



# ANÁLISE E MELHORIA DO FUNCIONAMENTO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL USANDO SIMULAÇÃO

LUCAS DE SOUZA REIS

julho de 2024

# **ANÁLISE E MELHORIA DO FUNCIONAMENTO DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL USANDO SIMULAÇÃO**

**Lucas de Souza Reis**

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

**Orientador:** Professor Doutor Carlos Ramos Nunes Luís Pinto Ferreira

**Júri:**

Presidente:

Professor Doutor Rafaela Carla Barros Casais, Professor Adjunto Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

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

Professor Doutor Ivan Iglesias. Profesor ayudante doctor, Centro Universitario de la Defensa – Universidad de Vigo



# Agradecimentos

A conclusão desta tese de mestrado representa a realização e um marco importante na minha vida acadêmica e profissional. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio, incentivo e orientação de diversas pessoas e instituições às quais expresso a minha mais profunda gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de concluir mais esse ciclo de estudo, e principalmente por ser o alicerce que sustenta tudo o que faço e todas as decisões que tomo. À Nossa Senhora, agradeço ininterruptamente, por sempre interceder, e fazer de mim, uma pessoa melhor.

À empresa objeto de estudo, o meu muito obrigado, que de maneira tão prestosa cedeu os dados e o valioso tempo de seus colaboradores para me apoiarem ao longo de todo o percurso.

Ao Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, meu orientador, pelo seu inestimável suporte, paciência e valiosas orientações durante todo o processo. A sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a concretização desta tese.

Agradeço, de forma especial, à minha querida esposa Raquel Reis, pelo seu amor, apoio incondicional e compreensão ao longo desta jornada, que mesmo pelas minhas ausências para dedicar à execução do presente trabalho, você sempre esteve firme ao meu lado. A sua paciência, encorajamento e sacrifício foram fundamentais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Ao meu filho, Pedro Reis, que apesar de tão pequeno, foi fundamental na fase final, me trazendo uma alegria imensa e uma motivação adicional para seguir em frente. O seu sorriso e a sua presença foram uma fonte constante de inspiração e energia.

Aos meus pais, cujo amor incondicional e apoio foram a base de toda a minha jornada, sempre acreditaram em mim e me proporcionaram todas as oportunidades necessárias para alcançar os meus objetivos. À minha irmã, pelo incentivo constante e pelas palavras de motivação nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus sogros, Antônio Sergio e Eliane, pelo apoio e encorajamento contínuos. A vossa compreensão e ajuda em momentos cruciais permitiram-me dar continuidade ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, que compartilharam comigo esta jornada acadêmica, proporcionando um ambiente de colaboração e amizade. Agradeço pelas discussões produtivas, pela ajuda mútua e pelos momentos de descontração que tornaram este percurso mais leve e agradável.

Não posso deixar de mencionar o Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, por fornecer uma excelente estrutura não só física e material, como também o corpo de docentes, que fizeram com que os ensinamentos passados fossem transmitidos de maneira tão marcante.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se concretizasse. A todos, o meu sincero obrigado.



# Resumo

A eficiência operacional e a otimização de processos industriais são cruciais para a competitividade e sustentabilidade das organizações. Neste contexto, a simulação tem se destacado como uma ferramenta poderosa para modelar sistemas complexos, como linhas de produção, permitindo a análise detalhada de seu desempenho. Este estudo visa explorar o potencial da simulação na análise e melhoria do funcionamento de uma linha de produção industrial. Utilizando o *software JaamSim*, foi criado um modelo detalhado da linha de produção atual, identificando pontos fracos e gargalos.

Após a construção e validação do modelo, foram elaborados e testados cenários alternativos de melhoria, com o objetivo de aprimorar a eficiência e o desempenho da linha de produção. Os resultados das simulações indicaram uma redução significativa nos tempos de espera e um aumento na produtividade, comprovando a eficácia das melhorias propostas. Este trabalho demonstra a relevância da simulação como ferramenta de apoio à decisão, proporcionando um ambiente controlado para avaliar diferentes estratégias antes de sua implementação real.

**Palavras-chave:** Simulação, Otimização, Produção Industrial, *JaamSim*, Gargalos, Eficiência.



# Abstract

Operational efficiency and process optimization in industry are crucial for the competitiveness and sustainability of organizations. In this context, simulation has emerged as a powerful tool for modeling complex systems, such as production lines, allowing detailed performance analysis. This study aims to explore the potential of simulation in analyzing and improving the operation of an industrial production line. Using JaamSim software, a detailed model of the current production line was created, identifying weaknesses and bottlenecks.

After constructing and validating the model, alternative improvement scenarios were developed and tested to enhance the efficiency and performance of the production line. Simulation results indicated a significant reduction in waiting times and an increase in productivity, demonstrating the effectiveness of the proposed improvements. This work highlights the relevance of simulation as a decision support tool, providing a controlled environment to evaluate different strategies before real implementation.

**Keywords:** Simulation, Optimization, Industrial Production, JaamSim, Bottlenecks, Efficiency.



# Índice

Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Lista de Figuras .....	xi
Lista de tabelas .....	xiii
Acrónimos .....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Metodologia de Investigação .....	2
1.4. Apresentação da Empresa.....	3
1.5. Conteúdo e organização da dissertação .....	4
2. Revisão da Literatura e Fundamentação Teórica .....	7
2.1. A importância da simulação no desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão .....	7
2.2. Fase de um projeto de simulação .....	8
2.3. Vantagens e desvantagens da aplicação de simulação.....	11
2.4. Classificação dos modelos de simulação.....	12
2.5. O papel da simulação no contexto da indústria 4.0.....	13
2.6. Casos de estudo .....	14
3. Descrição do Processo de Produção Real .....	23
3.1. Descrição do processo e postos de trabalho das linhas de produção .....	23
3.1.1. Posto de trabalho 1.....	23
3.1.2. Posto de trabalho 2.....	24
3.1.3. Posto de trabalho 3.....	25
3.1.4. Posto de trabalho 4.....	26
3.1.5. Posto de trabalho 5.....	26
3.1.6. Posto de trabalho 6.....	27
3.1.7. Posto de trabalho 7.....	27
3.2. Análise da problemática.....	28
3.3. Delineamento de estratégias a executar .....	28
3.3.1. Cenário para validação do modelo .....	29
3.3.2. Cenário 1 – Diminuição do tempo de operação do posto de trabalho 2 .....	29
3.3.3. Cenário 2 – Aumento da capacidade das máquinas do posto de trabalho 4 .....	29
3.3.4. Cenário 3 – Diminuição do tempo de transporte entre os postos de trabalho 5 e 6 .....	29
3.3.5. Cenário 4 – Combinação entre os cenários 1 e 2.....	29
3.3.6. Cenário 5 – Combinação entre os cenários 1, 2 e 3.....	29

