



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

O Efeito da Indústria 5.0 na Produção

EDVÂNIA DA GLÓRIA E SILVA
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau
de Mestre
em Engenharia e Gestão Industrial

Orientador (es):

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Júri:

Presidente: Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

Vogais:

Doutor José Miguel Aragão Celestino Soares

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Dezembro de 2023



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

O Efeito da Indústria 5.0 na Produção

EDVÂNIA DA GLÓRIA E SILVA
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau
de Mestre
em Engenharia e Gestão Industrial

Orientador (es):

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Júri:

Presidente: Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu

Vogais:

Doutor José Miguel Aragão Celestino Soares

Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Dezembro de 2023

Agradecimentos

É com grande alegria e gratidão que dedico este momento para expressar os meus mais profundos agradecimentos. A conclusão desta dissertação representa não apenas uma conquista pessoal, mas também um marco importante na minha jornada académica e na minha vida.

Primeiramente, gostaria de expressar a minha eterna gratidão à minha família. O apoio incondicional que me deram ao longo deste percurso foi fundamental. Obrigada por estarem sempre ao meu lado, pelas palavras de encorajamento nos momentos de dúvida e por serem o meu porto seguro. A vossa fé em mim foi o impulso que precisava para chegar até aqui.

Aos meus amigos, quero expressar o meu reconhecimento pelo vosso constante incentivo e pelo tempo que partilharam comigo, mesmo quando eu estava imersa nos estudos. As nossas conversas e momentos de descontração foram essenciais para manter o equilíbrio na minha vida e para enfrentar este desafio com determinação.

À minha escola, o ISEL, quero agradecer pelo ambiente de aprendizagem que proporcionou ao longo destes anos. Os professores desempenharam um papel crucial no meu desenvolvimento académico e pessoal e o conhecimento que adquiri serviu de base sólida para esta dissertação e para o meu futuro.

Agradeço do fundo do coração por todo o apoio, amor e orientação que me proporcionaram. Esta conquista não seria possível sem o vosso contributo.

Que este seja apenas o início de muitas realizações e que continuemos a partilhar momentos especiais juntos. Mais uma vez, obrigada por tudo.

Resumo

A dissertação examina a Indústria 5.0 e o seu potencial impacto nas operações industriais. A revisão da literatura começa por introduzir o conceito de Indústria 5.0, destacando as suas raízes históricas e os seus princípios. Além disso, compara a Indústria 5.0 com sua antecessora, a Indústria 4.0, e destaca exemplos de implementações bem-sucedidas.

O uso da simulação como ferramenta na otimização dos processos industriais é discutido, incluindo sua evolução histórica, objetivos e vantagens. O software Arena® é apresentado como uma ferramenta de modelação para este estudo, abordando os seus princípios e distribuições estatísticas.

A Análise Custo-Benefício (ACB) é introduzida como uma metodologia para avaliar propostas de melhoria, com foco na relação entre ACB e a tecnologia 5.0. As etapas da ACB e os indicadores-chave são detalhados.

A secção do caso de estudo descreve o objetivo, contexto e modelação do processo produtivo atual, incluindo os resultados da simulação e são apresentadas propostas de melhoria.

A validação das propostas é realizada através da comparação de indicadores de produção e da análise ACB e a tomada de decisão é discutida com base nestes resultados.

Finalmente, a dissertação conclui com um resumo das descobertas da pesquisa, incluindo as limitações e propostas para trabalhos futuros.

Este trabalho contribui para o entendimento da Indústria 5.0 e seu potencial para otimizar operações industriais, destacando a importância da simulação e da análise custo-benefício nesse contexto.

Palavras-Chave: Indústria 5.0, Simulação de processos produtivos, Arena®, Otimização industrial, Eficiência operacional, Análise ACB

Abstract

The dissertation examines Industry 5.0 and its potential impact on industrial operations. The literature review begins by introducing the concept of Industry 5.0, highlighting its historical roots and principles. It also compares Industry 5.0 with its predecessor, Industry 4.0, and highlights examples of successful implementations.

The use of simulation as a tool for optimizing industrial processes is discussed, including its historical evolution, objectives, and advantages. Arena® software is presented as a modelling tool for this study, addressing its principles and statistical distributions.

Cost-Benefit Analysis (CBA) is introduced as a methodology for evaluating improvement proposals, with a focus on the relationship between CBA and 5.0 technology. The CBA steps and key indicators are detailed.

The case study section describes the objective, context, and modelling of the current production process, including simulation results, and improvement proposals are presented.

Validation of the proposals is carried out by comparing production indicators and the CBA analysis, and decision-making is discussed based on these results. Finally, the dissertation concludes with a summary of the research findings, including limitations and proposals for future work.

This work contributes to the understanding of Industry 5.0 and its potential to optimize industrial operations, highlighting the importance of simulation and cost-benefit analysis.

Keywords: Industry 5.0, Production process simulation, Arena®, Industrial optimization, Operational efficiency, CBA Analysis

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Siglas e Acrónimos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Contextualização da Dissertação	1
1.2 Objetivos e Metodologias	2
1.2.1 Objetivos.....	2
1.2.2 Metodologia.....	3
1.2.3 Perguntas de investigação.....	4
1.3 Organização da Dissertação	5
2 Revisão da literatura	7
2.1 Indústria Inteligente: 5.0	7
2.1.1 Conceito.....	7
2.1.2 Tendências históricas no desenvolvimento industrial	8
2.1.3 Princípios e pilares do 5.0 na indústria.....	17
2.1.4 O papel da tecnologia na indústria 5.0	22
2.1.5 O impacto da indústria 5.0.....	24
2.1.6 Indústria 5.0 VS. Indústria 4.0.....	26
2.1.7 Exemplos de implementações bem sucedidas na Indústria 5.0	27
2.1.8 Considerações finais	31
2.2 Simulação.....	31
2.2.1 Introdução à simulação	32
2.2.2 Objetivos da simulação.....	33
2.2.3 Evolução da simulação	35
2.2.4 Modelação	38
2.2.5 Vantagens da simulação	41
2.2.6 Desafios e tendências futuras	43

2.3	Arena®.....	44
2.3.1	Princípios da Arena®	45
2.3.2	Distribuições estatísticas	52
2.3.3	Vantagens e desvantagens do software Arena®.....	55
2.4	Análise Custo-Benefício (ACB)	56
2.4.1	Principais conceitos da ACB	57
2.4.2	Tempo e Atualização	58
2.4.3	Risco e Incerteza.....	59
2.4.4	Vantagens e Desvantagens da ACB	60
2.4.5	Etapas da ACB	60
2.4.6	Indicadores-Chave na ACB.....	61
2.4.7	A relação entre ACB e a emergente tecnologia 5.0.....	63
2.4.8	Considerações finais	64
3	Caso de estudo.....	65
3.1	Objetivo	65
3.2	Contexto.....	65
3.2.1	Descrição do cilindro.....	66
3.2.2	Descrição do processo de manufatura	67
3.3	Modelação do processo produtivo atual	71
3.3.1	Cenário atual.....	71
3.3.2	Resultados da simulação do cenário atual	87
3.3.3	Conclusões.....	94
4	Propostas de melhoria	95
4.1	Cenário de melhoria I: Criação de <i>stock</i> de peças cromadas	95
4.1.1	Prós e contras.....	99
4.1.2	Resultados da simulação.....	100
4.2	Cenário de melhoria II: Introdução de <i>cobots</i> na linha de montagem	106
4.2.1	Prós e contras.....	109
4.2.2	Resultados da simulação.....	109
4.3	Cenário de melhoria III: <i>Stock</i> de peças cromadas e <i>cobots</i>	114
4.3.1	Prós e contras.....	115
4.3.2	Resultados da simulação.....	115
5	Validação das propostas.....	121
5.1	Comparação dos indicadores de produção.....	121

5.1.1	Tempos de processamento das operações	122
5.1.2	Tempos médios de filas de espera	124
5.1.3	Taxa de ocupação média dos recursos.....	126
5.1.4	Tempo total de fabrico do cilindro	127
5.2	Análise ACB.....	128
5.2.1	Identificação e quantificação dos custos	129
5.2.2	Análise Financeira	135
5.3	Tomada de decisão.....	138
6	Conclusão.....	141
6.1	Conclusões da investigação	141
6.1.1	Limitações da investigação.....	142
6.2	Conclusões gerais	143
6.3	Propostas de trabalhos futuros	143
	Referências bibliográficas.....	145
	Anexos.....	151

Índice de Figuras

Figura 1. Metodologia de trabalho	3
Figura 2. Evolução da Indústria.....	8
Figura 3. Princípios da Indústria 5.0.....	19
Figura 4. Logótipo da Siemens.....	27
Figura 5. Logótipo ABB.....	29
Figura 6. Logótipo Clarify.....	30
Figura 7. Interface do Arena.....	46
Figura 8. Constituição do cilindro hidráulico.....	66
Figura 9. Fluxo de operações para cada parte do cilindro	70
Figura 10. Configuração do módulo CREATE	72
Figura 11. Sequenciação dos módulos STATION, PROCESS e ROUTE.....	73
Figura 12. Configuração do módulo ASSIGN	73
Figura 13. Estações de trabalho criadas no módulo STATION	74
Figura 14. Configuração do módulo STATION.....	74
Figura 15. Configuração do módulo de dados RESOURCE com os recursos criados ..	75
Figura 16. Configuração dos sets no módulo de dados SET.....	76
Figura 17. Configuração do módulo PROCESS	76
Figura 18. Configuração do campo <i>Resource</i> , do módulo PROCESS.....	77
Figura 19. Configuração do módulo ROUTE	79
Figura 20. Sequenciação dos módulos DECIDE e MATCH para modelação da montagem	79
Figura 21. Configuração do módulo DECIDE	80
Figura 22. Configuração do módulo MATCH	80
Figura 23. Configuração do módulo SEPARATE.....	81
Figura 24. Sequenciação dos módulos BATCH e SEPARATE para modelação do envio e receção das peças da cromagem	81
Figura 25. Sequenciação do módulo SEPARATE para modelação da operação de corte	82
Figura 26. Configuração do módulo BATCH	82
Figura 27. Representação unificada dos módulos utilizados para a modelação do sistema produtivo.....	85

Figura 28. Sequenciação do módulo HOLD para modelação do <i>stock</i> de peças cromadas	95
Figura 29. Configuração do módulo HOLD.....	96
Figura 30. Representação unificada dos módulos utilizados para a modelação do cenário de melhoria I.....	97
Figura 31. Configuração do módulo PROCESS do cenário de melhoria II.....	108
Figura 32. Gráfico de comparação dos tempos médios de processamento dos quatro cenários.....	122
Figura 33. Gráfico de comparação do Desvio Padrão médio dos tempos de processamento médios dos quatro cenários	122
Figura 34. Gráfico de comparação dos tempos médios das filas de espera dos quatro cenários.....	124
Figura 35. Gráfico de comparação dos desvios padrão dos tempos médios das filas de espera dos quatro cenários.....	124
Figura 36. Gráfico de comparação das taxas de ocupação média dos quatro cenários	126
Figura 37. Gráfico de comparação dos desvios padrão das taxas de ocupação médias dos quatro cenários.....	126
Figura 38. Gráfico de comparação dos tempos do cilindro dos quatro cenários.....	127
Figura 39. Gráfico dos custos acumulados.....	136
 Figura A 1. Gama de cilindros hidráulicos básicos.	 151
Figura A 2. Gama de cilindros telescópicos de 3 estágios.	152
Figura A 3. Gama de cilindros telescópicos de 4 estágios.	153
Figura A 4. Gama de cilindros telescópicos de 5 estágios.	154

Índice de Tabelas

Tabela 1. Pilares da Inovação na Produção de Energia da Terceira Revolução Industrial.	14
Tabela 2. Vantagens da Indústria 5.0.	21
Tabela 3. Comparação dos aspetos das indústrias 4.0 e 5.0.	26
Tabela 4. Evolução dos sistemas de simulação.	35
Tabela 5. Vantagens da Simulação.....	42
Tabela 6. Módulos de Fluxo.	47
Tabela 7. Módulos de Fluxo (Continuação).	48
Tabela 8. Módulos de Dados.	49
Tabela 9. Módulos Avançados	50
Tabela 10. Módulos Avançados (continuação).	51
Tabela 11. Distribuições do Arena®.	53
Tabela 12. Distribuição do Arena® (Continuação).	54
Tabela 13. Vantagens e Desvantagens de Arena®®.....	56
Tabela 14. Etapas da Análise ACB.	58
Tabela 15. Vantagens e Desvantagens da ABC.	60
Tabela 16. Lista de partes que constituem o cilindro.	66
Tabela 17. Alocação dos operadores.	69
Tabela 18. Distribuição dos tempos de processamento de cada parte, por operação 71	
Tabela 19. Distribuições de tempo para as rotas das entidades..... 78	
Tabela 20. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário atual para 10 replicações..... 88	
Tabela 21. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário atual para 10 replicações 90	
Tabela 22. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário atual para 10 replicações 92	
Tabela 23. Tempos médios da entidade cilindro no cenário atual..... 93	
Tabela 24. Prós e Contras da criação de <i>stock</i> das peças cromadas 99	
Tabela 25. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário de melhoria I para 10 replicações 100	
Tabela 26. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário de melhoria I para 10 replicações..... 102	

Tabela 27. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário de melhoria I para 10 replicações.....	104
Tabela 28. Tempos médios da entidade cilindro no cenário de melhoria I.....	105
Tabela 29. Distribuição dos tempos de processamento melhorados das operações de torno e polimento	108
Tabela 30. Prós e Contras da implementação de <i>cobots</i>	109
Tabela 31. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário de melhoria II para 10 replicações.....	110
Tabela 32. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário de melhoria II para 10 replicações	111
Tabela 33. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário de melhoria II para 10 replicações	112
Tabela 34. Tempos médios da entidade cilindro no cenário de melhoria II.....	113
Tabela 35. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário de melhoria III para 10 replicações	115
Tabela 36. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário de melhoria III para 10 replicações	117
Tabela 37. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário de melhoria III para 10 replicações	118
Tabela 38. Tempos médios da entidade cilindro no cenário de melhoria III	119
Tabela 39. Dados estimados da produção dos cilindros hidráulicos	129
Tabela 40. Encargos Salariais estimados.....	130
Tabela 41. Capacidade e potência por equipamento	131
Tabela 42. Preço por kWh de eletricidade em Portugal	132
Tabela 43. Custos estimados de manutenção	132
Tabela 44. Preço estimado do kWh por equipamento	133
Tabela 45. Estimativa dos custos anuais	134
Tabela 46. Custo estimado de aquisição e instalação de <i>cobot</i>	135
Tabela 47. Custo estimado de energia para a produção anual.....	135
Tabela 48. Indicadores de viabilidade calculados para cada cenário	137
 Tabela A 1. Distribuições de Arena®	 155
Tabela A 2. Distribuições de Arena® (Continuação).....	155
Tabela A 3. Tempos médios de processamento por operação dos quatro cenários.....	157

Tabela A 4. Tempos médios de filas de espera dos quatro cenários	158
Tabela A 5. Tempos médios de filas de espera dos quatro cenários (Continuação)	159
Tabela A 6. Taxa de ocupação média dos quatro cenários.....	161
Tabela A 7. Tempos de produção do cilindro dos quatro cenários	161
Tabela A 8. Fluxos de caixa ao longo de 6 anos para a situação atual e de melhoria associada ao comércio I.....	163
Tabela A 9. Fluxos de caixa ao longo de 6 anos para as situações de melhoria associadas aos cenários II e III	164

Lista de Siglas e Acrónimos

ACB – Análise Custo-Benefício

CNC - Comando Numérico Computadorizado

CPS - *Cyber-Physical Systems*

HDI - *Humam Development Index*

IA – Inteligência Artificial

IoT – *Internet Of Things*

kHz – kilo Hertz

kW – kilo Watt

MGAW - *Metal Gas Arc Welding*

NVA - *Non-Value Added*

RCB – Relação Custo-Benefício

UE - União Europeia

VA - *Value Added*

1 Introdução

Esta introdução estabelece a base para a dissertação, introduzindo o tema, a motivação, os objetivos e a estrutura do trabalho e preparando o leitor para a exploração detalhada que se seguirá nos capítulos subsequentes.

1.1 Motivação e Contextualização da Dissertação

A Indústria 5.0, um conceito emergente na atual paisagem industrial, tem sido objeto de pouco interesse e pesquisa, apesar do seu possível potencial para revolucionar as operações de manufatura. A motivação por trás desta dissertação reside na necessidade de explorar o efeito prático da Indústria 5.0 nas operações industriais, através da simulação de processos produtivos como estratégias viáveis para otimizar. A contextualização desta pesquisa é fundamental para se compreender o cenário no qual estas estratégias são implementadas.

A evolução da indústria, desde as suas origens até a era atual, passou por várias fases significativas, como abordado no presente trabalho. Da Revolução Industrial à Indústria 4.0, destacam-se os avanços tecnológicos que impulsionaram a automação, a conectividade e a digitalização. Agora, a Indústria 5.0 surge como uma continuação desta evolução, enfatizando uma integração mais estreita entre humanos e tecnologia.

A Indústria 5.0 introduz conceitos que incluem a colaboração homem-máquina, a customização em massa, a produção descentralizada e a sustentabilidade. Conceitos estes, que abrem caminho para uma abordagem mais centrada no ser humano e na otimização das operações industriais.

A tecnologia desempenha um papel fundamental na implementação desta indústria e a simulação de processos produtivos torna-se uma ferramenta valiosa para modelar sistemas, testar estratégias e prever resultados antes da implementação real, nomeadamente no que toca à integração das empresas e processos produtivos com as tecnologias da vanguarda.

A pesquisa contextualiza os desafios enfrentados pelas indústrias modernas, como a procura pela eficiência operacional, a gestão de recursos humanos ou a adaptação às mudanças tecnológicas.

A Indústria 5.0 e a simulação oferecem oportunidades para abordar estes desafios de maneira inovadora. Com esta dissertação pretende-se preencher esta lacuna,

explorando estratégias tangíveis de otimização, aspirando contribuir para o corpo de conhecimento na área da Indústria 5.0 e fornecendo pontos de vista práticos e dados concretos sobre as estratégias de melhoria e a sua viabilidade.

1.2 Objetivos e Metodologias

1.2.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar a influência da Indústria 5.0 através da simulação de processos produtivos como estratégias fundamentais para a otimização das operações de produção. Para alcançar este objetivo, foram delineados objetivos específicos que orientaram a pesquisa em direções fundamentais.

Primeiramente, a dissertação procura avaliar o conceito da Indústria 5.0 e o seu impacto na indústria contemporânea. Isto implica uma análise aprofundada das transformações que esta abordagem tem gerado no cenário industrial. Além disso, o estudo procura examinar de que modo é que a simulação de processos produtivos pode ser empregado na modelação de sistemas de manufatura, pelo entendimento das nuances da simulação como ferramenta de análise e otimização.

Outro ponto central é a proposta e avaliação de cenários de melhoria num contexto real de um processo de manufatura. Estes cenários representam diferentes estratégias de otimização que serão investigadas em detalhe.

Para a validação das propostas de melhoria, a pesquisa concentra-se nas comparações de desempenho, uma etapa considerada fundamental para avaliar a eficácia das estratégias propostas em termos de eficiência operacional e, por fim, a dissertação também se dedica à realização de uma Análise Custo-Benefício (ACB) das propostas de melhoria, com o propósito de avaliar a viabilidade económica das estratégias em questão, considerando os aspetos financeiros envolvidos.

Estes objetivos, quando cumpridos, fornecerão uma compreensão das estratégias de otimização na indústria moderna sob a perspetiva da Indústria 5.0.

1.2.2 Metodologia

O presente trabalho tem como foco central a investigação e análise da aplicação das tecnologias da Indústria 5.0 e a simulação de processos produtivos em estratégias de otimização de operações de manufatura. Para alcançar este objetivo, foi considerada e implementada uma metodologia devidamente planeada, ilustrada pela figura 1.

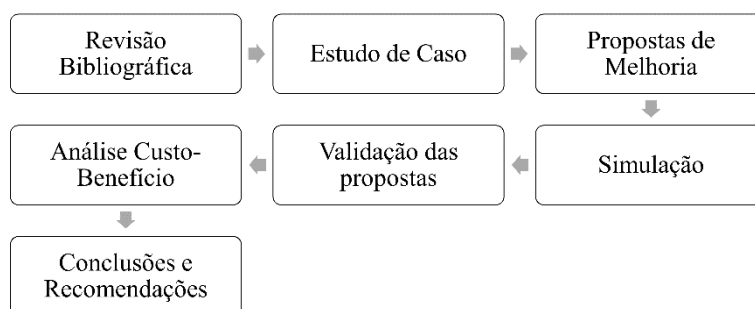


Figura 1. Metodologia de trabalho

Fonte: Elaboração própria

A primeira etapa consistiu numa revisão bibliográfica extensa, que permitiu adquirir um entendimento profundo da evolução da Indústria 5.0, dos seus princípios e pilares, bem como do papel crucial da tecnologia neste contexto. De igual modo, também foram explorados os conceitos-chave da simulação, identificando as suas vantagens e desvantagens e compreendendo de que modo é que esta ferramenta pode ser aplicada de maneira eficaz na produção. A análise ACB também foi abordada, incluindo a sua relação com a tecnologia emergente da Indústria 5.0.

Em seguida, a pesquisa avançou para um caso de estudo específico, selecionando um processo de produção real como objeto de estudo. A modelação detalhada deste processo produtivo atual no *software* Arena® envolveu a recolha de dados relevantes e a identificação de áreas que apresentavam potencial para melhorias.

A terceira etapa foi a proposta de três cenários de melhoria distintos, cada um representando uma estratégia específica para otimizar o processo de manufatura. Cada cenário foi analisado, considerando os respetivos os prós e contras associados.

A quarta etapa envolveu novamente o uso do *software* mencionado, para modelar os cenários de melhoria propostos. Isto permitiu realizar simulações específicas para avaliar o desempenho operacional de cada cenário. Indicadores de desempenho, como tempos de processamento, tempos de espera, taxa de ocupação dos recursos e tempo total de fabrico, foram analisados minuciosamente.

A quinta etapa consistiu na validação das propostas de melhoria por meio da comparação dos resultados da simulação com base nos indicadores relevantes, seguida da sexta etapa, focada na ACB. Neste estágio, a viabilidade económica das propostas de melhoria foi avaliada através dos cálculos de fluxos financeiros e na Relação Custo-Benefício (RBC).

A dissertação termina com uma secção de conclusões e recomendações, onde os principais resultados da pesquisa foram resumidos, destacando suas contribuições para a compreensão da Indústria 5.0 e das estratégias de melhoria na manufatura. Além disso, foram fornecidas recomendações para pesquisas futuras, encerrando a dissertação com discussões finais.

Esta metodologia abrangente proporcionou uma abordagem estruturada e completa para a pesquisa, abordando aspetos técnicos, operacionais e económico-financeiros das estratégias de otimização na indústria moderna.

1.2.3 Perguntas de investigação

No âmbito desta dissertação, foram definidas uma série de questões de investigação para explorar o efeito da Indústria 5.0 nos processos produtivos. Estas questões mostram-se fundamentais, na medida em que permitem aprofundar a compreensão dos desafios e as oportunidades associadas à integração da tecnologia 5.0 na indústria moderna.

1. Como é que a aplicação dos princípios da Indústria 5.0 pode impactar as operações de manufatura num contexto real?

O primeiro ponto de interrogação foca-se na análise da Indústria 5.0 e tem como objetivo compreender de que modo é que os seus conceitos podem ser implementados eficazmente para melhorar as operações de manufatura em ambientes reais. Isto envolve a avaliação do conceito da Indústria 5.0 e a exploração de seu impacto na indústria.

2. Como é que a simulação de processos produtivos pode ser usada eficazmente para modelar sistemas de manufatura?

A segunda questão investiga a utilidade da simulação de processos produtivos na modelação de sistemas de manufatura. Esta etapa da pesquisa procura identificar a simulação como uma ferramenta de análise e otimização de processos industriais.

3. De que modo é que a simulação de cenários de melhoria pode afetar um processo de manufatura específico?

A terceira questão foca-se no desenvolvimento de propostas de melhoria. Aqui, a pesquisa analisará detalhadamente cenários de melhoria propostos, destacando os benefícios e as limitações de cada estratégia. Adicionalmente são realizadas simulações para avaliar o desempenho operacional de cada cenário, considerando indicadores de desempenho e produção.

4. Qual é a viabilidade económica das propostas de melhoria?

A última questão de investigação aborda a viabilidade económica das propostas de melhoria, através da aplicação de análises específicas e o estudo de indicadores financeiros relevantes.

Estas questões de investigação fornecem uma estrutura sólida para esta dissertação, permitindo a exploração detalhada e a análise crítica das estratégias de otimização na indústria, contribuindo assim para o conhecimento neste campo em constante evolução.

1.3 Organização da Dissertação

O presente trabalho apresenta um estudo abrangente sobre a Indústria 5.0, simulação de processos produtivos e ACB num contexto de otimização de processos de manufatura. A estrutura da dissertação adota a estrutura convencional do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (2023), estando cuidadosamente organizada para fornecer uma compreensão lógica e clara do estudo realizado.

O primeiro capítulo, a introdução, estabelece o cenário geral da pesquisa, definindo o contexto, objetivos e a relevância do estudo. Além disso, delineia a estrutura da dissertação, indicando os tópicos a serem abordados em cada capítulo subsequente.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão da literatura, que explora profundamente a Indústria 5.0. Isto inclui a definição do conceito, sua evolução histórica, pilares fundamentais e o impacto que esta abordagem tem na indústria moderna. Também são discutidos princípios de simulação e ACB, preparando o terreno teórico para o estudo.

O terceiro capítulo concentra-se no caso de estudo, onde são apresentados objetivos específicos, o contexto do estudo e os detalhes do processo de manufatura considerado. A modelação do processo produtivo atual é discutida, juntamente com a definição de cenários de melhoria.

O quarto capítulo introduz propostas de melhoria para o processo de manufatura. Três cenários diferentes são explorados, cada um representando uma estratégia específica

de otimização. Os prós e contras de cada cenário são analisados em detalhe, seguidos pelos resultados da simulação.

No quinto capítulo, ocorre a validação das propostas de melhoria. Isto envolve uma comparação detalhada dos resultados operacionais e a ACB, para avaliar a viabilidade económica das propostas.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões gerais do estudo, resumindo os principais resultados e as suas implicações. São discutidas as contribuições da pesquisa para o campo da Indústria 5.0 e estratégias de melhoria na manufatura, juntamente com recomendações para trabalhos futuros.

Os anexos e referências completam a dissertação, fornecendo informações adicionais e uma lista completa de fontes bibliográficas citadas ao longo do estudo.

2 Revisão da literatura

Neste capítulo a revisão da literatura fornece a compreensão necessária das áreas-chave que sustentam este estudo. Este capítulo serve como um guia para os conceitos da Indústria 5.0, da simulação de processos produtivos, da ferramenta Arena® e da Análise Custo-Benefício (ACB), que são pilares essenciais para a análise e avaliação das estratégias de otimização propostas neste trabalho.

2.1 Indústria Inteligente: 5.0

A Indústria 5.0 é um conceito recente impulsionado pelas mudanças rápidas na economia global devido à tecnologia digital, que procura ajudar as empresas a capitalizar a tecnologia, criar produtos inovadores e melhorar a eficiência. A Indústria 5.0 pretende transformar a interação das empresas com o ambiente, focando-se na experiência do cliente e no valor para os parceiros. Isso é feito por meio de tecnologias como Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning*, bem como novos modelos de negócios, que permitirão que as empresas inovem e se mantenham competitivas na era digital.

Esta evolução representa uma mudança significativa na produção, que promete revolucionar o desenvolvimento e produção de produtos. Baseada na Indústria 4.0 e combinando a tecnologia digital com a criatividade humana, caminha-se para uma produção personalizada e sustentável. Conforme esta tendência cresce, é fundamental compreender os seus possíveis impactos na produção, numa perspetiva tanto quantitativa como qualitativa.

O objetivo deste subcapítulo é explorar a investigação existente sobre os efeitos da Indústria 5.0 na produção de fabrico, tendo em vista a definição e explicação do conceito da Indústria 5.0, destacando a evolução industrial ao longo do tempo, a sua relação com a Indústria 4.0 e enfatizando a sua abordagem centrada no ser humano e sustentável.

2.1.1 Conceito

A Indústria 5.0, definida pela Comissão Europeia (2021), fundamenta-se nos objetivos sociais, como a prosperidade e o bem-estar dos trabalhadores, para além de crescimento económico. Complementando a anterior Indústria 4.0, esta promove uma indústria sustentável e centrada no ser humano. Em 2020, foram organizados workshops

pela Comissão para debater a implementação das tecnologias habilitadoras da Indústria 5.0, abrangendo áreas como a interação homem-máquina individualizada e as tecnologias inspiradas na biologia.

Associada à procura de um "novo capitalismo" mais justo e sustentável, a Indústria 5.0 eleva a colaboração entre humanos e sistemas inteligentes para melhorar a produção em diversos setores. A Comissão Europeia (2021) também enfatiza a importância de alinhar os avanços tecnológicos com os valores sociais, como o Acordo Verde e a resiliência da indústria em resposta à COVID-19.

Em suma, a Indústria 5.0 é uma visão para uma indústria mais sustentável e centrada no ser humano, com a colaboração entre todas as partes interessadas, atrás de um futuro mais próspero e sustentável (Breque, De Nul, & Petridis, 2021)

2.1.2 Tendências históricas no desenvolvimento industrial

As tendências históricas no desenvolvimento industrial são marcadas por quatro principais revoluções industriais, como ilustrado pela figura 2: a Revolução Industrial, a Revolução Elétrica, a Revolução da Computação e a Revolução Digital, também conhecidas por 1.0, 2.0, 3.0 e 4.0, respectivamente.

Seguidamente, é traçada uma linha do tempo das revoluções industriais ao longo da história, de modo a enquadrar a Indústria 5.0 dentro do cenário de desenvolvimento industrial.

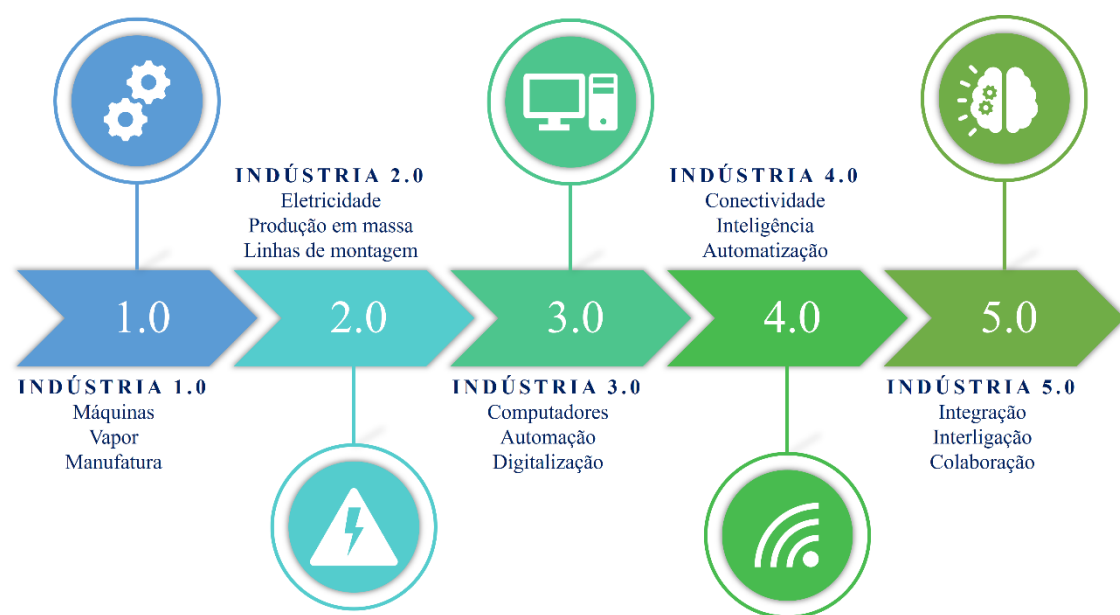


Figura 2. Evolução da Indústria.

Fonte: Adaptado de Medke (2022)

A Primeira Revolução Industrial, 1.0, foi um período marcado por grandes avanços na produção e na utilização de máquinas, marcando o início da era industrial. O uso da maquinaria e das tecnologias foi essencial para o aumento da quantidade e da qualidade dos produtos produzidos.

A Segunda revolução, a Revolução Elétrica ou 2.0, destacou-se pela grande transformação na forma como as pessoas viviam e trabalhavam. O uso de energia elétrica permitiu que os processos industriais se tornassem mais eficientes, rápidos e precisos.

A Revolução 3.0, da Computação, foi um marco no desenvolvimento industrial, pois permitiu que os processos industriais fossem automatizados. A computação também abriu novas possibilidades para a criação de produtos e serviços.

Por fim, a Revolução Digital, 4.0, foi um grande passo para a modernização da produção industrial. A tecnologia digital permitiu que os processos industriais se tornassem mais eficientes e rápidos, além de dar suporte ao desenvolvimento de novos produtos e serviços.

2.1.2.1. Revolução Industrial: 1.0

Antes do advento da indústria, toda a produção era realizada manualmente, o que limitava as capacidades de produção, tornando-se inviável diante de uma população em crescimento descontrolado. Impulsionada pelo objetivo principal do capitalismo, ou seja, a procura pelos lucros, surgiu a necessidade de aumentar a produção de forma mais rápida e em maior quantidade (Cavalcante & Silva, 2011).

O conceito da Revolução Industrial tem sido objeto de interrogação legítimo, com algumas perspectivas preferindo interpretá-lo como uma "evolução rápida e irresistível" (Iglésias, 1990). Inicialmente, as máquinas coexistiam com as ferramentas e utensílios que auxiliavam o trabalho humano sem substituí-lo. Estas máquinas, movidas pela força da natureza, como vento, água, vapor, força humana ou animal, desempenhavam um papel crucial na produção. A Revolução Industrial, no entanto, marcou a transição para a "maquinofatura", onde as máquinas dominaram integralmente o processo produtivo (Iglésias, 1990)

A Revolução Industrial teve início na segunda metade do século XVIII, na Grã-Bretanha, especialmente na Inglaterra, e foi impulsionada pelos avanços da máquina a vapor, que introduziu uma fonte de energia superior às forças naturais. Este período testemunhou a mudança da produção doméstica para o sistema fabril (Iglésias, 1990). A transformação logo estendeu-se para outros países, como França, Bélgica, Holanda,

Rússia, Alemanha e Estados Unidos, com impacto nas indústrias têxtil e metalúrgica. A evolução dos setores produtivos e transportes foi impulsionada por invenções significativas, incluindo a utilização do carvão como fonte de energia, que levou ao desenvolvimento da máquina a vapor e da locomotiva (Venturelli, 2014).

O refinamento da máquina a vapor que marcou a Indústria 1.0 foi atribuído a James Watt. A indústria têxtil, pioneira na adoção desta nova tecnologia, foi seguida por muitos outros setores na incorporação de máquinas nos seus processos produtivos e a mesma, em particular, tornou-se um ícone da produção excedente, levando ao aparecimento do capitalismo industrial, diferente do sistema comercial antigo (Boettcher, 2015 como citado em Sakurai & Zuchi, 2018). Segundo Cavalcante e Silva (2011), as consequências da Primeira Revolução Industrial tiveram um impacto profundo na vida das pessoas e as suas ramificações continuam a ser reconhecidas até os dias de hoje, moldando-se por meio de processos de transformação contínua.

Falcon e Moura (1975) distinguem o conceito de Revolução Industrial em duas abordagens distintas. A primeira abordagem é mais ampla e considera a revolução sinónimo de qualquer processo de industrialização, independentemente da sua velocidade ou abrangência. Neste contexto, a Revolução Industrial é vista como várias "revoluções industriais", cada uma associada a casos nacionais específicos, como a Revolução Industrial inglesa, a alemã, a japonesa ou a soviética, entre outras. Ainda nesta perspetiva, o termo “Revolução Industrial” é sinónimo de industrialização em geral (Falcon & Moura, 1975).

Por outro lado, a segunda abordagem diz respeito a um conceito histórico mais preciso, onde a Revolução Industrial é entendida como um evento específico, com data e local definidos. Neste sentido, a Revolução Industrial está intrinsecamente ligada às transformações ocorridas na Europa Ocidental, principalmente durante o final do século XVIII e início do século XIX. Estas foram marcadas pelo surgimento do capitalismo industrial em certos países, com a introdução da máquina e o advento do maquinismo no processo de produção industrial como aspetos notáveis deste período (Falcon & Moura, 1975).

Assim sendo, o conceito de Revolução Industrial é considerado por muitos como o ponto de partida da produção capitalista. As duas perspetivas mencionadas pelos autores Falcon e Moura (1975) permitem compreender a Revolução Industrial tanto como uma evolução ampla da industrialização, como um momento histórico único que revolucionou a economia de toda a Europa Ocidental.

2.1.2.2. Revolução Elétrica: 2.0

Um dos pilares da Segunda Revolução Industrial foi a eletricidade. A sua introdução revolucionou a vida quotidiana e as operações industriais. A capacidade de transmitir eletricidade com eficiência, juntamente com sua versatilidade para conversão em movimento, luz, calor e som, tornou-a uma tecnologia essencial. A eletricidade possibilitou uma ampla gama de aplicações a preços acessíveis para a população em geral, o que impulsionou não apenas as indústrias, mas também a qualidade de vida das pessoas (Dathein, 2003).

Também as comunicações foram revolucionadas durante este período. Desde a invenção do telégrafo eletromagnético em 1837/38, usado inicialmente para o controlo de tráfego ferroviário, até a introdução do telefone em 1876 e do telégrafo sem fio em 1895, as comunicações deram saltos significativos (Landes, 1979). Isto permitiu uma conectividade e uma propagação de informações sem precedentes, encurtando as distâncias e acelerando o ritmo dos negócios e da vida em sociedade.

Outro marco fundamental da Segunda Revolução Industrial foi o aço. A produção de aço foi aprimorada por meio de inovações significativas, como o conversor Bessemer, em 1856, e a fornalha Siemens-Martin, da década de 1860, que usava temperaturas mais altas e economizava combustível. A introdução do aço básico, na década de 1870, mais económico e eficiente, resultou numa redução drástica de custos (Landes, 1979). Como resultado, os preços do aço caíram em até 80% a 90%, levando à substituição maciça do ferro pelo aço em várias indústrias, como a ferroviária, a construção naval e o armamento. Este aumento na disponibilidade de aço e a redução de custos tiveram um impacto transformador na produção e na infraestrutura industrial (Hobsbawm, 2015).

Na Grã-Bretanha, a produção de aço saltou de 49 mil toneladas, em 1850, para impressionantes 1,44 milhões, em 1880. Além disso, novos elementos, como Tungstênio, Manganês, Crómio e Níquel, foram incorporados na metalurgia, expandindo ainda mais as possibilidades de aplicações industriais (Hobsbawm, 2015).

Em adição às mudanças anteriores, a indústria química desempenhou um papel crucial na Segunda Revolução Industrial. Um exemplo notável é a Bayer na Alemanha, onde cientistas profissionais colaboraram com a indústria para aplicar conhecimentos científicos na produção (Dathein, 2003). Tal resultou em avanços significativos em setores como plásticos, farmacêutica e química em geral. A aplicação intensiva da ciência

e dos laboratórios levou a descobertas e inovações que transformaram estes campos e afetaram positivamente a vida das pessoas e as indústrias relacionadas.

Outro avanço revolucionário durante a Segunda Revolução Industrial foi a ascensão do petróleo como uma fonte de energia. James Young, um químico escocês, desenvolveu a base para a refinação do petróleo em 1859, e a extração de petróleo começou nos Estados Unidos na mesma época. Assim deu-se desenvolvimento dos motores a combustão interna, com a patente do motor a gasolina em 1860 e a criação do primeiro carro popular por Daimler e Benz em 1885 (Cipolla, 1977). O petróleo oferecia vantagens em relação ao carvão, produzindo mais trabalho por unidade de peso e ocupando menos espaço. Com o aperfeiçoamento das técnicas e a descoberta de novos poços, o petróleo tornou-se uma fonte de energia acessível e viável, transformando a indústria de transporte e muitos outros setores (Landes, 1969).

Todas essas inovações tecnológicas tiveram um impacto profundo nos lucros e nos processos produtivos em várias indústrias. A Segunda Revolução Industrial permitiu uma maior gestão dos custos, o que possibilitou cálculos mais precisos das margens de lucro (Boettcher, 2015). Estas mudanças impulsionaram o capitalismo e conduziram ao rápido crescimento da economia global. Países como os Estados Unidos, Alemanha, Japão e França emergiram como líderes globais em tecnologia e desenvolvimento económico devido ao seu compromisso com a inovação e a adoção de tecnologias avançadas e tornaram-se centros de excelência tecnológica e económica, liderando o caminho para a modernização industrial (Sakurai & Zuchi, 2018).