3.4. Recolha e tratamento dos dados .....	30
4. Sistema de Apoio à Decisão .....	31
4.1. Modelo lógico.....	31
4.1.1. Representação da entrada do material .....	31
4.1.2. Representação dos postos de trabalho .....	33
4.1.3. Representação da saída do produto final.....	39
5. Validação do Modelo de Simulação e Análise de Resultados.....	41
5.1. Validação do modelo de simulação.....	41
5.2. Análise de Resultados – Cenários propostos .....	42
5.2.1. Análise de Resultado: Cenário 1 – Diminuição do tempo de operação do posto de trabalho 2 .....	42
5.2.2. Análise de Resultado: Cenário 2 – Aumento da capacidade do posto de trabalho	43
5.2.3. Análise de Resultado: Cenário 3 – Diminuição do tempo de transporte entre os postos de trabalho 5 e 6.....	44
5.2.4. Análise de Resultado: Cenário 4 – Combinação entre os cenários 1 e 2.....	45
5.2.5. Análise de Resultado: Cenário 5 – Combinação entre os cenários 1, 2 e 3 .....	45
5.2.6. Síntese dos resultados apresentados .....	46
6. Conclusão e Trabalhos Futuros.....	47
6.1. Conclusões finais.....	47
6.2. Desafios encontrados.....	48
6.3. Projeções de trabalhos futuros .....	49
Referências Bibliográfica.....	65
Declaração de Integridade .....	71
Anexos .....	73
Anexo A – Tempo da entrada de material e tempo do processo de moldagem (Posto de trabalho 1) .....	74
Anexo B – Tempo de operação de alocação dos moldes em carros de transportes (Posto de trabalho 2) .....	75
Anexo C – Tempo de realização da operação de limpeza do canal de vazamento dos moldes (Posto de trabalho 3) .....	76
Anexo D – Tempo da etapa de “pesagem” e vazamento (Posto de trabalho 4) .....	77
Anexo E – Tempo percorrido pelo molde ao longo da linha contínua de arrefecimento (Posto de trabalho 5) .....	78
Anexo F – Tempo da entrada nos moldes na plataforma de desmoldagem (Posto de trabalho 6) .....	79
Anexo G – Tempo de realização do processo de desmoldagem nas esteiras (Posto de trabalho 7) .....	80

# Lista de Figuras

Figura 1 - Catálogo de peças da linha automotiva. Fonte: Site da empresa.....	3
Figura 2 - Catálogo de peças da linha agropecuária. Fonte: Site da empresa .....	4
Figura 3 - Catálogo de peças da linha industrial. Fonte: Site da empresa .....	4
Figura 4 - Artigos publicados por década até 2014. Adaptado de [12] .....	7
Figura 5 - Sequência de etapas para um projeto de simulação. Adaptado de [26] .....	8
Figura 6 - Etapas e sub-etapas da implementação de modelos de simulação. ....	9
Figura 7 - Classificação de sistemas. Adaptado de [37]. ....	12
Figura 8 - Número de publicações por ano. Fonte: [39] .....	13
Figura 9 - Framework conceitual - Simulação e Indústria 4.0. Adaptada de [39].....	14
Figura 10 - Layout da linha de produção em estudo. ....	23
Figura 11 - Posto de Trabalho 1. ....	24
Figura 12 - Exemplo de Molde "montado". ....	24
Figura 13 - Posto de Trabalho 2. ....	25
Figura 14 - Transferência do Carro com os moldes para a plataforma de vazamento.....	25
Figura 15 - Posto de Trabalho 3. ....	26
Figura 16 - Posto de Trabalho 4. ....	26
Figura 17 - Posto de Trabalho 5. ....	27
Figura 18 - Posto de Trabalho 6. ....	27
Figura 19 - Posto de Trabalho 3. ....	28
Figura 20 - Modelo de simulação gerado no software JaamSim. ....	31
Figura 21 - Representação da Entrada da Matéria-prima.....	32
Figura 22 - Exemplo de configuração do bloco SimEntity.....	32
Figura 23 - Exemplo de configuração do bloco EntityGenerator.....	33
Figura 24 - Exemplo de configuração do bloco EntityConveyor. ....	33
Figura 25 - Representação do Posto de Trabalho 1. ....	34
Figura 26 - Exemplo de configuração do bloco Server.....	35
Figura 27 - Exemplo de configuração do bloco Queue. ....	35
Figura 28 - Representação do Posto de Trabalho 2. ....	36
Figura 29 - Representação do Posto de Trabalho 3. ....	36
Figura 30 - Representação do Posto de Trabalho 4. ....	37
Figura 31 - Representação do Posto de Trabalho 5. ....	37
Figura 32 - Representação do Posto de Trabalho 6. ....	38
Figura 33 - Representação do Posto de Trabalho 7. ....	38
Figura 34 - Representação da Saída do Produto Final. ....	39
Figura 35 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 1. ....	43
Figura 36 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 2. ....	43
Figura 37 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 3. ....	44
Figura 38 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 4. ....	45
Figura 39 – Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 5. ....	45
Figura 40 – Resultados compilados dos 5 cenários.....	46



# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial.....	15
Tabela 2 - Validação do Modelo Desenvolvido .....	41
Tabela 3 - Tempos de operação com um trabalhador extra.....	42
Tabela 4 - Média dos tempos de operação do posto de trabalho 2 .....	42
Tabela 5 - Resultados da Avaliação de Cenários Realizada.....	47
Tabela 6 - Médias dos tempos diários da entrada de material e do processo de moldagem (Posto de trabalho 1).....	59
Tabela 7 - Médias dos tempos diários da operação de alocação dos moldes em carros de transporte (Posto de trabalho 2). .....	60
Tabela 8 - Média dos tempos de realização da operação de limpeza do canal de vazamento dos moldes (Posto de trabalho 3); .....	61
Tabela 9 - Média dos tempos da etapa de “pesagem” e vazamento (Posto de trabalho 4); ....	62
Tabela 10 - Média dos tempos percorridos pelos moldes ao longo da linha contínua de arrefecimento (Posto de trabalho 5); .....	63
Tabela 11 - Média dos tempos da entrada nos moldes na plataforma de desmoldagem (Posto de trabalho 6);.....	64
Tabela 12 - Média dos tempos de realização do processo de desmoldagem nas esteiras de desmoldagem (Posto de trabalho 7).....	65
Tabela 13 - Valores das produções diárias em um período de 30 dias consecutivos.....	66



# Acrónimos

## Lista de Acrónimos

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
VMC	<i>Vertical Milling Center</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OPC	<i>Operational Process Chart</i>
SPT	<i>Shorter Processing Time</i>
SRPT	<i>Shorter Remaining Processing Time</i>
AGVs	<i>Automated Guided Vehicles</i>
Ro-Ro	<i>Roll on-Roll off</i>
WIP	<i>Work in Progress</i>



# 1. Introdução

Este capítulo é iniciado com o enquadramento do presente trabalho, de forma a dar espaço ao desenvolvimento detalhado e compreensivo à temática. Em seguida, são delineados os objetivos da dissertação, que servirão como um ponto de referência e comparação para avaliar o sucesso do trabalho, bem como os pontos a serem melhorados. Expõem-se a metodologia de investigação que será empregada para alcançar esses objetivos, seguida de uma introdução à empresa em foco. Logo depois, é realizada a apresentação da empresa que está a ser alvo do estudo, e por fim é detalhada a estrutura da dissertação.

## 1.1. Enquadramento

A eficiência operacional e a otimização de processos na indústria desempenham um papel fundamental na busca pela competitividade e sustentabilidade das organizações [1]. A capacidade de analisar, compreender e melhorar o funcionamento de uma linha de produção industrial é de suma importância para atingir esses objetivos [2]. Nesse sentido, a simulação tem se destacado como uma ferramenta poderosa para alcançar essas metas.

Admitindo que a simulação é uma técnica poderosa para modelar sistemas complexos, como linhas de produções industriais, e permitindo a análise detalhada de seu desempenho [3, 4], as ferramentas de simulação conseguem proporcionar um ambiente de teste controlado para avaliar diferentes cenários e estratégias antes da implementação real de melhorias [5], e por isso têm sido amplamente exploradas por acadêmicos e profissionais, no que toca o assunto de gestão industrial.

A linha de produção industrial representa um componente crítico nos processos de fabrico, onde seu funcionamento eficiente é essencial para garantir a qualidade do produto, reduzir custos e atender às procuras do mercado [6], e, levando em consideração que não se pode controlar o que não se pode medir, a simulação a nível industrial, mostra-se uma mais valia importante, uma vez que a medição e análise rigorosa dos processos são essenciais para identificar oportunidades de melhoria [6, 7].

## 1.2. Objetivos

Esta tese tem como objetivo explorar o potencial da simulação na análise e melhoria do funcionamento de uma linha de produção industrial. Pretende-se aplicar técnicas de modelação e simulação para criar representações virtuais de sistemas de produção, permitindo a avaliação

de diferentes cenários, configurações, estratégias de operação e melhorias de processo, sendo que, ao fazê-lo, almeja-se otimizar a eficiência, a produtividade e a qualidade da linha de produção.

Para atingir o objetivo geral, esta pesquisa foi estruturada em torno dos seguintes objetivos específicos:

- **Modelação da Linha de Produção Atual:** Desenvolver um modelo de simulação representativo da linha de produção em estudo. Isso incluirá a identificação e a representação de todos os componentes e processos relevantes da linha.
- **Avaliação do Desempenho Atual:** Utilizar o modelo de simulação para realizar uma avaliação do desempenho atual da linha de produção. Isso envolverá a recolha de dados, a execução de simulações e a análise dos resultados para identificar ineficiências e gargalos.
- **Proposição de Cenários de Melhoria:** Com base na análise do desempenho atual, criar cenários de melhoria que incluam mudanças nas configurações de processo, nos fluxos de produção, na alocação de recursos e em outras variáveis relevantes.
- **Simulação dos Cenários de Melhoria:** Utilizar o modelo de simulação para avaliar os cenários de melhoria propostos. Isso permitirá a comparação dos cenários com o estado atual e a identificação das alterações mais eficazes para otimizar as operações e processos da linha.

### 1.3. Metodologia de Investigação

A metodologia adotada neste estudo iniciou-se ao ser conduzida pesquisas e revisões bibliográficas abrangentes, a fim de adquirir uma base sólida de conhecimento sobre o tema. Todas as fontes de informação foram avaliadas cuidadosamente, considerando a relevância e a contribuição significativa para o campo, ilustrando as múltiplas vantagens, e, por vezes, algumas limitações da utilização das ferramentas de simulação e gestão de linhas industriais foram analisadas. Estas análises contribuirão para a identificação de melhores práticas e oportunidades de aprimoramento [8], proporcionando uma eficaz implementação na empresa em estudo e na dissertação em desenvolvimento.

Posteriormente, serão elaborados fluxogramas para mapear a linha de produção, com base na recolha exaustiva de dados sobre o fluxo de material, postos de trabalho, locais de armazenamento e tempos de trabalho. Com base nestes dados recolhidos, será criado um modelo da linha de produção atual, que com o uso de simulações computacionais, cuja ferramenta de simulação que será utilizada é o *software JaamSim*, pretende-se encontrar os pontos mais fracos do processo, e assim formular hipóteses de melhorias. Essas hipóteses representam oportunidades valiosas para a otimização dos processos da linha de produção [9].

Após a construção do modelo de simulação, utilizando os dados previamente coletados, os pontos fracos e gargalos identificados, bem como a validação do modelo, cenários alternativos de melhoria serão elaborados e testados com o objetivo de aprimorar a eficiência e o desempenho da linha de produção.

## 1.4. Apresentação da Empresa

A empresa foco da execução deste trabalho, e mantendo a confidencialidade da mesma, é uma empresa fundada em 1992 no interior do Estado de Minas Gerais, na cidade de Cabo da Mata, Brasil, a qual é especializada na produção e maquinação de peças fundidas de ferro cinzento e nodular, em moldes de área verde. Com forte atuação nos mercados nacional e internacional, esta indústria conta com três unidades fabris, sendo duas fundições e uma unidade de acabamentos.

A gama de produtos, agregada com sucesso a sua diversificação, é baseada em três ramos: automotivo, agropecuária e peça industriais, os quais contam com as mais diversas soluções a começar com produtos *standards* até produtos feitos sob medida, ambos com capacidade de serem produzidos em larga escala, como o representado nas Figuras 1, 2 e 3.

- Peças da linha automotiva:



Figura 1 - Catálogo de peças da linha automotiva. Fonte: Site da empresa

- Peças da linha agropecuária:



Figura 2 - Catálogo de peças da linha agropecuária. Fonte: Site da empresa

- Peças da linha industrial:

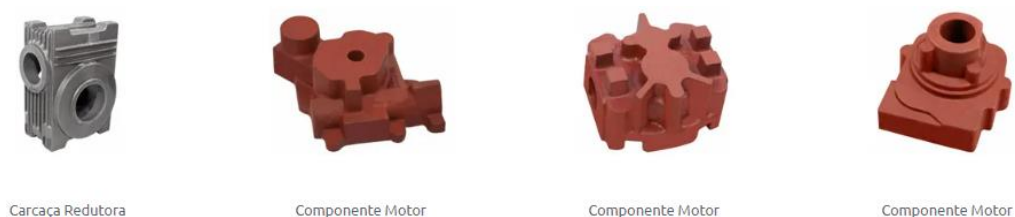


Figura 3 - Catálogo de peças da linha industrial. Fonte: Site da empresa

## 1.5. Conteúdo e organização da dissertação

A dissertação será composta por 6 capítulos: introdução, revisão da literatura e fundamentos teóricos, sistema de apoio à decisão, validação do modelo de simulação e análise de resultados, e por último, conclusão.

No primeiro capítulo, Introdução, objetivando dar ao trabalho uma estrutura sólida e de fácil entendimento, é feito um enquadramento ao tema, são apresentados os objetivos da dissertação e são explicadas a metodologia aplicada e a organização da dissertação.

No capítulo seguinte, revisão da literatura e fundamentos teóricos, é implementada uma fundamentação teórica robusta para o trabalho. É descrita a importância, para uma linha de produção otimizada, do desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão. Em seguida, é discriminado quais são as fases para a correta elaboração e implementação de modelos de simulação, com a posterior exposição de vantagens e desvantagens. Posteriormente, é apresentada a classificação dos modelos de simulação. É efetuado, então, um enquadramento do papel da simulação no contexto da indústria 4.0, e por fim, são apresentados trabalhos realizados na área de simulação.

No capítulo 3, é descrito o processo real em que essa dissertação está fundamentada, indicando individualmente as particularidades de cada posto de trabalho. A seguir, é apresentada e formulada a problemática a ser tratada, com a posterior delimitação dos cenários propostos para resolução dos problemas.