Concluindo, a Segunda Revolução Industrial foi um período de transformação extraordinária, impulsionado por várias inovações tecnológicas que moldaram a sociedade e a indústria. A eletricidade, o aço, a química e o petróleo foram algumas destas principais forças motrizes, que não apenas aumentaram a produção e a eficiência, mas também melhoraram a qualidade de vida das pessoas em todo o mundo.

2.1.2.3. Revolução Computacional: 3.0

A Terceira Revolução Industrial, também conhecida como 3.0, abrangeu um período que se estendeu de 1950 a 2013, marcando uma era de transformações profundas na sociedade e na tecnologia (Mohajan, 2021). Rifkin (2011), no seu livro "A Terceira Revolução Industrial" (2011), observa que o "fornecimento centralizado de energia elétrica, da era do petróleo, do automóvel e da construção em áreas suburbanas", ao longo do século XX, provocou um crescimento e riqueza sem precedentes em grande parte do

mundo. No entanto, a economia industrial contemporânea enfrentava várias crises, incluindo a escassez de petróleo, as mudanças climáticas e os níveis alarmantes de dívida. O anúncio do fim da era do carbono e suas consequências apontavam para possíveis convulsões sociais, políticas e financeiras (Rifkin, 2011)

Ao longo da história, o progresso económico tem estado intrinsecamente ligado à "relação orgânica entre tecnologias de comunicação e fontes de energia". Por exemplo, a tecnologia do motor a vapor otimizou as máquinas de impressão, impulsionando a alfabetização e, conseqüentemente, criando uma força de trabalho qualificada que estimulou a Primeira Revolução Industrial. De maneira semelhante, os combustíveis fósseis permitiram o desenvolvimento dos transportes no século XX, aumentando a acessibilidade e a produtividade (Rifkin, 2011).

Apesar disso, a "revolução das tecnologias de informação e comunicação", iniciada nos anos 1990, ainda não alcançava todo o seu potencial devido à sua dependência de uma infraestrutura energética em declínio. Não obstante, as novas alternativas energéticas, combinadas com a modernização das comunicações e da transferência de dados, favoreceram o desenvolvimento da Terceira Revolução Industrial (Rifkin, 2011).

Uma das características mais marcantes da Terceira Revolução Industrial foi a introdução de novas tecnologias, que influenciaram de maneira significativa o mundo do trabalho e a organização da sociedade (Medeiros & Rocha, 2004). A ascensão das tecnologias de informação, como a Internet e o telemóvel, foi fundamental para impulsionar esta revolução. No entanto, é importante ressaltar que uma verdadeira revolução não ocorre apenas com os avanços tecnológicos, mas sim quando estes são acompanhados por mudanças profundas no sistema produtivo e nas fontes de energia (Martins, 2012).

A introdução de novas tecnologias na Terceira Revolução Industrial teve um impacto significativo no mercado de trabalho. As políticas neoliberais afetaram negativamente este processo, levando ao aumento do desemprego nos setores produtivos e à exclusão de trabalhadores do mercado de trabalho (Medeiros & Rocha, 2004). Conseqüentemente, foi criada uma divisão na força de trabalho, com trabalhadores centrais, trabalhadores do setor informal e desempregados em diferentes posições hierárquicas (Medeiros & Rocha, 2004).

A condição de desemprego ou a ameaça de mesmo teve impacto negativo na saúde mental das pessoas, conduzido ao aumento do stress, da angústia e da depressão, e até

mesmo da violência na sociedade (Medeiros & Rocha, 2004). A exclusão no mercado de trabalho também levantou questões sobre a solidariedade social e a importância de garantir o acesso às políticas sociais (Medeiros & Rocha, 2004).

Um aspecto crítico para definir uma verdadeira revolução industrial, conforme argumentado por Martins (2012), é o papel das fontes de energia. As revoluções anteriores, como a Primeira e Segunda, foram impulsionadas por novas formas de energia, como o vapor a carvão, a eletricidade e o petróleo (Martins, 2012).

No entanto, surgiram preocupações de que as fontes de energia fósseis, como o carvão, o gás natural e o petróleo, podiam não ser sustentáveis o suficiente para manter o avanço das novas tecnologias e o crescente consumo global (Martins, 2012). Assim, a procura por novas fontes de energia sustentáveis tornou-se crucial para garantir o sucesso da Terceira Revolução Industrial.

Rifkin (2011) aponta cinco pilares interligados, que fundamentam a Terceira Revolução Industrial. Estes pilares, representados na tabela 1, representam mudanças que procuram novos conceitos de produção e distribuição de energia, envolvendo investimentos privados e governamentais, com potencial para criar empregos e benefícios globais, incluindo a redução das emissões de carbono.

Tabela 1. Pilares da Inovação na Produção de Energia da Terceira Revolução Industrial.

Pilares	Descrição
Mudança para a energia renovável	Utilizar fontes de energia como água, vento, terra e sol em vez de combustíveis fósseis, que estão a extinguir e ficar mais caros.
Transformação do patrimônio imobiliário para "microgeradores de energia"	Fazer com que prédios e casas produzam a sua própria energia a partir de fontes verdes, em vez de depender de grandes centrais de energia.
Armazenamento de energias intermitentes	Encontrar maneiras melhores de armazenar energia de fontes intermitentes como vento e sol, como as células de hidrogénio.
Criação de uma rede de partilha de energia	Utilizar sensores e internet para melhorar o consumo, distribuição e preço da energia. Também permitir que as casas e os carros vendam a energia extra de volta à rede.
Utilização de veículos elétricos/movidos por células de combustíveis	Mudar os carros que usam combustíveis fósseis para carros elétricos e similares, que podem até fornecer energia de volta à rede.

Fonte: Adaptado de (Rifkin, 2011)

A Terceira Revolução Industrial teve impactos tanto positivos quanto negativos na sociedade. Por um lado, houve avanços tecnológicos significativos, aumento da produção de bens e melhoria nos padrões de vida para muitas pessoas. O comércio internacional e o uso de tecnologias como a Internet e a análise de dados impulsionaram o crescimento econômico (Mohajan, 2021).

Por outro lado, a mesma também trouxe desafios como a poluição, mudanças climáticas e desigualdade. A crise climática resultou em extinções de espécies e outras mudanças ambientais. Adicionalmente, surgiram crises interdependentes, como a explosão demográfica, crises financeiras e a escassez de água (Mohajan, 2021).

O futuro da Terceira Revolução Industrial mostrava-se incerto, na medida em que uma revolução não se limita apenas aos avanços tecnológicos, mas também à sinergia entre tecnologias e uma mudança profunda nas fontes de energia (*The Strategic Foresight Initiative*, 2013). A adoção de fontes de energia sustentáveis era fundamental para garantir a sustentabilidade desta revolução (*The Strategic Foresight Initiative*, 2013).

Segundo Mohajan (2021) é importante encontrar um equilíbrio entre os benefícios e desafios da Terceira Revolução Industrial para garantir um futuro sustentável e próspero. As inovações atuais podem ser vistas como avanços, mas apenas com uma mudança substancial nas fontes de energia e uma abordagem ética e social sólida, podemos garantir que essa revolução seja verdadeiramente transformadora (Martins, 2012).

Em resumo, a Terceira Revolução Industrial representou um período de mudanças profundas na sociedade, impulsionadas pela introdução de novas tecnologias e pela busca por fontes de energia sustentáveis. Seu legado, seja positivo ou negativo, moldou a forma como vivemos e trabalhamos no mundo moderno

2.1.2.4. Revolução Digital: 4.0

Em 2016, o Fórum Económico Mundial destacou que as três revoluções industriais anteriores surgiram a partir de tecnologias como a máquina a vapor, eletricidade e computadores. No entanto, a iminente Quarta Revolução Industrial prometeu uma transformação ainda mais profunda, que alteraria fundamentalmente a própria essência do ser humano. Esta revolução basear-se-ia na convergência de sistemas digitais, físicos e biológicos, tornando potencialmente os corpos humanos tão tecnológicos que a distinção entre componentes naturais e fabricados se tornaria impercetível.

Klaus Schwab (2016), o fundador do Fórum Económico Mundial, enfatizou a necessidade de uma "mudança de valores" nos sistemas económicos do mundo. O mesmo argumentou que os novos modelos económicos deveriam priorizar o bem-estar de todos os seres humanos em detrimento do crescimento fiscal. Neste sentido, a "economia circular" emergente procuraria recuperar e reintroduzir materiais na economia, evitando que recursos finitos limitassem o crescimento. À medida que a sociedade redefinia a sua relação com o planeta, a criação de cidades altamente eficientes desempenharia um papel crucial. A transição para fontes de energia sustentáveis, como a solar e eólica, também se mostraria essencial para alimentar a civilização moderna.

Enquanto isso, a robótica e outras tecnologias remodelavam o futuro do trabalho, o que implicaria uma consequente expansão e adaptação dos modelos educacionais. Diferentes abordagens, como a inclusão de princípios de engenharia na educação básica ou a aprendizagem autodidata por meio de conteúdos online, surgiam e, diante da abundância de informações na era da informação, a questão-chave era como motivar e sustentar a aprendizagem.

Embora as máquinas tivessem o poder de transformar vidas, desde permitir que pessoas paralisadas se movimentassem novamente até a criação de tecidos biológicos em laboratório, a sociedade precisava adotar uma abordagem responsável ao usar essas ferramentas. Com o avanço da tecnologia para aceder aos pensamentos e sentimentos das pessoas, a proteção da "liberdade de pensamento" tornava-se crucial, assim como a proteção da liberdade de expressão.

Schwab (2015), já havia previsto uma revolução tecnológica que mudaria radicalmente a maneira como se vivia, trabalhava e se relacionava. A natureza dessa transformação, com a sua escala, abrangência e complexidade, diferenciava-se de tudo o que a humanidade experimentara anteriormente. Apesar do desdobramento exato ser incerto, ficava claro que a resposta à revolução precisaria ser integrada e holística, envolvendo todos os setores da comunidade global, desde o público e privado até a academia e a sociedade civil. Segundo o autor (2015), três fatores distinguiam a Quarta Revolução Industrial das anteriores: velocidade, alcance e impacto sistémico. As mudanças aconteciam a uma velocidade sem precedentes, de forma exponencial em vez de linear. Esta revolução estava presente em todas as indústrias e países, afetando sistemas inteiros de produção, gestão e governança.

A crescente conectividade global, potencializada por dispositivos móveis e acesso a conhecimento sem precedentes, abria possibilidades ilimitadas. Tecnologias emergentes

como Inteligência Artificial (IA), robótica, Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things*, IoT) e impressão 3D, entre outras, alteravam a maneira como se vivia e trabalhava, desde a pesquisa de novos medicamentos até previsões culturais. No entanto, Schwab (2015) também alertou para desafios, como a desigualdade agravada pela automação e a perda de empregos.

O autor ressaltou que a mudança trazida pela Quarta Revolução Industrial não estava limitada ao setor empresarial. Ela afetaria o comportamento do consumidor, forçando adaptações na forma como produtos e serviços eram projetados, comercializados e entregues. Plataformas tecnológicas emergentes revolucionariam o consumo, reunindo pessoas, ativos e dados, gerando novos modelos de negócios.

Apesar dos desafios, a Quarta Revolução Industrial tinha o potencial de elevar a renda global e melhorar a qualidade de vida. No entanto, a automação poderia agravar a desigualdade e desencadear tensões sociais. A crescente diferença entre capital e trabalho poderia levar a um mercado de trabalho polarizado, com uma lacuna crescente entre competências baixas e altas (Schwab, 2015)

A desigualdade emergente era uma preocupação não apenas econômica, mas também social. A crescente diferença de riqueza entre aqueles dependentes do capital e do trabalho gerava insatisfação e marginalização. O poder das redes sociais amplificava essas preocupações, disseminando tanto expectativas irrealistas quanto ideias extremas.

As tecnologias sustentadoras da Quarta Revolução Industrial tiveram impactos significativos em todos os setores. Elas interromperam cadeias de valor, introduziram novos modelos de negócios e transformaram a maneira como os bens e serviços eram consumidos. Tais mudanças impulsionaram a inovação, mas também trouxeram desafios, como a robotização excessiva e o possível declínio da empatia.

Schwab (2015) enfatizou que, ao passo que a tecnologia era uma ferramenta poderosa, a sua utilização responsável era essencial. O mesmo insistiu que a sociedade deveria priorizar os valores humanos e a procurar um futuro benéfico para todos. A Quarta Revolução Industrial, apesar de suas complexidades, poderia elevar a humanidade por meio da criatividade, empatia e cuidado.

2.1.3 Princípios e pilares do 5.0 na indústria

Para Ali, Al-Sultan, e Rubaie (2022), a pergunta sobre o que vem após a quarta revolução industrial é legítima uma vez que a primeira paixão do homem sempre foi explorar o futuro e o que ele envolve. Enquanto o período entre a primeira e a segunda

revoluções industriais durou quase 90 anos, este foi reduzido para 44 anos entre a segunda e a terceira revoluções, e para cerca de 31 anos entre a terceira e a quarta, o que impõe um futuro mais rápido do que o imaginável e que a quinta revolução estaria mais próxima que o expectável (Ali *et al.*, 2022).

Embora não se saiba o que advém da Quinta Revolução Industrial, de acordo com a lógica da construção cumulativa das revoluções que a precederam, esta dependerá, assim como a Quarta Revolução, de dados, dispositivos digitais e inteligência artificial, e o espaço virtual será o seu recreio. A Quinta Revolução Industrial eliminará as barreiras entre os mundos natural e virtual. Novas tecnologias serão mais avançadas do que tudo já conhecido antes, mais rápidas e escaláveis e construídas globalmente. As pessoas terão maior acesso a hardware, onde vastas quantidades de dados poderão ser extraídas e processadas de forma inteligente para melhorar a eficiência e a produtividade, ao mesmo tempo em que criam oportunidades de negócios.

Adiante, são apresentados os princípios fundamentais e os pilares que sustentam a Indústria 5.0, destacando a importância da sustentabilidade, foco no ser humano e resiliência, além das suas vantagens.

2.1.3.1. Princípios da indústria 5.0

A Indústria 5.0 emerge como uma evolução inovadora da Indústria 4.0, superando as suas limitações anteriores com uma abordagem revigorada. Com um novo foco na colaboração entre seres humanos e máquinas, na resiliência ambiental e na experiência do cliente, essa abordagem transforma a próxima geração da revolução industrial (Berg, 2022). Além disso, a Indústria 5.0 pretende atender à crescente procura por personalização em massa, impulsionando essa procura tanto psicologicamente quanto culturalmente - utilizando a tecnologia para revalorizar a contribuição humana no fabrico (Østergaard, 2018).

A exploração dos princípios fundamentais da Indústria 5.0 abre portas para um mundo de possibilidades que transcendem a mera eficiência operacional, como ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Princípios da Indústria 5.0.

Fonte: Elaboração própria

A abordagem centrada no ser humano destaca-se, reconhecendo o valor insubstituível do talento humano no contexto industrial. Ao contrário da abordagem puramente automatizada da Indústria 4.0, a Indústria 5.0 coloca ênfase na colaboração e sinergia entre trabalhadores humanos e máquinas, transformando essa interação num impulsionador fundamental do progresso. Este foco, muitas vezes chamado de *society-centric*, coloca as necessidades e o bem-estar humanos no centro das operações industriais, criando ambientes de trabalho seguros, inclusivos e estimulantes (Berg, 2022). Com a realocação do ser humano no epicentro da produção industrial, a Indústria 5.0 visa oferecer aos consumidores os produtos desejados e aos trabalhadores empregos mais gratificantes (Østergaard, 2018).

A resiliência e sustentabilidade constituem outra base essencial da Indústria 5.0. Esse novo paradigma industrial reconhece a urgência de adotar uma abordagem mais consciente em relação ao meio ambiente e ao uso de recursos. Na procura de um equilíbrio entre competitividade empresarial e responsabilidade ambiental, a Indústria 5.0 promove tecnologias flexíveis e ágeis, capazes de se adaptar às mudanças globais. A ênfase na sustentabilidade é refletida na capacidade de manter a eficiência operacional diante de desafios imprevistos e no compromisso de minimizar o impacto ambiental (Berg, 2022).

Um dos princípios mais inovadores da Indústria 5.0 é a promoção ativa da colaboração entre seres humanos e máquinas. Ao reconhecer tanto as vantagens quanto as limitações da automação, a Indústria 5.0 visa criar um ecossistema onde a complementaridade entre seres humanos e tecnologia alcance o seu potencial máximo.

Isso implica otimizar a interação entre ambos, capitalizando as vantagens da precisão e eficiência robótica, enquanto são abordadas as limitações de inflexibilidade e falta de adaptabilidade (Berg, 2022).

Por último, mas não menos importante, a Indústria 5.0 incorpora um compromisso sólido com a experiência do cliente e a hiperpersonalização. Além de otimizar processos internos, a Indústria 5.0 coloca o cliente no cerne da sua visão. Capacitada a oferecer produtos e serviços altamente personalizados, adaptados às necessidades individuais, as empresas que adotarem a abordagem da Indústria 5.0 superarão as expectativas dos clientes, estabelecendo um novo padrão de excelência (Berg, 2022).

Resumindo, a Indústria 5.0 inaugura um novo subcapítulo na revolução industrial - com um enfoque na colaboração humano-máquina, resiliência ambiental e experiência do cliente. Essa abordagem revolucionária redefine o cenário industrial, promovendo ambientes enriquecedores, empresas sustentáveis e experiências de consumo transformadoras. Inicia-se uma era de infinitas possibilidades, com os princípios da Indústria 5.0 moldando o futuro global.

2.1.3.2. Vantagens associados à Indústria 5.0

A Indústria 5.0 traz consigo uma série de vantagens significativas que vão além dos aspetos tradicionais de produtividade e eficiência. A tabela 2 enumera as principais vantagens desta abordagem.

Tabela 2. Vantagens da Indústria 5.0.

Vantagens	Descrição
Humanização	Valorização dos colaboradores como ativos valiosos
	Foco em agregar valor à vida dos trabalhadores.
	Melhoria da acessibilidade e ambiente de trabalho equitativo.
Resiliência	Abordagem resiliente para responder a crises e prever desafios.
	Vantagem competitiva pela flexibilidade operacional.
	Capacidade de adaptação rápida a mudanças imprevistas.
Análise Preditiva	Contribuição para decisões informadas e otimização de recursos
	Desenvolvimento contínuo de competências através de programas de formação robustos.
Sustentabilidade	Reputação corporativa mais positiva.
	Reforço do compromisso com a responsabilidade social e ambiental.
	contribuição para um impacto ambiental e social positivo e um futuro melhor.
Redução de resíduos e custos energéticos	Redução de resíduos e custos energéticos pela abordagem sustentável.
	Benefício para o meio ambiente e eficiência operacional.

Fonte: Adaptado de Dharmarajan (2023)

Estas vantagens demonstram que a Indústria 5.0 não se limita à automação e à eficiência, mas abrange uma visão mais ampla que considera o bem-estar humano, a adaptabilidade, a sustentabilidade e a inteligência baseada em dados como elementos essenciais para uma indústria centrada no ser humano e pronta para enfrentar desafios dinâmicos.

2.1.4 O papel da tecnologia na indústria 5.0

A Indústria 5.0 representa uma evolução significativa no cenário industrial, impulsionada pela convergência de avanços tecnológicos transformadores. No contexto dessa nova revolução, o papel da tecnologia desempenha um papel central e revolucionário. Em seguida, será explorado o modo como as tecnologias têm redefinindo radicalmente os processos industriais, promovendo uma interação mais intuitiva entre humanos e máquinas e criando um ambiente mais centrado no ser humano e sustentável. As tecnologias que desempenham papéis-chave no paradigma da Indústria 5.0 coincidem principalmente com as tecnologias centrais dos sistemas da Indústria 4.0.

2.1.4.1. Automação e robótica em 5.0

Na dinâmica da Indústria 5.0, a colaboração entre humanos e máquinas assume um papel central. Essa abordagem destaca a interação humano-máquina como um componente essencial para o sucesso da nova revolução industrial. Neste cenário, os robôs colaborativos, popularmente conhecidos como *cobots*, emergem como protagonistas. Ao contrário dos robôs industriais da Indústria 4.0, que tendem a operar isoladamente, os *cobots* trabalham em conjunto com os operadores humanos, promovendo uma relação de coexistência produtiva (Berg, 2022).

Os *cobots* são projetados para serem altamente flexíveis, capazes de realizar uma variedade de tarefas com facilidade e eficiência. Além disso, eles são mais acessíveis em termos de custo, tornando a automação mais viável para empresas de diferentes portes. A sua natureza interativa e amigável também os torna uma solução prática para ambientes de produção em constante mudança. Os *cobots* são uma resposta ao desafio de otimizar a produtividade enquanto mantêm a adaptabilidade humana, uma abordagem que atende tanto à eficiência quanto ao bem-estar dos trabalhadores (Berg, 2022).

2.1.4.2. Análise de dados e inteligência artificial em 5.0

A análise de dados e a IA desempenham papéis fundamentais na transformação da Indústria 5.0. No entanto, contrariamente à abordagem anterior, a ênfase é na aplicação humana dessas tecnologias. A IA é projetada para ampliar as capacidades humanas, oferecendo soluções centradas nas necessidades individuais. Interfaces homem-máquina competentes permitem uma interação fluida e eficaz, incentivando a criação de um ambiente de trabalho harmonioso e produtivo (Berg, 2022).

A análise de dados, por sua vez, vai além de métricas de eficiência comuns. Esta é aplicada para a melhoria da aprendizagem dos funcionários, antecipação de problemas de manutenção e aprimoramento de processos. A sua capacidade de simular diferentes cenários por meio de gêmeos digitais permite tomadas de decisões mais informadas. A Indústria 5.0 transforma dados em conhecimento lógico e racional, garantindo não apenas um aumento da produtividade, mas também um ambiente de trabalho estimulante e desafiador para os trabalhadores (Berg, 2022).

2.1.4.3. Sistemas ciber-físicos e as suas aplicações em 5.0

Os sistemas ciber-físicos (do inglês *Cyber-Physical Systems*, CPS) surgem como a base da Indústria 5.0, conectando o mundo físico ao virtual. Tal integração possibilita a criação de gêmeos digitais detalhados, que simulam operações e produtos num ambiente virtual e, consequentemente, permite que as empresas testem diferentes cenários e otimizem as suas operações antes da implementação no mundo real. Além disso, os CPS desempenham um papel vital na medição do impacto social e ambiental, proporcionando uma visão abrangente dos efeitos das operações industriais (Berg, 2022).

A flexibilidade inerente aos CPS permite que as empresas se adaptem rapidamente às mudanças do mercado e às exigências dos clientes. Ao promover uma abordagem proativa, as organizações podem melhorar a eficiência, reduzir custos e aumentar a qualidade dos produtos. Os CPS na Indústria 5.0 oferecem uma visão holística das operações, permitindo que as empresas tomem decisões informadas e estratégicas (Berg, 2022).

2.1.4.4. Cibersegurança e gestão de risco em 5.0

À medida que a Indústria 5.0 se baseia cada vez mais na interligação de tecnologias e sistemas, a cibersegurança e a gestão de riscos assumem um papel crítico. A troca de dados entre máquinas, sistemas e dispositivos exige medidas robustas de segurança para proteger informações sensíveis e evitar violações cibernéticas. A criptografia, autenticação e outras técnicas de segurança são implementadas para salvaguardar a integridade dos sistemas (Berg, 2022). Além disso, a gestão de riscos aborda desafios inerentes à adoção de tecnologias avançadas, como falhas operacionais e ameaças cibernéticas. A implementação de estratégias de gestão de riscos permite que as empresas se preparem para cenários adversos e tomem medidas preventivas. Ao abordar esses aspetos, a Indústria 5.0 procura garantir um ambiente de trabalho seguro, de

confiança e eficiente, enquanto continua a impulsionar a inovação e a produtividade (Berg, 2022).

2.1.5 O impacto da indústria 5.0

Seguidamente, são explorados os potenciais impactos da Indústria 5.0 nomeadamente na economia global, na força de trabalho e as suas implicações éticas, abordando como esta pode melhorar a qualidade, personalização e eficiência da produção.

2.1.5.1. Economia global

A Indústria 5.0 representa uma revolução que transcende as fronteiras das fábricas e das empresas, refletindo de forma profunda na economia global. A sua influência abrangente é sentida em várias esferas, moldando dinâmicas económicas e impulsionando transformações em escala mundial.

A adoção da Indústria 5.0 tem o potencial de criar uma vantagem competitiva significativa para os países que a abraçam. Uma vez que a colaboração homem-máquina se torna uma norma, as nações capazes de alinhar as suas forças de trabalho e tecnologias serão capazes de criar produtos e serviços altamente diferenciados e inovadores. Isso, por sua vez, pode resultar num aumento na procura global por esses produtos, alavancado o crescimento económico (Berg, 2022).

Em adição, a Indústria 5.0 pode ser um motor para o desenvolvimento de novos setores económicos. O seu foco na personalização e na experiência do cliente pode abrir caminho para mercados emergentes, antes eram considerados nichos. Empresas que adotam os princípios da Indústria 5.0 podem encontrar-se na vanguarda dessas mudanças, explorando oportunidades de crescimento em novos domínios (Berg, 2022).

Por outro lado, a adoção da Indústria 5.0 também pode intensificar as disparidades económicas entre os países. Nações que lutam para acompanhar a rápida evolução tecnológica podem ficar para trás, enfrentando desafios de competitividade e emprego. Assim sendo, a implementação bem-sucedida da Indústria 5.0 requer uma abordagem holística que tenha em consideração tanto as oportunidades quanto as preocupações, garantindo uma distribuição equitativa dos benefícios (Berg, 2022).

2.1.5.2. Potenciais implicações da indústria 5.0 para a força de trabalho

A ascensão da Indústria 5.0 acarreta consigo implicações profundas para a força de trabalho global. À medida que a colaboração entre humanos e máquinas se torna mais intrínseca, novos modelos de emprego e interações profissionais começam a emergir.

A introdução de robôs colaborativos e CPS pode redesenhar os papéis tradicionais desempenhados pelos trabalhadores. Funções anteriormente realizadas exclusivamente por humanos podem ser complementadas e ampliadas pela automação. Isso, por sua vez, pode levar a uma mudança na procura por capacidades, focada maioritariamente em proficiências digitais, adaptabilidade e resolução de problemas (Berg, 2022). Todavia, as implicações da Indústria 5.0 para a força de trabalho não se limitam apenas à aquisição de competências. Também se revelam preocupações sobre o impacto social e económico da automação. A automação avançada pode resultar na redução da procura por certas ocupações, causando potencialmente o desemprego em algumas áreas. Não obstante, a colaboração homem-máquina pode criar ambientes de trabalho complexos, onde a interação entre humanos e tecnologia exige novos níveis de coordenação e entendimento (Berg, 2022).

2.1.5.3. Implicações éticas da Indústria 5.0

A evolução em direção à Indústria 5.0 também traz importantes considerações éticas que devem ser abordadas de maneira cuidadosa e deliberada.

Uma das principais preocupações éticas envolve o tratamento dos dados gerados pela interligação de máquinas e sistemas. A recolha e análise de dados em massa pode levantar questões sobre privacidade e segurança. Garantir a proteção dos dados pessoais e a salvaguarda contra usos indevidos é fundamental para uma adoção responsável da Indústria 5.0 (Berg, 2022).

Além disso, a evolução tecnológica também pode dar origem a dilemas éticos em relação à substituição de trabalhadores humanos por máquinas. A procura pelo aumento da eficiência e da produtividade não deve negligenciar o impacto humano. É fundamental encontrar um equilíbrio entre a automação e a preservação do bem-estar e dignidade dos trabalhadores (Berg, 2022).

De igual modo, a implementação da Indústria 5.0 levanta questões sobre a responsabilidade em casos de erros ou acidentes envolvendo máquinas autónomas. A definição clara de responsabilidades e sistemas de prestação de contas é crucial para evitar implicações legais e morais indesejadas. Portanto, à medida que a Indústria 5.0 se desdobra, é imperativo que os aspetos éticos sejam cuidadosamente abordados, garantindo que a inovação tecnológica é guiada por princípios de justiça, transparência e respeito pelos valores humanos (Berg, 2022).

2.1.6 Indústria 5.0 VS. Indústria 4.0

Atualmente, a Indústria 5.0 tem vindo a ganhar impulso como uma abordagem pós-pandémica para o futuro da automação industrial. Neste contexto, elementos como robótica, máquinas inteligentes, IoT, IA e *Big Data* continuam a ser fundamentais para o sucesso empresarial. No entanto, há uma ênfase mais proeminente em considerações de sustentabilidade, resiliência e qualificação do talento humano, apoiada por dispositivos cada vez mais eficazes e inteligentes (Berg, 2022). A tabela 3 compara a Indústria 5.0 com sua predecessora, a Indústria 4.0, destacando as suas diferenças chave em termos de abordagem e objetivos.

Tabela 3. Comparação dos aspetos das indústrias 4.0 e 5.0.

Aspeto	Indústria 4.0	Indústria 5.0
Automação	Ênfase na automação avançada e robótica.	Valoriza a colaboração entre humanos e máquinas, transferindo tarefas repetitivas para as máquinas.
Papel dos trabalhadores	Substituição de trabalhadores humanos em tarefas repetitivas.	Transferência de trabalhadores para funções mais criativas e complexas, enfatizando competências humanas únicas.
Abordagem social	Prioriza a eficiência e produtividade, com foco nas máquinas.	Reintroduz o elemento humano no centro do processo de fabrico e destaca a interação entre humanos e máquinas.
Sustentabilidade	Menos ênfase na sustentabilidade ambiental.	Incorpora a sustentabilidade desde o início, visando contribuir para a preservação do meio ambiente.
Resiliência econômica	Menos ênfase na adaptabilidade e flexibilidade.	Busca criar sistemas mais adaptáveis e flexíveis para lidar com mudanças e desafios imprevistos.

Fonte: Adaptado de Berg (2022) e Østergaard (2018)

Em resumo, a principal diferença entre o conceito de Indústria 5.0 e Indústria 4.0 reside na ênfase dada à inclusão do "toque humano" às máquinas, bem como na utilização das mais recentes tecnologias para ampliar a capacidade de atuação dos trabalhadores humanos. Apesar de a Indústria 5.0 representar uma evolução no campo da automação industrial, ela apresenta características que, de muitas formas, contrariam os princípios tradicionais da industrialização (Berg, 2022).

A perspectiva da Indústria 5.0 não nega a importância da tecnologia e da automação, mas enfatiza que esses elementos devem ser usados para melhorar a experiência humana e criar ambientes de trabalho mais equilibrados e eficazes. Dessa forma, a Indústria 5.0 propõe uma evolução na forma como a tecnologia é aplicada na manufatura, reconhecendo que o valor humano não pode ser substituído e que a colaboração entre humanos e máquinas é a chave para o sucesso na próxima era industrial (Berg, 2022).

2.1.7 Exemplos de implementações bem sucedidas na Indústria 5.0

A Indústria 5.0 é ainda um conceito emergente e a sua implementação ainda não é generalizada. No entanto, algumas empresas já começaram a explorar e implementar tecnologias da Indústria 5.0 nas suas operações.

Siemens

A Siemens é uma das empresas líderes na área da Indústria 5.0. Eles têm sido pioneiros no desenvolvimento de soluções centradas no ser humano que combinam as forças tanto dos seres humanos como das máquinas. A sua abordagem à Indústria 5.0 concentra-se em permitir que os seres humanos trabalhem lado a lado com as máquinas num ambiente colaborativo e seguro.



Figura 4. Logótipo da Siemens

Fonte: Adaptado de BSH Home Appliances Group (2023)

No artigo de autoria do jornalista Miguel Prado, publicado a 11 de julho de 2023, "Siemens Portugal Planeia Expansão para 4 Mil Colaboradores até 2025", são revelados planos ambiciosos da Siemens Portugal em relação ao seu crescimento e desenvolvimento nos próximos anos. O artigo foi veiculado em meio à Conferência "Portugal 5.0", promovida pela própria Siemens em parceria com o jornal Expresso, na Fundação Champalimaud. O evento abordou o tema da transformação digital, um dos pilares fundamentais da Indústria 5.0.

O presidente executivo da Siemens Portugal, Fernando Silva, anunciou durante a conferência que a empresa tem como meta atingir a marca de 4.000 colaboradores até o ano de 2025, um notável aumento em relação aos 3.500 atuais. Esse aumento considerável

de colaboradores reflete uma estratégia de expansão e investimento no contexto da evolução da Indústria 5.0.

O artigo de (Prado, 2023) destaca que a Siemens Portugal tem se dedicado não apenas a aumentar o número de colaboradores, mas também a fortalecer suas atividades em áreas estratégicas. Uma dessas áreas envolve o desenvolvimento de tecnologias avançadas que são empregadas em todo o grupo Siemens. Esse foco na inovação e desenvolvimento tecnológico está alinhado com os princípios da Indústria 5.0, que promove a integração harmoniosa de tecnologia de ponta nas operações industriais.

Além disso, a Siemens Portugal vem investindo no crescimento de seu ecossistema de mobilidade elétrica em Corroios. O objetivo é expandir a produção de carregadores para veículos elétricos, contribuindo para um futuro mais sustentável e em consonância com os ideais de "verde" e "sustentável" da Indústria 5.0.

O artigo também destaca os comentários do CEO do Grupo Siemens, Roland Busch, que elogiou Portugal como uma área-chave para tecnologias líderes. Essa afirmação reforça a importância de Portugal na visão da Siemens em relação à inovação e à tecnologia, aspectos centrais na era da Indústria 5.0.

As informações presentes no artigo de Miguel Prado (2023) sugerem que a Siemens Portugal está empenhada em se adaptar aos desafios e oportunidades da Indústria 5.0. A procura por colaboradores talentosos, a expansão de áreas estratégicas e o foco na inovação tecnológica demonstram um compromisso em alinhar-se com os princípios dessa nova era industrial, onde a interação entre seres humanos e tecnologia é central para o sucesso empresarial. Este artigo exemplifica como empresas como a Siemens respondem às transformações do cenário industrial e tecnológico, como preparação para uma era marcada pela colaboração, inovação e sustentabilidade.

ABB

No cenário atual de constante evolução tecnológica, a indústria tem testemunhado a emergência de abordagens inovadoras que transformam a maneira como as empresas operam e produzem. Um exemplo notável desse progresso pode ser encontrado na trajetória da ABB India, uma empresa líder em tecnologia global que tem avançado de maneira notável em direção à integração da tecnologia 5.0 em suas operações, conforme demonstrado num comunicado de imprensa datado de 29 de agosto de 2022.



Figura 5. Logótipo ABB

Fonte: Adaptado de ABB (2023)

No comunicado, a (ABB, 2022) revela uma expansão e aprimoramento da sua fábrica de *Smart Power*, em Nelamangala, Bengaluru, adotando uma abordagem que não apenas abraça a Indústria 4.0, mas também lança as bases para a Indústria 5.0. O termo "Indústria 5.0" demonstra uma nova fase na evolução da manufatura, onde a colaboração entre seres humanos e máquinas (robôs) assume um papel crucial, na procura em maximizar a eficiência e a flexibilidade das operações industriais.

A ABB está na vanguarda dessa transição, construindo uma fábrica que utiliza a tecnologia 5.0 para promover uma interação mais estreita entre humanos e máquinas. Nesse ambiente, a IA e as tecnologias avançadas de digitalização são integradas para criar um ambiente de produção automatizado e adaptável, capaz de se ajustar rapidamente às procuras em constante mudança do mercado (ABB, 2022).

Um aspeto notável dessa transformação é a aplicação de robôs colaborativos (*cobots*), que trabalham em harmonia com os seres humanos para otimizar os processos de fabrico. Essa abordagem não apenas aumenta a produtividade em até 40%, mas também melhora a eficiência energética em mais de 15%, mostrando claramente os benefícios tangíveis da adoção da tecnologia 5.0. (ABB, 2022)

Adicionalmente, a fábrica ABB *Smart Power* é um exemplo de como a integração da IoT e a conectividade entre equipamentos podem ser aproveitadas na melhoria da eficiência operacional. Essa sinergia entre tecnologias modernas destaca as oportunidades

de otimização de processos e permite a manutenção preditiva, contribuindo para um ambiente de produção altamente flexível e ágil.

A expansão dessa fábrica não é apenas um marco na jornada da ABB India, mas também uma indicação clara do papel crucial da tecnologia 5.0 na evolução da indústria. Ao adotar essa abordagem inovadora, a ABB India não apenas fortalece sua posição como líder tecnológico, mas também oferece um vislumbre do futuro da manufatura - um futuro onde a colaboração entre seres humanos e máquinas não apenas otimiza a eficiência, mas também impulsiona a inovação contínua e sustentável. Com essa iniciativa pioneira, a ABB India demonstra a capacidade da Indústria 5.0 de redefinir os padrões de excelência na produção industrial e impulsionar a sociedade em direção a um futuro mais produtivo e sustentável.

Clarify

A Clarify é uma plataforma colaborativa de transmissão de dados para equipes industriais. A empresa oferece uma ferramenta de inteligência de dados de séries temporais projetada para automação industrial. A sua solução permite que as organizações aproveitem diversos tipos de dados recolhidos de sistemas de automação industrial, como Historiadores, SCADA e dispositivos IoT. A plataforma de análise de dados da Clarify possui características alinhadas com os princípios da Indústria 5.0, permitindo a integração, organização, colaboração e visualização de dados industriais. Ela suporta tecnologia de linha do tempo de dados em *streaming*, possibilitando que os utilizadores naveguem e visualizem rapidamente sinais de dados ao mesmo tempo (Berg, 2022).



Figura 6. Logótipo Clarify

Fonte: Adaptado de (Berg, 2022)

A Clarify também promove a colaboração, permitindo que os membros da equipa se identifiquem uns aos outros, registem incidentes e adicionem arquivos de média diretamente na linha do tempo dos dados. A empresa também enfatiza a propriedade dos dados pelo cliente e facilita a extração dos dados para uso em outras ferramentas (Berg, 2022).

2.1.8 Considerações finais

O desenvolvimento global foi significativamente afetado pelas várias fases da industrialização abordadas ao longo deste subcapítulo e, conseqüentemente, trouxe problemas igualmente abordados, como a crise dos recursos naturais, o aquecimento global e o aumento das desigualdades económicas que, em grande parte, refletem a maneira prejudicial pela qual a industrialização ocorreu.

Para combater este cenário de insustentabilidade e vulnerabilidade, surge uma nova fase para a indústria, baseada na observação da Indústria 4.0 que, ao priorizar a tecnologia em detrimento das preocupações humanas e ambientais, mostrou margem para evolução. O conceito de Indústria 5.0 enfatiza a importância da pesquisa e inovação para sustentar a indústria a longo prazo. Este visa transformar a indústria numa fonte resiliente de prosperidade, assegurando uma produção alinhada com os limites do planeta e colocando o trabalhador no centro do processo de produção.

A perspetiva da Indústria 5.0 pode ser examinada por diferentes ângulos, todos convergentes para a eficiência e a produtividade como os únicos objetivos. Ao contrário dos eventos anteriores, esta realça o papel da indústria na sociedade e a necessidade de uma transição em direção a uma indústria sustentável, focada nas necessidades humanas e resiliente.

É importante observar que os estudos relacionados à Indústria 5.0 ainda estão em estágios iniciais em Portugal e no mundo, portanto, este trabalho desempenha um papel fundamental ao iniciar discussões sobre o futuro da indústria e a necessidade de adotar abordagens mais sustentáveis e centradas no ser humano.

2.2 Simulação

Na procura pela compressão das possíveis discrepâncias da realidade e antecipação do desconhecido, a humanidade tem explorado vastos e diversos territórios intelectuais. No centro dessa exploração cognitiva reside a prática da simulação, uma ferramenta tão antiga quanto a própria curiosidade humana, agora ampliada pelas tecnologias contemporâneas. Este subcapítulo explora as profundezas deste conceito multifacetado, onde mundos virtuais emergem como simulacros da realidade tangível, fenómenos complexos podem ser recriados em ambientes controlados e onde a fronteira entre o autêntico e o simulado torna-se progressivamente subtil.