O capítulo 4, é dedicado a apresentação e desenvolvimento do modelo de simulação desenvolvido. É realizada, ao longo do texto, uma detalhada projeção de como os postos de trabalhos foram implementados no *software JaamSim*.

São apresentados, no capítulo 5, os resultados obtidos a partir das várias simulações e cenários realizados. Neste capítulo, é também realizada uma análise crítica dos resultados obtidos.

No último capítulo, conclusão e trabalhos futuros, são apresentadas as conclusões e considerações retiradas da execução da dissertação, bem como os desafios encontrados e quais são as perspectivas para trabalhos futuros.



## 2. Revisão da Literatura e Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento do tema abordado no presente trabalho. No subcapítulo 2.1, é esboçada a crescente importância da aplicação de simulação em sistemas de apoio à decisão em ambientes industriais. O subcapítulo 2.2 apresenta as etapas para uma correta execução e implementação de simulações, no contexto de otimização de processos produtivos. No subcapítulo 2.3, é feita uma apresentação de vantagens e desvantagens do uso de modelos de apoio a decisão baseados em simulações. No subcapítulo 2.4, foi apresentada a classificação dos modelos de simulação. No subcapítulo 2.5, tomando por base o crescente desenvolvimento tecnológico de suas derivações, foi apresentado como o desenvolvimento de sistemas de simulações têm se comportado no contexto da indústria 4.0. E por fim, no subcapítulo 2.6, foram apresentados casos de estudos, cuja ferramenta principal de trabalho foi a utilização de modelos de simulação.

### 2.1. A importância da simulação no desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão

Nos dias de hoje, a competitividade na indústria exige uma abordagem proativa e estratégica para enfrentar desafios constantes [10]. A utilização de simulações em sistemas de apoio à decisão se destaca como um instrumento-chave para aprimorar a eficiência e a gestão dos processos industriais [11], onde essas ferramentas, oferecem uma representação virtual precisa do funcionamento de uma linha de produção, permitindo experimentação e análise de cenários complexos em um ambiente controlado [12, 13]. E por isso, é possível observar uma constante evolução do número de publicações relacionadas a essas técnicas de simulação, conforme mostrado na Figura 4 [14].

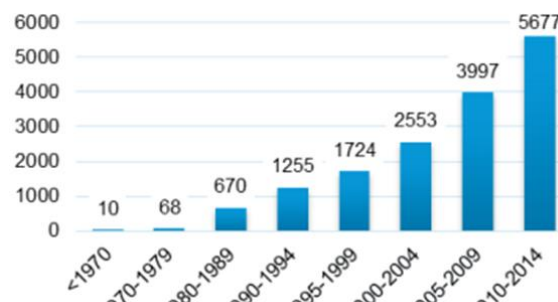


Figura 4 - Artigos publicados por década até 2014. Adaptado de [12]

Neste contexto, se destaca a importância do desenvolvimento de simulações, a qual reside na capacidade de modelar com precisão os diversos aspectos de uma operação industrial [15, 16]. Ao criar modelos detalhados, é possível examinar como diferentes variáveis, desde a alocação de recursos até as estratégias de produção, influenciam no desempenho global [17]. Isso possibilita aos gestores explorarem inúmeras opções e tomar decisões embasadas em dados sólidos, reduzindo assim o risco associado a mudanças operacionais [18].

Além disso, a simulação desempenha um papel crucial na otimização de processos, onde, ao identificar gargalos, pontos de estrangulamento ou ineficiências na linha de produção, os modelos simulados proporcionam *insights* valiosos para implementar melhorias [19 - 21]. A capacidade de realizar testes virtuais antes da implementação prática, economiza recursos significativos, além de permitir uma abordagem mais rápida e eficaz na melhoria dos processos industriais [13].

Outro ponto relevante é a habilidade da simulação em prever e planejar para cenários futuros. Ao simular diferentes condições, é possível antecipar desafios potenciais e desenvolver estratégias para enfrentá-los [22]. Isso contribui para aumentar a resiliência do sistema de produção, tornando-o mais adaptável às mudanças do mercado e às flutuações na procura [23].

## 2.2. Fase de um projeto de simulação

A simulação consiste na representação de um processo real utilizando um espaço de tempo e custos reduzidos, possibilitando a análise antecipada dos eventos e a identificação de possíveis correções a serem aplicadas, reduzindo assim, despesas significativas decorrente de erros [24]. Ao analisar, desenvolver e implementar um modelo de simulação, é preciso executar três grandes etapas: a concepção, a implementação e a análise dos resultados do modelo desenvolvido [25], tal como ilustrado na Figura 5 [26].

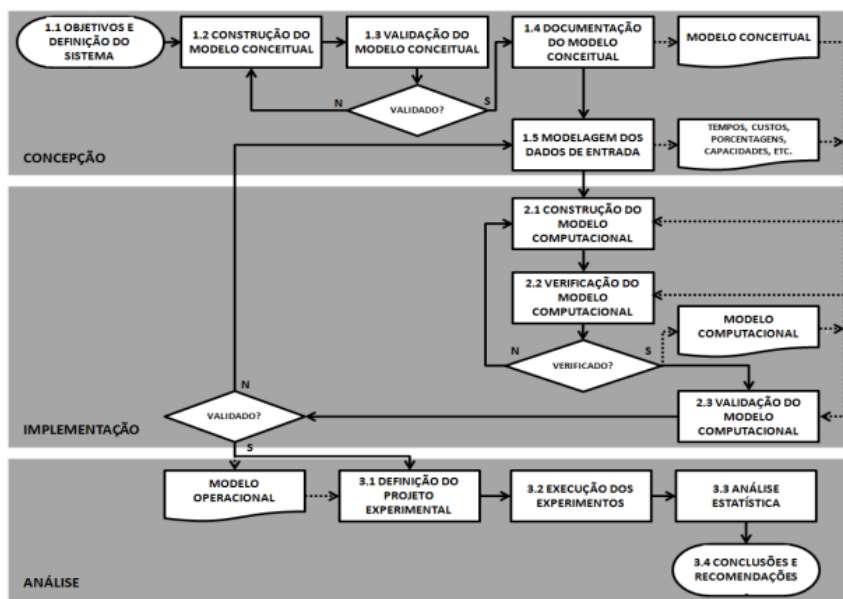


Figura 5 - Sequência de etapas para um projeto de simulação. Adaptado de [26]

A etapa da concepção, de forma geral, tem como objetivo esclarecer o sistema a ser analisado. Neste estágio, é fundamental a definição do sistema a ser simulado, a delimitação de sua abrangência, a elaboração do modelo conceitual e a coleta dos dados necessários para o desenvolvimento do estudo. O modelo conceitual, abrange a delineação do modelo de simulação a ser elaborado, destacando os propósitos, as variáveis de entrada e saída, bem como o conteúdo de suposições e simplificações adotados no modelo [27].

A etapa seguinte, a implementação, constitui a transposição do modelo conceitual para uma linguagem computacional, executada por meio de uma ferramenta e/ou *software* de simulação. Após a construção do modelo computacional, existe a necessidade de recorrer a procedimentos de verificação e validação. A etapa de verificação, assegura a conformidade da programação e implementação do modelo computacional, enquanto a validação visa determinar se as saídas do modelo atendem à precisão requerida de acordo com o propósito desejado [28].

Por fim, na última etapa, a análise, são conduzidas simulações do modelo, enquanto são analisadas, como sugestão, diferentes soluções em consonância com os objetivos previamente estabelecidos. Nesta fase, é importante que os resultados sejam analisados de forma exaustiva e objetiva, a fim de confirmar se os mesmos são de fato soluções otimizadas e confiáveis [29].

As três etapas mencionadas acima, de acordo com [30], são subdivididas em outras onze sub-etapas, mais bem exemplificado na Figura 6. As seis primeiras, fazem parte da etapa de concepção, as três seguintes pertencem à etapa da implementação, e as duas últimas sub-etapas fazem parte da etapa da análise dos resultados:

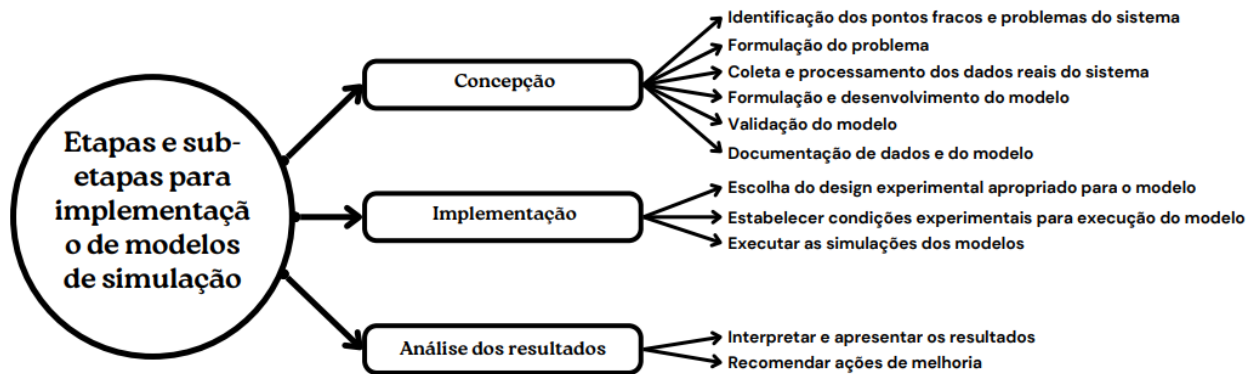


Figura 6 - Etapas e sub-etapas da implementação de modelos de simulação.

- Identificação dos pontos fracos e problemas do sistema: Neste passo é feita uma enumeração dos pontos fracos encontrados após uma análise exaustiva do sistema;
- Formulação do problema: É realizado nesta etapa, a parametrização geral da elaboração e execução do modelo, onde é definido os objetivos que se espera alcançar, as medidas de desempenho, o período que o sistema será analisado, e a identificação do usuário final do modelo de simulação;
- Recolha e processamento dos dados reais do sistema: São coletados os dados necessários para o desenvolvimento do modelo de simulação, como por exemplo, as variáveis de entrada, os tempos do processo, colaboradores envolvidos nos postos de

trabalho ativos, o *layout* do sistema, e resultados do sistema existente para comparações;

- Formulação e desenvolvimento do modelo: É desenvolvido esquemas e diagramas das redes do sistema. É realizada a tradução dos modelos conceituais para um *software* de simulação. Nessa etapa também é realizada a checagem do modelo de simulação, verificando se o mesmo, é executado conforme planejado. As técnicas de checagem incluem, rastreamentos, variação de parâmetros de entrada dentro do intervalo aceitável e verificação dos resultados à saída, substituição de constantes por variáveis aleatórias e verificação manual de resultados, além de, em alguns casos, a implementação de animação gráfica para o modelo de simulação;
- Validação do modelo: Para a execução dessa etapa, é realizada, por pessoas competentes no assunto, uma comparação e análise estatística e detalhada entre do desempenho sob condições conhecidas do modelo e o desempenho real do sistema. A correta aplicação desse processo, não só garante que as suposições do modelo sejam corretas, completas e consistentes, mas também aumenta a confiança no modelo;
- Documentação de dados e do modelo: Neste passo é feita a documentação dos dados coletados após o desenvolvimento das etapas anteriormente realizadas, a fim de adquirir uma base sólida para a realização das etapas seguinte;
- Escolha do design experimental apropriado para o modelo: É preciso definir um medidor de desempenho, e colocar em esquemas, algumas variáveis de entrada que podem interferir no desempenho. Assim, será possível determinar o grau de complexidade do sistema a ser simulado. Posteriormente, é realizado o estudo e a elaboração de um modelo computacional gráfico, para posterior inserção das condições da simulação;
- Estabelecer condições experimentais para execução do modelo: Este ponto é iniciado com a determinação da estacionaridade do sistema, ou seja, se o desempenho varia com o passar do tempo. A seguir, são definidos os parâmetros definitivos para execução dos modelos, como por exemplo, a duração da simulação, condições iniciais, o número de simulação a se executar, de forma a gerar níveis de confiabilidade satisfatórios, e a identificação dos dados de saída com maior probabilidade de serem correlacionados;
- Executar as simulações dos modelos: Realizar as simulações em conformidade com os dois últimos passos;
- Interpretar e apresentar os resultados: Calcular estimativas numéricas de desempenho, como por exemplo, médias, desvios padrão, e intervalos de confiança, dos resultados de interesse para o processor de otimização, e a realização de exibições gráficas dos mesmos. Nessa etapa é também fundamental a documentação dos resultados e conclusões;
- Recomendar ações de melhoria: Neste último passo, é realizado um plano de ação a ser proposto com o objetivo de aumentar a precisão de simulações futuras e de otimizar o sistema em funcionamento.

## 2.3. Vantagens e desvantagens da aplicação de simulação

A aplicação de simulação, no contexto de otimização de uma linha de produção industrial, oferece uma série de vantagens significativas, mas também apresenta desafios e limitações a serem considerados [31]. Entender as nuances entre os prós e contras, é crucial para uma implementação eficaz dessas ferramentas em um processo produtivo. A seguir são destacadas as vantagens e desvantagens da implementação de sistemas de simulação [30, 32 - 36]:

São consideradas como principais vantagens:

- Facilitar uma melhor e mais pormenorizada compreensão dos sistemas ao proporcionar a oportunidade de criar modelos após análise sistemática do seu funcionamento;
- Detectar gargalos nos processos produtivos globais;
- Permite explorar situações, até então desconhecidas, especialmente quando a informação disponível é limitada;
- Avaliar a viabilidade do sistema por meio de testes de hipóteses;
- Testar explicações hipotéticas sobre como ou por que determinados fenômenos ocorrem no sistema;
- Facilitar a análise das consequências de alterações na operação do sistema ao modificar o modelo, evitando interferir no sistema real e diminuindo riscos experimentais, sem necessidade de acrescentar custos financeiros;
- Identificar as variáveis mais significativas que influenciam o desempenho, e entender a interação entre as mesmas;
- Auxiliar na decisão de investimentos tecnológicos, objetivando aprimorar a capacidade de produção e a administração de todos os recursos;
- Desenvolver sistemas mais resilientes e com *layout* mais otimizando, para alcançar tempos mais curtos do processo;
- Explorar novas estratégias de alocação de recursos, procedimentos operacionais, decisões regulamentares, estruturas organizacionais e fluxos de informação sem interferir no funcionamento habitual do sistema.