Ao longo da história, a simulação tem sido utilizada como instrumento para melhorar a compreensão de processos naturais, sociais e científicos. Desde os primórdios modelos cartográficos, que refletiam a topografia terrestre, até aos avançados simuladores usados em contextos de treino aeronáutico, a simulação tem possibilitado a exploração de cenários diversos, a análise de resultados hipotéticos e a formulação de estratégias fundamentadas. No entanto, o início da era digital revolucionou a forma como as simulações são concebidas e aplicadas, oferecendo um novo nível de complexidade, precisão e interatividade. Neste subcapítulo, é explorado o mundo da simulação. O mesmo tem início com uma introdução aos princípios da simulação, seguida pela explicação de seus objetivos, evolução histórica e os processos de modelação. Destaca-se a simulação de eventos discretos e suas vantagens, além de discutir os desafios e tendências futuras nesse campo essencial para otimizar processos industriais.

2.2.1 Introdução à simulação

A modelação e simulação emergem como ferramentas fundamentais na análise e compreensão de sistemas complexos. Na sua essência, um modelo é uma abstração simplificada que representa uma entidade para fins específicos (White & Ingalis, 2009). Esses modelos são empregues para investigar se um sistema real é inviável, seja devido a custos, tempo, segurança ou outras limitações. Adicionalmente, os modelos permitem estudar sistemas que existem apenas em conceito, oferecendo uma visão precisa e adaptável dos sistemas conforme os objetivos de análise (Fishman, 1978). A definição de um sistema, como proposto por (Schmidt & Taylor, 1986), engloba entidades interligadas que colaboram para atingir um objetivo lógico. No entanto, a delimitação do sistema é altamente dependente dos objetivos de estudo, o que destaca sua flexibilidade (Fishman, 1978).

Modelos podem ser estáticos ou dinâmicos, capturando uma imagem instantânea ou a evolução do sistema ao longo do tempo (White & Ingalis, 2009). A classificação dos sistemas em discretos ou contínuos é crucial para compreender suas dinâmicas de mudança (Law, 2014). Nos sistemas discretos, as variáveis de estado mudam instantaneamente, como a quantidade de clientes num banco. Em sistemas contínuos, as variáveis evoluem gradualmente, como o movimento de um avião no ar (Law, 2014). Essa distinção é vital para entender as mudanças e as respostas dos sistemas ao longo do tempo.

A análise sistemática de sistemas proporciona pontos de vista sobre as interações dos seus componentes e previsões de desempenho em diferentes cenários (Law, 2014). Independentemente do tipo de sistema, a análise sistemática é essencial para alicerçar decisões bem fundamentadas e otimizar processos, em procura de melhores resultados (Fishman, 1978). A simulação, conforme Shannon (1975), é o processo de projeção de um modelo de sistema real e condução de experiências para compreender o seu comportamento ou avaliar estratégias de operação (White & Ingalls, 2009).

A simulação dinâmica cria uma imitação de um sistema à medida que ele evolui ao longo do tempo, proporcionando uma maneira única de analisar resultados (Robinson, 2014). A mesma é empregue para modelar sistemas de manufatura, serviços e transporte, oferecendo vantagens como a economia de tempo, recursos financeiros e a capacidade de experimentar cenários alternativos (Mello, 2007). Os modelos de simulação são uma abordagem experimental que auxiliam na compreensão, experimentação e melhoria dos sistemas operacionais (Chung, 2003).

Em suma, a modelação e simulação são ferramentas vitais para analisar sistemas complexos, que permitem uma abordagem sistemática na compreensão de interações, previsão de desempenho e tomada de decisões (Law, 2014). Através dos modelos dinâmicos, estas ferramentas possibilitam uma visão abrangente dos sistemas, enquanto as simulações oferecem uma abordagem experimental que auxilia na formulação de hipóteses, experimentação e melhoria contínua (Robinson, 2014). A flexibilidade na definição de sistemas e a escolha entre modelos discretos ou contínuos demonstram a adaptabilidade dessas técnicas às necessidades específicas de análise (Fishman, 1978). No panorama atual, a modelação e simulação continuam a desempenhar um papel crucial na compreensão e otimização de sistemas complexos, fundamentando decisões e melhorias contínuas (Anes, 2022).

2.2.2 Objetivos da simulação

A utilização da simulação e análise de modelos engloba uma gama diversificada de objetivos, conforme destacado por Chung (2003) e Pegden, Shannon, e Sadowski, (1995):

Compreensão Intrincada do Funcionamento Sistémico

Em muitos casos, os sistemas complexos desafiam a compreensão direta dos seus mecanismos internos. A abordagem da modelação dinâmica surge como uma ferramenta essencial para iluminar a operação e as interações destes sistemas. Através dela, é possível

explorar processos que, de outra forma, permaneceriam obscuros. Por exemplo, ao examinar gargalos em processos de fabrico, é difícil alcançar conclusões profundas sem um modelo dinâmico que reproduza as dinâmicas subjacentes (Chung, 2003).

Formulação de Políticas para Aprimoramento Operacional e de Recursos

Mesmo em sistemas já compreendidos, a procura por melhorias contínuas é constante. A modelação dinâmica oferece duas vias principais para essa otimização: a redefinição das políticas operacionais e a gestão mais eficiente dos recursos. As mudanças nas políticas operacionais podem abranger aspetos como a programação de ordens de trabalho com prioridades distintas. Enquanto isso, a alocação otimizada de recursos, como a configuração do pessoal ou os intervalos de pausa, pode ser aprimorada por meio da análise modelística (Chung, 2003).

Avaliação de Novos Conceitos e Pré-Implementação

A simulação revela-se especialmente valiosa quando os sistemas ainda não existem ou quando se considera a implementação de novos conceitos. Os modelos de simulação permitiram uma exploração prévia de como os tais sistemas propostos funcionariam na prática. Essa abordagem pode ser de baixo custo quando comparada aos investimentos de capital necessários para a instalação completa. Além disso, é possível avaliar os impactos de diferentes níveis e custos de equipamentos, refinando assim as escolhas de configuração antes da implementação (Chung, 2003).

Avaliação sem Intervenção no Sistema Real

Para sistemas extremamente críticos ou sensíveis, nos quais qualquer mudança operacional poderia ter repercussões graves, a simulação é frequentemente o único meio viável para experimentação. Um exemplo clássico é o ponto de controlo de segurança em aeroportos comerciais. Experiências que envolvam alterações nas políticas operacionais ou nos níveis de recursos poderiam comprometer a eficácia de segurança ou a operação do sistema. A simulação permite avaliar cenários sem perturbar o funcionamento real (Chung, 2003).

A integração desses propósitos abrangentes da simulação possibilita a análise minuciosa, a otimização do desempenho e a tomada de decisões numa ampla variedade de sistemas, desde processos industriais complexos a sistemas críticos de segurança (Chung, 2003; Pegden *et al.*, 1995).

2.2.3 Evolução da simulação

Desenvolvidas por engenheiros e projetistas para o estudo de uma diversidade de sistemas, as ferramentas de simulação, têm evoluído em consonância com a tecnologia de suporte disponível (*hardware* e *software*) no momento da sua implementação. Esta evolução tem percorrido um caminho, desde os modelos físicos em escala e os modelos matemáticos, até alcançar a mais recente geração de simuladores inteligentes e interativos com interfaces gráficas (Lobão & Porto, 1999).

A Tabela 4 ilustra a trajetória dos sistemas de simulação em paralelo com o progresso da tecnologia de suporte, tópicos estes que serão explorados ao longo deste subcapítulo.

Tabela 4. Evolução dos sistemas de simulação.

Tipo	Tecnologia disponível	Ferramenta de simulação
I	Conhecimentos científicos, matemáticos, estatísticos; Ferramentas manuais	Modelos matemáticos e físicos de escala reduzida ou ampliada
II	Computadores de grande porte; Primeiros microcomputadores	Linguagem de simulação: GPSS, SLA, SIMAN, etc. Simuladores de interface por diálogo
III	Microcomputadores.	Simuladores de interface gráfica: Arena, Automod, Promodel, etc.
IV	Estações de trabalho; Microcomputadores de alto desempenho e grande capacidade de memória.	Simuladores de interface gráfica interativos com recurso a realidade virtual e inteligentes, com sistemas especialistas em inteligência artificial

Fonte: Adaptado de Lobão e Porto (1999)

Tipo I

Os modelos matemáticos foram criados a partir de observações sobre sistemas para prever o seu comportamento em diferentes situações. São identificadas as variáveis que influenciam o comportamento e propõe-se uma relação matemática que descreva o sistema e faça previsões. Alguns exemplos práticos incluem a verificação da autenticidade de obras de arte, estudo de variações populacionais (modelo de Malthus), análise de crescimento de tumores, investigação de vibrações mecânicas, entendimento de diabetes e realização de inferências em campanhas militares com modelos de F. W. Lanchester (Braun, 1979 como citado em Lobão & Porto, 1999).

Tipo II

Com os avanços na eletrônica e na informática, os modelos físicos em escala foram consideravelmente aprimorados. Incorporaram-se inovações como microprocessadores e microsensores eletrônicos, resultando numa significativa expansão da capacidade de coleta de dados. Em 1983, Ranky (como citado em Lobão & Porto, 1999) já apontava que alguns desses modelos eram equipados com kits microprocessados que possibilitavam movimentação, permitindo simulações altamente realistas de linhas de produção. Adicionalmente, a integração de sensores eletrônicos avançados viabilizou explorações em áreas complexas, como aerodinâmica e análise estrutural. Por outro lado, em 1983, Schlie e Grimberg (como citado em Lobão & Porto, 1999) apresentam uma abordagem distinta para modelos em escala, descrevendo a técnica de estereolitografia. Essa técnica utiliza um feixe de laser ultravioleta para solidificar resina fotossensível, controlado por computador, permitindo a criação precisa de peças conforme o projeto

Contudo, a modelagem física em escala enfrentava desafios como altos custos complexidade no processo construtivo e limitada adaptabilidade a diferentes sistemas (Lobão & Porto, 1999).

Os modelos matemáticos tiveram um impulso notável graças aos avanços na tecnologia da informação. No final dos anos 90, segundo Lobão e Porto (1999), diversos pacotes de software comerciais permitiam simulações de sistemas altamente complexos, como MATLAB, MATRIX e SIMULINK. Além de simulação, esses softwares também possibilitavam inferências em modelos desenvolvidos em outros pacotes, como ADAMS e SDFAST para sistemas multicorpos, além de CAEDS, ANSYS, NASTRAN e COSMOS para análises de elementos finitos (Lobão & Porto, 1999).

As linguagens de simulação do Tipo II surgiram como resposta ao desafio de aumentar a eficiência dos sistemas produtivos num contexto de globalização económica. Com a modernização industrial e a adoção de sistemas automatizados complexos, a necessidade de monitorizar e operar esses sistemas tornou-se crucial. Surgiram, então, linguagens de simulação para simplificar a modelação, a inicialização de sistemas e a formação de operadores. Inicialmente, linguagens de programação genéricas, como Basic, Pascal e C, foram utilizadas, mas exigiam um profundo conhecimento de programação (Lobão & Porto, 1999).

Posteriormente, emergiram linguagens de programação específicas para simulação, como GPSS, SIMAN, SLAM e SIMSCRIPT. Essas linguagens eram, essencialmente, bibliotecas de macrocomandos construídas com base em linguagens de

programação genéricas, como FORTRAN, para simplificar a construção de modelos. A geração subsequente de simuladores gráficos, exemplificada pelo ARENA, aproveitou os princípios dessas linguagens, sendo o ARENA, por exemplo, construído com base na linguagem SIMAN (Lobão & Porto, 1999).

Tipo III

O surgimento de linguagens dedicadas à construção de modelos de simulação, juntamente com a redução dos custos de hardware e software, alavancou uma ampliação significativa do número de adeptos à técnica de simulação de sistemas, abrangendo várias esferas de aplicação (Lobão & Porto, 1999).

Esse crescimento de utilizadores motivou o desenvolvimento de programas de simulação voltados a contextos específicos, distinguidos por Lobão e Porto (1999), como simulações de processos de fabrico, simulações de voo, simulações de tráfego e formação para operadores. Estes simuladores foram concebidos para simplificar a criação de modelos nos cenários em questão.

Ainda que essas ferramentas de simulação não possuíssem a mesma versatilidade das linguagens gerais de simulação, elas apresentam vantagens notáveis (Lobão & Porto, 1999):

- Integram interfaces de utilizador mais amigáveis e acessíveis;
- Facilitam a incorporação de rotinas já existentes;
- Dispensam a necessidade de um profundo domínio de programação, graças à sua operação em níveis mais abstratos.

O avanço tecnológico e a melhoria do desempenho dos computadores pessoais, permitiu o desenvolvimento de soluções comerciais como ARENA, PROMODEL e AUTOMOD. Estes sistemas mostravam características distintivas, como interfaces gráficas interativas, modelos orientados a objetos, capacidades de animação, fornecimento de relatórios detalhados e instrumentos estatísticos para análise dos dados provenientes das simulações.

Tipo IV

A tendência atual para os sistemas simuladores aponta na direção de sistemas interativos e inteligentes. Nestes sistemas irão ser amplamente incorporados recursos de realidade virtual, inteligência artificial e sistemas especialistas (Lobão & Porto, 1999).

Os novos sistemas simuladores têm vindo a evoluir para uma estrutura composta por diversos módulos que interagem entre si de forma integrada. Esses módulos auxiliam

em todas as fases do processo de simulação, desde a definição das especificações do processo e do modelo a ser construído até a obtenção dos resultados e sua subsequente análise. Num futuro, prevê-se que serão fornecidos comentários concisos sobre cada um desses diversos módulos do simulador e como eles se relacionam com os utilizadores do sistema (Lobão & Porto, 1999).

De forma sumária, as ferramentas de simulação evoluíram devido à globalização económica e à rápida progressão tecnológica na eletrónica e informática. Elas agora englobam sistemas interativos e inteligentes, integrando realidade virtual, inteligência artificial e sistemas especialistas. Essa evolução atende à procura das empresas por eficiência e redução de custos no desenvolvimento de produtos e operações. A geração anterior de simuladores exigia conhecimentos complexos, enquanto a atual simplifica a modelagem com abordagens orientadas a objetos e incorpora técnicas de realidade virtual para aprimorar a qualidade dos dados obtidos. Além disso, módulos de sistemas especialistas orientam a definição de especificações, mesmo para profissionais menos familiarizados com os processos. O uso de módulos inteligentes facilita a interpretação dos resultados.

2.2.4 Modelação

No trabalho de Robinson (2014), são exploradas várias abordagens para modelar a passagem do tempo, incluindo o método de *time-slicing*, a simulação contínua e a simulação de eventos discretos. No entanto, o foco principal do presente estudo recairá sobre a abordagem de simulação de eventos discretos.

O método de *time-slicing* constitui uma abordagem simples, na qual um intervalo de tempo constante é adotado para avançar a simulação. Por exemplo, num centro de atendimento telefónico, o tempo poderá ser segmentado em intervalos fixos, sendo que as mudanças no sistema são analisadas somente nos momentos dessas subdivisões temporais. Contudo, esta abordagem poderá revelar-se ineficaz, uma vez que muitos cálculos são executados mesmo quando não ocorrem alterações no estado do sistema (Robinson, 2014).

A simulação contínua é utilizada para modelar sistemas nos quais as alterações ocorrem de forma suave e contínua ao longo do tempo. Esta abordagem é particularmente adequada para sistemas em que as variáveis mudam de forma contínua, como processos químicos e físicos. Porém, esta abordagem exige a discretização do tempo para ser

implementada em computadores, o que poderá conduzir a aproximações e limitações de precisão (Robinson, 2014).

Por outro lado, a simulação de eventos discretos concentra-se nos momentos específicos em que ocorrem alterações de estado no sistema. Esta abordagem é mais adequada para sistemas em que as mudanças ocorrem de forma discreta e pontual, como a chegada de clientes num centro de atendimento telefónico ou a ocorrência de eventos num sistema de filas. Esta abordagem oferece vantagens como a capacidade de modelar interações detalhadas entre eventos, a manipulação de sistemas complexos e variáveis e a incorporação de incertezas nos dados de entrada (Robinson, 2014).

Face ao âmbito deste estudo e às características dos sistemas a serem modelados, escolheu-se a abordagem de simulação de eventos discretos como a mais adequada. Esta permite uma análise detalhada e flexível do sistema, capturando as dinâmicas que ocorrem em momentos específicos e oferece uma forma eficaz de lidar com a complexidade e variabilidade inerentes aos sistemas do mundo real.

2.2.4.1. Simulação de eventos discretos

A simulação de eventos discretos é uma abordagem amplamente utilizada para modelar sistemas complexos ao longo do tempo, permitindo a análise do seu comportamento em variados cenários. Nessa abordagem, um sistema é representado através de variáveis de estado que mudam instantaneamente em pontos específicos no tempo e cada ponto de mudança é um evento. Isso significa que as alterações no sistema ocorrem apenas em momentos discretos, geralmente relacionados a eventos definidos, como a chegada de um cliente ou a conclusão de um serviço (White & Ingalls, 2009).

De acordo com Law (2014), para realizar simulações de eventos discretos, é necessário acompanhar o tempo simulado à medida que a simulação avança. Esse tempo é representado por um relógio de simulação, que é atualizado sempre que um novo evento é programado para ocorrer. Existem diferentes mecanismos de avanço no tempo, sendo um deles o "próximo evento", onde o relógio de simulação é ajustado para o momento em que o próximo evento ocorrerá. O avanço do tempo é essencial para perceber a evolução do sistema de acordo com a ocorrência dos eventos.

Um exemplo prático que ilustra a simulação de eventos discretos é um sistema de atendimento com um único servidor, como uma barbearia. O objetivo é estimar o atraso médio na fila de chegada dos clientes. Nesse modelo, as variáveis de estado representam o status do servidor (ocupado ou livre), o número de clientes na fila e os tempos de

chegada dos clientes. Os eventos ocorrem quando um cliente chega ou quando o atendimento de um cliente é concluído. A mudança de estado acontece apenas nos momentos de evento, como a transição de um servidor ocioso para ocupado quando um cliente chega (Law, 2014).

A organização de um modelo de simulação de eventos discretos envolve vários componentes interligados. O estado do sistema é composto pelas variáveis necessárias para descrever completamente o sistema num determinado momento. Além disso, a lista de eventos contém os próximos momentos em que cada tipo de evento ocorrerá. À medida que a simulação avança, o tempo de simulação é ajustado e os eventos são programados para ocorrer e os contadores estatísticos recolhem informações relevantes para avaliar o desempenho do sistema. O ciclo principal da simulação consiste na determinação do próximo evento, atualização do respetivo sistema conforme esse evento e repetição do processo até que uma condição de término seja atingida (Law, 2014).

Em resumo, a simulação de eventos discretos é uma ferramenta poderosa para modelar e analisar sistemas complexos através da visualização da evolução do sistema em pontos discretos no tempo, que refletem a ocorrência de eventos que alteram o estado do sistema.

2.2.4.2. Componentes básicos da simulação de eventos discretos

A estrutura da simulação de eventos discretos inclui componentes básicos que a maioria dos pacotes de software de simulação utiliza. Independentemente da complexidade destes últimos, é provável que contenham, segundo White e Ingalls (2009):

- **Entradas, Saídas e Estado:** As ações do ambiente sobre um sistema são chamadas de entradas do sistema. Essas entradas causam mudanças nas condições internas do sistema, chamadas de estado do sistema. As saídas do sistema são quantidades medidas que podem derivar do estado do sistema e são necessárias para responder às perguntas feitas no estudo de simulação.
- **Entidades e Atributos:** Em simulações de eventos discretos, as entradas são representadas pela chegada de entidades dinâmicas. Essas entidades fluem pelo sistema e são elementos estruturais que causam mudanças nas variáveis de estado do sistema. As entidades são vitais para simulações, uma vez que representam transações ou objetos que causam mudanças de estado.
- **Atividades e Eventos:** Atividades são processos e lógicas na simulação, enquanto eventos são condições que ocorrem num momento específico, causando

mudanças no estado do sistema. As entidades interagem com atividades para criar eventos. Existem três tipos principais de atividades numa simulação: atrasos, filas e lógica.

- **Recursos:** Recursos são elementos com capacidade limitada numa simulação, como máquinas, trabalhadores ou outros objetos que precisam ser compartilhados entre as entidades. As entidades podem aguardar pelos recursos e podem ser atrasadas após adquirir um recurso.
- **Variáveis Globais:** São variáveis disponíveis para toda a simulação e podem monitorizar vários aspetos. Podem incluir valores relacionados a políticas operacionais, estado do sistema, desempenho, entre outras.
- **Gerador de Números Aleatórios:** Todo pacote de simulação possui um gerador de números aleatórios que gera números aleatórios entre 0 e 1. Esses números são usados para a amostragem de distribuições aleatórias e simulação de incertezas.
- **Relógio e Calendário:** O relógio é uma variável global que representa o tempo atual da simulação. O calendário é uma lista de eventos agendados para o futuro, ordenados pelo tempo agendado mais cedo.
- **Coletor de Estatísticas:** Esses componentes recolhem estatísticas sobre condições, recursos, desempenho e outros aspetos da simulação. Podem incluir contagens, estatísticas de utilização de recursos e tempo que as entidades permanecem no sistema.

2.2.5 Vantagens da simulação

A análise e o aprimoramento de sistemas operacionais podem ser abordados de diversas maneiras, não se limitando apenas à simulação. É possível realizar experiências com o sistema real ou empregar outras técnicas de modelação (Pidd, 1998). No entanto, é importante destacar as vantagens distintas que a simulação oferece em comparação com essas abordagens (Robinson, 2014).

Em vez de construir e utilizar um modelo de simulação, é possível conduzir experiências diretamente no sistema real. Por exemplo, novas mesas de check-in podem ser adicionadas a uma área de partida num aeroporto ou ajustes podem ser feitos no fluxo de produção numa fábrica. Existem razões evidentes e sutis pelas quais a simulação se destaca em relação a essa experimentação direta (Robinson, 2014).

A tabela 5 enumera as vantagens da simulação, devidamente explicadas.

Tabela 5. Vantagens da Simulação.

Vantagens	Descrição
Custo	Experiências no sistema real frequentemente envolvem altos custos, interrupções nas operações diárias e possíveis perdas de clientes. A simulação permite fazer alterações com custos limitados, no tempo necessário para ajustar o modelo, sem interromper as operações reais.
Tempo	Experiências no sistema real consomem um tempo considerável, enquanto a simulação pode fornecer resultados muito mais rapidamente, muitas vezes em minutos ou horas. Isto permite explorar uma variedade de ideias num curto período e obter avaliações de desempenho mais rapidamente
Controlo das Condições Experimentais	A simulação oferece um controlo maior das condições experimentais ao comparar alternativas. Testes no sistema real podem ser afetados por fatores externos difíceis de controlar. Com a simulação, as condições podem ser reproduzidas repetidamente, permitindo comparações precisas e repetições de cenários complexos.
Sistemas Não Existentes	Experimentar com sistemas que ainda não existem é difícil no mundo real. A simulação permite criar modelos de sistemas não existentes para avaliar o seu desempenho e viabilidade, sem a necessidade de construir múltiplos sistemas reais alternativos.

Fonte: Adaptado de Robinson (2014)

Além das vantagens já discutidas, a modelação de simulação oferece benefícios adicionais, enumerados por Chung (2003) incluindo:

- **Experimentação em Tempo Comprimido:** A simulação permite a execução de experiências num ritmo acelerado. Processos que normalmente levariam meses ou anos podem ser simulados em segundos. Isso é particularmente útil para sistemas de longa duração, permitindo replicar execuções para uma análise estatisticamente mais robusta (Chung, 2003);
- **Requisitos Analíticos Reduzidos:** Antes da simulação por computador, a análise de sistemas complexos era restrita a especialistas em matemática ou pesquisa operacional. A simulação democratizou essa análise, possibilitando que profissionais de diversas áreas estudem sistemas dinâmicos em tempo real, sem lidar diretamente com cálculos complexos (Chung, 2003).
- **Modelos de Fácil Demonstração:** Muitos softwares de simulação incluem recursos de animação que permitem depurar e demonstrar dinamicamente o funcionamento do modelo. Essa capacidade ajuda a identificar falhas na lógica

do modelo e a comunicar efetivamente a operação do sistema a outras partes interessadas (Chung, 2003).

A simulação não só proporciona um ambiente controlado e económico para a análise de sistemas complexos, mas também oferece uma plataforma para experimentação ágil, análise reduzida e visualização eficaz (Chung, 2003; Robinson, 2014).

2.2.6 Desafios e tendências futuras

O mundo da simulação é rico em benefícios, mas também apresenta desafios que não podem ser ignorados. Estas limitações não estão diretamente relacionadas à criação e análise dos modelos em si, mas sim à forma como os projetos de simulação são encarados. Reconhecer e lidar adequadamente com esses desafios é crucial para profissionais da área, e eles incluem (Chung, 2003):

A precisão dos dados de entrada é fundamental. A velha máxima "entrada de qualidade, saída de qualidade" é pertinente aqui. Mesmo com o modelo mais avançado, dados de entrada imprecisos inevitavelmente levam a resultados questionáveis. A recolha de dados, por vezes subestimada, é o alicerce da simulação. Infelizmente, alocar tempo inadequado para essa etapa é comum, resultando em dados duvidosos sendo erroneamente incorporados. Investir tempo e recursos na recolha de dados de alta qualidade é uma necessidade incontornável para um projeto de simulação bem-sucedido (Chung, 2003).

Lidar com sistemas complexos e esperar soluções simplistas é uma armadilha. Sistemas intrincados exigem análises profundas. A procura por soluções fáceis não se alinha com a realidade. Quando um sistema abrange múltiplos componentes e interações, encontrar a melhor estratégia requer uma análise minuciosa de cada elemento. A tentação de adotar abordagens simplificadoras para acelerar o processo pode resultar em soluções insuficientes, negligenciando aspetos cruciais que afetam o desempenho geral (Chung, 2003).

A simulação não resolve problemas por si só. Esta é uma crença equivocada que muitos têm. A mesma oferece potenciais soluções, mas a implementação eficaz é responsabilidade dos gestores e partes interessadas. Transformar as soluções propostas em ações tangíveis é um passo crítico, muitas vezes subestimado. O sucesso não está na simulação isolada, mas na interação ativa dos envolvidos. O engajamento dos tomadores

de decisão é fundamental para evitar que as soluções fiquem no papel devido à inércia organizacional ou considerações políticas (Chung, 2004).

Ao encarar esses desafios, os profissionais de simulação podem otimizar a eficácia dessa abordagem e ao garantir dados precisos, abordagens abrangentes e colaboração ativa dos envolvidos, a simulação pode realmente cumprir a sua expectativa de aprimorar a tomada de decisões e a gestão de sistemas complexos.

2.3 Arena®

Neste subcapítulo dedicado ao Arena, um software de simulação, são apresentados os seus princípios fundamentais, interface e recursos. É explorado também o uso de distribuições estatísticas em simulação. Além disso, são abordados os desafios comuns que podem surgir ao utilizar o Arena na modelagem de sistemas complexos.

O Arena® é uma plataforma de simulação e modelação, projetada para habilitar as organizações na análise detalhada e otimização dos seus processos de negócios. Dotado de uma interface intuitiva e características avançadas, o Arena® permite uma compreensão aprofundada dos fluxos de trabalho, a identificação de áreas de melhoria e a tomada de decisões focadas na otimização da eficiência operacional.

Através da combinação da elaboração de fluxogramas minuciosos com simulações de desempenho prospectivo, o Arena® oferece uma visão sobre a interação e funcionamento dos processos. O mesmo possibilita a modelação do trajeto das entidades - como pedidos, produtos ou informações - enquanto percorrem distintas fases do processo. Além disso, a capacidade de simulação viabiliza a análise de cenários hipotéticos variados, permitindo avaliar antecipadamente os impactos de mudanças antes de sua implementação no ambiente real.

O Arena® proporciona a representação visual de animações dinâmicas, refletindo o movimento das entidades ao longo do processo, o que contribui significativamente para a compreensão visual. Seu painel de relatórios disponibiliza análises pormenorizadas acerca dos tempos de processamento, gargalos, recursos necessários e outros parâmetros cruciais.

Independentemente de otimizar processos de produção, logística, serviços financeiros ou entre outros domínios empresariais, o Arena® apresenta-se como uma abordagem abrangente para a análise e otimização dos fluxos operacionais. Ao disponibilizar a exploração de vários cenários e a tomada de decisões fundamentadas em

dados às equipas de trabalho, o software emerge como uma ferramenta imprescindível para fomentar a inovação e alcançar a excelência operativa.

O software Arena® permite a incorporação do poder da modelação e simulação ao core de uma atividade empresarial. O mesmo foi meticulosamente concebido para analisar o impacto das mudanças que envolvem redesenhos significativos e mais complexos, relacionados a áreas como cadeias de abastecimento, manufatura, processos, logística, distribuição, armazenamento e sistemas de serviços. Com uma abordagem flexível e abrangente, o software Arena® permite a modelação a qualquer nível desejado de detalhe e complexidade, proporcionando a máxima adaptabilidade (Rockwell Software, 2000).

Dos cenários típicos contemplados, destacam-se:

- Análise minuciosa de vários sistemas de manufatura, incluindo componentes de manuseamento de materiais;
- Avaliação de sistemas complexos de atendimento e gestão de clientes;
- Estudo de cadeias globais de abastecimento, que abrangem sistemas de armazenamento, transporte e logística;
- Projeção do desempenho de um sistema com base em métricas essenciais, como custos, taxa de produção, tempos de ciclo e utilização;
- Detecção de gargalos nos processos, como acumulação de filas e excesso de utilização de recursos;
- Planeamento de pessoal, equipamentos e requisitos de materiais.

2.3.1 Princípios da Arena®

O software Arena® é amplamente reconhecido como uma ferramenta de simulação versátil, projetada para a modelação visual e interativa de processos complexos. A sua estrutura fundamental constitui a base sobre a qual modelos de simulação detalhados e esclarecedores podem ser construídos (Rockwell, 2000).

No cerne dessa abordagem de simulação no Arena® estão as Entidades e os Recursos. As Entidades representam elementos que percorrem o modelo, como pedidos, produtos ou pessoas, interagindo com os Recursos que englobam máquinas, estações de trabalho e veículos, desempenhando funções cruciais no processo analisado. A trajetória das Entidades no fluxo do modelo pode envolver solicitações, ocupações e libertações de Recursos, conforme definido pelo design da simulação (Rockwell, 2000).

O desenvolvimento das Entidades e dos Recursos com Atributos acrescenta camadas de informações ao modelo. Por exemplo, numa simulação de atendimento ao cliente, um Atributo pode representar o tempo médio de atendimento por cliente. Esses Atributos desempenham um papel central na influência da dinâmica da simulação, afetando o comportamento das Entidades e Recursos. Por sua vez, as Variáveis são valores numéricos que moldam o modelo. Elas capturam informações como o número de Entidades processadas, o tempo decorrido na simulação e outros dados relevantes, proporcionando uma melhor compreensão sobre o desempenho sistêmico ao longo do tempo (Rockwell, 2000).

O Arena® constrói o modelo através da utilização de módulos, elementos que representam etapas distintas do processo analisado. Desde a entrada de Entidades até ao processamento em máquinas específicas, esses módulos formam um fluxo lógico na simulação. A organização dos módulos é facilitada pelos painéis, similarmente à figura 7, que agrupam esses elementos para criar uma representação visual coesa do sistema global ou de segmentos específicos dentro dele (Rockwell, 2000).

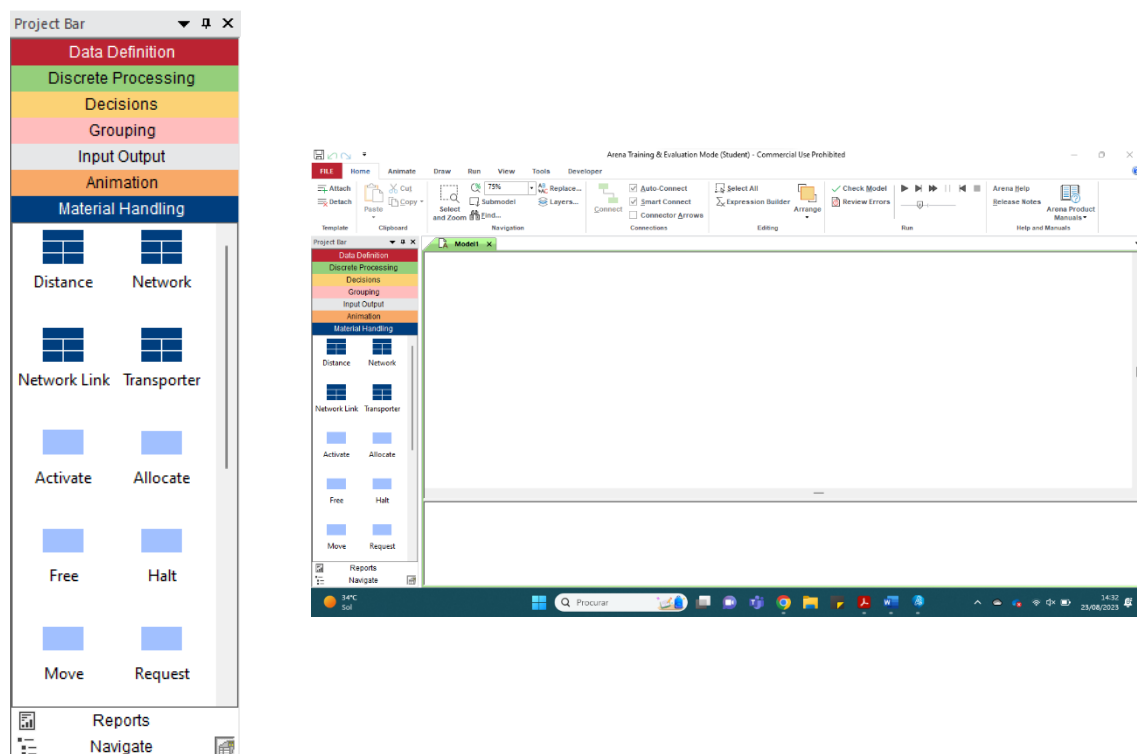


Figura 7. Interface do Arena.

Fonte: Elaboração própria

As tabelas 6 e 7 enumeram alguns dos módulos de fluxo essenciais para a construção do fluxograma que representa modelo de simulação, aquando da utilização do software (Rockwell, 2000).

Tabela 6. Módulos de Fluxo.

Módulos	Descrição
 Create <i>Create</i>	Este módulo é destinado como ponto de partida para as entidades. As entidades são criadas usando um agendamento ou com base num intervalo de tempo entre chegadas. Em seguida, as entidades deixam o módulo para iniciar o processamento pelo sistema. O tipo de entidade é especificado neste módulo.
 Dispose <i>Dispose</i>	Este módulo é destinado como ponto de término para as entidades. As estatísticas da entidade podem ser registadas antes que a entidade seja descartada.
 Process <i>Process</i>	Este módulo é o centro do processamento na simulação. Ele permite controlar recursos, usar lógica personalizada e definir o tempo de processamento da entidade, com seus os custos associados.
 Decide <i>Decide</i>	Este módulo ajuda o sistema a tomar decisões com base em condições específicas ou probabilidades. Pode haver dois resultados possíveis: verdadeiro ou falso. Se houver mais opções, cada uma terá seu próprio resultado. É útil quando o sistema precisa escolher entre diferentes caminhos com base em regras ou chances. Isso ajuda a automatizar tarefas e tornar o sistema mais eficiente.

Fonte: Adaptado de Rokwell (2000)

Tabela 7. Módulos de Fluxo (Continuação).

Módulos	Descrição
 Batch <i>Batch</i>	Este módulo serve para agrupar entidades. Os grupos podem ser permanentes ou temporários. Grupos temporários precisam ser separados mais tarde usando o módulo SEPARATE. Entidades que chegam ao módulo são colocadas em fila até que o número certo de entidades seja alcançado. Quando isso acontece, é criada uma entidade nova que representa o grupo.
 Separate <i>Separate</i>	Este módulo permite copiar uma entidade de entrada em várias entidades idênticas ou dividir uma entidade agrupada previamente. Também é possível definir regras para atribuir custos e tempos às cópias. Ao dividir um grupo existente, a entidade temporária formada é descartada e as entidades originais são recuperadas. Ao copiar, o número de cópias desejado é feito a partir do módulo, enquanto a entidade de entrada original também segue adiante.
 Assign <i>Assign</i>	Este módulo é usado para atribuir novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipos de entidades, imagens de entidades ou outras variáveis do sistema. Múltiplas atribuições podem ser feitas com um único ASSIGN.
 Record <i>Record</i>	Este módulo é usado para recolher estatísticas. Vários tipos de estatísticas observacionais estão disponíveis, incluindo o tempo entre saídas pelo módulo, estatísticas da entidade (tempo, custos, etc.), observações gerais e estatísticas de intervalo (de algum momento no tempo até o tempo atual da simulação). Um tipo de estatística de contagem também está disponível. Conjuntos de registros (<i>Tally</i>) e contadores (<i>Counter</i>) também podem ser especificados.

Fonte: Adaptado de Rokwell (2000)

Uma das maiores vantagens do Arena® é a sua abordagem visual, que elimina a necessidade de programação extensa. Essa abordagem intuitiva permite aos utilizadores criar modelos de simulação complexos. Além disso, o software oferece uma variedade de ferramentas para analisar os resultados da simulação, como gráficos e tabelas, que enriquecem e facilitam a compreensão do desempenho do sistema.

Em adição aos módulos de fluxo mencionados anteriormente, é imperativo destacar os módulos de dados, listados na tabela 8, que permitem introduzir na simulação a movimentação de Entidades entre processos ou estações de trabalho. Embora não visíveis na área de trabalho do software, pois não são usados na construção do fluxograma, esses módulos também estão disponíveis no painel *Project bar*.

Tabela 8. Módulos de Dados.

Módulos	Descrição
 Entity Entity	Este módulo define os diferentes tipos de entidades e seus valores iniciais de imagem. Informações de custo inicial e custos de espera também são definidos para a entidade.
 Queue Queue	Este módulo muda a forma como uma fila específica é organizada. A organização padrão de todas as filas é "Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair", a menos que seja alterado aqui. Também é possível definir a fila como compartilhada.
 Resource Resource	Neste módulo, definem-se os recursos, com custos, disponibilidade e capacidade fixa ou baseada num horário. Também se podem configurar falhas e estados dos recursos.
 Variable Variable	Neste módulo, define-se a dimensão e o valor inicial de variáveis. As variáveis podem ser usadas noutros módulos (por exemplo, o módulo DECIDE), podem receber novos valores com o módulo ASSIGN e ser utilizadas em expressões.
 Schedule Schedule	Este módulo é usado com o módulo RESOURCE para definir um cronograma de operação para um recurso ou com o módulo CREATE para definir um cronograma de chegada. Além disso, um cronograma pode ser usado para atrasos com base no tempo de simulação. Cronogramas formatados em duração são definidos neste módulo.
 Set Set	Neste módulo, são definidos tipos de conjuntos, como recursos, contadores, registos, tipos de entidades e imagens de entidades. Por exemplo, conjuntos de recursos são usados nos módulos de processo, enquanto conjuntos de contadores e registos são úteis no módulo de Registo. Estes conjuntos são ferramentas para gerir a simulação.

Fonte: Adaptado de Rockwell (2000)

Numa abordagem mais avançada, o Arena® oferece uma série de módulos avançados que ampliam ainda mais a sua capacidade de simulação. Estes módulos especializados, descritos nas tabelas 9 e 10, fornecem soluções para cenários complexos, como simulação de transportes contínuos, logística detalhada e alocação de recursos, permitindo que os profissionais enfrentem desafios do mundo real com confiança e precisão.

Tabela 9. Módulos Avançados

Módulos	Descrição
 Delay <i>Delay</i>	Este módulo retém uma entidade por um tempo definido. Quando uma entidade chega a este módulo, seu tempo de atraso é calculado usando uma expressão. A entidade aguarda no módulo pelo tempo calculado, e o módulo registra o tempo como valor acrescentado, não valor acrescentado, etc., além de calcular os custos.
 Dropoff <i>Dropoff</i>	Este módulo remove um número específico de entidades do grupo da entidade e as envia para outro módulo, conforme especificado por uma conexão gráfica. Atributos de valor definido pelo usuário do grupo e atributos internos podem ser atribuídos às entidades entregues com base numa regra especificada.
 Enter <i>Enter</i>	Este módulo define locais onde o processamento acontece. Quando uma entidade chega, pode haver atraso e dispositivos de transferência podem ser liberados. Cada local possui uma área de atividade para registrar tempos e custos das entidades.
 Hold <i>Hold</i>	Este módulo mantém uma entidade em espera. Pode esperar por um sinal, por uma condição específica para ser verdadeira ou ser mantida indefinidamente (será removida mais tarde com o módulo de remoção). Se esperar por um sinal, a entidade avança quando recebe o sinal em outro local do modelo. Se aguardar por uma condição, fica no módulo até a condição ser verdadeira. Quando a espera é indefinida, a entidade é liberada para continuar o processamento com o módulo de remoção em outra parte do modelo.
 Leave <i>Leave</i>	Este módulo move uma entidade para uma estação ou módulo. Isso pode ser feito de duas maneiras: referindo-se à estação e seguindo um caminho até ela, ou usando uma conexão direta para outro módulo. Quando a entidade chega ao módulo LEAVE, ela pode esperar por um dispositivo de transferência. Após obtê-lo, pode haver um atraso antes de ser movida para o próximo destino.
 Match <i>Match</i>	Este módulo junta um certo número de entidades de diferentes filas. Isso acontece quando há pelo menos uma entidade em cada fila desejada. Quando uma entidade chega, é colocada numa das até cinco filas, dependendo de onde veio. Assim que há uma entidade em cada fila, algumas são liberadas juntas.

Fonte: Adaptado de Rockwell (2000)

Tabela 10. Módulos Avançados (continuação).

Módulos	Descrição
 PickStation <i>PickStation</i>	Este módulo permite que uma entidade escolha uma estação entre várias opções com base em regras definidas. A entidade pode ser encaminhada, transportada ou conectada à estação escolhida. Isso depende de critérios como valores mínimos ou máximos de variáveis do sistema.
 Pickup <i>Pickup</i>	Este módulo retira um número de entidades consecutivas de uma fila específica, começando de uma posição determinada na fila. As entidades retiradas são adicionadas ao final do grupo da entidade que chegou.
 ReadWrite <i>Readwrite</i>	Este módulo é usado para ler dados de um arquivo de entrada ou do teclado e atribuir os valores a variáveis ou atributos. Também é usado para escrever dados em dispositivos de saída, como a tela ou um arquivo. A lógica varia com base no tipo de arquivo no Arena®.
 Release <i>Release</i>	Este módulo é usado para soltar recursos capturados por uma entidade. Pode ser para recursos individuais ou em grupo. Ao entrar no módulo, a entidade liberta os recursos especificados, permitindo que as entidades em fila os peguem imediatamente.
 Remove <i>Remove</i>	Este módulo tira uma entidade de uma fila e a envia para outro lugar. A entidade que causou a remoção segue para o próximo passo do processo.
 Route <i>Route</i>	Este módulo move uma entidade para uma estação específica ou para a próxima estação na sequência de visita da entidade. Pode haver um tempo de espera antes da transferência para a próxima estação. Quando uma entidade entra no módulo, sua <i>Entity.Station</i> atribuída é definida como a estação de destino. A entidade é então enviada para essa estação, com base no tempo de rota definido. Se a estação for definida como "Por Sequência", a próxima estação é decidida pela sequência e etapa da entidade.
 Seize <i>Seize</i>	Este módulo aloca recursos para uma entidade. A entidade espera em fila até que todos os recursos necessários estejam disponíveis ao mesmo tempo. O tipo de alocação também é definido.
 Station <i>Station</i>	Este módulo define locais onde ocorre o processamento. Pode definir várias estações ou um conjunto delas. Cada estação possui uma Área de Atividade correspondente para registrar tempos e custos das entidades. Se houver uma Área de Atividade pai, ela também registra esses dados.

Fonte: Adaptado de Rockwell (2000)

A combinação dos módulos principais e avançados do Arena® oferece uma abordagem abrangente para a modelação, análise e otimização de sistemas complexos por meio de simulações realistas e embasadas em dados (Rockwell Software, 2000).

É relevante salientar que apenas foram considerados alguns módulos, tendo em conta o âmbito do trabalho. No entanto, o Arena® disponibiliza uma ampla gama de ferramentas para criar simulações complexas e detalhadas. Estes módulos abordados fornecem numa base sólida para a modelação e análise, mas o software vai muito além, permitindo a construção de simulações altamente elaboradas que podem representar cenários realistas e processos intrincados. A sua capacidade de combinar módulos, atributos, recursos e regras complexas possibilita aos utilizadores explorar uma variedade de cenários, otimizar processos e tomar decisões fundamentadas em dados simulados. O Arena®, enquanto ferramenta de simulação robusta e versátil, continua a ser uma escolha poderosa para quem procura compreender, analisar e melhorar sistemas complexos através da simulação.

2.3.2 Distribuições estatísticas

O Arena® dispõe de um conjunto de funções incorporadas para a geração de números aleatórios, baseados em distribuições de probabilidade amplamente utilizadas. Estas distribuições estão disponíveis em menus suspensos em diversos módulos do Arena®, nos quais são comumente empregadas. Além disso, elas alinham-se com as distribuições presentes no *Arena® Input Analyzer*.

Cada uma das distribuições no Arena® é acompanhada por um ou mais valores de parâmetros associados. A especificação destes valores de parâmetros é fundamental para a definição completa da distribuição. A quantidade, o significado e a ordem dos valores de parâmetros variam conforme a distribuição em questão.

As tabelas 11 e 12 resumem as distribuições, em ordem alfabética, os seus respectivos parâmetros e as aplicações mais comuns.

Tabela 11. Distribuições do Arena®.

Distribuição	Parâmetros	Aplicações
Beta (BETA)	Beta, β Alpha, α	Esta distribuição é usada como um modelo simples quando não há dados. Também é usada para representar proporções aleatórias, como a percentagem de itens defeituosos num lote.
Contínua (CONT)	CumP1, Val1 CumPn, Valn	Esta distribuição é usada para colocar dados reais de variáveis contínuas diretamente no modelo. Isto é útil quando os dados têm padrões complexos ou valores extremos.
Discreta (DISC)	CumP1, Val1 CumPn, Valn	Esta distribuição é usada para colocar dados discretos reais no modelo. Isto é comum em casos como atribuições discretas, como o tipo de trabalho, a ordem de visitas ou o tamanho de um determinado grupo para algo.
Erlang (ERLA)	Média, β N.º de amostras, k	Esta distribuição é usada quando algo acontece em várias etapas e cada etapa tem um tempo previsível. Quando há muitas etapas, esta distribuição é parecida com uma distribuição normal. É comum usá-la para calcular quanto tempo uma tarefa demora. Esta distribuição é um tipo especial da distribuição gama, onde um número inteiro (k) define a forma da distribuição.
Exponencial (EXPO)	Média, β	Esta distribuição é usada para calcular intervalos de tempo entre eventos aleatórios, como chegadas e falhas. Isso é útil em negócios de serviços, como lojas ou centros de atendimento, onde o número de clientes varia ao longo do dia.
Gamma (GAMM)	Beta, β Alpha, α	Quando os parâmetros são números inteiros, a distribuição gama é igual à Erlang. Ela é usada para mostrar o tempo que se leva para terminar algo, como o tempo de operação ou de reparação de uma máquina.

Fone Adaptado de Rockwell (2000)

Tabela 12. Distribuição do Arena® (Continuação).

Distribuição	Parâmetros	Aplicações
Johnson (JOHN)	Gamma, γ Delta, δ Lambda, λ Xi, ξ	Esta distribuição é flexível e pode ser ajustada a muitos conjuntos de dados. No software, podem ser escolhidas duas formas da distribuição: ilimitada ou limitada. Se o Delta (δ) for positivo, é usada a forma limitada. Se for negativo, usa-se ilimitada, com o valor absoluto de δ como parâmetro.
Lognormal (LOGN)	Média, μ Desvio Padrão, σ	Esta distribuição é usada quando se multiplicam muitos números aleatórios para obter um resultado. Também é usada para representar tempos de tarefas que tendem a ser mais longos.
Normal (NORM)	Média, μ Desvio Padrão, σ	Esta distribuição é usada quando se tem somas de quantidades diferentes, de acordo com o teorema do limite central. Também é usada empiricamente para processos que parecem ter uma forma simétrica. No entanto, só deve ser usada para quantidades positivas, como tempos de processamento.
Poisson (POIS)	Média, λ	Esta distribuição é usada para contar eventos aleatórios num intervalo de tempo fixo. Se os eventos ocorrem com um espaço de tempo exponencial, a distribuição é aplicada. Também é usada para calcular tamanhos aleatórios de grupos.
Triangular (TRIA)	Mínimo, a Provável, m Máximo, b	Esta distribuição é usada quando não se conhece exatamente como algo é distribuído, mas há dados sobre os valores mínimo, máximo e mais provável.
Uniforme (UNIF)	Mínimo, a Máximo, b	Esta distribuição é usada quando todos os valores num intervalo têm a mesma probabilidade. É usada quando não há muita informação além do intervalo. Ela tem uma variabilidade maior que as outras distribuições usadas quando não se sabe muito (como a distribuição triangular).
Weibull (WEIB)	Beta, β Alpha, α	Esta distribuição prevê quanto tempo um dispositivo vai durar. Se um sistema tem partes que podem falhar independentemente e o sistema falha quando qualquer parte falha, a Weibull estima o tempo entre essas falhas. Também é usada para calcular tempos de tarefas que não são negativos e costumam ser mais curtos.

Fonte: Adaptado de Rockwell (2000)

Mais detalhes sobre os intervalos, médias e variâncias podem ser encontrados em anexo, na tabela A1.

2.3.3 Vantagens e desvantagens do software Arena®

Com base na avaliação realizada pela Critical Manufacturing em 2014, o software Arena® apresenta tanto vantagens quanto desvantagens notáveis.

Entre as vantagens, destaca-se a extensa documentação disponível no mercado, o que torna sua utilização mais acessível e compreensível. Além disso, o software Arena® é compatível com dados ODBC (*Open Database Connectivity*), proporcionando flexibilidade para a integração com outros sistemas e facilitando a troca de informações. Outro ponto positivo são os recursos avançados de automação e a capacidade de recolha de estatísticas, o que o torna uma ferramenta valiosa para análises detalhadas e otimização de processos. Além disso, o software pode ser personalizado e adaptado para atender a necessidades específicas, o que é uma vantagem significativa para atender aos requisitos específicos da empresa.

No entanto, algumas desvantagens também foram identificadas. O software Arena® não oferece suporte à comunicação WCF (*Windows Communication Foundation*), o que pode limitar a sua capacidade de interação com determinadas tecnologias e sistemas. Além disso, a interface de utilizador foi considerada pouco intuitiva e apresenta baixa qualidade gráfica, o que pode dificultar a utilização e a experiência do utilizador.

Outro aspeto a considerar é que a importação de desenhos do AutoCad para simulação pode consumir recursos significativos do computador, afetando o desempenho geral do sistema. A limpeza no software Arena® também é apontada como um desafio, tornando a resolução de problemas potencialmente complicada. Por fim, vale ressaltar que, entre as opções disponíveis, o software Arena® é considerado o mais caro, o que pode ser um fator a ser ponderado em relação a custos e benefícios.

O quadro da tabela 13 resume as observações referidas previamente.

Tabela 13. Vantagens e Desvantagens de Arena®.

Vantagens	Desvantagens
Ampla documentação disponível no mercado, facilitando a utilização.	Ausência de suporte à comunicação WCF, o que pode limitar a interação com determinadas tecnologias.
Compatibilidade com dados ODBC, o que proporciona flexibilidade para integração com outros sistemas.	Interface de usuário considerada pouco intuitiva e com baixa qualidade gráfica, afetando a usabilidade.
Recursos avançados de automação e coleta de estatísticas para análises detalhadas.	Consumo significativo de recursos do computador ao importar desenhos do AutoCad para simulação.
Possibilidade de personalização para atender a necessidades específicas	Dificuldades na depuração, tornando a resolução de problemas problemática.
	Custo mais elevado em comparação com outras opções disponíveis.

Fonte: Adaptado de Critical Manufacturing (2014)

Em resumo, o software Arena® oferece funcionalidades avançadas e personalização, mas também apresenta limitações, especialmente no que diz respeito à interface do utilizador e à comunicação com determinadas tecnologias. A sua escolha pode depender das necessidades específicas do utilizador final e das prioridades em relação a funcionalidades e custos.

2.4 Análise Custo-Benefício (ACB)

A análise custo-benefício, uma ferramenta essencial na tomada de decisões relacionadas a projetos de investimento, tem uma história que remonta ao século XIX. Foi inicialmente proposta pelo engenheiro francês Jules Dupuit no século XIX, com o intuito de avaliar a utilidade de obras públicas. Posteriormente, o economista britânico Alfred Marshall impulsionou seu uso em projetos de obras públicas (Paes, 2019).

No contexto dos Estados Unidos, a análise de custo-benefício tornou-se mais proeminente com a Lei Federal da Navegação de 1936, que tornou obrigatória a análise desse tipo para projetos desenvolvidos pelo U.S *Corps of Engineers*. A Lei de Controlo de Inundações de 1939 foi um marco fundamental, exigindo que os benefícios superassem os custos estimados ao longo do ciclo de vida do projeto (Paes, 2019).

Foi apenas na década de 1950, segundo Fonseca (2014), que os economistas começaram a desenvolver métodos mais rigorosos para medir os benefícios e os custos de forma consistente, tornando a análise custo-benefício uma ferramenta valiosa para avaliar a viabilidade de projetos.

Nos anos seguintes, a análise custo-benefício foi incorporada em programas regulamentares e políticas públicas, como a Lei Nacional de Política Ambiental de 1969 nos Estados Unidos. Na década de 1980, embora tenha havido críticas quanto à sua implementação, a análise custo-benefício continuou a ser amplamente utilizada em avaliações de projetos de grande envergadura e se tornou um requisito essencial para o cofinanciamento em regulamentos da União Europeia (Fonseca, 2014).

Em resumo, a análise custo-benefício é uma metodologia que evoluiu ao longo do tempo e se tornou uma ferramenta fundamental na avaliação de projetos de investimento, contribuindo para uma alocação mais eficiente de recursos em uma variedade de setores, incluindo saúde, meio ambiente e infraestrutura (Soares, 2019).

2.4.1 Principais conceitos da ACB

A ACB é uma metodologia essencial para avaliar o impacto económico líquido de um projeto de investimento. Este método de avaliação, mencionado por Paes (2019) pode ser aplicado numa ampla variedade de intervenções, incluindo reformas regulatórias, novas políticas de tributação e investimentos em projetos privados. O objetivo central da ACB é determinar a viabilidade de um projeto por meio da análise dos custos e benefícios associados, descontados ao longo do tempo.

Independentemente do contexto de aplicação, a ACB tem como objetivo calcular a rentabilidade económica de um projeto, prevendo seus efeitos económicos e quantificando-os. A mesma permite formular uma opinião fundamentada sobre o desempenho esperado do projeto, no entanto, é importante destacar que tanto os custos quanto os benefícios devem ser analisados de forma incremental, levando em consideração diferentes cenários e objetivos predefinidos para o projeto. Além disso, a análise de risco desempenha um papel crucial na ACB, uma vez que ajuda a compreender melhor os impactos e a desenvolver estratégias de gestão de risco sólidas (Paes, 2019).

Uma das principais vantagens da ACB em relação a outras técnicas contábeis de avaliação é a consideração das distorções nos preços. Isso significa que a ACB tem em consideração os efeitos de políticas públicas, como impostos, que podem afetar os resultados financeiros do projeto (Soares, 2019).

Soares (2019) refere que a ACB é dividida em duas etapas principais: a análise privada e a análise social, detalhadas no quadro da tabela 14.

Tabela 14. Etapas da Análise ACB.

Análise Privada	Análise Social
Os custos e benefícios financeiros do projeto são avaliados com base em políticas públicas e preços de mercado. Isso envolve considerar os custos e benefícios para os investidores ou acionistas do projeto.	Os custos e benefícios são analisados sem a valorização do impacto das políticas públicas, e os preços podem ser ajustados para refletir preços de eficiência ou preços sombra. Esta análise concentra-se nos custos e benefícios que o projeto trará para a sociedade como um todo.

Fonte: Adaptado de Soares (2019)

Para calcular os benefícios sociais, a ACB utiliza conceitos como o excedente do consumidor e o excedente do produtor (Soares, 2019):

- **Excedente do consumidor** representa a diferença entre o valor que os consumidores pagam por um bem ou serviço e o valor que estão dispostos a pagar por ele;
- **Excedente do produtor** é a diferença entre o preço de mercado de um bem ou serviço e seu custo de produção.

A ACB visa maximizar o excedente total, que é a soma dos excedentes do consumidor e do produtor. No entanto, a análise também precisa considerar fatores subjetivos e não quantificáveis, como externalidades (impactos indiretos do projeto sobre terceiros), distorções de mercado e a dificuldade de medir o valor económico de bens públicos (Soares, 2019).

2.4.2 Tempo e Atualização

Aquando de uma análise ACB é importante a consideração do tempo e a atualização (ou desconto) dos fluxos de custos e benefícios ao longo do tempo. Isto é realizado convertendo os fluxos futuros de custos e benefícios num valor presente usando uma taxa de atualização/desconto (Dunn, 2009).

A escolha da taxa de atualização/desconto é uma decisão subjetiva e a sua magnitude tem um impacto significativo na avaliação de intervenções com efeitos a longo prazo. Uma taxa de desconto menor implica dar um valor maior às futuras gerações, equiparando-o ao valor da geração atual. Por outro lado, taxas mais elevadas, como as

taxas de retorno de mercado, refletem a tendência humana de valorizar mais o dinheiro recebido hoje do que no futuro. Esta escolha da taxa de desconto tem implicações cruciais, especialmente ao lidar com questões de longo prazo, como as mudanças climáticas (Newell, 2003).

Uma questão complexa que surge é o chamado "enigma do prêmio de rendibilidade das ações" (*equity premium puzzle*). Isto deve-se ao fato de que a rendibilidade de longo prazo das ações é consideravelmente mais alta do que seria esperado. Se essa disparidade persistir, há um argumento convincente de que as taxas de retorno de mercado não devem ser usadas como base para determinar a taxa de atualização/desconto, uma vez que isso resultaria na subvalorização do futuro distante. Tal conceito é particularmente relevante quando se considera o impacto de eventos futuros, como as implicações das mudanças climáticas, que têm um impacto significativo nas gerações futuras (Newell, 2003).

A escolha da taxa de atualização é uma decisão que envolve ponderar o valor relativo do presente e do futuro, com implicações profundas para a tomada de decisões em uma ampla gama de áreas. Portanto, a consideração cuidadosa da taxa de desconto é essencial para garantir que as avaliações de custos e benefícios sejam justas e equitativas ao longo do tempo.

2.4.3 Risco e Incerteza

Na Análise Custo-Benefício (ACB), o tratamento do risco associado às previsões de um projeto é uma consideração crítica. Geralmente, a abordagem para lidar com o risco é baseada na teoria das probabilidades. Embora a taxa de atualização possa ser ajustada para refletir o risco (ou seja, aumentar à medida que o horizonte temporal se estende, incorporando uma crescente incerteza ao longo do tempo), muitas vezes o risco é tratado como um elemento separado na análise. É importante notar que a aversão ao risco também desempenha um papel significativo neste contexto e as pessoas tendem a preferir evitar uma perda de valor equivalente a assumir um ganho da mesma magnitude, mesmo que essa preferência possa ser considerada irracional (Campbell & Brown, 2003).

A incerteza relacionada aos parâmetros da ACB, que difere do risco associado à falência do projeto ou a eventos inesperados, pode ser avaliada de várias maneiras. Uma abordagem comum é a análise de sensibilidade, que examina como os resultados do projeto respondem a variações nos parâmetros-chave. Isto envolve a realização de análises "e se" para entender como é que as mudanças nas premissas afetam as conclusões

da ACB. Esta análise ajuda a identificar que parâmetros têm o maior impacto nas conclusões e onde a incerteza é mais crítica (Campbell & Brown, 2003).

Uma abordagem mais formal para avaliar a incerteza é a utilização de simulações de Monte Carlo. Neste método, são gerados milhares de cenários possíveis com base em distribuições de probabilidade para os parâmetros da ACB. Cada cenário é uma iteração que simula uma possível trajetória futura. A partir dessas simulações, é possível criar distribuições de probabilidade para os resultados da ACB, fornecendo uma visão mais completa da incerteza associada ao projeto. Isto permite uma análise mais robusta do risco, levando em consideração não apenas variações pontuais, mas a gama completa de resultados possíveis (Campbell & Brown, 2003).

2.4.4 Vantagens e Desvantagens da ACB

Apesar de ser uma ferramenta valiosa para a avaliação de projetos, a ACB também possui limitações importantes (Soares, 2019). A tabela 15 enumera as vantagens e desvantagens da análise custo-benefício, identificadas por Soares (2019).

Tabela 15. Vantagens e Desvantagens da ABC.

Vantagens	Desvantagens
Permite distinguir várias opções de projeto, facilitando a escolha do projeto de investimento.	Dificuldade em estimar os custos e benefícios externos ao projeto.
Contribui para uma tomada de decisão mais transparente à conveniência do projeto de investimento.	Não considera os efeitos do retorno de custos e benefícios não conversíveis em moeda
Incentiva a identificação dos reais custos e benefícios econômicos, mesmo que não estejam expressos na mesma moeda.	

Fonte: Adaptado por Soares (2019)

2.4.5 Etapas da ACB

A Comissão Europeia (2011) enumera uma série de etapas bem definidas da ACB para garantir uma avaliação abrangente e precisa de um projeto:

1. **Descrição do Contexto:** O primeiro passo é entender o contexto em que o projeto será implementado. Isso inclui identificar as necessidades que o projeto visa atender e os desafios que ele enfrentará.

2. **Definição de Objetivos:** É crucial estabelecer metas claras para o projeto. O que se espera alcançar com a sua execução? Os objetivos devem ser mensuráveis e específicos.
3. **Identificação do Projeto:** O terceiro passo envolve a identificação detalhada do projeto em si. Isso inclui a sua natureza, âmbito e todas as partes envolvidas.
4. **Viabilidade Técnica:** A viabilidade técnica avalia se o projeto pode ser realizado com os recursos e tecnologias disponíveis.
5. **Análise Financeira/Privada:** Neste estágio, os custos diretos e benefícios financeiros associados ao projeto são calculados e comparados.
6. **Análise Económica/Social:** Além dos aspetos financeiros, a ACB também considera os impactos económicos e sociais do projeto. Isso inclui fatores externos, como efeitos ambientais e sociais.
7. **Avaliação de Risco/Análise de Sensibilidade:** A incerteza é inerente a qualquer projeto. Portanto, a ACB realiza uma avaliação de riscos e uma análise de sensibilidade para entender como variações nas variáveis-chave podem afetar os resultados.

2.4.6 Indicadores-Chave na ACB

A Análise Custo-Benefício (ACB) desempenha um papel central, sendo uma ferramenta vital para avaliar o mérito de projetos propostos. Dentro desse contexto, a Análise Financeira emerge como uma componente crítica da ACB, permitindo avaliar a viabilidade financeira, a rentabilidade e a sustentabilidade de tais projetos (União Europeia, 2013).

A análise financeira tem como objetivo determinar a capacidade de um projeto de gerar retorno financeiro. Isto é realizado através do cálculo do Valor Atual Líquido (VAL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). Estes indicadores são essenciais para determinar se o projeto é economicamente viável e se é capaz de recuperar o investimento inicial (Artigo 101.º, n.º 1, alínea e) do Regulamento (UE) n.º 1303/2013)

Valor Atual Líquido (VAL)

O VAL é uma métrica mencionada por Brealey, Myers, e Allen (2014) que representa a diferença entre o valor presente das entradas de caixa (receitas) e o valor presente das saídas de caixa (custos e despesas) ao longo do tempo. Um VAL positivo indica que o projeto é economicamente viável. O cálculo do VAL pode ser expresso na equação (1):

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+t)^i} \quad (1)$$

Onde:

- CF representa o fluxo de caixa em um determinado período (i);
- i refere-se ao período específico no tempo em que os fundos serão investidos no projeto, começando no período 1, que marca o primeiro fluxo de caixa efetivo;
- n denota o número total de períodos (t);
- t representa a taxa de custo de capital.

Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é outra métrica importante destacada pelos mesmos autores. Esta representa a taxa de desconto que torna o VAL do projeto igual a zero. Se a TIR for maior do que a taxa de desconto exigida, o projeto é considerado viável (Brealey *et al.*, 2014). O cálculo do TIR pode ser expresso pela equação (2):

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+t)^i} = 0 \quad (2)$$

Rácio Custo-Benefício (RCB)

O RCB compara os benefícios totais com os custos totais. Este é definido pelo VAL dos benefícios do projeto dividido pelo VAL dos custos do projeto: (União Europeia, 2015). Um RCB maior que 1 sugere que os benefícios superam os custos e, por sua vez, o projeto é economicamente atrativo. (Soares, 2019). A fórmula geral para o cálculo do rácio custo-benefício é expressa pela equação (3):

$$RCB = \frac{VAL_{Benefícios}}{VAL_{Custos}} \quad (3)$$

Onde:

- VAL dos Benefícios se refere ao valor presente de todos os benefícios esperados que serão gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil. Estes

benefícios podem incluir receitas adicionais, economias de custos, e outros impactos positivos que resultam da implementação do projeto; e

- *VAL dos Custos* se refere ao valor presente de todos os custos associados à concepção, implementação e operação do projeto. Isto inclui custos de investimento inicial, custos operacionais contínuos, custos de manutenção, e quaisquer outros gastos relacionados ao projeto.

Num mundo de recursos limitados, a ACB desempenha um papel crucial na alocação eficiente de recursos para projetos que beneficiarão a sociedade como um todo

2.4.7 A relação entre ACB e a emergente tecnologia 5.0

A interseção entre a análise de ACB e a tecnologia 5.0 é um território ainda pouco explorado na literatura, dado que a tecnologia 5.0 é um conceito relativamente novo. No entanto, é possível vislumbrar algumas maneiras pelas quais estes dois campos se podem relacionar e potencialmente transformar a forma como os projetos são avaliados.

Primeiramente, tem-se a análise de dados avançada. A tecnologia 5.0 traz consigo a integração de tecnologias de ponta, como a IoT, IA e *Big Data*, que prometem melhorar substancialmente a qualidade e a quantidade de dados disponíveis para a análise de viabilidade financeira. A análise de dados avançada pode proporcionar perspetivas mais precisas e detalhadas sobre os fluxos de caixa futuros e os riscos associados a um projeto. Outra forma é por meio do desenvolvimento de modelos preditivos. Com o auxílio da IA e de *Machine Learning*, torna-se possível criar modelos preditivos mais sofisticados para a análise de viabilidade financeira. Estes modelos podem levar em consideração uma ampla gama de variáveis e cenários possíveis, tornando as projeções financeiras mais robustas e confiáveis. Além disso, a tecnologia 5.0 tem o potencial de elevar a análise de risco a um patamar superior, através da simulação de cenários complexos e a avaliação em tempo real dos riscos envolvidos. Isto pode auxiliar na tomada de decisão, com a compreensão mais profunda das implicações financeiras de eventos inesperados e incertezas.

A automatização de tarefas rotineiras é outra área em que a tecnologia 5.0 pode fazer a diferença. Isto envolve a recolha e o processamento de dados de forma automatizada, o que economiza tempo e recursos no processo de análise de viabilidade financeira. Desta forma, os analistas podem concentrar-se em tarefas mais estratégicas, como a interpretação dos resultados e a formulação de estratégias. A tomada de decisão baseada em dados também se beneficia da tecnologia 5.0, que facilita a integração de

análises financeiras avançadas nas decisões de investimento. Os responsáveis pela tomada de decisão têm acesso a informações atualizadas em tempo real e análises detalhadas para fundamentar as suas decisões. Por fim, a tecnologia 5.0 também promove a transparência e sustentabilidade em projetos financeiros, tendo em vista a rastreabilidade e o entendimento do impacto financeiro de práticas sustentáveis e éticas, o que é cada vez mais importante num mundo preocupado com questões ambientais e sociais.

É fundamental realçar que a adoção da tecnologia 5.0 na ACB também carrega desafios significativos, como questões de segurança de dados e a necessidade de adquirir competências técnicas avançadas. Portanto, cabe aos profissionais se adaptarem e adquirirem o conhecimento sobre essas tecnologias emergentes para aproveitar ao máximo os seus benefícios e enfrentar os desafios com eficácia. A convergência entre esta análise e tecnologia 5.0 é um campo interessante que visa transformar a maneira como são realizadas avaliações financeiras e as decisões estratégicas são tomadas.

2.4.8 Considerações finais

A Análise Custo-Benefício é uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões informadas sobre projetos que permite que governos, empresas e organizações determinem se um projeto é viável do ponto de vista financeiro, económico e social. Ao seguir os passos da ACB e usar indicadores-chave, é possível avaliar projetos com precisão. Além disso, a análise social garante que os impactos não monetários também sejam considerados.

3 Caso de estudo

Este capítulo tem como objetivo fornecer uma análise detalhada do processo produtivo da empresa, abrangendo sua descrição, do produto e do processo produtivo, bem como a modelação dos cenários atual e de melhoria. Além do mais, procura-se realizar uma discussão crítica e aprofundada dos resultados obtidos na simulação, identificando áreas de oportunidade, gargalos e estratégias de otimização para aperfeiçoar a eficiência operacional.

3.1 Objetivo

O objetivo principal deste caso de estudo, adaptado de um trabalho anterior de outro autor, é analisar o impacto da Tecnologia 5.0 no processo produtivo de uma empresa especializada na manufatura de cilindros hidráulicos. A empresa opera no sistema *make-to-order*, onde a produção é baseada em pedidos específicos dos clientes, utilizando um sistema de fabrico de peças discreto.

Este estudo visa compreender de que maneira as tecnologias da Indústria 5.0 podem otimizar a eficiência e produtividade da empresa, especialmente no processo produtivo de manufatura e no revestimento das hastes de pistão que tem como objetivo aumentar a resistência do material às condições atmosféricas e forças de atrito, contribuindo para melhorar o desempenho dos cilindros hidráulicos.

3.2 Contexto

A empresa selecionada para o estudo é um fabricante de cilindros hidráulicos e realiza todas as operações de fabrico internamente, exceto o processo de "Cromagem" das hastes dos pistões. Não obstante ao processo terceirizado, este ainda se mostra essencial para a qualidade final dos cilindros hidráulicos. Adicionalmente, a empresa também demonstrou interesse em aprimorar as operações de endurecimento superficial e retificação de outros produtos, indicando a possibilidade de expandir suas atividades.

Conforme destacado anteriormente, a empresa especializada no fabrico de cilindros hidráulicos foi selecionada como objeto de estudo, tendo em vista sua política de produção por encomenda (*make-to-order*) e a mesma apresenta no seu portfólio, uma diversificada gama de produtos, discriminados nas figuras A1, A2, A3 e A4 anexadas. Dentro desse contexto, foi escolhido o processo de manufatura do tipo de cilindro mais

solicitado, caracterizado pelo diâmetro interno do barril de Ø100 mm e um curso de 500 mm. Importa ressaltar que a empresa ostenta a capacidade de fabricar variados tipos de cilindros, abrangendo desde um diâmetro externo mínimo de Ø63 mm até um máximo de Ø300 mm, com comprimentos que alcançam até 2200 mm.

3.2.1 Descrição do cilindro

A figura 8 ilustra o cilindro hidráulico produzido escolhido para o presente estudo.

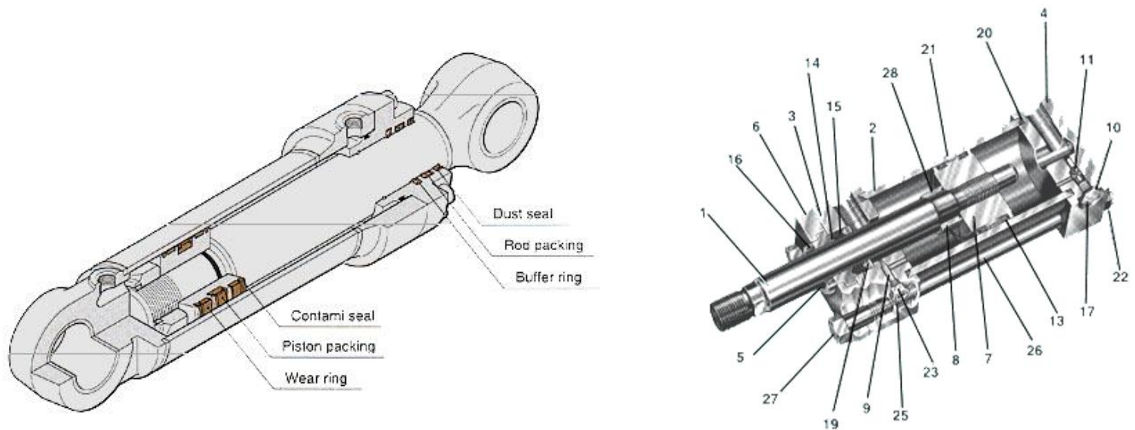


Figura 8. Constituição do cilindro hidráulico.

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

O conjunto de peças padronizadas para os cilindros hidráulicos é enumerado, na tabela 16.

Tabela 16. Lista de partes que constituem o cilindro.

#	Descrição	#	Descrição	#	Descrição
1	Haste	11	Esfera de verificação	21	Andel de desgatse
2	Barril	12	N/A	22	Porca de fixação da haste
3	Tampa extremidade da cabeça	13	Vedante “V” do bloco	23	Anel de vedação para o armotecedor
4	Tampa extremidade da base	14	Conjuntos de anéis “V”	24	N/A
5	Bucha da haste	15	Anilha de vedação	25	Porca de aperto
6	Placa do retentor	16	Limpa haste	26	Haste de amarração
7	Pistão	17	Anel de vedação “O” para reterer da esfera	27	Parafuso autrotravante de cabeça sextavada
8	Êmbolo amortecedor	18	N/A	28	Anel de vedação para o amortecedor flutuante
9	Agulha de ajuste do armotecedor	19	Mola ondulada		
10	Retentor da esfera de verificação	20	Anel de vedação para o barril		

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

Dos itens enumerados, para o presente estudo foram consideradas as partes principais que constituem o cilindro: a haste do pistão, o próprio pistão, o barril do cilindro, a tampa da extremidade da cabeça e a tampa da extremidade da base.

3.2.2 Descrição do processo de manufatura

O processo produtivo da empresa de cilindros é composto por várias operações de fabrico essenciais, descritas posteriormente. Essas etapas são cruciais para garantir a qualidade e o desempenho dos cilindros fabricados pela empresa.

Torneamento

Nesta etapa, são utilizadas quatro tornos universais e um torno de Comando Numérico Computadorizado (CNC). O torno CNC possui vantagens como tempos de configuração mais baixos e maior velocidade operacional, que reduz o tempo de operação em, aproximadamente, três vezes menos, comparativamente aos outros tornos. Esses tornos são utilizados para as operações de preparação das bordas soldadas, torneamento bruto, roscagem e operações de ranhura. As operações de torneamento contam com cinco técnicos.

Soldadura

Soldadura de diferentes tipos de rolamentos às hastes dos pistões, de acordo com as especificações dos clientes e a área de uso do cilindro hidráulico. Um operador de soldagem trabalha com uma máquina de solda *Metal Gas Arc Welding* (MGAW)

Tratamento térmico

O tratamento térmico tem como finalidade obter uma superfície resistente e dura, especialmente para peças expostas a condições de trabalho severas. Na empresa, existe uma máquina de endurecimento superficial por indução, com frequência de 10 kHz e potência de 200 kW. As hastes dos pistões dos cilindros hidráulicos devem ser endurecidas antes da operação de retificação. Se solicitado, outros produtos, como engrenagens (com módulo de 5-40 e diâmetro entre 25-3000 mm), pinos, buchas, carretéis, equipamentos automotivos (com comprimento de 30-3000 mm), etc., também podem ser endurecidos por meio de uma máquina de endurecimento por indução. Existe um técnico para operar com esta máquina.

Retificação

Esta operação tem como objetivo obter uma superfície lisa das hastes dos pistões, antes de serem enviados para cromagem. Existe uma máquina de retificação cilíndrica

com capacidade de Ø280x2000 mm e potência de 6 kW. Um técnico trabalha com essa máquina para realizar a retificação dos cilindros hidráulicos.

Cromagem

Após a operação de retificação, as hastes dos pistões são enviadas para cromagem. Esta operação tem a finalidade de as proteger contra condições atmosféricas mais severas e com caracter corrosivo. Visto que a empresa não possui capacidade de realizar esta operação internamente, as hastes são enviadas para outra empresa externa que realiza a respetiva operação.

Corte

O processo de corte de tubos é realizado por meio de uma serra de fita com altura máxima de corte de 920 mm. O comprimento do cilindro é ajustado de acordo com o comprimento do curso.

Polimento

A máquina de polimento foi projetada e fabricada internamente pela empresa, podendo operar em barris de cilindro com diâmetro de 300 mm e comprimento de 2200 mm. A velocidade máxima do fuso da máquina pode alcançar 450 rotações por minuto e permite a montagem de vários cabeçotes de polimento (com diâmetros de furo de 30 a 300 mm) ao seu fuso. Através desta máquina é obtida uma superfície interna bem lisa, que proporciona um melhor contato entre as vedações. Para a operação desta máquina existe um operador.

Furação

O barril do cilindro deve ser perfurado e um mecanismo deve ser montado para fornecer o fluxo de óleo entre as lacunas. Esse mecanismo ajusta o movimento dos cilindros hidráulicos. Os tipos de cilindros hidráulicos podem ser divididos em dois grupos, de acordo com seus tipos de movimento: cilindros hidráulicos de simples ou dupla ação. Nos cilindros de simples ação, o retorno do movimento da haste do pistão é feito pelo peso da construção, enquanto nos cilindros de dupla ação, o movimento da haste do pistão é feito por meio de bombas. Essas bombas geralmente são montadas na máquina onde os pistões são utilizados. Os operadores da máquina controlam o movimento dos pistões hidráulicos alimentando óleo para as lacunas usando essas bombas.

A tabela 17 ilustra a alocação dos trabalhadores pelas operações anteriormente descritas.

Tabela 17. Alocação dos operadores.

Operações vs operadores	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Torneamento	X	X	X	X	X				
Retificação						X			
Tratamento térmico									X
Corte/Serra	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Polimento							X		
Engenho de Furar	X	X	X	X	X	X	X		
Soldadura								X	
Limpeza	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Montagem	X	X	X	X	X	X	X		

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

Neste processo produtivo, é importante salientar a polivalência dos operadores, ou seja, a capacidade do mesmo operador desempenhar diferentes tarefas. Apesar da flexibilidade dos trabalhadores, as operações de retificação, tratamento térmico, polimento e soldadura são executadas exclusivamente pelos operadores 6, 9, 7 e 8, respectivamente.

O horário de trabalho definido é das 8:00 às 18:00, com um intervalo de almoço de 30 minutos. Se o intervalo de almoço ocorrer antes que o trabalhador termine seu trabalho, ele faz sua pausa de 30 minutos após concluir o trabalho.

A seleção do tipo de cilindro e a identificação de suas partes principais deu origem a um processo de fabrico claro e linear, ilustrado pela figura 9.

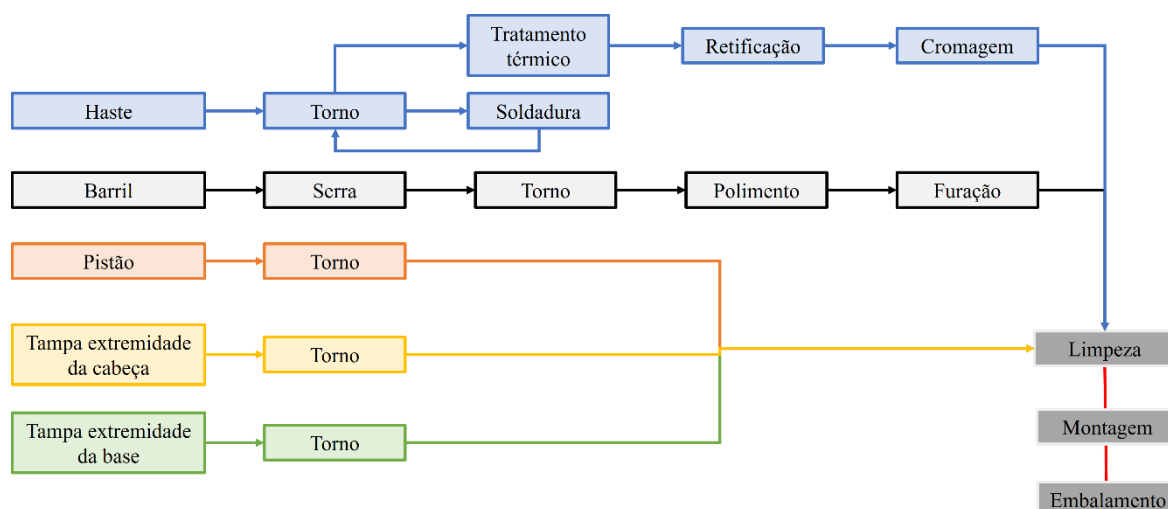


Figura 9. Fluxo de operações para cada parte do cilindro

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

Os tempos de maquinação foram obtidos junto aos operários ou mediante a utilização de um cronômetro. Convém salientar que, normalmente, os intervalos de tempo exatos de processo não devem ser extraídos diretamente dos operadores, mas sim recorrendo a diferentes fórmulas de distribuição, de modo a constituir uma solução adequada. A distribuição triangular, dada sua flexibilidade, emergiu como a alternativa mais propícia para modelar os tempos das operações. Tal abordagem é amplamente adotada quando se dispõe de estimativas ou pressupostos para os valores mínimo, máximo e mais provável da distribuição, enquanto sua forma precisa permanece incerta.