Em contrapartida às vantagens apresentadas, o desenvolvimento de sistemas de simulação, apresentam algumas limitações em sua aplicação:

- A criação de modelos exige treinamento especializado e conhecimento bastante detalhado do processo produtivo que está a ser analisado, onde a precisão da análise, está diretamente ligada à excelência do modelo e à perícia do responsável por sua construção;
- A simulação não oferece as soluções finais para os problemas em análise, porém possibilita a avaliação do comportamento do sistema mediante o estudo dos cenários gerados;

- As interpretações dos resultados da simulação podem, por vezes, ser complexas;
- Desenvolver um modelo de um sistema complicado pode ser dispendioso e levar vários meses, especialmente quando os dados são difíceis de obter e inconsistentes.

## 2.4. Classificação dos modelos de simulação

Existem algumas formas de proceder com a classificação de modelos de simulação, classificação essa que é ilustrada na Figura 7 [37], onde segundo [38], elas são:

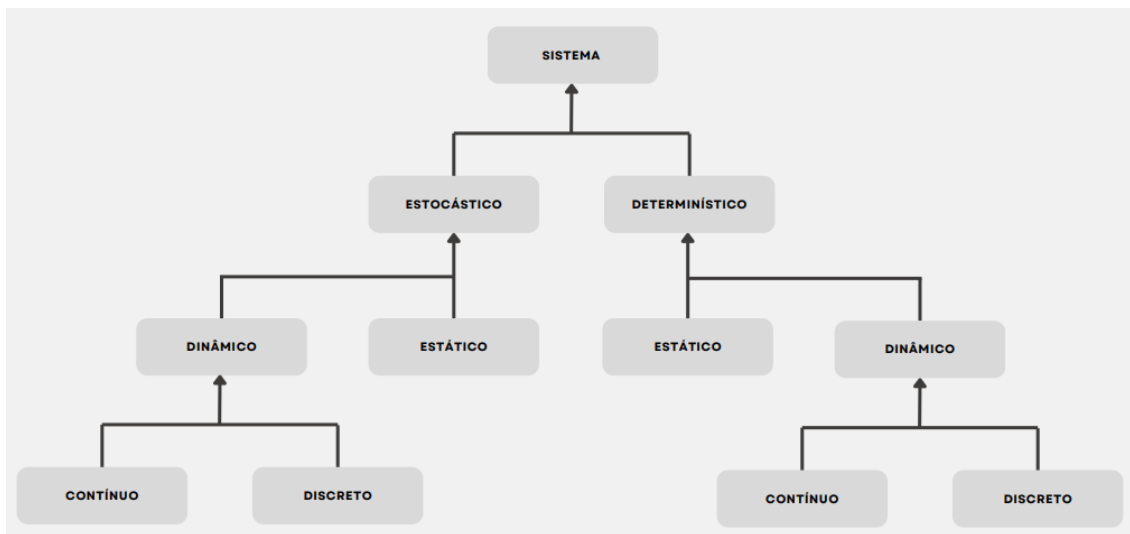


Figura 7 - Classificação de sistemas. Adaptado de [37].

- Dinâmicos ou Estáticos:

Nos modelos dinâmicos, o tempo tem influência no comportamento do sistema durante todo o processo de simulação. Entretanto, modelos estáticos, representam sistemas que em um ponto particular no tempo ou em um sistema completo, o tempo não desempenha papel importante.

- Determinísticos ou Estocásticos:

Uma simulação é tida como determinística quando todas as variáveis envolvidas também são determinísticas. Normalmente, um problema expresso por um modelo determinístico pode e deve ser examinado de forma analítica. Algumas das aplicações primárias da simulação determinística compreendem processos de fabricação conduzidos por máquinas, planejamento financeiro e simulações de sistemas macroeconômicos. Por outro lado, a simulação probabilística normalmente se baseia em uma descrição mais detalhada da realidade. Nesse contexto, o modelo incorpora uma ou mais variáveis aleatórias, cujo papel durante a simulação é representado por meio de amostragens, onde o objetivo é reproduzir da forma mais precisa possível o comportamento probabilístico dessas variáveis.

- Contínuos ou Discretos:

A diferenciação entre simulação discreta e contínua está ligada à maneira como as variáveis, que representam o estado do sistema, são atualizadas. Na simulação discreta, o tempo avança em intervalos, entre um evento e outro. Nesse caso, presume-se que o estado do sistema permaneça constante durante o intervalo entre esses eventos. Por exemplo, uma linha de produção que possui máquinas a funcionar em tempos diferentes, onde as mesmas iniciam e interrompem os seus ciclos de funcionamento de tempo em tempo. Já na simulação contínua, o estado do sistema pode mudar de maneira contínua, mas essa mudança é registrada em pequenos intervalos de tempo, devido ao método empregado e das limitações computacionais implementadas. Por exemplo, o nível de um reservatório no qual o caudal de entrada e saída do fluido são contínuos, e também, fenômenos como evaporação e precipitação. Os modelos contínuos geralmente possuem uma natureza determinística.

## 2.5. O papel da simulação no contexto da indústria 4.0

Na era da Indústria 4.0, a simulação desempenha um importante papel no que toca a transformação e aprimoramento dos processos industriais, sobretudo o que possuem altos níveis de complexidade [39 - 41]. Essa revolução industrial, impulsionada pela digitalização e pela integração de tecnologias avançadas, demanda uma abordagem inovadora para enfrentar os desafios e explorar as oportunidades na indústria [42], e com isso os estudos e publicações abordando a simulação no contexto da indústria 4.0 vem ao longo dos anos em um constante crescimento, como ilustrado na Figura 8 [39].

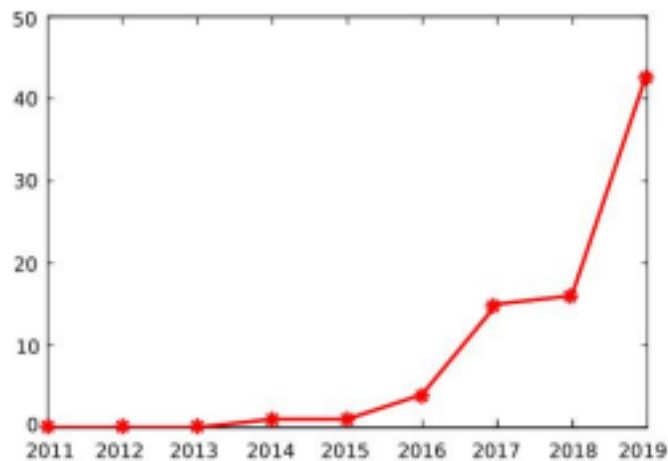


Figura 8 - Número de publicações por ano. Fonte: [39]

A simulação torna-se um recurso estratégico dentro desse contexto, permitindo análise, a modelação e a otimização de sistemas de produção de forma mais inteligente e adaptativa [43]. Por meio da criação de modelos virtuais detalhados, a simulação possibilita não apenas a reprodução do funcionamento de uma linha de produção, mas também a previsão de comportamentos, a análise de cenários e testes mais interativos de novas estratégias antes da implementação prática [44]. A Figura 9 [39], expõe um *framework* conceitual que exemplifica a relação entre a simulação e a indústria 4.0.