Os operadores, por sua vez, têm a capacidade de fornecer as estimativas de tempos máximos e mínimos de processamento. Por meio dessa distribuição, a plataforma ARENA® permitiu o cálculo das médias representativas para os tempos de operação. No âmbito dessa aplicação inicial, a unidade base de tempo adotada foi o minuto.

Adicionalmente, é imperativo considerar os momentos de chegada, os intervalos de transferência, os tempos de preparação das entidades e os horários de atividade. Apesar de prevalecer a utilização de empilhadores para a movimentação manual, é válido mencionar que a oficina também dispõe de duas pontes rolantes. Os valores pertinentes aos intervalos de tempo (mínimo, médio e máximo) de transporte foram estabelecidos por meio de observações com cronômetro.

A tabela 18 mostra a distribuição dos tempos de processo por operação tendo em contas os respectivos componentes do cilindro hidráulico.

Tabela 18. Distribuição dos tempos de processamento de cada parte, por operação

	Haste	Pistão	Barril	Tampa Cabeça	Tampa Base
	Em minutos				
Torneamento	TRIA (7, 10, 15) TRIA (70, 80, 110)	TRIA (54, 60, 75)	TRIA (130, 145, 155)	TRIA (120, 150, 165)	TRIA (15, 20, 25)
Retificação	TRIA (22, 25, 32)				
Tratamento térmico	TRIA (8, 10, 13)				
Corte/Serra			TRIA (7, 10, 12)		
Polimento			TRIA (60, 75, 80)		
Furação			TRIA (5, 10, 12)		
Soldadura	TRIA (13, 15, 21)				
Cromagem	TRIA (360, 710, 1080)				
Limpeza	TRIA (10, 15, 20)				
Montagem	TRIA (30, 45, 60)				

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

3.3 Modelação do processo produtivo atual

Neste subcapítulo, é explorada a utilização do software ARENA® no âmbito da simulação para modelar o processo de fabrico. Através desta simulação, foi possível acompanhar as etapas do processo e compreender de que forma se poderia tornar o mesmo mais eficiente.

3.3.1 Cenário atual

A simulação do primeiro cenário permitiu entender os fluxos, os tempos e os desafios enfrentados na realidade da produção, servindo para, posteriormente, aprimorar

os procedimentos e maximizar a eficiência de todo o processo. Cada etapa do processo foi representada por uma série de módulos e ações, resultando numa simulação abrangente do fluxo de trabalho.

Inicialmente, o módulo CREATE, ilustrado pela figura 10, foi empregue com o objetivo de introduzir entidades, que representam as peças a serem processadas no sistema de simulação. Através dessa ação, o fluxo de trabalho foi iniciado, dando início ao processo de fabrico.

Name: É o nome exclusivo dado ao módulo de chegada, que é "Chegada Haste".

Type: Configurado como "Constant", o que significa que as hastes chegam numa taxa constante.

Entities per Arrival: Apenas 1 haste é gerada a cada chegada.

Entity Type: Indica o tipo de entidade gerada, que são as "Haste".

Value: A taxa constante de chegada é de 1 haste por hora.

Units: As unidades de tempo usadas são horas.

Max Arrivals: O número máximo de hastes geradas é limitado a 12 durante a simulação.

Figura 10. Configuração do módulo CREATE

Fonte: Elaboração própria

As configurações descritas para o módulo de criação de entidades modelam a chegada controlada de hastes no sistema de simulação, com uma taxa constante de uma haste por hora e um limite máximo de 12 hastes durante a simulação e foram criadas cinco entidades, que correspondem às partes principais para o fabrico do cilindro previamente referidas (haste, pistão, barril, tampa extremidade cabeça, tampa extremidade base).

Para as outras entidades, configurações semelhantes foram utilizadas, exceto para o barril, que passa por uma operação de corte. No caso do barril, o parâmetro *Max Arrivals* foi alterado para um. Essa única entidade, após o corte, dará origem às 12 entidades propostas para o próximo estágio do processo.

A atribuição de atributos essenciais às entidades foi realizada por meio do módulo ASSIGN, que permitiu a associação de informações específicas a cada peça. Neste caso, o presente módulo, representado pela figura 11, foi utilizado para criar atributos que iriam ser utilizados posteriormente na simulação de modo a assegurar a semelhança com o processo real.

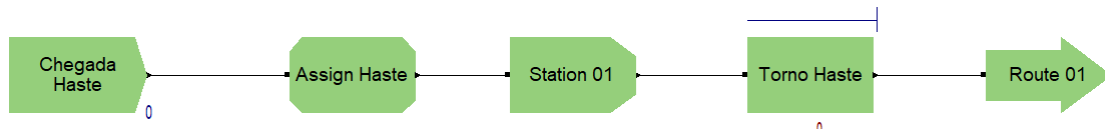


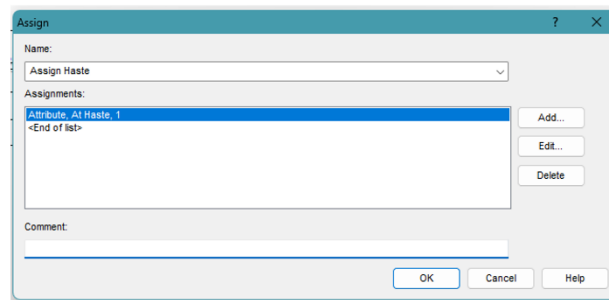
Figura 11. Sequenciação dos módulos STATION, PROCESS e ROUTE

Fonte: Elaboração própria

A combinação dos módulos STATION, PROCESS e ROUTE, permitiu modelar as operações nas estações de trabalho, a interação dos operadores e a movimentação das peças entre as etapas do processo. Esta sequenciação é ilustrada pela figura 12.

Name: É o nome exclusivo atribuído ao módulo, que é "Assign Haste".

Assignments: Permite a configuração de atribuições específicas às entidades que passarem por este módulo. Neste caso foi configurado um atributo.



Attribute Name: A nova atribuição é chamado "At Haste". Isso significa que a entidade terá um novo valor atribuído a esse atributo específico quando passar por este módulo.

New Value: O valor atribuído a "At Haste" é 1. Quando uma entidade passar por este módulo, o atributo será definido como 1.

Figura 12. Configuração do módulo ASSIGN

Fonte: Elaboração própria

Foram definidas um total de 19 estações de trabalho no modelo, através do módulo STATION, cada uma com um nome exclusivo para fins de identificação, como ilustrado pela figura 13.

	Symbol Number	Name	Associated Intersection	Parent Activity Area	Report Statistics	Comment
1		Tratamento Térmico	Intersection 2		☒	
2		Cromagem	Intersection 2		☒	
3		Grinding	Intersection 1		☒	
4		Corte	Intersection 1		☒	
5		Tor Varão	Intersection 2		☒	
6		Honing	Intersection 1		☒	
7		Furação	Intersection 2		☒	
8		Tor Pistão	Intersection 1		☒	
9		Tor T Cabeça	Intersection 1		☒	
10		Tor T Ext	Intersection 2		☒	
11		Limp	Intersection 2		☒	
12		Mont	Intersection 2		☒	
13		Saída			☒	
14		Polimento	Intersection 1		☒	
15		Tor Haste	Intersection 1		☒	
16		Sol Haste	Intersection 1		☒	
17		Tor Haste II	Intersection 1		☒	
18		Retificação	Intersection 1		☒	
19		Tor Barril	Intersection 1		☒	

Figura 13. Estações de trabalho criadas no módulo STATION

Fonte: Elaboração própria

A configuração deste módulo é representada pela figura 14.

Name: É o nome dado ao módulo, "Station 01".

Station Type: Tipo de estação como "station", indica que esta é uma estação de trabalho individual.

Entities per Arrival: O nome específico da estação individual é "Tor Haste". Isso significa que esta estação chamada será representada no modelo de simulação como "Station 01" e é onde a operação relacionada à "Haste" será executada.

Figura 14. Configuração do módulo STATION

Fonte: Elaboração própria

Os módulos PROCESS foram aplicados para representar e simular as operações específicas realizadas em cada estação de trabalho do sistema. Ao combinar esses módulos com os conjuntos de recursos previamente configurados, foi possível modelar a execução das operações de trabalho em todo o processo de fabrico. A figura 15 ilustra os recursos criados para esta simulação.

	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics	Comment
1	OP 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
2	OP 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
3	OP 3	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
4	OP 4	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
5	OP 5	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
6	OP 6	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
7	OP 9	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
8	OP 7	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
9	OP 8	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	
10	Externo	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	☒	

Double-click here to add a new row.

Figura 15. Configuração do módulo de dados RESOURCE com os recursos criados

Fonte: Elaboração própria

Nessa representação, os recursos "OP1" a "OP9" foram designados para simular os operadores internos, enquanto o recurso "Externo" foi configurado para simular a empresa externa responsável pela cromagem das peças.

Cada recurso foi agrupado num conjunto, *set*, de acordo com a distribuição previamente referida na tabela 18. A figura 16 mostra os *sets* criados.

	Name	Type	Member Definition Method	Members	Comment
1	Operadores Torno	Resource	Manual List	5 rows	
2	Operadores Retificação	Resource	Manual List	1 rows	
3	Operadores Trat. Termico	Resource	Manual List	1 rows	
4	Operadores Corte	Resource	Manual List	9 rows	
5	Operadores Polimento	Resource	Manual List	1 rows	
6	Operadores Furadeira	Resource	Manual List	7 rows	
7	Operadores Soldadura	Resource	Manual List	1 rows	
8	Operadores Limpeza	Resource	Manual List	9 rows	
9	Operadores Montagem	Resource	Manual List	7 rows	

Double-click here to add a new row.

Member Type	Resource Name
1 Single Element	OP 1
2 Single Element	OP 2
3 Single Element	OP 3
4 Single Element	OP 4
5 Single Element	OP 5

Figura 16. Configuração dos sets no módulo de dados SET.

Sets (à esquerda) e operadores (à direita)

Fonte: Elaboração própria

A figura ilustra a set de “Operadores Torno”, composto pelos recursos OP1, 2, 3, 4 e 5.

A figura 17 ilustra a configuração do módulo PROCESS.

Name: É o nome dado ao módulo, “Torno Haste”.

Action: A ação selecionada é “Seize Delay Release”, o que indica que um recurso será alocado (seize), haverá um atraso (delay) no processo e, em seguida, o recurso alocado será libertado (release). Isso é típico em operações onde um recurso (como uma máquina) é usado temporariamente e, em seguida, liberado para outras entidades.

Resources: Definição do conjunto de recursos para a operação neste módulo. Neste caso foi alocado o set de operadores para o torneamento.

Delay Type: Configuração da distribuição, que indica que o tempo de processamento varia de acordo com uma distribuição triangular. Os parâmetros abaixo (Minimum, Value e Maximum), representam os parâmetros da distribuição.

Type: Definido “Standard”, por default.

Priority: Definida “Medium(2)”, por default. Isto significa que, para várias entidades em fila de espera do mesmo recurso, sua prioridade é sempre média.

Units: As unidades de tempo usadas são minutos.

Value Added: Significa que o tempo de processamento é considerado um tempo de que agrega valor ao produto.

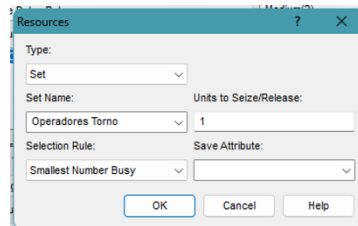
Figura 17. Configuração do módulo PROCESS

Fonte: Elaboração própria

No campo *Resource*, é atribuído o conjunto de recursos responsável pelo processamento da entidade no módulo. Aqui são definidos os conjuntos de operados para as respectivas operações, como ilustrado pela figura 18.

Type: A escolha de "Set" como o tipo de especificação de recurso significa que é selecionado um conjunto predefinido de recursos para serem usados neste módulo.

Selection Rule: A regra de seleção "Smallest number busy", significa que o Arena tentará alocar o operador que está menos ocupado no momento. Isso pode ajudar a distribuir a carga de trabalho de maneira mais uniforme entre os operadores disponíveis.



Units to Seize/Release: Neste caso, está definido como "1", o que significa que um operador do turno será alocado e liberado por vez.

Set Name: O nome do conjunto de recursos é "Operadores Torno" e todos os operadores do turno estão agrupados neste conjunto.

Figura 18. Configuração do campo *Resource*, do módulo PROCESS

Fonte: Elaboração própria

Além disso, a simulação também incorporou os intervalos de tempo necessários para o deslocamento das peças entre as diferentes estações de trabalho. Esses tempos de deslocamento foram configurados para refletir as distâncias físicas entre as estações e a complexidade da movimentação das peças.

O módulo ROUTE foi utilizado para direcionar as entidades para diferentes estações de trabalho, de acordo com critérios de tempo pré-definidos. Isso permitiu a modelação do fluxo de trabalho, garantindo que as entidades seguissem a sequência correta de operações. A tabela 19 representa as distribuições do tempo das rotas das entidades, obtidas através da utilização de um cronometro, desde a estação de trabalho de partida.

Tabela 19. Distribuições de tempo para as rotas das entidades

Entidade	Estação de partida transferência	Distribuição em minutos
Haste	Torno I	TRIA (12, 15, 17)
	Soldadura	TRIA (3, 4, 6)
	Torno II	TRIA (12, 15, 17)
	Tratamento térmico	TRIA (3, 4, 6)
	Retificação	TRIA (50, 60, 75)
	Cromagem	TRIA (50, 60, 75)
	Limpeza	TRIA (2, 3, 4)
	Montagem	TRIA (1, 2, 3)
Pistão Tampa extremidade cabeça Tampa extremidade pistão	Torno	TRIA (12, 15, 17)
	Limpeza	TRIA (2, 3, 4)
	Montagem	TRIA (1, 2, 3)
Barril	Serra	TRIA (3, 4, 6)
	Torno	TRIA (12, 15, 17)
	Polimento	TRIA (9, 11, 13)
	Furação	TRIA (3, 5, 7)
	Limpeza	TRIA (2, 3, 4)
	Montagem	TRIA (1, 2, 3)

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

A configuração dos tempos no módulo ROUTE, ilustrada pela figura 19, contribuiu para a modelagem realista do processo de produção, garantindo que os tempos de transporte fossem considerados em cada etapa do fluxo de trabalho.

Name: Nome único do módulo que definido como "Route 01".

Route Time: O tempo de percurso é modelado usando uma distribuição triangular com parâmetros (12, 15, 17).

Destination Type: A determinação do local de destino da entidade é feita com base na estação "Station", o que significa que a entidade será encaminhada para uma estação específica do processo.

Units: Definidas como minutos.

Station Name: Especificou-se o nome da estação de destino "Sol Haste", que representa a estação de soldagem da haste, a próxima etapa do processo para onde a entidade será encaminhada.

Figura 19. Configuração do módulo ROUTE

Fonte: Elaboração própria

A utilização do módulo DECIDE desempenhou um papel essencial na simulação do processo de montagem das diferentes partes do sistema. Com o objetivo de coordenar e direcionar as entidades específicas para o módulo subsequente, MATCH, onde ocorre a montagem propriamente dita, o módulo DECIDE foi devidamente configurado, como ilustrado pela figura 20.

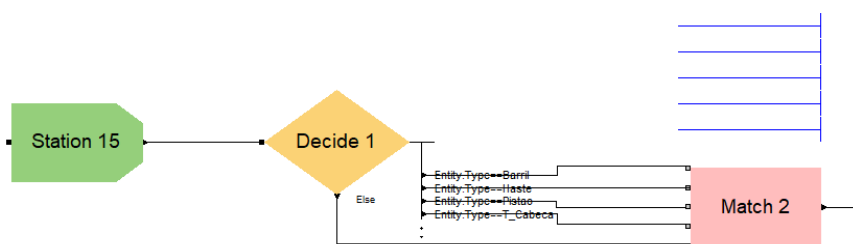


Figura 20. Sequenciação dos módulos DECIDE e MATCH para modelação da montagem

Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, cada entidade que passou pelas etapas anteriores do processo, como o corte ou a cromagem, entre outras respectivas operações, foi direcionada para o módulo DECIDE. Neste ponto, o módulo assumiu o papel de tomada de decisão com base no critério predefinido, tal como ilustrado pela figura 21.

Name: Nome único do módulo
“Decide 1”.

Conditions: Aqui foram definidas as condições usadas para determinar o percurso das entidades. Neste caso, as condições são baseadas no tipo de entidade *Entity Type*, com as entidades correspondentes às peças do cilindro. Isto permitiu direcionar as peças de forma separada para o módulo seguinte.

Type: O tipo "N-way by condition" significa que se pode definir várias condições para direcionar as entidades para diferentes caminhos.

Figura 21. Configuração do módulo DECIDE

Fonte: Elaboração própria

O critério lógico definido avaliou as características específicas de cada entidade, permitindo a sua separação por tipo, ou seja, as partes diferentes que compõe o produto final. Com base nessa avaliação, o módulo DECIDE tomou a decisão de encaminhar cada entidade diferente para a operação correta seguinte.

Com a decisão tomada, as entidades foram direcionadas de maneira apropriada para o módulo MATCH, cuja configuração é ilustrada pela figura 22.

Name: É o nome dado ao módulo,
“Match 2”.

Type: A escolha de *Any Entities* como o método para corresponder as entidades significa que uma entidade deve estar em cada fila para que uma correspondência seja feita.

Batch Action after Matching: A correspondência bem-sucedida das entidades com base nas condições especificadas e no número de correspondências necessárias, resulta num *Permanent Batch*, lote permanente.

Save Criterion: A escolha de "first" como o método significa que os valores de atributo da primeira entidade do lote serão usados como representativos para o lote.

Number to match: Para que um lote seja formado, é necessário que 5 entidades correspondentes estejam em filas diferentes.

Representative type: Ao realizar um agrupamento de entidades é criada uma nova entidade “Cilindro”, que, no contexto de simulação representa o grupo das 5 entidades diferentes anteriores.

Figura 22. Configuração do módulo MATCH

Fonte: Elaboração própria

A este módulo MATCH estão associadas cinco filas de espera, consequência da configuração do módulo DECIDE , representado pelas linhas azuis na figura 20, que correspondem às diferentes entidades do sistema:

1. Barril;
2. Haste;
3. Pistão;
4. Tampa Cabeça;
5. Tampo Extremidade.

Assim, as diferentes partes do sistema são reunidas, avançando posteriormente para a montagem, refletindo o fluxo real das operações. Esta integração das entidades permitiu a simulação do processo de montagem, tendo em consideração as características individuais de cada parte e a lógica de montagem.

No âmbito de operações mais específicas, como a operação de corte, o módulo SEPARATE permitiu a sua simulação. Este módulo, cuja sequenciação é ilustrada pela figura 23, foi configurado para modelar a divisão dos lotes de entidades em subgrupos, simulando o resultado do processo de corte do barril, ilustrado pela figura 24.

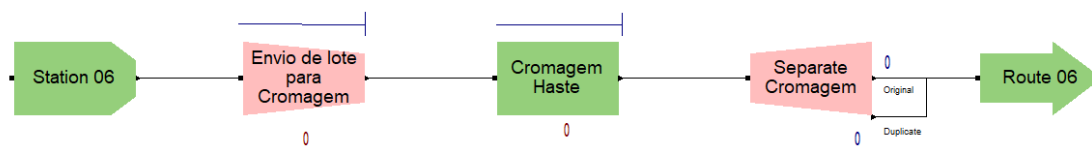


Figura 24. Sequenciação dos módulos BATCH e SEPARATE para modelação do envio e receção das peças da cromagem

Fonte: Elaboração própria

Name: Nome único do módulo “Separate corte barril”.

Percent to Cost Duplicates: Esta configuração determina como os custos e tempos das entidades de entrada serão alocados às entidades duplicadas. O valor padrão é de 50%, o que significa que metade dos custos e tempos da entidade original serão distribuídos igualmente entre as duplicatas. A outra metade permanecerá com a entidade original.

Type: Esta configuração especifica o método de separação das entidades de entrada. Neste caso, *Duplicate Original* indica que a entidade original será duplicada 11x para criar várias entidades idênticas.

of Duplicates: Esse valor especifica quantas entidades duplicadas serão criadas além da entidade original. A configuração de 11 duplicatas, totaliza a criação de 12 entidades no total.

Figura 23. Configuração do módulo SEPARATE

Fonte: Elaboração própria

Adicionalmente, na simulação do processo fabril, os módulos BATCH e SEPARATE, ilustrados na figura 25, foram utilizados para simular o agrupamento de peças em lote para o processo de cromagem da haste e a posterior separação das peças quando retornavam à fábrica.

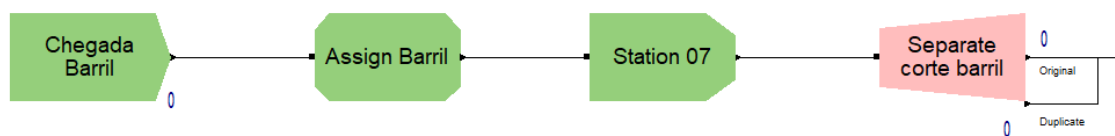


Figura 25. Sequenciação do módulo SEPARATE para modelação da operação de corte

Fonte: Elaboração própria

O BATCH, cuja configuração é ilustrada pela figura 26, foi utilizado para modelar o processo de agrupamento de peças para a cromagem.

Name: É o nome dado ao módulo, “Envio de lote para Cromagem”.

Batch Size: Este valor indica que serão agrupadas 12 entidades em cada lote temporário.

Rule: Esta configuração determina como é que as entidades de entrada serão agrupadas em lotes. *By Attribute* indica que as entidades devem ter o mesmo valor de atributo *At Haste* para serem agrupadas.

Representative type: Indica o tipo de entidade que representará o lote após o agrupamento. Neste caso, a entidade representativa será a *Haste*.

Type: Esta configuração especifica o método de agrupamento temporário de entidades. O modo *Temporary* indica que as entidades serão temporariamente agrupadas em lotes para o processo de cromagem.

Save Criterion: Determina como é que os valores dos atributos da entidade representativa serão definidos. A configuração *Sum* indica que os valores dos atributos serão somados para todas as entidades no lote.

Attribute Name: Especificação do nome do atributo cujo valor deve ser o mesmo para que as entidades sejam agrupadas - *At Haste*.

Figura 26. Configuração do nóduo BATCH

Fonte: Elaboração própria

Nesta etapa, as peças que estavam prontas para serem cromadas são agrupadas em lotes antes de serem enviadas para a entidade externa responsável pelo processo de cromagem. Os atributos previamente definidos pelo módulo ASSIGN à entidade “Haste” foram utilizados neste módulo para refletir as condições reais do processo de agrupamento, como ilustrado pela figura anterior 12.

Após o processo externo, as peças retornam à fábrica e precisam ser separadas novamente para continuar o fluxo de produção. Aqui, o módulo SEPARATE desempenhou um papel importante, uma vez que possibilitou a simulação de separação das peças retornadas da cromagem em lotes, para serem processadas nas etapas seguintes.

Para esta etapa o presente módulo foi configurado de forma semelhante ao SEPARATE previamente mencionado (figura 24).

Em resumo, a utilização dos módulos BATCH e SEPARATE, ilustrado pela figura, proporcionou uma visão geral de como as peças eram agrupadas em lotes para cromagem e posteriormente separadas para o fluxo de produção interno.

A simulação do processo fabril no ambiente do Arena® foi conduzida, utilizando uma abordagem estruturada cujo objetivo era refletir da melhor forma possível o fluxo de trabalho real, tendo em consideração a informação fornecida. Cada módulo e ação foram cuidadosamente escolhidos e configurados para criar um cenário de simulação rico em detalhes, proporcionando uma visão das operações do mundo real.

A figura 27 ilustra modelo de simulação desenvolvido no software Arena®, na qual agrega todos os módulos do sistema, proporcionando uma representação unificada e abrangente da simulação completa do sistema.

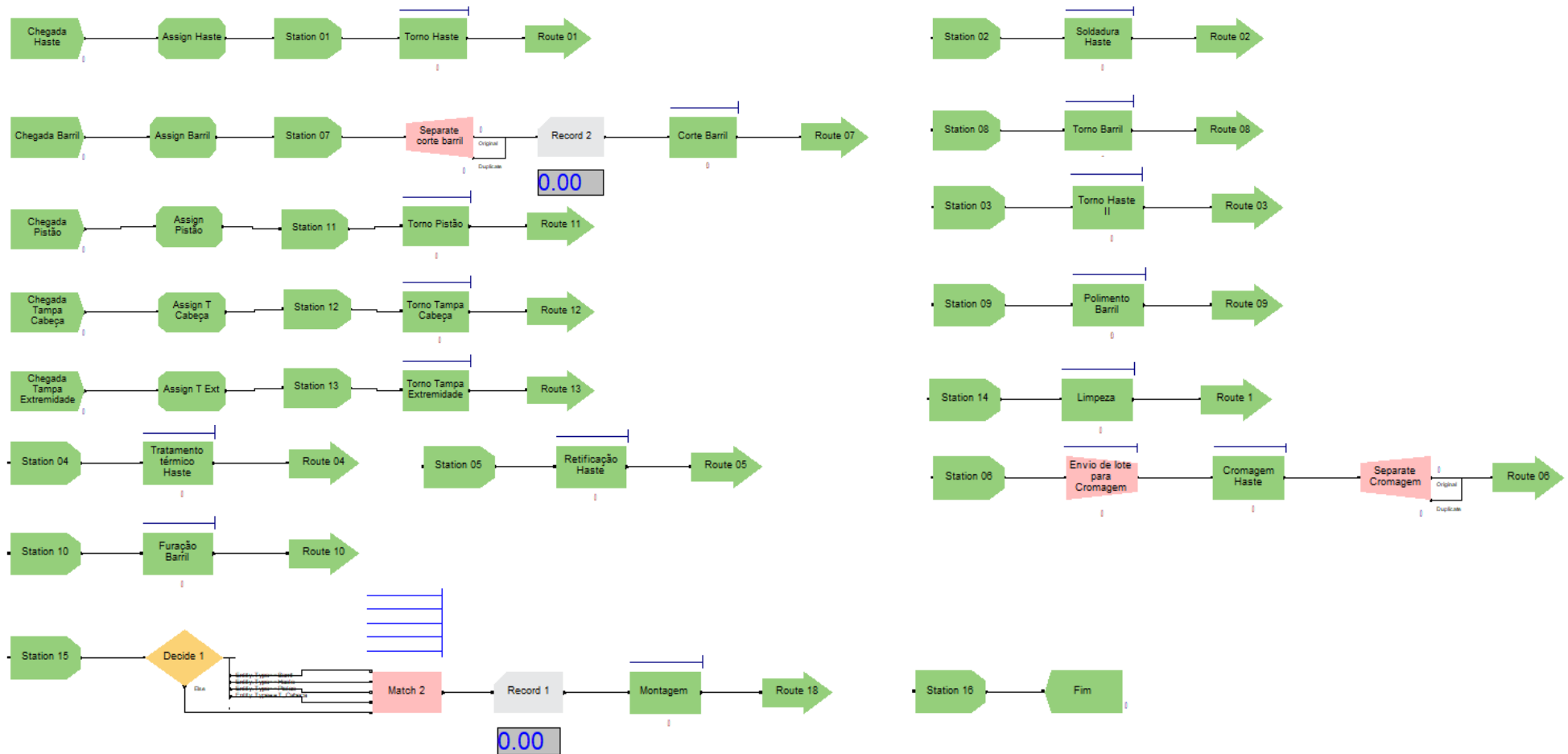


Figura 27. Representação unificada dos módulos utilizados para a modelação do sistema produtivo

Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Resultados da simulação do cenário atual

Para a simulação do processo de manufatura dos cilindros, foi considerado o horário de trabalho dos operadores que consistia em 8 horas por dia, por um período contínuo de 48 horas. A escolha das 48 horas foi feita de forma estratégica para acomodar a produção das 12 unidades de cilindros hidráulicos, conforme especificado no trabalho fonte do caso de estudo. ao usar um número fixo, proporcionou-se um ponto de partida claro para a simulação, que permitiu avaliar o processo de fabrico com base nesse número específico.

De modo a assegurar a confiabilidade dos resultados, foram consideradas 10 replicações da simulação. Adicionalmente, o software definiu um intervalo de confiança de 95% que permite avaliar a robustez estatística dos dados obtidos durante o ensaio de simulação. O foco principal da simulação foi a produção de um total de 12 unidades de cilindros hidráulicos, como especificado no contexto do estudo.

Tendo em conta os parâmetros de replicação da simulação, com o objetivo de avaliar a eficiência e o desempenho do processo, foram levados em consideração três parâmetros, que serão discutidos posteriormente no capítulo de discussão de resultados deste trabalho.

A tabela 20 representa o tempo de processamento médio por operação no ARENA®. Este parâmetro representa a média do tempo necessário para executar cada etapa no ciclo de produção dos cilindros hidráulicos.

Tabela 20. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário atual para 10 replicações

Operação	Média do tempo médio de operação por entidade	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Corte Barril	13,63	0,58
Cromagem Haste	721,99	138,21
Furação Barril	15,26	2,61
Limpeza	15,70	0,43
Montagem	61,20	3,76
Polimento Barril	318,97	10,43
Retificação Haste	36,69	3,40
Soldadura Haste	25,36	5,56
Torno Barril	292,80	14,06
Torno Haste	263,45	38,41
Torno Haste II	334,69	58,99
Torno Pistão	308,94	25,85
Torno Tampa Cabeça	375,52	49,83
Torno Tampa Extremidade	269,25	31,68
Tratamento térmico Haste	12,53	1,15

Fonte: Elaboração própria

Começando pela cromagem, o seu tempo de processamento reflete a capacidade da empresa terceirizada em realizar esta etapa com eficiência. Assim sendo, muitas vezes não há controle direto sobre os tempos elevados associados a esta operação, pois estes são determinados pelo recurso externo.

Ao analisar os tempos de operações internas, é evidente que os maiores tempos são observados nas etapas de torneamento e polimento. Estes tempos prolongados podem ser indicadores de processos que não são tão constantes quanto o desejado, uma vez que a variação significativa nos mesmos sugere uma falta de uniformidade na execução das

tarefas. A variação alta pode ser também um indicador de inconsistências no desempenho dos recursos ou na qualidade das matérias-primas envolvidas.

Por outro lado, os tempos das demais operações internas são aceitáveis, com variações baixas, o que indica um alto grau de consistência e previsibilidade nestes processos. Isto pode ser um reflexo da eficiência das máquinas e da qualidade dos recursos utilizados, resultando numa produção mais estável e confiável.

Em suma, as operações de torneamento e polimento foram consideradas críticas, devido aos tempos elevados e variabilidades significativas, merecendo atenção para otimização e melhoria.

Ao mesmo tempo, é fundamental manter as restantes operações internas, que demonstram consistência e tempos aceitáveis, para garantir que não se tornem novos pontos de estrangulamento.

A eficiência das filas de espera está representada na tabela 21. Estas filas pretendem refletir a forma como as máquinas e os operadores são utilizados durante os processos de fabrico do cilindro.

Tabela 21. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário atual para 10 replicações

Filas de espera por operação	Média do tempo médio de fila de espera	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Match 2.Queue1	1 385,45	137,76
Match 2.Queue2	0,00	0,00
Corte Barril.Queue	3,81	0,20
Cromagem Haste.Queue	0,00	0,00
Envio de lote para Cromagem.Queue	233,34	22,34
Furação Barril.Queue	6,24	2,46
Limpeza.Queue	0,75	0,43
Match 2.Queue3	1 358,41	208,41
Match 2.Queue4	1 300,39	152,68
Match 2.Queue5	1 415,50	157,44
Montagem.Queue	16,48	1,35
Polimento Barril.Queue	247,19	10,00
Retificação Haste.Queue	10,46	3,36
Soldadura Haste.Queue	9,12	5,68
Torno Barril.Queue	150,35	14,17
Torno Haste II.Queue	249,42	59,86
Torno Haste.Queue	252,68	38,17
Torno Pistão.Queue	246,47	26,21
Torno Tampa Cabeça.Queue	230,56	47,92
Torno Tampa Extremidade.Queue	249,17	31,83
Tratamento térmico Haste.Queue	2,07	0,96

Fonte: Elaboração própria

Analisado os números, é fundamental destacar a importância das filas de espera, em particular as filas de MATCH, dentro do contexto do processo de montagem. Este

módulo está diretamente relacionado à simulação do processo de montagem e qualquer atraso nestas filas pode ter um impacto significativo na continuidade do processo de montagem em si. Cada fila do MATCH representa uma entidade, como mencionado anteriormente e, dado que a única fila sem tempo é a *Match 2*, que corresponde à entidade haste, é possível inferir que todas as outras entidades aguardam a conclusão do processo de cromagem, que ocorre externamente. Este fator pode causar atrasos na linha de montagem, uma vez que todas as entidades estão dependentes da disponibilidade da haste.

Além disso, as filas de espera associadas ao polimento e aos tornos também apresentam altos níveis de espera, o que sugere a presença de gargalos nestes processos e, conseqüentemente, possíveis atrasos adicionais na produção. A fila de envio de lote para cromagem, que representa a preparação do lote para o processo externo, também possui uma fila de espera considerável, o que indica a necessidade de uma gestão eficaz desta tarefa.

Assim sendo, foram identificados os pontos críticos nas filas de espera, como as filas de "match", polimento, tornos e envio de lotes para cromagem, a fim de otimizar o fluxo de produção e minimizar quaisquer atrasos no processo de montagem

A tabela 22 fornece as taxas de ocupação dos diversos recursos no processo de produção. A taxa de ocupação expressa a proporção do tempo em que cada recurso está ocupado em relação ao tempo total de simulação do processo e permite uma análise aprofundada do desempenho dos operadores, através da identificação de áreas de consistência e possíveis oportunidades de melhoria.

Tabela 22. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário atual para 10 replicações

Recurso	Média da taxa média de ocupação	Desvio padrão da média da taxa média
Externo	25,07%	4,80%
OP 1	43,20%	1,54%
OP 2	43,11%	1,49%
OP 3	42,71%	0,99%
OP 4	42,55%	1,13%
OP 5	42,81%	0,91%
OP 6	29,05%	1,21%
OP 7	35,14%	0,85%
OP 8	14,65%	0,96%
OP 9	10,53%	0,78%

Fonte: Elaboração própria

O recurso "Externo," responsável pela cromagem das peças, apresenta uma taxa média de utilização de 25,07%. Isso sugere que, em média, este recurso opera a uma capacidade relativamente baixa. A presença de um desvio padrão de 4,80% sugere alguma variabilidade na utilização, o que pode significar que há momentos em que a capacidade é mais aproveitada do que em outros. Tal pode indicar a necessidade de avaliar e otimizar a alocação dos recursos externos para garantir um uso mais eficiente.

Por outro lado, os colaboradores internos (OP 1 a OP 9) demonstram taxas médias de utilização variadas, variando de 10,53% a 43,20%. Essas variações refletem diferenças na necessidade e na eficiência das operações realizadas por cada colaborador. No entanto, é importante notar que todos eles mantêm taxas médias razoáveis de utilização, e os desvios padrão relativamente baixos sugerem uma consistência notável nas suas

operações. Isso sugere que os colaboradores internos mantêm um ritmo de trabalho constante e eficaz.

Em resumo, a análise das taxas médias de utilização revela que o recurso "Externo" poderia ser mais bem aproveitado para aumentar sua capacidade de produção. Enquanto isso, os colaboradores internos mantêm um desempenho consistente e eficiente nas suas tarefas.

Para terminar, a tabela 23 mostra o tempo total de fabrico de uma unidade do cilindro hidráulico. A análise do tempo médio total no fabrico de cilindros hidráulicos contribui fundamentalmente para a avaliação da eficiência e desempenho do sistema de produção.

Tabela 23. Tempos médios da entidade cilindro no cenário atual

	Tempo médio das médias das replicações	Desvio Padrão do tempo médio da média das replicações
	Em minutos	
<i>NVA Time</i>	0,00	0,00
<i>Other Time</i>	0,00	0,00
<i>Total Time</i>	2142,90	142,52
<i>Transfer Time</i>	319,27	3,54
<i>VA Time</i>	1525,25	149,33
<i>Wait Time</i>	7370,87	602,26

Fonte: Elaboração própria

Primeiramente, é notável que não há tempos significativos de Valor Não Agregado (do inglês, *Non-Value Added*, NVA), *NVA Time*, ou outros tempos, *Other Time*, o sugere que cada minuto investido no processo está diretamente relacionado à produção efetiva, eliminando desperdícios de tempo.

O tempo total de produção, *Total Time*, é de cerca de 2 142,90 minutos, indicando a duração completa do ciclo de produção e o tempo de transferência, *Transfer Time*, de 319,27 minutos revela o período gasto na transferência do cilindro entre diferentes as etapas ou locais do processo. Este pode ser considerando um ponto sensível que merece atenção, pois a sua otimização pode encurtar o tempo total de produção e aumentar a eficiência. O tempo de Valor Agregado (do inglês, *Value Added*, VA), *VA Time*, de 1 525,25 minutos representa o tempo em que o cilindro está ativamente em processo e

agregando valor. Ao maximizar este tempo é crucial é possível contribuir para uma produção eficaz.

Dos tempos todos destaca-se, por fim, o *Wait Time*, por ser o maior. Tal acontece devido à necessidade de montar um "cilindro" a partir de cinco peças diferentes. Para a simulação da montagem do cilindro, todas as cinco peças devem estar disponíveis ao mesmo tempo. Se uma das peças demora mais para chegar, é necessário que as outras fiquem em fila, aumentando assim o tempo de espera. Sendo assim, este tempo, de 7.370,87 minutos, sugere que existem possíveis oportunidades de melhoria na redução do tempo em que as entidades iniciais ficam em espera ou presas, em filas ou processos.

A análise dos tempos de produção no processo de fabrico do cilindro hidráulico aponta para uma linha de produção com um baixo desperdício de tempo, mas com oportunidades de otimização nos tempos de transferência e nos tempos de espera.

3.3.3 Conclusões

A análise anterior concentrou-se na eficiência do processo de fabrico, destacando o tempo, a utilização de recursos e o fluxo de produção no mesmo. Durante a simulação, foram recolhidos os dados essenciais para identificar gargalos e oportunidades de otimização com base nas métricas referidas. Apesar do número constante de 12 entidades a serem produzidas, a simulação permitiu avaliar o cenário de processamento, evidenciando as possíveis áreas para melhorias eficientes e uso mais eficaz dos recursos disponíveis.

Foram identificados vários gargalos significativos no processo. As filas de MATCH, bem como as operações de polimento e torneamento, destacaram-se como pontos críticos que contribuem para atrasos no processo, em geral. Adicionalmente, a fila de envio de lote para cromagem também foi identificada como um gargalo potencial, uma vez que representa a preparação do lote para o processo externo de cromagem.

Estas áreas críticas requerem atenção para a implementação de melhorias eficazes que possam aumentar a eficiência global do processo de fabrico. Assim, com base nesta análise foram desenvolvidas estratégias específicas para mitigar os atrasos e otimizar o fluxo de produção, abordadas no capítulo seguinte.

4 Propostas de melhoria

No contexto dinâmico da produção de cilindros hidráulicos, a eficiência operacional e a capacidade de atender às necessidades do mercado desempenham um papel crucial na determinação do sucesso de uma organização. Um dos desafios recorrentes enfrentados por empresas que operam nesse setor é a gestão efetiva do tempo necessário para a obtenção de peças críticas para a produção, como o processo de cromagem de componentes.

O presente subcapítulo aborda os diferentes cenários de melhoria estratégica concebidos para otimizar a eficiência do processo produtivo, objeto de estudo do presente trabalho.

4.1 Cenário de melhoria I: Criação de *stock* de peças cromadas

Em resposta à necessidade de reduzir os tempos de espera e melhorar o fluxo de produção, foi proposta a criação de um *stock* de peças cromadas. Esta iniciativa visa minimizar os impactos negativos causados pela demora no processo de cromagem, permitindo uma resposta mais ágil às necessidades dos clientes e, potencialmente, aumentando a competitividade da empresa.

Na simulação do *stock* de peças cromadas, o módulo HOLD desempenhou um papel essencial na modelagem do fluxo de entidades, como evidenciado pela representação na figura 28.

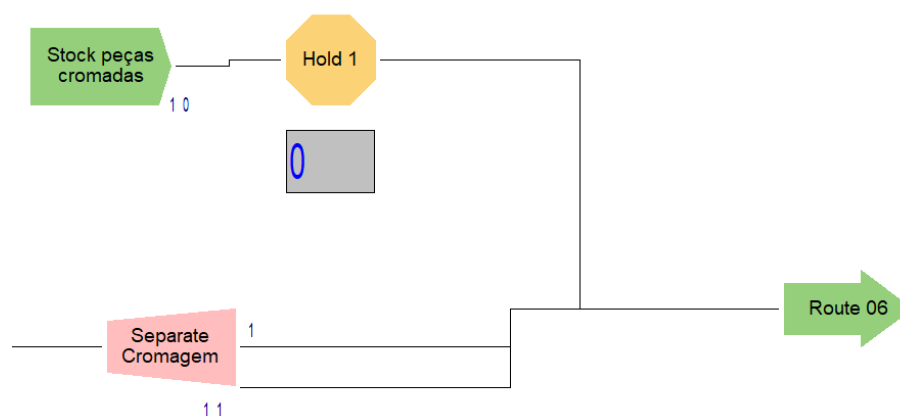


Figura 28. Sequenciação do módulo HOLD para modelação do *stock* de peças cromadas

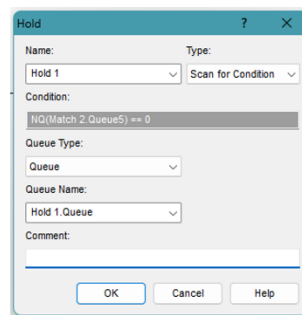
Fonte: Elaboração própria

Esta configuração permitiu que as hastes cromadas avançassem no processo somente quando estivessem prontas e quando o sinal correspondente fosse emitido. Essa abordagem assegurou que as entidades não avançassem prematuramente, evitando esperas desnecessárias e possibilitando a otimização do fluxo de produção.

O módulo HOLD com a condição *Scan for Condition* é usado para segurar entidades até que uma condição específica seja satisfeita. No contexto da criação de *stock* de peças cromadas, ele foi configurado para libertar as entidades de *stock* até que o lote enviado para o processo externo esteja completo, como ilustrado pela figura 29.

Name: O módulo Hold foi nomeado como "Hold 1".

Queue Type: O tipo de fila escolhido foi *Queue*, o que significa que uma fila específica será usada para manter as entidades em espera.



Type: A configuração do módulo como *Scan for Condition* significa que as entidades passarão por esse módulo e serão mantidas até que uma determinada condição seja atendida.

Condition: A condição definida indica que fila do match correspondente às entidades de peças cromadas igual a zero. Isso significa que as entidades serão mantidas no módulo "Hold" enquanto a fila correspondente às peças cromadas esteja vazia, no MATCH

Figura 29. Configuração do módulo HOLD

Fonte: Elaboração própria

A figura 30 ilustra modelo de simulação do primeiro cenário de melhoria desenvolvido, incluindo todos os módulos do sistema, para uma representação unida e abrangente da simulação completa do sistema

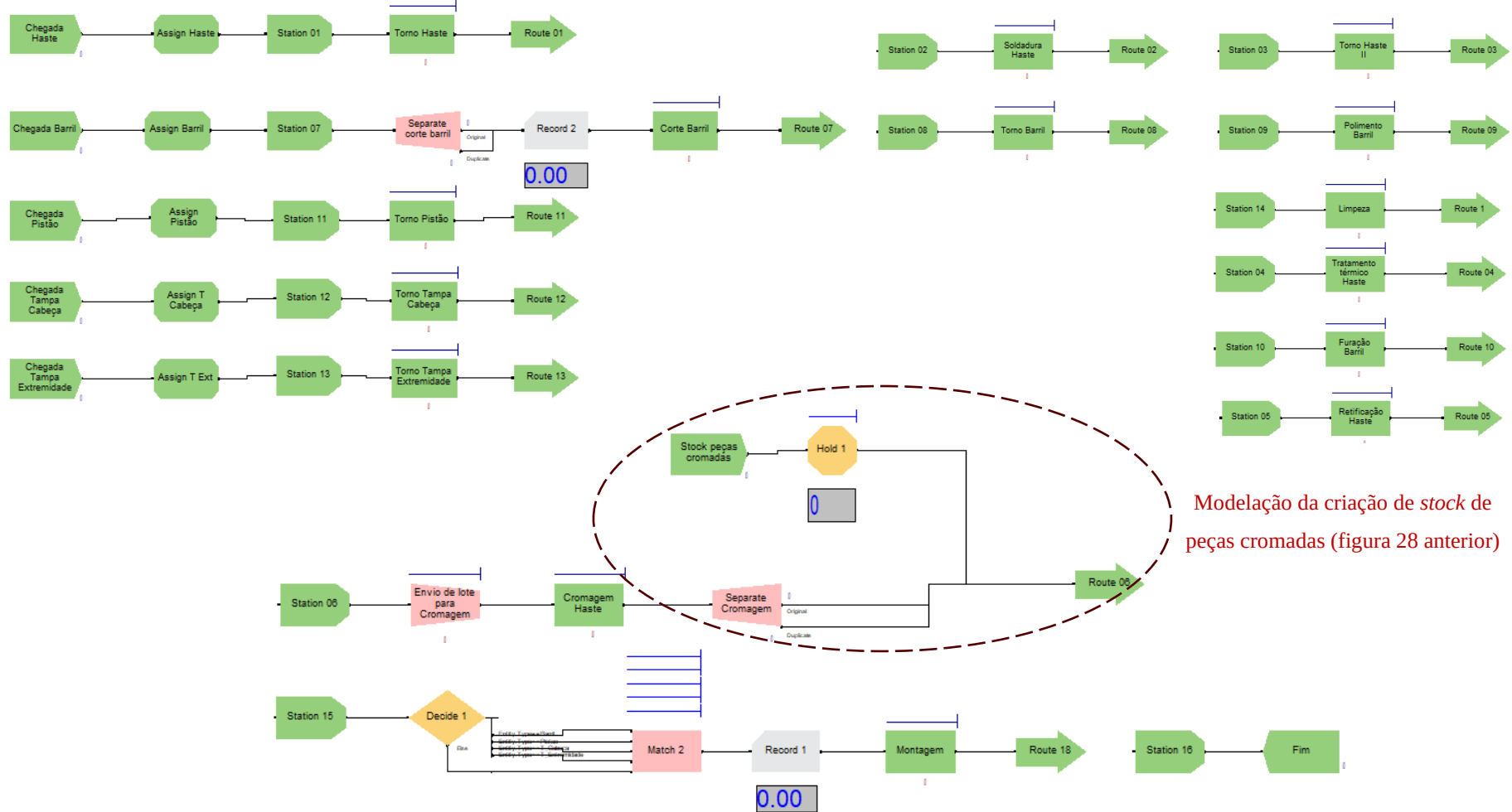


Figura 30. Representação unificada dos módulos utilizados para a modelação do cenário de melhoria I

Fonte: Elaboração própria

4.1.1 Prós e contras

O quadro resumo da tabela 24 sumaria as vantagens e desvantagens associadas à criação do *stock* de peças cromadas.

Tabela 24. Prós e Contras da criação de *stock* das peças cromadas

Prós	Contras
Disponibilidade rápida de peças quando necessário.	Risco de obsolescência das peças se não forem usadas dentro do prazo.
Atendimento a necessidades urgentes e imprevistas.	Capital da empresa preso em peças de <i>stock</i> , limitando a disponibilidade de recursos para outros investimentos.
Potencial economia de escala na cromagem.	Dificuldade de gestão eficaz do <i>stock</i> , em casos imprevisíveis de procura.
Redução de custos de transporte de ida e volta.	Dependência de fornecedores externos para a cromagem, sujeita a atrasos ou problemas de qualidade fora do controlo direto da empresa.
Maior controlo da disponibilidade de peças em caso de interrupções no fornecimento da empresa terceira.	

Fonte: Elaboração própria

Apesar das vantagens enumeradas, a decisão de criar ou não um *stock* de peças cromadas dependerá das circunstâncias específicas da empresa, das necessidades do mercado e da capacidade de gestão da organização.

Considerando a presente empresa, se os custos adicionais relacionados ao espaço de armazenamento local não forem significativos, é menos uma desvantagem associada à estratégia nova de aprovisionamento.

4.1.2 Resultados da simulação

Na simulação do primeiro cenário de melhoria foram avaliados os tempos médios de processamento nas várias etapas do processo de fabrico de cilindros hidráulicos. Esses dados estão representados na tabela 25.

Tabela 25. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário de melhoria I para 10 replicações

Operação	Média do tempo médio de operação por entidade	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Corte Barril	13,39	0,55
Cromagem Haste	701,06	139,74
Furação Barril	32,54	6,87
Limpeza	17,55	1,07
Montagem	67,81	11,40
Polimento Barril	313,57	12,75
Retificação Haste	69,09	22,04
Soldadura Haste	27,48	4,65
Torno Barril	298,54	19,34
Torno Haste	265,15	81,42
Torno Haste II	280,45	69,43
Torno Pistão	348,90	67,89
Torno Tampa Cabeça	391,45	95,11
Torno Tampa Extremidade	294,18	71,33
Tratamento térmico Haste	13,78	2,15

Fonte: Elaboração própria

Neste primeiro cenário de melhoria, observa-se que processo terceira de cromagem externo se mantém como um dos principais desafios de tempo, justificado pela falta de controlo da empresa sobre esta etapa. Esta dependência externa pode resultar em atrasos no fluxo de produção, uma vez que todas as entidades aguardam a conclusão desse processo.

Internamente, o polimento, embora exiba uma variabilidade baixa nos tempos de ciclo, ainda se destaca como um ponto crítico devido ao tempo de operação prolongado. A necessidade de garantir um acabamento de alta qualidade nas peças pode contribuir para esta extensão no tempo de processamento.

Por outro lado, as operações de tornos apresentam uma variabilidade significativa nos tempos de ciclo, o que indica que pode haver inconsistências na execução destas tarefas. Esta variabilidade pode causar incertezas no tempo necessário para concluir as respectivas operações, tendo impacto na eficiência do processo de fabrico.

A tabela 26 apresenta os tempos de espera nas filas relacionadas às diversas operações de produção.

Tabela 26. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário de melhoria I para 10 replicações

Filas de espera por operação	Média do tempo médio de fila de espera	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Corte Barril.Queue	3,81	0,20
Cromagem Haste.Queue	0,00	0,00
Envio de lote para Cromagem.Queue	230,10	58,48
Furação Barril.Queue	23,69	6,81
Hold 1.Queue	0,00	0,00
Limpeza.Queue	2,66	0,90
Match 2.Queue1	310,70	43,60
Match 2.Queue2	310,68	108,35
Match 2.Queue3	239,38	110,73
Match 2.Queue4	316,27	121,08
Match 2.Queue5	599,28	40,17
Montagem.Queue	24,30	11,28
Polimento Barril.Queue	242,07	11,71
Retificação Haste.Queue	43,28	21,88
Soldadura Haste.Queue	11,18	4,69
Torno Barril.Queue	155,16	18,13
Torno Haste II.Queue	193,28	68,23
Torno Haste.Queue	254,46	81,59
Torno Pistão.Queue	285,92	68,21
Torno Tampa Cabeça.Queue	245,45	95,10
Torno Tampa Extremidade.Queue	273,98	71,14
Tratamento térmico Haste.Queue	3,30	2,02

Fonte: Elaboração própria

A análise das filas de espera revela que os maiores tempos de espera continuam associados às filas de MATCH, polimento e tornos. No entanto, há diferenças significativas em termos de variabilidade e tempo médio.

As filas MATCH e tornos destacam-se pela variabilidade elevada nos tempos de espera. Isto significa que estas operações podem ser bastante inconsistentes em termos de quanto tempo levam para serem concluídas. A variabilidade alta das filas de MATCH também pode resultar em atrasos imprevisíveis no processo de montagem, uma vez que as entidades dependem dessas operações.

Por outro lado, o polimento, embora tenha um tempo médio longo, é caracterizado por uma variabilidade baixa, sugerindo que, apesar do tempo consistentemente mais longo em comparação com outras operações, é uma operação previsível e constante. Tal pode ser considerado uma vantagem, pois permite um planeamento mais preciso do tempo de conclusão das tarefas de polimento.

As diferenças identificadas nas filas de espera, com destaque para as características distintas das filas críticas, serão objetos de estudo mais aprofundado no capítulo seguinte. Nesse próximo capítulo, analisar-se-á, de forma mais detalhada, como é que as diferenças afetaram o fluxo de produção, considerando as estratégias específicas de otimização definidas.

Também foram analisadas as taxas de ocupação de recursos ao longo da simulação, representadas na tabela 27. Estes dados permitem entender como é que os recursos são utilizados ao longo das réplicas da simulação.

Tabela 27. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário de melhoria I para 10 replicações

Recurso	Média da taxa média de ocupação	Desvio padrão da média da taxa média
Externo	24,34%	4,85%
OP 1	43,68%	4,50%
OP 2	41,77%	1,37%
OP 3	41,41%	1,04%
OP 4	40,77%	1,31%
OP 5	40,46%	1,72%
OP 6	33,54%	2,15%
OP 7	35,08%	1,53%
OP 8	18,27%	1,43%
OP 9	14,74%	0,93%

Fonte: Elaboração própria

Em relação à ocupação de recursos, observamos que o recurso "Externo" é utilizado em média por cerca de 24,34% do tempo disponível. No entanto, este apresenta uma variabilidade considerável, com um desvio padrão de 4,85%, o que sugere uma flutuação na disponibilidade ou a procura pelo recurso externo ao longo do tempo.

No que diz respeito aos operadores internos (de OP 1 a OP 9), identificaram-se diferentes níveis de ocupação média e variabilidade. O OP 1 destaca-se como o operador mais utilizado, com uma ocupação média de 43,68% e um desvio padrão de 4,50%. Isto indica que este operador tem uma ocupação elevada e mantém uma ocupação relativamente consistente. Os operadores OP 2 a OP 5 também são bastante utilizados, com taxas médias de ocupação variando de 40,46% a 41,77% e desvios padrão relativamente baixos, sugerindo uma utilização estável. Por outro lado, OP 6 e OP 7 apresentam taxas médias de ocupação ligeiramente mais baixas, com desvios padrão moderados, indicando alguma variabilidade na utilização destes recursos.

Os recursos OP 8 e OP 9 têm as taxas médias de ocupação mais baixas, mas mantêm uma ocupação relativamente estável ao longo do estudo de simulação.

Esta análise é importante para a gestão dos recursos e a da produção, permitindo identificar recursos que podem requerer otimização de utilização e aqueles que são mais utilizados. Além disso, compreender a variabilidade na utilização dos recursos ajuda a adaptar o fluxo de produção a situações imprevisíveis, contribuindo para a eficiência global do processo de fabrico.

No contexto da produção do cilindro hidráulico com o stock de peças cromadas, a tabela 28 ilustra as várias categorias de tempo que compõem o ciclo de produção.

Tabela 28. Tempos médios da entidade cilindro no cenário de melhoria I

	Tempo médio das médias das replicações	Desvio Padrão do tempo médio da média das replicações
	Em minutos	
<i>NVA Time</i>	0,00	0,00
<i>Other Time</i>	0,00	0,00
<i>Total Time</i>	1093,16	36,17
<i>Transfer Time</i>	173,43	52,08
<i>VA Time</i>	666,06	271,59
<i>Wait Time</i>	3135,05	433,65

Fonte: Elaboração própria

Em primeiro lugar, os indicadores *NVA Time* e *Other Time* continuam a registar médias de 0,00 minutos, o que é extremamente positivo em termos de eficiência. Esta constatação reforça que o processo não incorre em desperdício de tempo em atividades que não agregam valor à produção, mantendo um alto padrão de eficiência.

O *Total Time* agora apresenta uma média de 1093,16 minutos, com uma variabilidade relativamente baixa. Isto significa que, em média, o processo leva cerca de 18 horas para produzir uma unidade do cilindro hidráulico, demonstrando um nível consistente no processo de fabrico. A baixa variabilidade indica que o processo é previsível e mantém uma produção constante ao longo das replicações da simulação.

No que diz respeito ao *Transfer Time*, apresenta uma média em torno de 173,43 minutos, a variabilidade significativa indica que o tempo gasto na transferência de entidades entre diferentes operações varia substancialmente entre replicações. Esta

variabilidade aponta para a possibilidade de otimização na gestão do tempo de transferência para torná-lo mais consistente.

O *VA Time* representa o tempo dedicado a atividades de valor agregado, com uma média de 666,06 minutos e uma variabilidade substancial de 271,59 minutos. A alta variabilidade sugere que ainda existe espaço para melhorar a consistência nas atividades de valor agregado, visando um processo mais uniforme e constante.

Por fim, o *Wait Time* continua a exibir uma média significativa de 3135,05 minutos, juntamente com uma variabilidade alta de 433,65 minutos. É importante destacar que este tempo de espera é uma característica específica do modelo de simulação e está intrinsecamente relacionado à lógica de montagem do cilindro. Portanto, ao interpretar os dados, é essencial compreender que o *Wait Time* do cilindro deve ser avaliado de forma distinta em relação aos outros tempos, já que reflete a sincronização necessária entre as entidades no processo de montagem.

4.2 Cenário de melhoria II: Introdução de *cobots* na linha de montagem

No âmbito da segunda simulação de melhoria do processo produtivo, foram consideradas as áreas críticas identificadas no processo de polimento e torno. Esta avaliação permitiu a incorporação dos princípios e conceitos da Indústria 5.0, que se concentra na promoção da interação simbiótica entre seres humanos e máquinas inteligentes. O objetivo primordial dessa abordagem é aperfeiçoar a eficiência, produtividade e qualidade dos processos de fabrico.

Foi concebida uma proposta de aprimoramento, baseada na implementação de tecnologias avançadas do paradigma 5.0, caracterizado por uma integração inteligente de sistemas. A estratégia de otimização delineada incorpora a Introdução de Robôs Colaborativos (*Cobots*). A proposta contempla a simulação da integração de robôs colaborativos nas operações de torno e polimento, por registarem os maiores tempos de processamento das operações internas. Ao estabelecer uma cooperação harmoniosa entre os operadores humanos e os *cobots*, espera-se otimizar as operações, reduzindo os tempos de ciclo e, conseqüentemente, minimizando as filas de espera. A análise detalhada desta interação proporcionará uma compreensão clara dos potenciais impactos dessa tecnologia 5.0 na otimização do fluxo de produção.

Para avaliar a melhoria proporcionada pela implementação dos *cobots*, foi necessário modelar e analisar a distribuição dos tempos de operação antes e depois da introdução da automação. Como os *cobots* podem influenciar a variabilidade dos tempos de operação, foi aplicada a abordagem de converter as distribuições TRIA para distribuições normais com uma redução de 10%.

Esta conversão implicou o ajuste dos parâmetros das distribuições de modo a refletir a mudança esperada nos tempos de operação. Para tal considerou-se uma redução do valor médio em 10%, mantendo como desvio padrão da distribuição normal aproximadamente metade da amplitude da distribuição TRIA original. Um exemplo prático disso pode ser observado ao considerar a distribuição TRIA (7, 10, 15) da primeira operação de torneamento da haste.

Originalmente, a distribuição TRIA é caracterizada por três parâmetros: Valor Mínimo (a) = 7, Valor médio (b) = 10 e Valor Máximo (c) = 15. O novo valor médio (μ') após a redução é calculado subtraindo 10% do valor original, ou seja, $\mu' = 10 - (10\% \text{ de } 10) = 10 - 1 = 9$. A amplitude da distribuição TRIA original é determinada pela diferença entre o valor máximo e mínimo, ou seja, $c - a = 15 - 7 = 8$. Para manter o desvio padrão (σ') aproximadamente igual à metade dessa amplitude, o novo desvio padrão é calculado como: $\sigma' = (8 / 2) = 4$.

Essa aproximação simplificada permitiu considerar uma redução geral nos tempos de operação sem entrar em detalhes excessivos, mantendo, simultaneamente, a consistência da distribuição para fins de análise e modelação.

A nova distribuição normal resultante, representada na tabela 29, pôde então ser incorporada à simulação do processo produtivo permitindo avaliar como é que a presença dos *cobots* impacta a produção, a eficiência, os tempos de ciclo e outros indicadores relevantes, considerando a sua ação nos processos de torneamento e polimento.

Tabela 29. Distribuição dos tempos de processamento melhorados das operações de torno e polimento

		Distribuição Atual	Distribuição melhoria
		Em minutos	
Torneamento	Haste	TRIA (7, 10, 15) TRIA (70, 80, 110)	NORMAL (9, 4) NORMAL (72, 20)
	Pistão	TRIA (54, 60, 75)	NORMAL(54, 10.5)
	Barril	TRIA (130, 145, 155)	NORMAL (130.5, 12.5)
	Tampa Cabeça	TRIA (120, 150, 165)	NORMAL (135, 22.5)
	Tampa Base	TRIA (15, 20, 25)	NORMAL (18, 5)
Polimento		TRIA (60, 75, 80)	NORMAL (67.5, 10)

Fonte: Elaboração própria

A figura 31 ilustra a configuração do módulo PROCESS com a nova distribuição para a modelação do vigente cenário de melhoria.

Resources: Definição do conjunto de recursos para a operação neste módulo, com os cobots incluídos no *Set*.

Delay Type: Configuração da distribuição normal, considerando a redução de 10%. Os parâmetros abaixo (*Value* e *Std Dev*), representam os parâmetros da distribuição, média e desvio padrão.

Figura 31. Configuração do módulo PROCESS do cenário de melhoria II

Elaboração própria

O modelo de simulação do segundo cenário de melhoria desenvolvido, é igual ao primeiro, ilustrado pela figura 30 anterior, uma vez que apenas foram alterados os dados dos módulos de processo.

4.2.1 Prós e contras

O quadro da tabela 30 resume que segue enumera os principais benefícios e desafios associados à implementação de *cobots* na linha de produção dos cilindros hidráulicos.

Tabela 30. Prós e Contras da implementação de *cobots*

Prós	Contras
Aumento da eficiência e produtividade.	Custos iniciais de aquisição e implementação.
Redução de erros e melhoria na qualidade.	Formação necessária para os operadores e manutenção técnica.
Menos lesões e riscos de segurança no local de trabalho.	Restrições de aplicação em tarefas muito complexas ou não padronizadas.
Possibilidade de operação 24/7 sem necessidade de descanso.	Necessidade de atualização constante para acompanhar avanços tecnológicos.
Facilidade de reprogramação para diferentes tarefas.	Dependência de energia e possíveis falhas técnicas
Melhor utilização de espaço e recursos.	

Fonte: Elaboração própria

Também para esta melhoria, a decisão de implementação deve ser cuidadosamente ponderada, tendo por base as necessidades específicas da empresa, as tarefas a serem realizadas e a relação custo-benefício associada. Normalmente, existem implicações relacionadas com a locação de recursos e potencial desemprego, contudo, considerando a polivalência dos operadores e o compromisso de os manter a trabalhar, reduz os contras específicos relacionados à implementação desta tecnologia.

4.2.2 Resultados da simulação

No contexto da segunda simulação de melhoria, procedeu-se à avaliação dos tempos médios de processamento em diversas fases do processo de fabrico de cilindros hidráulicos.

A tabela 31 ilustra os tempos de processamento médio de cada operação, e os respectivos desvios padrão.

Tabela 31. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário de melhoria II para 10 replicações

Operação	Média do tempo médio de operação por entidade	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Corte Barril	13,56	0,53
Cromagem Haste	747,55	139,35
Furação Barril	16,63	5,57
Limpeza	15,81	0,59
Montagem	61,20	3,76
Polimento Barril	310,01	19,74
Retificação Haste	47,07	11,18
Soldadura Haste	28,37	8,22
Torno Barril	269,48	19,85
Torno Haste	230,47	52,40
Torno Haste II	246,14	63,14
Torno Pistão	258,47	56,62
Torno Tampa Cabeça	330,41	57,88
Torno Tampa Extremidade	218,76	59,02
Tratamento térmico Haste	12,54	2,07

Fonte: Elaboração própria

Apesar da estratégia de integração na Indústria 5.0, com a incorporação dos *cobots*, os resultados da simulação do segundo cenário continuam a revelar que a cromagem externa, o polimento e o torneamento são os processos mais demorados. Destaca-se, especialmente, a elevada variabilidade nos tempos de processamento dos tornos. A comparação desses resultados com os demais cenários simulados será discutida no capítulo 5, que se segue.

Os dados dos tempos de espera nas diferentes filas de espera para cada operação encontram-se ilustrados na tabela 32.

Tabela 32. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário de melhoria II para 10 replicações

Filas de espera por operação	Média do tempo médio de fila de espera por replicação	Desvio padrão da média dos tempos por replicação
	Em minutos	
Corte Barril.Queue	3,67	0,28
Cromagem Haste.Queue	0,00	0,00
Envio de lote para Cromagem.Queue	224,50	34,66
Furação Barril.Queue	7,58	5,81
Hold 1.Queue	0,96	0,52
Limpeza.Queue	1331,35	141,71
Match 2.Queue1	0,00	0,00
Match 2.Queue2	1323,43	163,93
Match 2.Queue3	1274,68	205,84
Match 2.Queue4	1370,93	153,69
Match 2.Queue5	16,48	1,35
Montagem.Queue	241,37	17,50
Polimento Barril.Queue	20,48	10,93
Retificação Haste.Queue	12,02	8,13
Soldadura Haste.Queue	138,46	17,21
Torno Barril.Queue	174,57	60,36
Torno Haste II.Queue	221,49	52,41
Torno Haste.Queue	205,73	56,96
Torno Pistão.Queue	193,61	57,61
Torno Tampa Cabeça.Queue	201,04	59,00
Torno Tampa Extremidade.Queue	2,24	1,92

Fonte: Elaboração própria

A análise das filas de espera do vigente cenário revela que os tempos de espera mais longos ainda estão relacionados com as filas de MATCH, polimento e torneamento.

Não obstante, existem diferenças significativas em termos de variabilidade e tempo médio.

As filas de MATCH e tornos sobressaem devido à elevada variabilidade nos tempos de espera, o que sugere que estas operações podem ser bastante inconsistentes em relação ao tempo necessário para serem concluídas.

O polimento, apesar do tempo médio mais longo, caracteriza-se por uma variabilidade baixa, o que sugere que, embora demorado, é uma operação previsível e constante, que pode ser visto como uma vantagem, uma vez que permite um planeamento mais preciso do tempo necessário para concluir as tarefas de polimento.

As diferenças identificadas nas filas de espera, nomeadamente nas filas críticas, serão exploradas mais aprofundadamente no próximo capítulo. O mesmo conta com uma análise mais detalhada sobre estas diferenças e afetaram o fluxo de produção, considerando as estratégias específicas de otimização que foram definidas.

As taxas de ocupação dos recursos e operadores internos no sistema de produção, estão ilustradas na tabela 33 e a sua análise oferece uma visão mais clara da eficiência e alocação de tarefas.

Tabela 33. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário de melhoria II para 10 replicações

Recurso	Média da taxa média de ocupação	Desvio padrão da média da taxa média
Externo	25,96%	4,84%
OP 1	39,24%	1,08%
OP 2	39,56%	2,05%
OP 3	39,60%	1,40%
OP 4	38,77%	1,65%
OP 5	38,65%	1,99%
OP 6	27,40%	1,77%
OP 7	33,24%	1,25%
OP 8	14,97%	0,89%
OP 9	11,32%	0,64%

Fonte: Elaboração própria

O recurso "Externo," têm uma taxa média de ocupação de 26,63%, indicando que está ocupado cerca de um quarto do tempo. No entanto, a sua variabilidade é relativamente alta, sugerindo flutuações na utilização desta empresa terceira.

Os operadores de 1 a 5, por outro lado, apresentam taxas médias de ocupação mais elevadas, variando de 37,56% a 40,50%, indicando uma utilização mais ativa dos mesmos nas suas respetivas operações, com uma consistência notável, uma vez que a variabilidade é relativamente baixa.

O operador 6 exibe uma taxa média de ocupação semelhante à do recurso externo, com 26,63%. No entanto, a mostra uma variabilidade é menor, sugerindo que a sua utilização é mais consistente nas suas operações designadas. O operador 7 mantém uma taxa média de ocupação de 33,57%, indicando a sua utilização moderada, mas consistente. Já os operadores 8 e 9 têm taxas médias de ocupação mais baixas, de 10,84% e 14,93%, respetivamente, sugerindo uma utilização menos ativa em comparação com os outros, mas igualmente consistentes

A análise dos tempos representados na tabela 34, oferece informações importantes sobre o desempenho e a variabilidade do processo, no que toca à produção do cilindro hidráulico.

Tabela 34. Tempos médios da entidade cilindro no cenário de melhoria II

	Tempo médio das médias das replicações	Desvio Padrão do tempo médio da média das replicações
	Em minutos	
<i>NVA Time</i>	0,00	0,00
<i>Other Time</i>	0,00	0,00
<i>Total Time</i>	2057,58	160,58
<i>Transfer Time</i>	319,35	3,83
<i>VA Time</i>	1502,54	151,68
<i>Wait Time</i>	6968,45	783,27

Fonte: Elaboração própria

Começando pelo *NVA Time* e o *Other Time*, ambos apresentam novamente valores médios de 0,00 minutos, sugerindo que não há tempo desperdiçado em atividades não produtivas ou não relacionadas ao valor agregado, ou seja, uma abordagem focada no processo e nas atividades essenciais.

No que toca ao *Total Time*, a média é de 2057,58 minutos, com uma variabilidade relativamente baixa de 160,58 minutos. Isto indica que o tempo médio necessário para concluir o processo do cilindro de cerca de 34 horas é consistente, proporcionando uma previsibilidade na produção. O *Transfer Time* é especialmente eficiente, com um tempo médio de 319,35 minutos e uma variabilidade extremamente baixa de 3,83 minutos, indicando que as atividades de transferência de entidades são realizadas de forma rápida e consistente. Por outro lado, o *VA Time* tem uma média de 1502,54 minutos, com uma variabilidade moderada de 151,68 minutos sugerindo que, apesar de ser o tempo dedicado a atividades de valor agregado, deixa espaço para melhorar a sua consistência.

Assim como nos dados anteriores, o *Wait Time* é o elemento que se destaca, com uma média significativamente alta de 6969,45 minutos e uma variabilidade considerável de 783,27 minutos. Este continua substancialmente maior em comparação com os outros tempos, evidenciando a espera considerável das diferentes entidades que constituem o cilindro, no modelo de simulação.

4.3 Cenário de melhoria III: *Stock* de peças cromadas e *cobots*

Os dois cenários criados são a criação de um *stock* de peças cromadas e a implementação de *cobots* na linha de produção de cilindros hidráulicos. Neste cenário, estas situações foram unidas para avaliar como é que as suas interações podem moldar a eficiência operacional e a capacidade de resposta da linha de produção como um todo.

Esta simulação integrada dos cenários permitiu um entendimento abrangente do potencial de aprimoramento da linha de produção, com implicações significativas para a indústria de cilindros hidráulicos. Ao unir a criação de *stock* de peças cromadas com a introdução de *cobots*, o estudo visa oferecer recomendações sólidas e orientações para a implementação eficaz dessas melhorias no ambiente de produção real.

O modelo de simulação do terceiro cenário de melhoria, é semelhante ao segundo, ilustrado pela figura 30 anterior, que inclui a modelação do *stock* de peças. Por outro lado, a implementação de *cobots* é modelada pelas alterações dos dados dos módulos de processo.

4.3.1 Prós e contras

No terceiro cenário, a estratégia que representa uma combinação das considerações tanto da criação de *stock* quanto da implementação de *cobots* na linha de produção.

Os benefícios deste, podem então ser vistos como a combinação dos prós associados à criação de *stock* para peças cromadas, juntamente com os prós relacionados à implementação de *cobots*. Da mesma forma, os desafios deste cenário traduzem a união dos contras de ambas as estratégias, ilustrados pelas tabelas 24 e 30, respetivamente.

De modo homólogo, a escolha desta hipótese representa um equilíbrio entre a disponibilidade imediata de peças e a automação da linha de produção, aproveitando os benefícios de ambas as estratégias, enquanto enfrenta os desafios correspondentes. Esta abordagem híbrida pode ser uma solução eficaz para atender às necessidades específicas da empresa, otimizando a produção e garantindo a qualidade do produto.

4.3.2 Resultados da simulação

Os dados dos tempos médios e desvios padrão das operações, para o cenário com criação de *stock* e a introdução de *cobots* encontra-se ilustrado na tabela 35.

Tabela 35. Tempos médios de processamento obtidos no Arena® por operação cenário de melhoria III para 10 replicações

Operação	Média do tempo médio de operação por entidade	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Corte Barril	13,25	0,53
Cromagem Haste	747,45	110,09
Furação Barril	45,13	8,32
Limpeza	18,45	1,07
Montagem	72,58	7,43
Polimento Barril	301,42	24,16
Retificação Haste	94,13	27,90
Soldadura Haste	29,64	7,39
Torno Barril	272,41	21,53
Torno Haste	216,41	25,95
Torno Haste II	256,92	57,88

Torno Pistão	265,23	54,63
Torno Tampa Cabeça	328,85	62,68
Torno Tampa Extremidade	222,62	36,63
Tratamento térmico Haste	14,33	2,59

Fonte: Elaboração própria

No cenário combinado, é notável que a cromagem externa, o polimento e o torneamento ainda apresentam os tempos médios de processamento mais prolongados. É importante destacar que todos esses processos, considerados críticos, demonstram valores de variabilidade moderada. Essa moderação na variabilidade pode sugerir que esses processos estão em um estado de consistência relativamente estável.

A análise das filas de espera destaca a importância da gestão das filas com tempos médios mais longos e variabilidade significativa para otimizar o fluxo de trabalho. Os seus dados são ilustrados pela tabela 36.

Tabela 36. Tempo médio das filas de espera obtidas no Arena® por fila no cenário de melhoria III para 10 replicações

Filas de espera por operação	Média do tempo médio de fila de espera	Desvio padrão da média dos tempos
	Em minutos	
Corte Barril.Queue	3,67	0,28
Cromagem Haste.Queue	0,00	0,00
Envio de lote para Cromagem.Queue	210,95	35,80
Furação Barril.Queue	36,19	8,23
Hold 1.Queue	0,00	0,00
Limpeza.Queue	3,47	0,98
Match 2.Queue1	260,06	52,23
Match 2.Queue2	316,42	64,73
Match 2.Queue3	218,17	57,42
Match 2.Queue4	321,56	109,73
Match 2.Queue5	533,88	23,95
Montagem.Queue	26,60	7,88
Polimento Barril.Queue	234,23	22,18
Retificação Haste.Queue	67,82	27,78
Soldadura Haste.Queue	13,17	7,09
Torno Barril.Queue	141,06	18,59
Torno Haste II.Queue	185,33	57,46
Torno Haste.Queue	207,43	26,56
Torno Pistão.Queue	212,30	55,51
Torno Tampa Cabeça.Queue	193,32	61,11
Torno Tampa Extremidade.Queue	204,87	37,24
Tratamento térmico Haste.Queue	4,27	2,55

Fonte: Elaboração própria

Os tempos de espera mais longos obtidos pela simulação do terceiro cenário ainda estão associados às filas de MATCH, polimento e tornos.

As filas de MATCH e tornos registam uma elevada variabilidade nos tempos de espera, sugerindo inconsistência em relação ao tempo necessário para serem concluídas. Por outro lado, o polimento, apesar de apresentar um tempo médio mais longo, é caracterizado por uma variabilidade baixa, sugerindo que é uma operação previsível e constante.

As diferenças identificadas nas filas de espera, com destaque para as características distintas das filas críticas, serão alvo de um estudo mais aprofundado no próximo capítulo, juntamente com os outros cenários modelados.

A análise dos valores da taxa de ocupação, ilustrados na tabela 37 revela informações sobre a utilização dos vários recursos ao longo do processo produtivo. Neste cenário incluem-se os robôs colaborativos para as operações de montagem e torneamento, além dos recursos originais.

Tabela 37. Média das taxas de ocupação obtidas no Arena® por recurso no cenário de melhoria III para 10 replicações

Recurso	Média da taxa média de ocupação	Desvio padrão da média da taxa média
Externo	25,95%	3,82%
OP 1	38,39%	1,72%
OP 2	39,07%	1,42%
OP 3	38,50%	1,68%
OP 4	37,17%	0,96%
OP 5	36,55%	1,29%
OP 6	32,09%	1,29%
OP 7	32,74%	1,83%
OP 8	17,91%	1,20%
OP 9	15,11%	0,83%

Fonte: Elaboração própria

O recurso "Externo," mostra uma taxa de ocupação média de 25,95%, com baixa variabilidade de 3,82%, sugerindo uma utilização relativamente consistente. Os recursos internos (OP 1 a OP 9), mostram taxas de ocupação variadas, entre os 15,11% e 39,07%.

Alguns recursos, como OP 1, OP 3 e OP 4, mostram taxas de ocupação mais altas e consistentes, indicando uma utilização eficiente dos mesmos. Por outro lado, OP 8 e OP 9 têm taxas mais baixas, sugerindo que a sua capacidade é subutilizada e requer uma análise mais aprofundada. Os outros recursos apresentam flutuações na sua ocupação, indicando a necessidade de monitorização contínua para otimizar o desempenho.

Os dados apresentados na tabela 38 referem-se aos tempos médios associados ao fabrico do cilindro hidráulico neste último cenário de melhoria. Cada categoria representa uma parcela do tempo total gasto no processo relacionado ao cilindro.

Tabela 38. Tempos médios da entidade cilindro no cenário de melhoria III

	Tempo médio das médias das replicações	Desvio Padrão do tempo médio da média das replicações
	Em minutos	
<i>NVA Time</i>	0,00	0,00
<i>Other Time</i>	0,00	0,00
<i>Total Time</i>	1021,81	29,47
<i>Transfer Time</i>	172,48	50,02
<i>VA Time</i>	629,05	267,15
<i>Wait Time</i>	2788,89	214,59

Fonte: Elaboração própria

Primeiramente, não foram identificados períodos de *NVA Time* ou *Other Time* - ambas as categorias de tempo estão registadas como 0,00, no entanto, o tempo total para produzir o "Cilindro" é de 1021,81 minutos, com um desvio padrão de 29,47 minutos, ou seja, cerca de 17 horas.

O tempo de transferência, *Transfer Time*, é de 172,48 minutos, com um desvio padrão de 50,02 minutos. Este é o tempo gasto entre transferências da entidade, entre as diferentes do processo produtivo. A variabilidade neste tempo pode indicar possíveis áreas de melhoria no fluxo de trabalho para reduzir o tempo de transferência.

O tempo de Valor Agregado é de 629,05 minutos, mas o desvio padrão notavelmente alto de 267,15 minutos, o que sugere que existe uma variabilidade significativa na entrega de valor durante o processo. Isto pode ser entendido como um ponto de atenção para garantir consistência na entrega de valor agregado.

O tempo de espera continua muito maior em comparação com os outros, homologamente aos cenários já analisado, com uma média de 2788,89 minutos e um desvio padrão de 214,59 minutos.

5 Validação das propostas

No âmbito do presente estudo, realizou-se uma análise das estratégias delineadas para otimizar processos e implementar mudanças no contexto fabril exposto. Este capítulo tem como objetivo principal a validação destas propostas por meio da comparação de métricas de produção obtidas da simulação de diferentes cenários – tempos médios de processamento, tempos médios de filas de espera, taxas de ocupação, tempos de produção total e tempos de transferência. Além disso, será conduzida uma ACB simplificada de para avaliar a viabilidade da implementação das estratégias propostas.

Através da combinação dessas abordagens, tem-se em vista fornecer uma visão abrangente e devidamente fundamenta das propostas em estudo, contribuindo para uma melhor compreensão de como as mudanças propostas afetam a produção e a viabilidade financeira do projeto. Isto permite, no fim, fundamente uma tomada de decisão sobre ase estratégias em relação ao futuro.

5.1 Comparação dos indicadores de produção

Adiante, segue a análise dos quatro cenários do estudo de simulação atual, cada um como uma tentativa de melhorar o processo de produção. Cada cenário é avaliado usando as métricas já abordadas de tempos médios de processamento, tempos médios de espera em filas, taxa média de ocupação de recursos e tempo médio de produção dos cilindros hidráulicos e principal objetivo é compreender como é que cada abordagem afeta o desempenho do sistema.