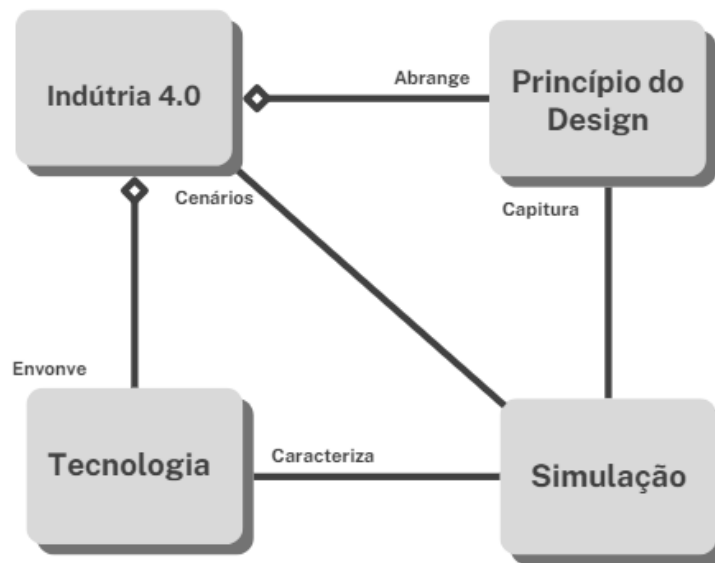


Figura 9 - Framework conceitual - Simulação e Indústria 4.0. Adaptada de [39]

Na base da Indústria 4.0, está a digitalização e a coleta em grande escala de dados por meio de sensores e dispositivos interconectados [45, 46]. Dados esses que, em uma simulação, são o principal pilar na criação de modelos mais precisos e dinâmicos [47], permitindo uma representação mais fiel do sistema industrial em tempo real [48]. Isso viabiliza a tomada de decisões mais informadas e ágeis, com base em informações atualizadas e relevantes [49]

Além disso, a simulação desempenha um papel relevante nos testes de novas tecnologias, como *internet of things* (IoT), inteligência artificial, análise de *big data* e sistemas ciber físicos [50]. A integração dessas tecnologias em uma linha de produção, pode ser simulada e avaliada, permitindo identificar os potenciais impactos, otimizar os processos de implementação e antecipar desafios [50, 51].

Portanto, no contexto da Indústria 4.0, a simulação surge como uma ferramenta estratégica para impulsionar a inovação, a eficiência e a competitividade industrial. Ao permitir uma análise preditiva, o desenvolvimento de estratégias adaptativas e a otimização dos processos, a simulação se torna um elemento-chave na jornada rumo à excelência operacional e à evolução dos sistemas na era digital [52, 53].

## 2.6. Casos de estudo

Cada vez mais os processos e sistemas de suporte à tomada de decisão vêm sendo apoiados por modelos de simulação [54]. É nesse sentido que na Tabela 1, são demonstrados exemplos de casos práticos, onde a implementação de simulações foram as ferramentas principais para os objetivos e bons resultados serem alcançados.

Tabela 1 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial.

Referências bibliográficas	Descrição do Trabalho
<p>Gunreddy et al., 2022 [55]</p>	<p>Este estudo foi elaborado em um fabricante de engrenagens, teve como objetivo analisar os gargalos da linha de produção, e apresentar cenários “<i>what if</i>” para otimização da linha de produção.</p> <p>O resultado obtido foi, dentre as 18 operações da linha de montagem, a etapa de maquinação do garfo, foi considerada como o principal gargalo. Onde a partir desse resultado, foi sugerido como solução a utilização de um centro de fresagem vertical (VMC). Além disso, foram explorados cinco possíveis cenários “<i>what if</i>”, dando possibilidades variadas à resolução do problema.</p>
<p>Kukla, 2016 [56]</p>	<p>O artigo apresenta um caso prático, no ambiente de uma fundição, de otimização e melhoria do processo de pós-acabamento de peças fundidas de ferro nodular para a indústria automotiva.</p> <p>A implementação de parâmetros estimados do processo e um gargalo na linha, foi elaborado um modelo de produção, cujo utilizou-se simulações para a visualização dos possíveis problemas a serem analisados.</p> <p>Os resultados foram apresentados em gráficos comparando prazos, custos, ergonomia de trabalho e indicador de eficiência geral dos equipamentos de produção, onde observou-se um aumento de aproximadamente 11% no OEE (<i>Overall Equipment Effectiveness</i>).</p>
<p>Talib Bom et al. 2016 [57]</p>	<p>Este artigo foi elaborado com base em dados de uma linha de produção de motocicletas modelo “<i>DINAMIK</i>” do fabricante MODENAS. Este estudo, através de simulações no <i>software</i> ARENA, tem como objetivo otimizar a produtividade da linha de montagem reduzindo o número de operações entre os postos de trabalho.</p> <p>Por meio de duas simulações, foi possível determinar quais operações nos postos de trabalho eram desnecessárias e quais dentre elas aumentavam o tempo da linha de espera, dando assim, possibilidade de traçar medidas para a otimização do processo.</p>
<p>Nallusamy, 2016 [58]</p>	<p>Este artigo foi desenvolvido em uma linha de montagem de um fogão a gás, utilizando o <i>software</i> de simulação e também ferramentas Lean de melhoria contínua. O objetivo do estudo foi, através de simulação, encontrar formas de reduzir o <i>lead time</i> da montagem de um queimador no processo de fabrico do fogão. Para isso, foi simulado quais eram os impactos das alterações de <i>layout</i> no valor do lead time.</p> <p>Foi concluído, por meio das simulações, que, com a implementação do <i>layout</i> proposto, o <i>lead time</i> reduziria cerca de 10% e que também haveria um aumento da produção em cerca de 20%.</p>

Tabela 2 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial (cont.).

<p>Calderón-Andrade et al., 2020 <b>[59]</b></p>	<p>Este trabalho foi elaborado em uma indústria de calçados, onde o objetivo foi expor uma reengenharia da linha de produção, apontando as áreas problemáticas e apresentar propostas de mudanças para os mesmos. Após simulações, a proposta consistiu em unir duas linhas de produção e compará-la com a linha de produção atual, tal como comparar com diferentes parâmetros de utilização de recursos e taxas de produção.</p> <p>Os resultados mostraram que ao empregar o novo design da linha de produção, a taxa de produção aumenta em aproximadamente 29%, utilizando os mesmos recursos. Para além, utilizando-se do recurso <i>OptQuest</i> do <i>software</i> ARENA, foi possível constatar que com a implementação do novo processo a taxa de produção poderia ser acrescida em até 41% face ao processo atual.</p>
<p>Kukla, 2017 <b>[60]</b></p>	<p>O artigo expõe um exemplo prático que tem como objetivo a melhoria da qualidade e segurança ocupacional em linhas produção de uma fundição automatizada. Foi executada uma análise baseada na inserção de um novo dispensador automático de argamassa no molde. Para a realização do trabalho, foi elaborado um modelo de simulação da linha de produção.</p> <p>Foi realizado uma simulação para determinar os parâmetros básicos do sistema de trabalho, onde foi possível analisar a organização e as condições de trabalho em diferentes troços da linha de produção, conferindo mais enfoque à qualidade, ergonomia e segurança nas operações. A partir dos dados coletados dessa simulação, foi possível realizar as análises finais de ergonomia nos postos de trabalho manuais, e foram sugeridas alterações nesses postos de trabalho com a finalidade de eliminar ações desnecessárias para os colaboradores.</p>
<p>Abrishami et al., 2018 <b>[61]</b></p>	<p>Este artigo em questão, é elaborado com base na operação de soldadura inserido em uma linha de fabrico de aquecedores, aplicando recursos de <i>softwares</i> de simulação. O objetivo principal deste trabalho é otimizar a produção de aquecedores por meio de um conjunto de simulações e suas respetivas análises, onde foram elaborados três diferentes cenários, onde cada um surge com sugestões de melhorias do cenário anterior.</p> <p>Após análise dos cenários, conclui-se que o melhor desenho da linha de produção da empresa seria alcançado ao se adicionar duas máquinas de soldar, dois operadores de soldadura, uma máquina compressora e um operador de testes, além de reduzir o número de trabalhadores a operação de moagem para reduzir os tempos de inatividade existentes, assim, em conjunto todas as propostas fizeram com que a taxa produção aumentasse.</p>