5.1.1 Tempos de processamento das operações

O cenário atual forneceu uma linha de base e os tempos de processo mais longos, foram identificados como um gargalo e uma oportunidade de melhoria. A fim de proporcionar uma compreensão mais aprofundada e visual das diferenças entre os cenários, os gráficos das figuras 32 e 33 apresentam uma comparação clara entre os tempos médios e os desvios padrão correspondentes, respectivamente. Para análises mais detalhadas e aprofundadas, todos os dados foram tabelados e estão disponíveis em anexo, na tabela A2.

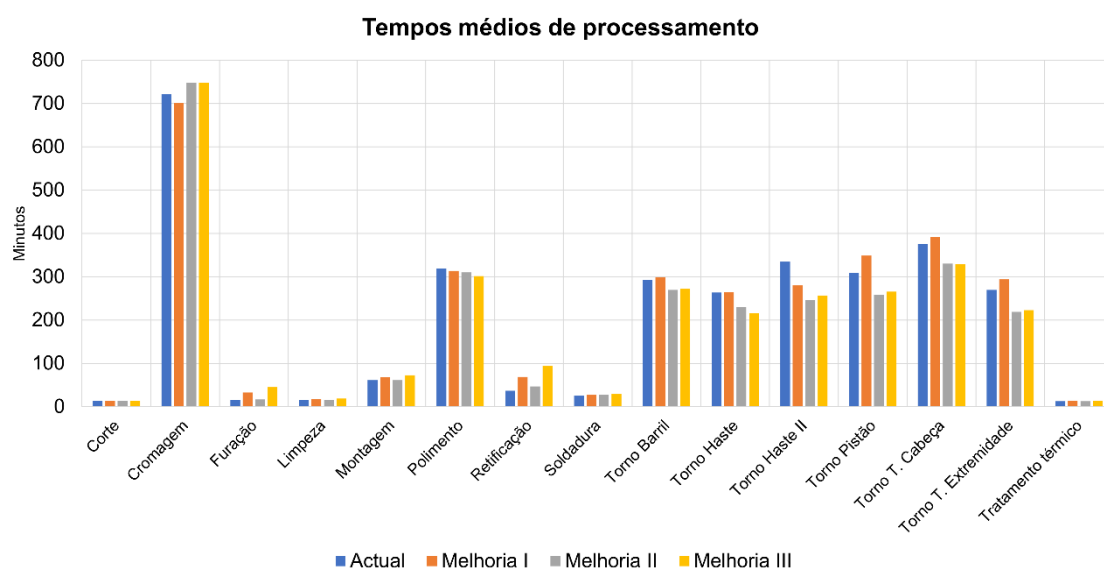


Figura 32. Gráfico de comparação dos tempos médios de processamento dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

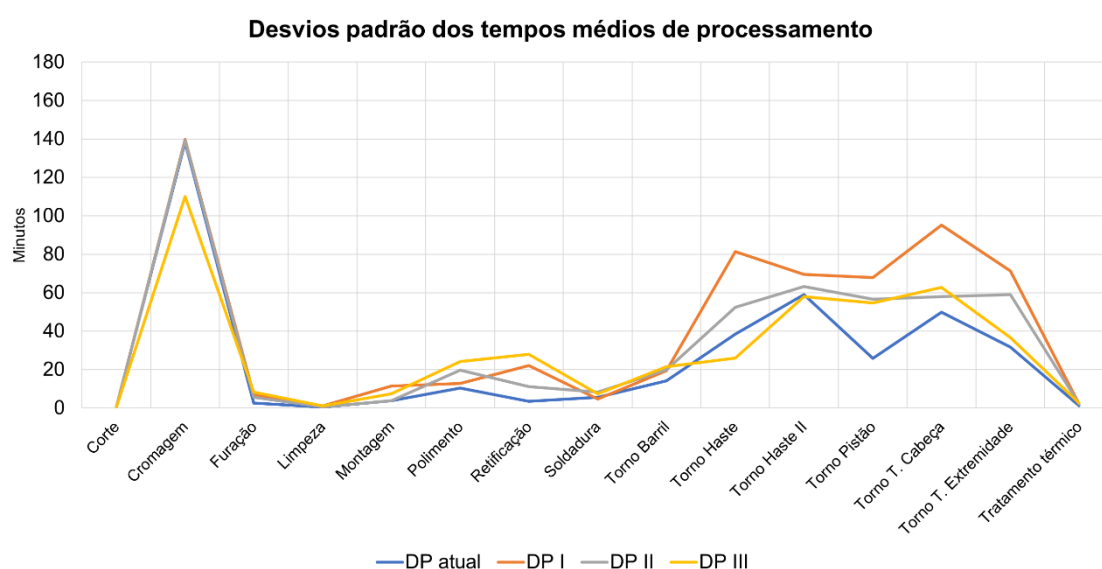


Figura 33. Gráfico de comparação do Desvio Padrão médio dos tempos de processamento médios dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

No Cenário Melhoria I, a criação de stock não refletiu grandes diferenças nos tempos de processamento das operações, pelo que se registam tempos semelhantes, registados nas tabelas 20 e 25, assim como os desvios padrão. Dos quatro cenários representados, a simulação deste cenário regista os piores desvios nas operações de torneamento, evidenciado a falta de consistência nestas operações. Isto pode refletir o mau desempenho dos recursos, tanto equipamentos como operadores, ou más condições da matéria-prima.

No Cenário Melhoria II, a implementação de *cobots* traduz-se em ligeiras melhorias nos tempos de processamento das operações consideradas críticas. Houve uma melhoria de cerca de 8 minutos no polimento, enquanto os tronos sofreram reduções entre os 20 e 90 minutos. Estas melhorias podem ser justificadas pela automação proporcionada pelos *cobots*, associada a um trabalho mais rápido e preciso, que reduz os tempos de inatividade. No que toca a variabilidade dos preços, os processos de torneamento continuam com variabilidades altas, mostrando algumas inconsistências no processo.

Em resumo, a implementação de *cobots* representa um passo importante em direção à automação e ao aumento da eficiência. Esta abordagem inovadora demonstra o compromisso com a melhoria contínua e a adoção de tecnologias avançadas para impulsionar a eficiência da produção.

No Cenário Melhoria III, registam-se os tempos de processamento mais reduzidos dos quatro cenários, tornado esta combinação de estratégias a mais eficiente em termos de tempo e consistência em comparação com os outros cenários. A introdução de *cobots* e o uso de peças cromadas pré-processadas, provou ser eficaz na redução dos tempos de operação e na melhoria da variabilidade. Este cenário representa uma abordagem inovadora e eficaz para otimizar o processo de fabrico, tornando-o mais ágil e capaz de enfrentar desafios de produção com sucesso.

Concluindo, cada cenário apresenta suas próprias características e desafios, e a escolha entre estes depende das prioridades da produção, seja foco na eficiência, a consistência ou um equilíbrio entre os dois. O Cenário Melhoria III destaca-se como o mais eficiente em termos de tempo e consistência, sugerindo que as estratégias implementadas têm um impacto positivo no processo de fabrico.

5.1.2 Tempos médios de filas de espera

Os gráficos das Figuras 34 e 35 apresentam uma visão geral dos tempos médios das filas de espera nos diferentes cenários e a respectiva variabilidade, enquanto os dados detalhados estão disponíveis na tabela A3, em anexo.

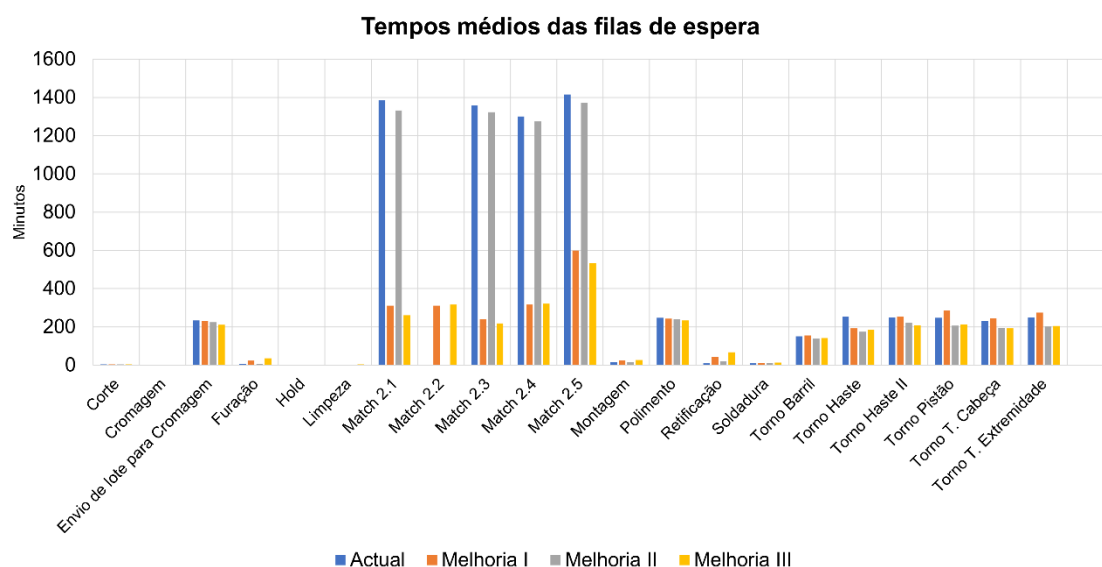


Figura 35. Gráfico de comparação dos tempos médios das filas de espera dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

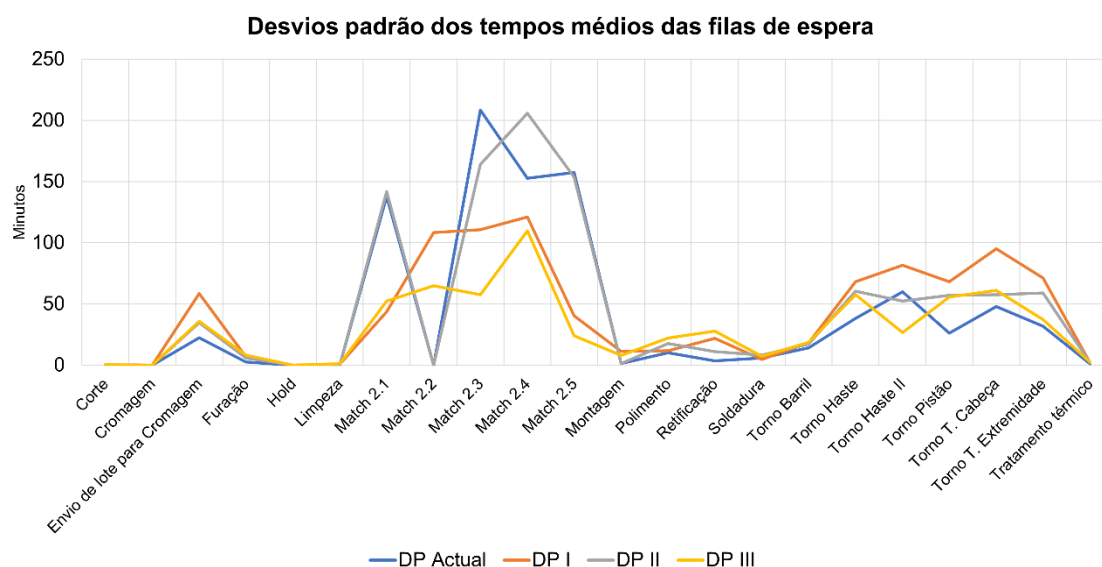


Figura 34. Gráfico de comparação dos desvios padrão dos tempos médios das filas de espera dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

No cenário de Melhoria I, onde o foco está na criação de *stock* de peças cromadas, destaca-se o impacto nas filas de MATCH, que foram significativamente afetadas pela disponibilidade dessas peças cromadas. Isto resultou, de forma geral, numa diminuição

nos tempos de espera nas filas. Especificamente, a estratégia de aprovisionamento utilizada reduzir as filas de espera associadas à espera das entidades pela haste em cromagem desempenhou um papel fundamental na otimização do processo. Além da redução nos tempos de espera, estas filas mostram uma variabilidade inferior, demonstrando a consistência na disponibilidade das peças, ao longo do estudo simulado.

Por outro, apesar do stock criado, ainda se verifica um tempo significativo de preparação das entidades “Haste” para a cromagem.

O Cenário de Melhoria II, mostrou diferenças insignificantes face ao cenário atual do processo produtivo. A implementação da tecnologia 5.0 teve pouca influencia nos tempos das filas de espera, contudo podem-se destacar as reduções ligeiras aos tempos das filas das operações de torneamento, que traduzem, a eficiência operacional dos *cobots* implementados.

Por fim, o Cenário de Melhoria III, trouxe uma melhoria notável nos tempos das filas MATCH, assim como uma redução significativa na respetiva variabilidade, através do *stock* de peças introduzido. Além disso, operações de torno mostraram melhorias evidentes, com reduções nas médias, indicando uma gestão eficaz das filas de espera, com a implementação dos *cobots*. Mais uma vez, a combinação das estratégias mostra ser bastante positiva no desempenho do sistema.

Estas análises ressaltam a importância da otimização dos processos através da redução dos tempos de espera e melhorar a eficiência da produção. O Cenário de Melhoria III destacou-se como o mais eficaz em termos de gestão das filas de espera, sugerindo que a implementação de estratégias de melhoria pode levar a resultados positivos num ambiente de fabrico.

5.1.3 Taxa de ocupação média dos recursos

Os dados ilustrados pelos gráficos da figura 33 representam os valores das taxas de ocupação de recursos externos e operadores (OP 1 a OP 9) no ambiente de produção e os respectivos desvios padrão, nas figuras 36 e 37. Estes valores, que refletem a percentagem de tempo em que esses recursos estão em uso em relação ao tempo total disponível, podem ser consultados nas respectivas tabelas A4 e A5, em anexo.

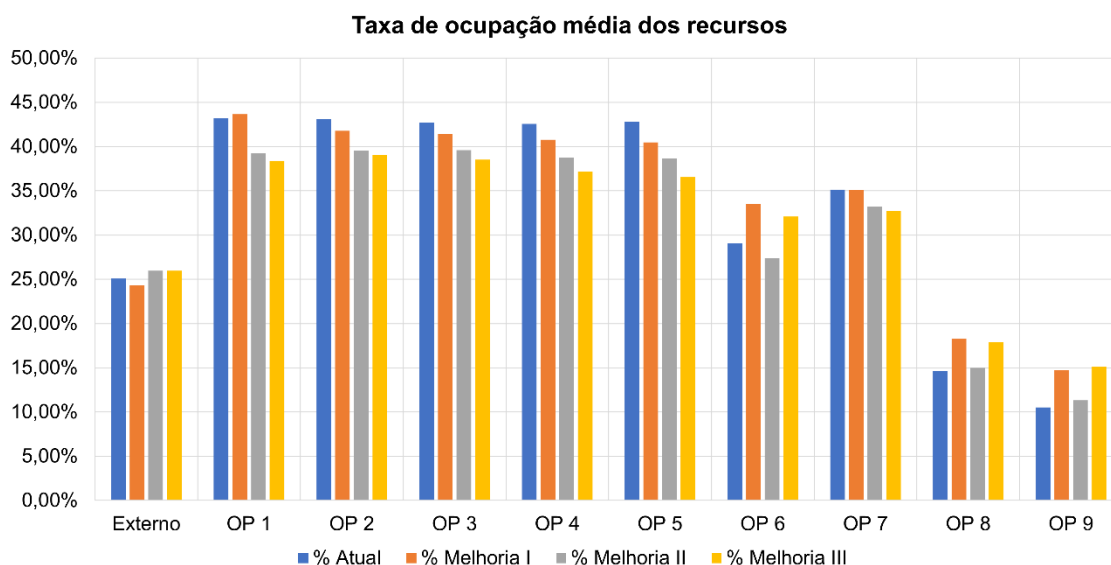


Figura 37. Gráfico de comparação das taxas de ocupação média dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

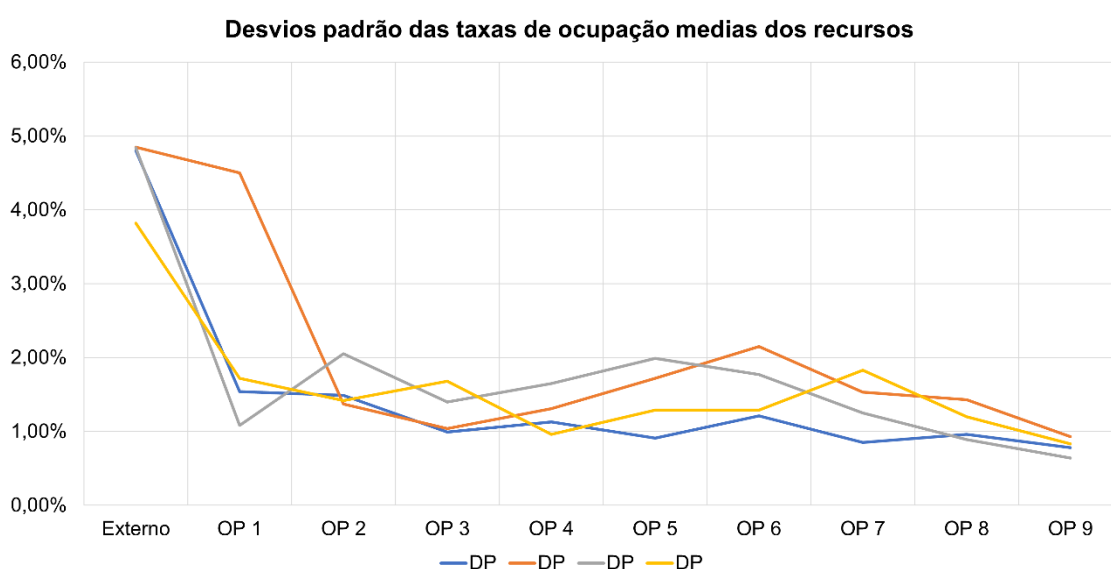


Figura 36. Gráfico de comparação dos desvios padrão das taxas de ocupação médias dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

No Cenário I, que se destaca pela criação do *stock* de peças cromadas, a taxa de ocupação dos recursos externos diminui ligeiramente. No entanto, as taxas de ocupação dos operadores ainda variam significativamente, com o OP 1 tendo a maior taxa de ocupação de 43,68% e o OP 9 a menor taxa de ocupação de 14,74%.

No Cenário II, onde ocorre a implementação de *cobots* no torno e no polimento, as taxas de ocupação dos operadores continuam a variar. Contudo, em ambos os cenários, as melhorias sugerem uma melhor alocação e utilização dos recursos.

No Cenário III, que combina a criação de *stock* com a implementação de *cobots*, as taxas de ocupação dos operadores também variam, mas, de forma geral, mostra as taxas de ocupação mais baixas, indicando uma gestão mais eficiente dos recursos, os operadores.

Relativamente ao recurso externo, que representa a empresa terceira de cromagem, tem uma ocupação semelhante ao longo dos cenários, mas uma variabilidade elevada, traduzindo a falta de consistência na gestão e na relação com a empresa terceira.

Esta análise sugere que a carga de trabalho não é uniforme entre os operadores em todos os cenários, e as mudanças nos processos de produção afetam as taxas de ocupação dos recursos externos. É fundamental uma monitorização continua destas taxas para otimizar a alocação de recursos e melhorar a eficiência geral da produção.

5.1.4 Tempo total de fabrico do cilindro

O gráfico da figura 38 proporciona uma representação visual dos dados relativos à entidade final, o cilindro hidráulico, nos quatro cenários simulados.

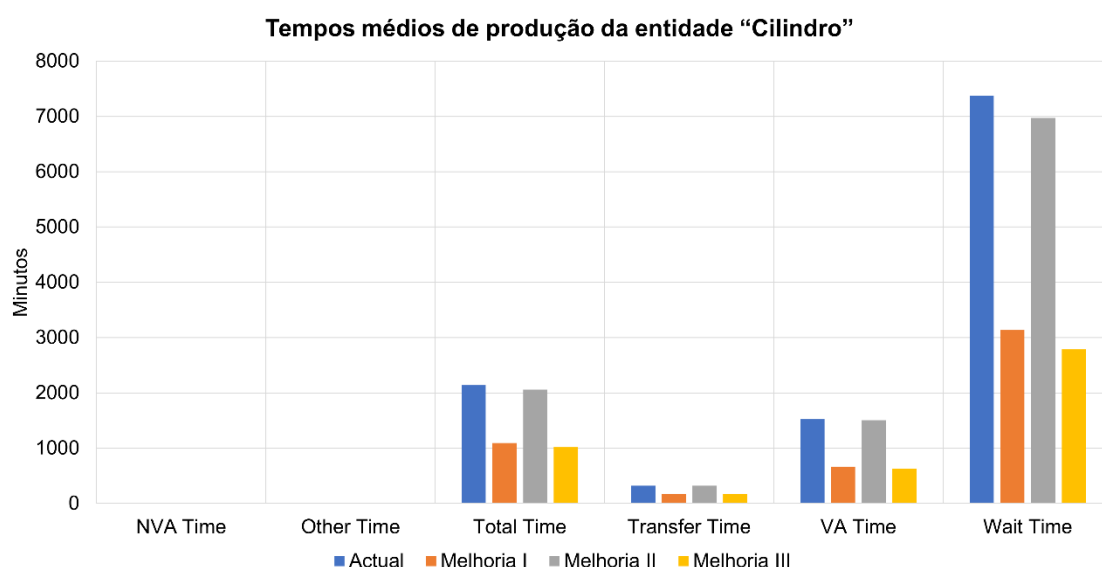


Figura 38. Gráfico de comparação dos tempos do cilindro dos quatro cenários

Fonte: Elaboração própria

Os valores completos estão disponíveis em anexo, na tabela A6, para possibilitar uma análise mais detalhada.

Em todos os cenários o *NVA Time* e *Other Time* são nulos. No Cenário I, observa-se uma melhoria significativa em relação ao cenário atual, em todos os tempos. O tempo total de produção foi reduzido para quase metade, e o *Wait Time* também diminuiu consideravelmente. Por outro lado, o *VA Time* diminuiu, indicando uma alocação mais eficiente do tempo em atividades de valor agregado.

No Cenário II, regista-se outra melhoria em relação ao cenário atual, porém não tao boa como o cenário precedente. O tempo total de produção manteve-se muito próximo do atual assim como o *VA Time*, apesar de ter verificado um aumento. No entanto, o *Wait Time* registou valores extremamente altos, indicando que, apesar das melhorias, ainda existem atrasos significativos no processo.

O terceiro cenário, que combina as melhorias dos cenários I e II, regista uma eficiência adicional. O tempo total de produção é de é o mais baixo de todos e o *VA Time* aumentou em comparação com os cenários anteriores. O *Wait Time* também diminuiu, registando os valores mais baixos dos quatro cenários.

Concluindo, os dados analisados revelam que os cenários I e III proporcionaram melhorias significativas em relação ao cenário atual, com reduções notáveis no tempo total de produção e melhorias substanciais nos tempos restantes. Não obstante, é importante notar que, no cenário II, o *Wait Time* permanece consideravelmente alto, apesar da sua diminuição, quando comparado com o cenário atual do processo de fabrico. Isto reflete os desafios relacionados à coordenação e sincronização entre as diversas entidades envolvidas na produção do cilindro hidráulico, já explicado anteriormente. Para continuar a aprimorar a eficiência do processo, será crucial enfrentar estes desafios e procurar maneiras de reduzir ainda mais os atrasos, tendo em vista uma produção mais fluida e eficaz.

5.2 Análise ACB

Além da comparação dos indicadores de produção, também foi conduzido uma análise ACB simplificada em relação aos cenários desenvolvidos. Estes cenários abrangem a criação de um *stock* de peças cromadas, a implementação de *cobots* e a combinação destes últimos. O principal objetivo por trás destas mudanças é iniciar a integração com as tecnologias 5.0 na linha de produção de cilindros hidráulicos, com o

propósito de aumentar a produtividade, ao mesmo tempo em que são asseguradas condições de trabalho superiores para os operadores.

5.2.1 Identificação e quantificação dos custos

5.2.1.1. Cenário atual

No cenário produtivo atual, ilustrado na tabela 39, a produção de um cilindro hidráulico requer um tempo total de 2142,90 minutos, que é equivalente a aproximadamente 35,72 horas de trabalho. Com base nesses números, pode-se calcular que a produção de um cilindro requer aproximadamente um dia e meio de trabalho. Adicionalmente, ao longo de um ano, considerando 251 dias trabalho e a capacidade de produção atual, a empresa mostra-se capaz de produzir cerca de 168 cilindros hidráulicos.

Tabela 39. Dados estimados da produção dos cilindros hidráulicos

Tempo total em minutos	2 142,90
Tempo total estimado em horas	35,72
Tempo total estimado em dias	1,5
Produção estimada num ano	168

Fonte: Elaboração própria

Os custos de mão de obra, detalhados na tabela 40, foram calculados tendo em consideração apenas os operadores da linha de produção, através dum sistema de processamento de salários. Isso inclui os salários com base no salário mínimo nacional de Portugal no ano de 2023, além dos subsídios de alimentação correspondentes.

Tabela 40. Encargos Salariais estimados.

Enquadramento IRS		N.º de dependentes	
Não casado		0	
Salário Base		Subsídio de refeição (diário)	
760,00 €		22 dias	
Dias de trabalho (mensal)		Renumerações adicionais	
22		0	
% Segurança Social			
11			

Funcionário		Empresa	
Total de abonos	1 244,00 €	Total Mensal Segurança Social (23,75%)	255,58 €
Renumeração Tributável	1 076,14 €	Total Mensal Fundo de Compensação	7,6 €
Segurança Social (11%)	118,38 €	Total Anual Segurança Social (23,75%)	3 578,17 €
IRS (12,1%)	140,97 €	Total Anual Fundo Compensação	106,4 €
Renumeração Líquida	984,65 €	Total Anual Seguro	90,00 €

Total Anual	19 517,75 €
Total anual para 9 funcionários	175 659,75 €

Fonte: Adaptado de PMESalarios (2023)

Os custos mencionados estão associados ao emprego de um único operador, incluindo salário e contribuições obrigatórias, proporcionando uma visão clara dos custos financeiros relacionados a esta posição. Para os nove operadores estudados foi considerado o encargo salarial calculado na última linha.

A tabela 41 fornece um panorama das diferentes máquinas industriais utilizadas ao longo da produção dos cilindros hidráulicos, detalhando as suas capacidades e o consumo de energia em kWh.

Tabela 41. Capacidade e potência por equipamento

Equipamento	Capacidade	Potência (kWh)
Torno CNC	Ø400x630 mm	10
Torno 1	Ø250x1500 mm	5,5
Torno 2	Ø250x2500 mm	5,5
Torno 3	Ø300x3000 mm	7,5
Torno 4	Ø400x3000 mm	10
Retificadora	Ø280x2000 mm	6
Rebarbadora	Ø300x2200 mm	5
Engenho de Furar	0-26 mm	2
Serra Circular	Ø350 mm	2
Máquina de soldadura MGAW	500 amp	15
Máquina de Tratamento Térmico de Média-frequência	10 kHz	200

Fonte: Elaboração própria

A coluna "Capacidade" mostra as dimensões máximas de maquinação que cada máquina pode acomodar eficientemente, especificadas em diâmetro (Ø) e comprimento ou altura, enquanto a coluna "Potência (kWh)" fornece informações sobre o consumo de energia elétrica de cada máquina, em kWh. Esses dados foram essenciais para calcular os custos operacionais e controlar o consumo de energia em processos de produção.

A tabela 42 fornece um panorama dos preços de eletricidade por quilowatt-hora para consumidores com uma capacidade contratada de eletricidade entre 3,45 kVA e 6,9 kVA, juntamente com os planos de energia associados de várias empresas fornecedoras.

Tabela 42. Preço por kWh de eletricidade em Portugal

Empresa	Preço kWh Eletricidade (3,45 kVA ; 6,9 kVA)	Plano de Energia
EDP Comercial	0,20 €	Plano Endesa e-Luz e Gás
Endesa	0,13 €	Endesa e-Luz e Gás
Goldenergy	0,13 €	Luz e Gás (com DD e FE)
Iberdrola	0,13 €	Plano Casa Iberdrola
Galp	0,17 €	Casa Galp e Continente
Repsol	0,15 €	Plano Repsol Viva
Média	0,15 €	

Fonte: <https://www.comparamais.pt/blog/preco-kwh-e-como-calculiar>

A média dos preços listados na tabela anterior é de 0,15 cêntimos por kWh, oferecendo uma estimativa representativa do custo energético para os consumidores dentro da faixa de capacidade contratada de 3,45 kVA a 6,9 kVA em Portugal.

Por fim, em média, a manutenção anual de um equipamento de maquinaria industrial pode representar de 2% a 5% do valor da máquina, dependendo das condições e requisitos específicos. Isto significa que, se a máquina de tiver um valor de aquisição de 100.000 euros, é expectável gastar entre 2.000 e 5.000 euros em manutenção anual. Assim sendo, a tabela 43 ilustra a estimativa dos custos de manutenção dos equipamentos usados ao longo da produção dos cilindros hidráulicos.

Tabela 43. Custos estimados de manutenção

Custo estimado de manutenção (unidade)	2 000,00 €
Quantidade	11
Total	22 000,00€

Fonte: Elaboração própria

A tabela 44 traduz o consumo de energia em quilowatt-hora (kWh) e os custos associados ao uso das máquinas descritas, com base no preço médio estimado de 0,15 euros por kWh.

Tabela 44. Preço estimado do kWh por equipamento

Equipamento	Potência (kWh)	€/kWh
Torno CNC	10	1,50 €
Torno 1	5,5	0,83 €
Torno 2	5,5	0,83 €
Torno 3	7,5	1,13 €
Torno 4	10	1,50 €
Retificadora	6	0,90 €
Rebarbadora	5	0,75 €
Engenho de Furar	2	0,30 €
Serra Circular	2	0,30 €
Máquina de soldadura MGAW	15	2,26 €
Máquina de Tratamento Térmico	200	30,09 €
Total		40,40 €

Fonte: Elaboração própria

O total calculado na tabela, de 40,40 euros, indica que custo total estimado para operar todas as máquinas listadas. Este cálculo é obtido multiplicando o consumo de energia de cada máquina pelo custo por kWh e a soma de todos os valores.

No contexto das operações industriais, os dados fornecidos na tabela 45 fornecem uma visão abrangente dos respectivos custos estimados.

Tabela 45. Estimativa dos custos anuais

		Custos estimados anuais
Horas de produção estimadas para uma unidade	35,7 h	
Unidades estimadas a produzir num ano	168	
Consumo energético	40,40 €/h	243 371,41 €
Custos estimados de mão de obra	19 517,75 €	175 659,75 €
Custos estimados de manutenção	2 000,00 €	22 000,00 €
Total		441 031,16 €

Fonte: Elaboração própria

O custo de energia, de 243 371,41 euros, é uma estimativa baseada as horas de produção das 168 unidades e o custo por hora de energia. Adicionalmente, a mão de obra contribui com 175 659,75 euros por ano. Esses valores foram estimados considerando o salário mínimo nacional de 2023 e os fatores de enquadramento fiscal, como o estado civil e o número de dependentes dos trabalhadores (tabela 37).

A manutenção é crucial para manter os equipamentos a operar de forma contínua. Os custos anuais de manutenção são estimados em 22 000,00 euros para um total de 11 máquinas, com um custo médio de 2 000 euros por máquina. Estas estimativas são baseadas na média dos custos anuais de manutenção para equipamentos semelhantes vendidos pela empresa da aluna. Esta abordagem considera a experiência prática da empresa com seus próprios equipamentos, tornando as estimativas mais confiáveis e realistas.

No total, os custos operacionais estimados foram de 441 031,16 euros por ano, considerando os componentes descritos - energia, mão de obra e manutenção.

5.2.1.2. Melhorias propostas

Levando em consideração que a empresa já possui um local de armazenamento para matéria-prima, outros materiais e produtos acabados, não foi necessário incorrer em custos de aprovisionamento adicionais para a criação do *stock* para as peças cromadas. Os custos relacionados à aquisição e armazenamento destas podem ser otimizados usando a infraestrutura de armazenamento existente, resultado em economias significativas

quando comparado com a necessidade de criar instalações de armazenamento novas ou incorrer em custos adicionais.

Após uma pesquisa na web, constatou-se que o investimento num único *cobot* varia entre 20 e 30 mil euros. Ao considerar a instalação de três robôs, o investimento total médio seria de 82,5 mil euros, refletindo o custo estimado para a aquisição e implementação dos três *cobots*, como ilustrado pela tabela 46.

Tabela 46. Custo estimado de aquisição e instalação de *cobot*

Custo médio de aquisição e instalação (unidade) s/ IVA	27 500,00 €
Quantidade	3
Total	82 500,00 €

Fonte: Elaboração própria

5.2.2 Análise Financeira

5.2.2.1. Fluxos Financeiros

Na situação atual, a produção anual é de aproximadamente 168 cilindros. Os custos de energia neste cenário são de 1.442,90 euros por kWh, além dos encargos salariais dos funcionários, que totalizam 175.659,75 euros, e os custos de manutenção, que alcançam 22.000 euros. Para avaliar os cenários de melhoria propostos, foram considerados os custos de energia estimados para a mesma quantidade de produção, conforme apresentado na tabela 47.

Tabela 47. Custo estimado de energia para a produção anual

	Cenário Atual	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Tempo total em minutos (aprox.)	2142,9	1093,16	2057,58	1021,81
Tempo total em horas (aprox.)	35,7	18,2	34,3	17,0
Tempo total em dias (aprox.)	1,5	0,8	1,4	0,7
Custo kWh para produção de 1 unidade	1 442,90 €	736,07 €	1 436,89 €	713,57 €
Custo kWh para produção de 168 unidades	243 371,41 €	124 151,33 €	242 357,75 €	120 356,72 €

Fonte: Elaboração própria

Os custos de energia foram obtidos através da multiplicação do €/kWh estimado para cada cenário para a produção de uma unidade pelas 168 unidades anuais.

Os dados apresentados no gráfico da figura 39 ilustram os fluxos de caixa ao longo de um período de cinco anos, dos quatro cenários objetos de estudo do presente trabalho. Estes, que representam diferentes estratégias, têm impactos significativos nos custos operacionais e investimentos iniciais da empresa que se dispõem devidamente tabelados em anexo, nas tabelas A8 e A9

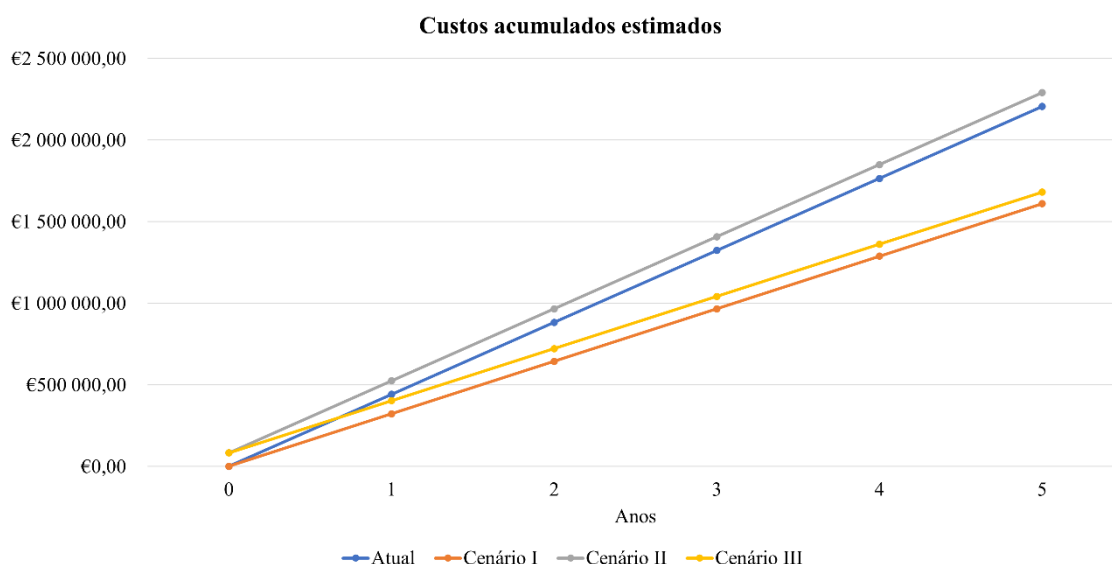


Figura 39. Gráfico dos custos acumulados

Fonte: Elaboração própria

O cenário atual, representado pela linha azul no gráfico, é caracterizado pela manutenção de custos anuais constantes, que permanecem em 441 031 € ao longo dos cinco anos. Isto reflete uma abordagem de estabilidade, onde a empresa não considera investimentos significativos ou mudanças substanciais nas suas operações. O custo acumulado no final do quinto ano atinge 2 205 156 €.

O cenário I, a cor de laranja, com *stock* de peças, apresenta uma estratégia diferente, tendo em vista economizar nos custos operacionais anuais, que são reduzidos para 321 811 € em cada ano, sem a necessidade de investimentos iniciais significativos. Ao final do quinto ano, o custo acumulado é de 1 609 055 €, revelando uma opção atrativa para a empresa, caso deseje otimizar os seus processos existentes e direcionar economias para outros investimentos ou melhorias operacionais.

No cenário II, com *cobots*, representado pela linha cinzenta, a empresa faz um investimento inicial considerável de 82 500 € no ano 0, seguido de custos operacionais crescentes nos anos subsequentes. Isto resulta num custo acumulado de 2 291 719 € no final do quinto ano. Embora esta estratégia prometa algumas melhorias operacionais substanciais, como abordado anteriormente, requer também um investimento inicial

significativo, que torna os custos operacionais maiores que os custos atuais. De todas, esta escolha não parece adequada, a não ser que a empresa se mostrasse disposta a fazer este investimento com a expectativa de economia a longo prazo e melhorias operacionais notáveis.

Por fim, a linha amarela ilustra o cenário III combinado, que representa um meio-termo entre economia de custos (semelhante ao Cenário I) e benefícios operacionais moderados (semelhante ao Cenário II). Neste cenário, a empresa realiza um investimento inicial de 82 500 € no ano 0 e os custos operacionais anuais variam entre os valores dos Cenários I e II. O custo acumulado no final do quinto ano é de 1 682 456 €. Esta estratégia mostra um equilíbrio entre economias de custos e melhorias operacionais moderadas.

A escolha entre estes cenários depende das metas financeiras e estratégicas específicas da empresa. O Cenário I oferece economias imediatas sem a necessidade de investimentos significativos, enquanto o Cenário II traz melhorias operacionais substanciais, mas com um custo inicial alto. O Cenário III visa um equilíbrio entre estas opções. A decisão final deve ser tomada após uma análise financeira detalhada, levando em consideração as prioridades estratégicas de longo prazo da organização e sua capacidade de investimento.

5.2.2.2. Indicadores de Viabilidade Financeira

Antes de mais, é necessário ressaltar que, no âmbito do presente estudo acadêmico, optou-se por utilizar uma taxa de atratividade de 10% para avaliar o projeto de investimento, por ser um valor frequentemente usada. A taxa de atratividade representa o retorno mínimo esperado para justificar um investimento e os 10% foram selecionados para representar a expectativa de retorno que a empresa considera aceitável.

A partir dos fluxos financeiros, foram calculados os indicadores de viabilidade económica utilizando o software Microsoft Office Excel, ilustrados na tabela 48.

Tabela 48. Indicadores de viabilidade calculados para cada cenário

	Cenário Atual	Cenário I	Cenário II	Cenário III
VAL associado aos custos	4 271 021,23 €	3 116 473,60 €	4 635 040,11 €	3 453 561,19 €
VAL associado aos benefícios	0	1 270 002,39 €	-364 018,88 €	817 460,04 €
RCB	0	0,41	-0,08	0,24

Fonte: Elaboração própria

Na tabela anterior, o VAL associado aos custos abrange o cálculo do valor presente líquido dos custos anuais relacionados à energia, mão de obra, manutenção e, quando aplicável, o investimento inicial associado à implementação das estratégias delineadas. Por outro lado, o VAL associado aos benefícios foi determinado considerando a economia gerada nos custos operacionais nos cenários de melhoria em comparação com o cenário atual.

Na análise dos diferentes cenários de investimento, considerando a taxa mínima de atratividade de 10%, os resultados revelam que no Cenário I, o VAL associado aos custos é de 3.116.473,60 euros, e o VAL associado aos benefícios é de 1.270.002,39 euros, resultando num RCB de 0,41. Isto sugere que o Cenário I é economicamente viável, porém não é atrativo.

O Cenário II apresenta um VAL associado aos custos de 4.635.040,11 euros, enquanto o VAL associado aos benefícios é negativo, no valor de -364.018,88 euros. O RCB negativo indica que os custos superam significativamente os benefícios, tornando o Cenário II economicamente desfavorável.

Por fim, no Cenário III, o VAL associado aos custos é de 3.453.561,19 euros, e o VAL associado aos benefícios é de 817.460,04 euros. O RCB é positivo, com um valor de 0,24, indicando que o Cenário III é economicamente viável, contudo não atrativo.

Em suma, com base na taxa mínima de atratividade definida, apenas o Cenário I e o Cenário III são considerados economicamente viáveis, mas não atrativos devido aos valores de RCB inferiores a 1, que indicam que os benefícios não superam os custos. Por outro lado, Cenário II não se mostra viável, nem atrativo. Essa análise é fundamental para a tomada de decisões informadas em projetos de investimento.

5.3 Tomada de decisão

Após uma análise abrangente das métricas de produção, é possível concluir que a implementação das estratégias relacionadas ao aprovisionamento de peças cromadas e à introdução de robôs colaborativos nos processos de torneamento e polimento é a opção mais viável do ponto de vista técnico e operacional. Esta escolha, associada ao terceiro cenário modelado e simulado, traduziu-se em reduções notáveis nos tempos de operação, diminuição dos tempos de espera, uma gestão mais eficaz dos recursos humanos e uma significativa redução no tempo de produção, resultados estes, que podem ser interpretados como uma otimização notável da eficiência operacional da linha de produção.

Além dos benefícios operacionais evidentes, esta combinação estratégica também representa um grande avanço na integração da empresa com as tecnologias associadas à Indústria 5.0, tema central deste trabalho. Isto demonstra um comprometimento da empresa em abraçar as inovações tecnológicas emergentes e adotar uma abordagem alinhada com as tendências da Indústria 5.0, o que pode posicionar a organização de maneira mais competitiva e preparada para os desafios futuros da indústria.

Do ponto de vista económico-financeiro, a análise ACB revela que nenhum dos projetos considerados é viável, uma vez que todos apresentam um rácio custo-benefício inferior a 1. No entanto, é interessante observar que, nos cenários de melhoria I e III, ao contrário do cenário II, os valores atuais associados aos benefícios são positivos. Isto significa que, nestes cenários, os custos operacionais estimados correntes são menores do que os custos operacionais estimados calculados para o cenário atual. Esta redução de custos pode ser um fator importante a ser considerado caso a decisão de avançar com alguma estratégia seja tomada.

Entre as duas estratégias mais promissoras (I e III) do ponto de vista económico-financeiro, a criação de um *stock* revela-se mais atrativa do que a combinação do *stock* com a utilização de *cobots*. Isto deve-se ao facto de a estratégia de *stock* apresentar um VAL associado aos benefícios positivo e um RCB mais elevado. Esta análise económica sugere que, do ponto de vista financeiro, a gestão de *stock* é mais vantajosa.

Porém, é importante ressaltar que, do ponto de vista da integração com a tecnologia 5.0, a estratégia de estoque não está alinhada com essa abordagem. Isso ocorre porque a gestão de estoque pode ser realizada sem a necessidade das tecnologias de ponta associadas à Indústria 5.0. Portanto, ao tomar uma decisão, é crucial considerar não apenas os aspetos financeiros, mas também o alinhamento estratégico com as metas de integração tecnológica da empresa.

6 Conclusão

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões finais da investigação desenvolvida ao longo da presente dissertação, destacando as respectivas considerações finais e as suas implicações, assim como as conclusões gerais sobre a elaboração de todo o trabalho e as possibilidades de trabalhos futuros.

6.1 Conclusões da investigação

No decorrer deste trabalho, procurou-se responder às perguntas de investigação definidas na introdução, explorando a aplicação da Indústria 5.0 e da simulação de processos produtivos como estratégias para otimizar as operações de manufatura.

Como resposta à primeira pergunta, conclui-se que a Indústria 5.0 tem um impacto positivo na indústria moderna, apesar de pequeno, no âmbito do presente caso de estudo. Os princípios e pilares da Indústria 5.0 oferecem efetivamente oportunidades para melhorar a eficiência, a qualidade e a sustentabilidade das operações industriais, contudo a integração mostrou-se estreita, tornando-a duvidosa para as indústrias mais pequenas, que procuram inovação e competitividade.

Respondendo à segunda questão, a pesquisa demonstrou que a simulação de processos produtivos é uma ferramenta útil para modelar sistemas de manufatura. Esta permitiu a criação de modelos detalhados, que refletiram da melhor forma possível, com base nos dados recolhidos, o funcionamento real de uma linha de produção de cilindros hidráulicos. Além disso, a simulação ofereceu a capacidade de testar diferentes cenários e estratégias previamente à implementação real, economizando tempo e recursos.

Em resposta à terceira questão, a simulação de cenários de melhoria demonstrou ser fundamental na identificação de áreas com potencial de otimização num processo produtivo específico. Ao modelar e simular diferentes cenários, foi possível avaliar o impacto operacional de propostas de melhoria específicas, compreendendo de que modo estas mudanças afetariam a produção e a viabilidade financeira.

A análise destes cenários ofereceu uma visão abrangente das estratégias em estudo. Foram explorados três cenários de melhoria diferentes no processo de fabrico real: a criação de *stock* de peças cromadas, a introdução de *cobots* na linha de montagem e a combinação dessas estratégias. Como resultados da simulação, constatou-se que a criação

de *stock* juntamente com a implementação dos *cobots* foi a estratégia mais eficaz em termos de eficiência operacional.

Por fim, respondendo à última questão, a ACB foi aplicada para avaliar a viabilidade económica das propostas de melhoria. Os resultados mostraram que, do ponto de vista económico-financeiro, nenhum dos cenários de melhoria é considerado viável, uma vez que todos apresentaram um rácio custo-benefício inferior a 1, evidenciando as dificuldades aquando da implementação das tecnologias associadas à Indústria 5.0. No entanto, os cenários de melhoria I e III mostraram valores atuais associados aos benefícios positivos, indicando uma diminuição nos custos operacionais em comparação com o cenário atual. Isto sugere que, apesar da falta de viabilidade económica direta, estas estratégias podem ser consideradas caso a decisão de avançar seja tomada.

6.1.1 Limitações da investigação

É importante reconhecer e discutir as limitações que influenciaram a abordagem e os resultados deste estudo. Em primeiro lugar, a pesquisa foi baseada num estudo de caso específico, num contexto particular da indústria. Isto significa que os resultados obtidos podem não ser diretamente aplicados a outras indústrias ou cenários. A aplicabilidade das estratégias propostas pode variar significativamente dependendo do contexto industrial, tornando essencial a realização de estudos semelhantes em diferentes contextos para validar os resultados num espectro mais amplo. Além disso, a simulação de processos produtivos, que desempenhou um papel fundamental neste estudo, envolveu a criação de modelos com base em várias suposições e simplificações. Estas suposições podem limitar a representação precisa do mundo real e influenciar os resultados da simulação. Portanto, é importante reconhecer que os modelos de simulação podem nunca capturar completamente a complexidade das operações industriais.

Outra limitação significativa diz respeito à disponibilidade e qualidade dos dados. Os resultados das simulações e da análise custo-benefício dependem da precisão dos dados utilizados. Neste estudo, os dados foram obtidos a partir do contexto específico do estudo de caso e a falta de dados precisos afeta a validade dos resultados. Adicionalmente, o horizonte temporal desta pesquisa focou-se principalmente na avaliação do impacto das estratégias de melhoria num período limitado. Mudanças significativas podem ocorrer ao longo do tempo, e os resultados podem variar em cenários de longo prazo. Uma investigação mais abrangente poderia explorar o impacto a longo prazo das estratégias propostas.

Finalmente, é crucial a mencionar que esta pesquisa se concentrou apenas nos custos associados às estratégias de melhoria e não considerou os potenciais benefícios financeiros ou receitas que poderiam surgir com a implementação dessas estratégias. A falta de inclusão de receitas na análise de custo-benefício pode influenciar significativamente a viabilidade financeira de um projeto ou estratégia. Assim sendo, a falta de consideração das receitas neste estudo deve ser reconhecida como uma limitação e serve como uma oportunidade para investigações futuras que possam abordar essa faceta crítica da tomada de decisões empresariais.

Em resumo, esta dissertação oferece uma visão abrangente da aplicação da Indústria 5.0 e da simulação de processos produtivos na otimização das operações de manufatura, no entanto, as limitações mencionadas fornecem contexto para a interpretação dos resultados e indicam áreas para futuras pesquisas e desenvolvimentos.

6.2 Conclusões gerais

Em conclusão, esta dissertação forneceu uma visão abrangente da aplicação da Indústria 5.0 e da simulação de processos produtivos na otimização das operações. Demonstrou-se que a Indústria 5.0 tem o potencial de transformar positivamente a indústria moderna, promovendo a eficiência e a sustentabilidade. A simulação emergiu como uma ferramenta para modelar sistemas complexos e testar estratégias de melhoria. Embora os cenários de melhoria não tenham demonstrado viabilidade econômica direta, estes representam passos significativos em direção a uma indústria mais eficiente e centrada no ser humano.

Este estudo contribui para o campo da Indústria 5.0, fornecendo perspectivas práticas e dados concretos sobre estratégias de melhoria e sua viabilidade. Além disso, destaca a importância da pesquisa contínua e da inovação na procura por soluções que impulsionem a indústria em direção a um futuro mais promissor. Portanto, enquanto se encerra esta dissertação, reconhece-se o caminho para a excelência na indústria contínua, com desafios a serem superados e oportunidades a serem exploradas.

6.3 Propostas de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, deixa-se como sugestão ampliar o âmbito da pesquisa para incluir estudos multissetoriais, explorar tendências da Indústria 5.0 em diferentes setores e avaliar o impacto social das estratégias de melhoria. Além disso, a comparação

internacional e a avaliação da segurança cibernética são áreas promissoras para pesquisa adicional.

Em resumo, esta dissertação contribuiu para o entendimento da Indústria 5.0 e da simulação de processos produtivos como estratégias para otimização da manufatura. Espera-se que as limitações reconhecidas e as propostas para trabalhos futuros e melhorias inspirem pesquisadores a continuar explorando esse campo fascinante e em constante evolução.

Referências bibliográficas

- ABB. (2022, agosto 29). ABB India ‘Smart Power portfolio’ expands capacity with cobots, one of the first in India to transition to Industry 5.0. Obtido 26 de setembro de 2023, de Press Release website: <http://new.abb.com/news/detail/94293/abb-india-smart-power-portfolio-expands-capacity-with-cobots-one-of-the-first-in-india-to-transition-to-industry-50>
- Ali, S. H., Al-Sultan, H. A., & Rubaie, M. T. A. (2022). Fifth Industrial Revolution: (New Perspectives). *International Journal of Business, Management and Economics*, 3(3), 196–212. <https://doi.org/10.47747/ijbme.v3i3.694>
- Anes, V. (2022). 1.2—*Introdução à Simulação de Sistemas.pdf*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Bahtiyar, M. (2005). Simulation modeling of shop floor activities for SMES in virtual enterprises. *Graduate School of Natural and Applied Sciences. Middle East Technical University*.
- Berg, C. (2022, março 31). What is Industry 5.0? (In-depth guide with examples). Obtido 26 de setembro de 2023, de <https://www.clarify.io/learn/industry-5-0>
- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2014). *Principles of Corporate Finance*. Reino Unido: McGraw-Hill Education.
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human centric and resilient European industry*. LU: Publications Office of the European Union. Obtido de <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
- BSH Home Appliances Group. (2023). Siemens Eletrodomésticos | A tecnologia encontra o design. Obtido 12 de outubro de 2023, de <https://www.siemens-home.bsh-group.com/pt/>

- Boettcher, M. (2015, novembro 26). Revolução Industrial - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0. *Linkedin*. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-dehist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>.
- Campbell, H. F., & Brown, R. (2003). *Incorporating Risk in Benefit-Cost Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cavalcantes, Z. V., & Silva, M. L. S. (2011, outubro). A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. Apresentado na VII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar, Maringá – Paraná - Brasil. Maringá – Paraná - Brasil: Cesumar.
- Chung, C. A. (2003). *Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach*. Reino Unido: CRC Press.
- Cipolla, C. M. (1977). *História econômica da população mundial*. Brasil: Zahar.
- Comissão europeia. (2011). A avaliação do desenvolvimento socioeconómico - O Guia. Agência para o Desenvolvimento e Coesão. Obtido de https://www.adcoesao.pt/wp-content/uploads/guia_avaliacao_desenvolvimento_socioeconomico.pdf
- Dathein, R. (2003). *Inovação e Revoluções Industriais: Uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX*. DECON/UFRGS. Obtido de <http://www.ufrgs.br/decon/>
- Dharmarajan, S. (2023, março 15). Industry 5.0: The Next Industrial Revolution. Obtido 28 de setembro de 2023, de <https://www.linkedin.com/pulse/industry-50-next-industrial-revolution-shankar-dharmarajan-1c>
- Dunn, W. M. (2009). *Public Policy Analysis: An Introduction (4th ed.)*. Pearson College Div. ISBN-10: 0205677924, ISBN-13: 978-0205677924.

- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L., Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
- Falcon, F. J. C., Moura, G. (1975). *A formação do mundo contemporâneo*. Brasil: Ed. Americana.
- Fishman, G. S. (1978). *Principles of Discrete Event Simulation*. Taiwan: Wiley.
- Fonseca, A. C. (2014). *Análise Custo Benefício: Descentralização Parcial da Consulta de Coagulação do Centro Hospitalar da Cova da Beira*. Universidade Da Beira Interior, Covilhã. Obtido de https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5733/1/3716_7404.pdf
- Hobsbawm, E. (2015). *A era do capital: 1848-1875*. Rio de Janeiro: Paz e Terra.
- Iglesias, F. (1990). *A revolução industrial*. Brasil: Brasiliense.
- Landes, D. S. (1979). *Progreso tecnológico y revolución industrial*. Madrid: Tecnos.
- Landes, D. S. (1969). *The Unbound Prometheus*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Law, A. M. (2014). *Simulation Modeling and Analysis*. Reino Unido: McGraw-Hill Education.
- Lobão, E. de C., & Porto, A. J. V. (1999). *Evolução das técnicas de simulação*. Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. Departamento de Eng. Mecânica, Rio de Janeiro. Obtido de <https://www.scielo.br/j/prod/a/qZG5jQ8qQXzjZSprgnKc4kC/?format=pdf&lang=pt>
- Martins, J. P. (2012). *A Terceira Revolução Industrial*. Obtido de <https://www.coreconpr.gov.br/wp-content/uploads/2012/08/23-A-Terceira-Revolu%C3%A7%C3%A3o-Industrial-Jos%C3%A9-Pio-Martins.pdf>

- Medeiros, S. M. D., & Rocha, S. M. M. (2004). Considerações sobre a terceira revolução industrial e a força de trabalho em saúde em Natal. *Ciência & Saúde Coletiva*, 9(2), 399–409. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232004000200016>
- Medke, R. (2022, junho 5). Indústria de transformação, 4.0 para a 5.0. Obtido 28 de setembro de 2023, de LinkedIn website: <https://pt.linkedin.com/pulse/ind%C3%BAria-de-transforma%C3%A7%C3%A3o-40-para-50-roger-medke>
- Mohajan, H. K. (2021). *Third Industrial Revolution Brings Global Development*. Premier University, 7, 239-251.
- Newell, R. G. (2003). Discounting the Distant Future: How Much Do Uncertain Rates Increase Valuations? *Journal of Environmental Economics and Management*, 46(1), 52–71. <https://dx.doi.org/10.1016%2FS0095-0696%2802%2900031-1>
- Østergaard, E. H. (2018). Welcome to Industry 5.0—ISA [Site]. Obtido 28 de setembro de 2023, de InTech website: <https://www.isa.org/intech-home/2018/march-april/features/welcome-to-industry-5-0>
- Paes, F. J. B. de B. (2019). *Modelo de análise custo-benefício – um mecanismo de racionalidade económica*. Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Economia e Gestão. Repositório da Universidade de Lisboa (DG - Dissertações de Mestrado / Master Thesis BISEG - Dissertações de Mestrado / Master Thesis). Obtido de <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/19141/1/DM-FJBBP-2019.pdf>
- Pegden, C. D., Shannon, R. E., Sadowski, R. P. (1995). *Introduction to Simulation using SIMAN*. Singapura: McGraw-Hill.
- Pidd, M. (1998). *Computer simulation in management science*. Alemanha: Wiley.

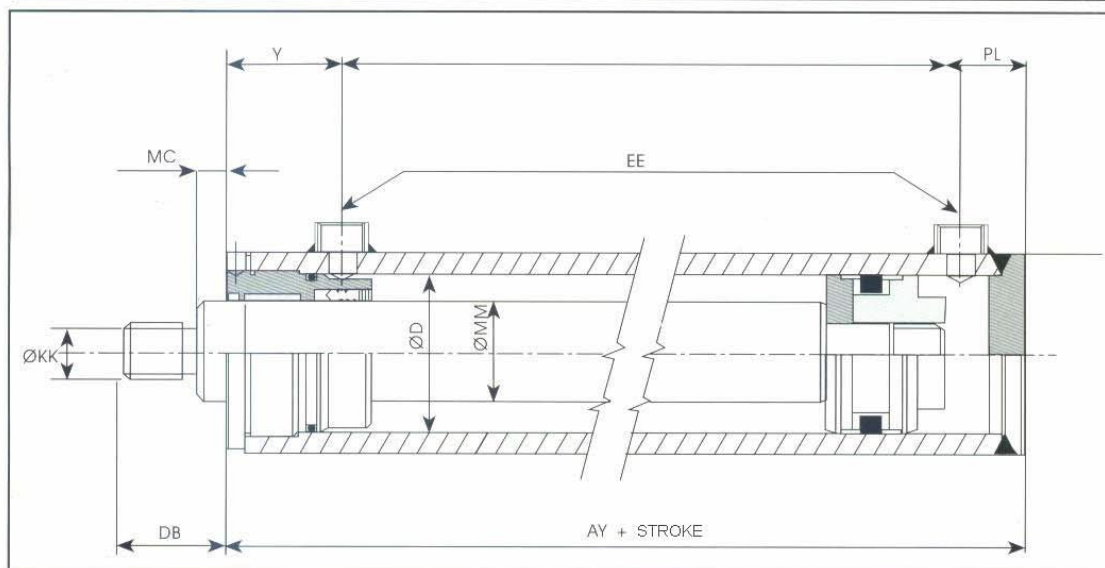
- PMESalários. (2023). *Simulador de Custo de Funcionário*. Obtido 13 de outubro de 2023, de <https://www.pmesalarios.pt/simulacao/custofunc>
- Prado, M. (2023, julho 11). Siemens prevê alcançar os 4 mil trabalhadores em Portugal em 2025—*Expresso*. *Expresso*. Obtido de <https://expresso.pt/economia/empresas/2023-07-11-Siemens-preve-alcancar-os-4-mil-trabalhadores-em-Portugal-em-2025-f1599ecb>
- Rifkin, J. (2011). *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Estados Unidos: St. Martin's Publishing Group.
- Robinson, S. (2014). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Reino Unido: Palgrave Macmillan.
- Rockwell Software. (2000). *Arena: User's Guide*. Rockwell Software. Obtido de https://studerende.au.dk/fileadmin/www.medarbejdere.au.dk/it/BSS_Analysevae_rktoejer/Arena/Arena_User_s_Guide_EN.pdf
- Sakurai, R., & Zuchi, J. D. (2018). Revoluções industriais até a indústria 4.0. *Revista Interface Tecnológica*, 15(2), 480–491. <https://doi.org/10.31510/inf.v15i2.386>
- Schmidt, J. W., & Taylor, R. E. (1986). *Simulation and analysis of industrial systems*. Estados Unidos: R. D. Irwin, 1970.
- Schwab, K. (2015, dezembro 12). *The Fourth Industrial Revolution*. *Foreign Affairs*. Obtido de <https://www.foreignaffairs.com/world/fourth-industrial-revolution>
- Schwab, K. (2016, janeiro 14). *The Fourth Industrial Revolution: What it means and how to respond*. Obtido 28 de setembro de 2023, de World Economic Forum website: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>

- Shannon, R. E. (1975). *Systems Simulation: The Art and Science*. Reino Unido: Prentice-Hall.
- Soares, L. V. B. de S. (2019). *Análise Custo-Benefício de Construção de um Novo Pavilhão para o Clube Infante Sagres*. Universidade Católica Portuguesa. Católica Porto Business School. Obtido de https://repositorio.ucp.pt/bitstream/10400.14/28530/1/TFM_LeonorSousaSoares.pdf
- União Europeia. *Regulamento (Ue) N.O 1303/2013 Do Parlamento Europeu E Do Conselho*. , Pub. L. No. Artigo 101.º, n.º 1, alínea e) (2013).
- União Europeia. (2015, fevereiro 13). *Metodologia para a realização da análise do custo-benefício*. *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 44–59.
- Venturelli, M. (2014, setembro 2). *Indústria 4.0: Uma Visão da Automação Industrial*. Obtido 26 de setembro de 2023, de Automação Industrial website: <https://www.automacaoindustrial.info/industria-4-0-uma-visao-da-automacao-industrial/>
- White, K. P., & Ingalls, R. G. (2009, dezembro 13). *Introduction to simulation*. 12–23. Austin, TX, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429315>

Anexos

ERDEMLER

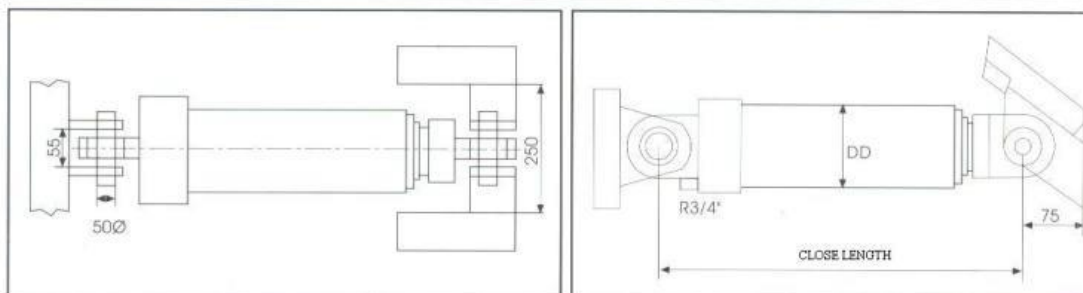
BASIC HYDRAULIC CYLINDER



ØD	MM	AY	KK	DB	MC	Y	PL	EE
40	20	133	16x1.5	16	10	62	15	3/8"
50	25	141	20x1.5	20	12	67	21	3/8"
63	35	145	27x2	25	15	70	22	3/8"
80	50	158	33x2	30	20	75	28	1/2"
100	60	175	42x2	38	25	85	30	1/2"
115	70	190	42x2	38	25	100	30	3/4"
125	80	202	52x2	50	25	106	35	3/4"
140	90	224	52x2	50	30	112	40	3/4"
160	100	243	56x2	60	35	115	45	1"
180	110	294	68x3	65	38	136	55	1"
200	125	294	68x3	65	38	136	55	1"

Figura A 1. Gama de cilindros hidráulicos básicos.

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

TELESCOPIC CYLINDERS
3 STAGE TELESCOPIC CYLINDERS

ETL. 3x3500x160

ETL. 3x3500x160					STAGE	BARREL DIA. mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	EXT DIA. mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	1	140	20.8	17.8	1160
					2	120	15.3	13.2	1170
3500	1500	160	145	135	3	100	10.6	9.2	1170
								40.2	3500

ETL. 3x3700x160

ETL. 3x3700x160					STAGE	BARREL DIA. mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	EXT DIA. mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	1	140	20.8	18.9	1230
					2	120	15.3	13.9	1235
3700	1600	160	155	135	3	100	10.6	9.7	1235
								42.5	3700

ETL. 3x4000x160

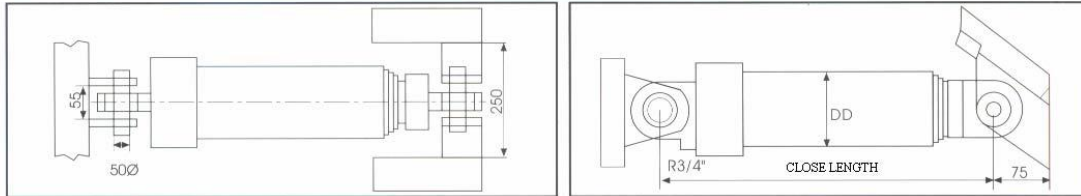
ETL. 3x4000x160					STAGE	BARREL DIA mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm				
STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	EXT DIA mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	1	140	20.8	20.46	1330				
4000	1760	160	175	135	2	120	15.3	15.9	1335				
					3	100	10.6	10.48	1335				
													46.84

ETL. 3x3500x190

ETL. 3x3500x190					STAGE	BARREL DIA mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	EXT DIA mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	1	165	24.8	24.8	1160
					2	140	18	18.0	1170
3500	1500	190	200	135	3	120	13.2	13.2	1170
								56.0	3500

Figura A 2. Gama de cilindros telesc3picos de 3 est3gios.

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

TELESCOPIC CYLINDERS
4 STAGE TELESCOPIC CYLINDERS

ETL. 4x3500x160

STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	EXT DIA mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	STAGE	BARREL DIA mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
3500	1250	160	140	135	1	140	20.8	13.46	875
					2	120	15.3	9.89	875
					3	100	10.6	6.87	875
					4	80	16.78	4.4	875
								34.62	3500

ETL. 4x3500x190

STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	DIŞ ÇAP mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	STAGE	BARREL DIA mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
3500	1250	190	175	135	1	165	28.85	18.7	875
					2	140	20.8	13.46	875
					3	120	15.3	9.89	875
					4	100	10.67	6.87	875
								48.92	3500

ETL. 4x4120x190

STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	DIŞ ÇAP mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	STAGE	BARREL DIA mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
4120	1400	190	210	135	1	165	28.85	22.01	1030
					2	140	20.8	15.85	1030
					3	120	15.3	11.64	1030
					4	100	10.6	8.08	1030
								57.58	4120

ETL. 4x4400x190

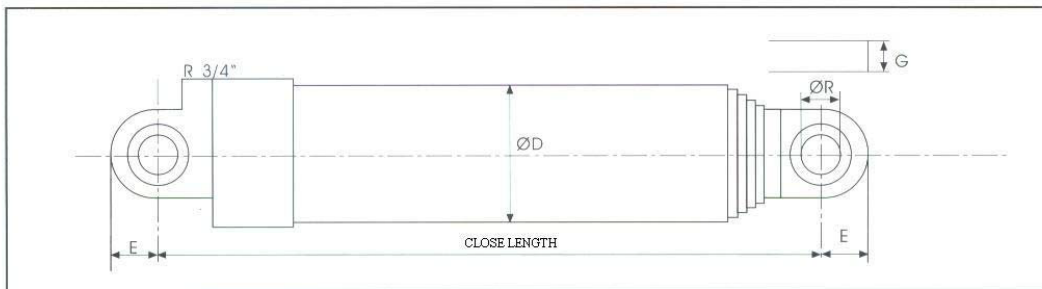
STROKE mm	CLOSE LENGTH mm	DIŞ ÇAP mm	CYLINDER WEIGHT kg	WORKING PRESSURE bar	STAGE	BARREL DIA mm	THRUST FORCE ton	LITER	STROKE mm
4400	1500	190	220	135	1	165	28.85	24.15	1100
					2	140	20.8	17.38	1100
					3	120	15.3	12.77	1100
					4	100	10.6	8.87	1100
								63.17	4400

Figura A 3. Gama de cilindros telescópicos de 4 estágios.

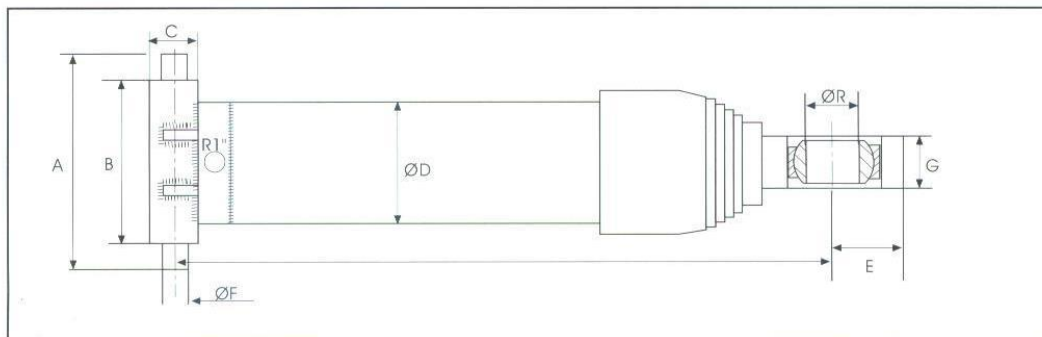
Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

TELESCOPIC CYLINDERS

5 STAGE TELESCOPIC CYLINDERS



STROKE (mm)	CLOSE LENGTH (mm)	EXTERNAL DIAMETER (mm)	CYLINDER WEIGHT (Kg)	WORKING PRESSURE (Bar)	STAGE	CYLINDER BARREL DIAMETER (mm)	THRUST FORCE (Ton) (135 Bar)	LITER	STROKE (mm)
5700	1520	220	320	135	1	190	38.25	40.38	1140
DIMENSIONS					2	165	28.85	30.45	1140
					3	140	20.8	21.92	1140
					4	120	15.26	16.1	1140
					5	100	10.6	11.18	1140
		ØR	G	E	ØD				
		60	50	65	220				
								120.03	5700



STROKE (mm)	CLOSE LENGTH (mm)	EXTERNAL DIAMETER (mm)	CYLINDER WEIGHT (Kg)	WORKING PRESSURE (Bar)	STAGE	CYLINDER BARREL DIAMETER (mm)	THRUST FORCE (Ton) (135 Bar)	LITER	STROKE (mm)
5700	1520	245	460	135	1	220	51.29	54.14	1140
DIMENSIONS					2	190	38.25	40.38	1140
					3	165	28.85	30.45	1140
					4	140	20.8	21.92	1140
					5	120	10.6	16.1	1140
A	B	C	ØF	ØR	E	G			
410	270	100	70	60	65	55			
								162.99	5700

Figura A 4. Gama de cilindros telescópicos de 5 estágios.

Fonte: Adaptado de (Bahtiyar, 2005)

Tabela A 1. Distribuições de Arena®

Distribuição (Sigla)	Parâmetros	Intervalo	Média	Variância
Beta (BETA)	Beta, β Alpha, α	[0,1]	$\frac{\beta}{\beta + \alpha}$	$\frac{\beta\alpha}{(\beta + \alpha)^2 + (\beta + \alpha + 1)}$
Contínua (CONT)	CumP1, Val1 CumPn, Valn	$[x_1, x_n]$		
Discreta (DISC)	CumP1, Val1 CumPn, Valn	$[x_1, x_2, \dots, x_n]$		
Erlang (ERLA)	Média, β N.º de amostras, k	$[0, +\infty]$	$k\beta$	$k\beta^2$
Exponencial (EXPO)	Média, β	$[0, +\infty]$	β	β^2
Gamma (GAMM)	Beta, β Alpha, α	$[0, +\infty]$	$\alpha\beta$	$\alpha\beta^2$
Johnson (JOHN)	Gamma, γ Delta, δ Lambda, λ Xi, ξ	Família ilimitada $[-\infty, +\infty]$ Família limitada $[\xi, \xi + \lambda]$		

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 2. Distribuições de Arena® (Continuação)

Distribuição (Sigla)	Parâmetros	Intervalo	Média	Variância
Lognormal (LOGN)	Média, μ_1 Desvio Padrão, σ_1	$[0, +\infty]$	$e^{2\mu+\sigma^2/2}$	$\sigma_1^2 = e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$
Normal (NORM)	Média, μ Desvio Padrão, σ	$[-\infty, +\infty]$	μ	σ^2
Poisson (POIS)	Média, λ	$[0, 1, \dots]$	λ	λ
Triangular (TRIA)	Mínimo, a Provável, m Máximo, b	$[a, b]$	$\frac{a + b + m}{3}$	$\frac{a^2 + m^2 + b^2 - ma - ab - mb}{18}$
Uniforme (UNIF)	Mínimo, a Máximo, b	$[a, b]$	$\frac{a + b}{2}$	$\frac{(b - a)^2}{12}$
Weibull (WEIB)	Beta, β Alpha, α	$[0, +\infty]$	$\frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$	$\frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\}$

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 3. Tempos médios de processamento por operação dos quatro cenários

	Atual		I		II		III	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Corte	13,63	0,58	13,39	0,55	13,56	0,53	13,25	0,53
Cromagem	721,99	138,21	701,06	139,74	766,81	158,01	733,93	83,17
Furação	15,26	2,61	32,54	6,87	17,29	3,87	37,11	10,38
Limpeza	15,7	0,43	17,55	1,07	16	0,83	17,85	0,59
Montagem	61,2	3,76	67,81	11,4	52,63	8,7	64,98	12,54
Polimento	318,97	10,43	313,57	12,75	330,93	17,88	322,78	11,96
Retificação	36,69	3,4	69,09	22,04	38,71	7,54	88,35	31,42
Soldadura	25,36	5,56	27,48	4,65	27,19	6,2	28,27	4,65
Torno Barril	292,8	14,06	298,54	19,34	269,96	19,28	271,92	21,4
Torno Haste	263,45	38,41	265,15	81,42	219,41	46,65	218,7	50,87
Torno Haste II	334,69	58,99	280,45	69,43	253,6	64,2	267,75	61,94
Torno Pistão	308,94	25,85	348,9	67,89	239,99	56,92	269,08	55,1
Torno T. Cabeça	375,52	49,83	391,45	95,11	314,72	63,45	346,15	54,33
Torno T. Extremidade	269,25	31,68	294,18	71,33	216,92	41,98	228,11	47,02
Tratamento térmico	12,53	1,15	13,78	2,15	12,35	1,46	13,45	2,51

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 4. Tempos médios de filas de espera dos quatro cenários

	Atual		I		II		III	
	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média
Corte	3,81	0,20	3,81	0,2	3,67	0,28	3,67	0,28
Cromagem	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Envio de lote para Cromagem	233,34	22,34	230,1	58,48	240,00	61,48	229,31	33,86
Furação	6,24	2,46	23,69	6,81	8,45	3,77	28,03	10,41
Hold			0	0			0,00	0,00
Limpeza	0,75	0,43	2,66	0,9	1,13	0,73	2,87	0,46
Match 2.1	1385,45	137,76	310,7	43,6	1321,22	172,27	259,20	54,23
Match 2.2	0,00	0,00	310,68	108,35	0,00	0,00	303,09	108,93
Match 2.3	1358,41	208,41	239,38	110,73	1304,90	215,09	242,24	50,68
Match 2.4	1300,39	152,68	316,27	121,08	1281,69	195,27	310,71	105,14
Match 2.5	1415,50	157,44	599,28	40,17	1391,13	144,05	542,30	37,00
Montagem	16,48	1,35	24,3	11,28	12,65	2,79	23,42	11,84
Polimento	247,19	10,00	242,07	11,71	259,10	16,79	252,02	11,06
Retificação	10,46	3,36	43,28	21,88	12,71	7,47	62,00	31,26
Soldadura	9,12	5,68	11,18	4,69	10,38	6,17	11,98	4,63

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 5. Tempos médios de filas de espera dos quatro cenários (Continuação)

	Atual		I		II		III	
	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média
Torno Barril	150,35	14,17	155,16	18,13	138,46	17,21	141,11	18,59
Torno Haste	252,68	38,17	193,28	68,23	181,71	59,65	198,04	59,98
Torno Haste II	249,42	59,86	254,46	81,59	210,41	46,60	209,10	50,30
Torno Pistão	246,47	26,21	285,92	68,21	185,59	56,55	214,48	55,05
Torno T. Cabeça	230,56	47,92	245,45	95,1	181,96	58,63	208,83	51,55
Torno T. Extremidade	249,17	31,83	273,98	71,14	198,76	41,13	210,47	46,13
Tratamento térmico	2,07	0,96	3,3	2,02	1,98	1,31	3,08	2,45

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 6. Taxa de ocupação média dos quatro cenários

	Atual		I		II		III	
	% média	DP	% média	DP	% média	DP	% média	DP
Externo	25,07%	4,80%	24,34%	4,85%	26,63%	5,49%	25,48%	2,89%
OP 1	43,20%	1,54%	43,68%	4,50%	40,04%	2,12%	38,00%	1,00%
OP 2	43,11%	1,49%	41,77%	1,37%	40,50%	1,74%	38,63%	1,90%
OP 3	42,71%	0,99%	41,41%	1,04%	39,34%	1,98%	37,45%	0,93%
OP 4	42,55%	1,13%	40,77%	1,31%	38,17%	2,24%	38,12%	0,92%
OP 5	42,81%	0,91%	40,46%	1,72%	37,56%	2,33%	37,43%	1,20%
OP 6	29,05%	1,21%	33,54%	2,15%	26,63%	1,80%	32,05%	1,90%
OP 7	35,14%	0,85%	35,08%	1,53%	33,57%	1,01%	33,53%	1,76%
OP 8	14,65%	0,96%	18,27%	1,43%	14,93%	0,88%	18,37%	0,79%
OP 9	10,53%	0,78%	14,74%	0,93%	10,84%	0,66%	14,36%	1,51%

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 7. Tempos de produção do cilindro dos quatro cenários

	Atual		I		II		III	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
<i>NVA Time</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Other Time</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Total Time</i>	2142,9	142,52	1093,16	36,17	2060,35	176,72	1025,84	42,49
<i>Transfer Time</i>	319,27	3,54	173,43	52,08	318,24	4,29	172,72	50,32
<i>VA Time</i>	1525,25	149,33	666,06	271,59	1520,61	180,24	629,97	263,76
<i>Wait Time</i>	7370,87	602,26	3135,05	433,65	6950,41	854,03	2822,42	132,79

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 8. Fluxos de caixa ao longo de 6 anos para a situação atual e de melhoria associada ao comércio I

	Anos	0	1	2	3	4	5
Atual	Energia		243 371,41 €	243 371,41 €	243 371,41 €	243 371,41 €	243 371,41 €
	Mão de obra		175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €
	Manutenção		22 000,00 €	22 000,00 €	22 000,00 €	22 000,00 €	22 000,00 €
	Total	0,00 €	441 031,16 €	441 031,16 €	441 031,16 €	441 031,16 €	441 031,16 €
	Atual	0,00 €	441 031,16 €	882 062,31 €	1 323 093,47 €	1 764 124,63 €	2 205 155,79 €
I: c/ stock	Energia		124 151,33 €	124 151,33 €	124 151,33 €	124 151,33 €	124 151,33 €
	Mão de obra		175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €
	Manutenção		22 000,00 €	22 000,00 €	22 000,00 €	22 000,00 €	22 000,00 €
	Total		321 811,08 €	321 811,08 €	321 811,08 €	321 811,08 €	321 811,08 €
	Cenário I		321 811,08 €	643 622,16 €	965 433,24 €	1 287 244,32 €	1 609 055,41 €
	Benefícios		119 220,08 €	238 440,15 €	357 660,23 €	476 880,30 €	596 100,38 €

Fonte: Elaboração própria

Tabela A 9. Fluxos de caixa ao longo de 6 anos para as situações de melhoria associadas aos cenários II e III

	Anos	0	1	2	3	4	5
II: c/ cobots	Investimento	82 500,00 €					
	Energia		242 357,75 €	242 357,75 €	242 357,75 €	242 357,75 €	242 357,75 €
	Mão de obra		175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €
	Manutenção		23 500,00 €	23 500,00 €	23 500,00 €	23 500,00 €	23 500,00 €
	Total	82 500,00 €	441 517,50 €	441 517,50 €	441 517,50 €	441 517,50 €	441 517,50 €
	Cenário II	82 500,00 €	524 017,50 €	965 535,01 €	1 407 052,51 €	1 848 570,02 €	2 290 087,52 €
	Benefícios	-82 500,00 €	-82 986,35 €	-83 472,70 €	-83 959,04 €	-84 445,39 €	-84 931,74 €
III: I+II	Investimento	82 500,00 €					
	Energia		120 356,72 €	120 356,72 €	120 356,72 €	120 356,72 €	120 356,72 €
	Mão de obra		175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €	175 659,75 €
	Manutenção		23 500,00 €	23 500,00 €	23 500,00 €	23 500,00 €	23 500,00 €
	Total	82 500,00 €	319 516,47 €	319 516,47 €	319 516,47 €	319 516,47 €	319 516,47 €
	Cenário III	82 500,00 €	402 016,47 €	721 532,94 €	1 041 049,41 €	1 360 565,88 €	1 680 082,34 €
	Benefícios	-82 500,00 €	39 014,69 €	160 529,38 €	282 044,07 €	403 558,75 €	525 073,44 €

Fonte: Elaboração própria