Tabela 3 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial (cont.).

<p>Swate et al., 2020 [62]</p>	<p>Esse artigo foi escrito no ambiente de em uma empresa de processamento de aço que transforma bobinas de aço em chapas, chapas, fendas, tubos, <i>blanks</i> e diversos produtos para telhados, que por meio de simulação no <i>software</i> ARENA, analisa o atual fluxo do processo <i>Shearcut</i> encontrado no armazém da operação.</p> <p>Dois modelos foram então elaborados, cujo primeiro foi desenvolvido com base em dados coletados dos registos de produção e de tempo realizados em algumas das operações, onde foram identificados pontos de gargalos e operações sem valor acrescentado. O segundo modelo foi criado a partir do primeiro, mas com algumas melhorias na redução dos tempos sem agregação de valor e por consequência, os resultados do segundo modelo tiveram um resultado otimizado.</p> <p>Concluiu-se que com o uso dos recursos do ARENA facilitou a manipulação de recursos que seriam inviáveis de serem manipulados em regime de otimização do sistema. Porém, para montar simulações reais, seria ainda necessário realizar um mapeamento aprofundado do fluxo do processo <i>Shearcut</i>, bem como, a recolha de outros dados do processo, como por exemplo, o tempo de execução das máquinas, a duração e as matérias-primas utilizadas no processo.</p>
<p>Javadi et al., 2023 [63]</p>	<p>Neste trabalho identificar e minimizar os gargalos de uma linha de produção em uma serralheria de madeiras curtas, com o objetivo de minimizar custos e maximizar a produção.</p> <p>Após ser traçado a estratégia para o estudo do caso, coletou-se os dados e então foi criado um modelo conceitual dos processos da linha de produção baseado em um gráfico de processos operacionais (OPC). Logo após, foi elaborado e corrido um modelo de simulação dos processos produtivos, encontrando como resultado alguns gargalos na linha de produção. E por fim, realizado análise, onde foi proposto algumas soluções para evitar gargalos e reduzir os custos totais de produção.</p>
<p>Yang &amp; Hsieh, 2014 [64]</p>	<p>Este artigo foi desenvolvido em uma empresa de fabrico de produtos eletrônicos. Tem como objetivo investigar os efeitos das regras de movimentação e da alocação de recursos como medida de desempenho. Os resultados indicaram que as regras de movimentação de menor tempo de processamento, SPT, e a data de vencimento mais próxima são superiores à atual regra de movimentação empregada pela empresa. E com isso, foi sugerido uma nova regra de movimentação, combinando a razão do menor tempo restante de processamento, SRPT, pelo SPT, ocasionando uma otimização no tempo médio de atraso na atual situação de recursos. Outro resultado obtido foi que com a redução de alguns recursos da produção, aumenta-se a sua própria utilização no processo, mas também aumenta o risco de possíveis atrasos na entrega, podendo causar grandes prejuízos à empresa. E por fim foram apresentadas algumas propostas pensando em futuros trabalhos.</p>

Tabela 4 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial (cont.).

<p>Araújo et al., 2019 [65]</p>	<p>Essa pesquisa foi realizada na agroindústria do Laticínio, Funarbe, cujo objetivo foi realizar simulações e modelos computacionais para apoiar as tomadas de decisões, buscando aumentar a capacidade da produção de iogurtes. Foi construído um modelo atual da linha de produção de iogurte, bem como um modelo com sugestões de melhoria, permitindo atender à nova procura. O <i>software</i> de simulação JaamSim foi a ferramenta utilizada para realização das simulações e modelos.</p> <p>Para validar o modelo proposto, foi então coletado dados de produção de iogurte dos últimos três meses e foi comparado com o resultado do modelo computacional proposto, onde observou-se que com o modelo proposto e posteriormente implantado, a capacidade de produção aumentou cerca de 5.000 litros/dia de iogurte, correspondendo a uma produção de iogurtes processados diariamente três vezes superior à produção atual.</p>
<p>Utku, 2023 [66]</p>	<p>Este estudo tem como objetivo garantir a satisfação do cliente ao fazer com que os produtos sejam sempre entregues no prazo, fazendo com que perdas de vendas sejam evitadas, em uma indústria que fabrica coletores de lixo. Usando dados reais coletados, elaborou-se simulações de linha de produção, utilizando de simulações computacionais, e também modelos matemáticos de programação inteira mista relacionado à minimização de atrasos na produção é resolvido pelo <i>software</i> GAMS CPLEX. Desta forma, aplicando os modelos matemáticos e investigando projetos alternativos para a melhoria dos processos de produção, foram possíveis minimizar o atraso total da área de produção, bem como identificar quais eram os gargalos no processo produtivo, fazendo com que a eficiência da produção fosse otimizada.</p>
<p>Valente et al., 2015 [67]</p>	<p>Esse artigo foi elaboração com base em simulações da linha de produção de semicondutores, com o objetivo de analisar a sensibilidade do modelo e otimizar o processo. Observou-se que o processo é considerado bastante complexo devido à quantidade de etapas e parâmetros individuais da máquina, o que provoca dificuldades na estabilização do processo final. Usou-se o <i>software</i> OptQuest para otimizar as simulações realizadas.</p> <p>Foi concluído que a variação no número de máquinas e operadores do processo, tem efeito direto sobre o tempo de ciclo, mas somente se houver um aumento de um ativo, onde destaca-se uma redução de 7,41% no tempo de ciclo.</p>

Tabela 5 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial (cont.).

<p>Said et al., 2013 [68]</p>	<p>Este artigo analisa o layout da linha de produção do projeto do sistema de fabricação com o objetivo de melhorar o desempenho da produção de uma empresa produtora de bebidas com bicarbonato. Após análise dos resultados, foram identificados uma melhoria no novo modelo melhorado em comparação com o layout real da linha de produção, onde os erros percentuais da simulação em comparação com a linha real foram de 3,91% para o Modelo A e 44,1% para o Modelo B. Com base nessa análise, ao utilizar modelos de apoio à decisão, mais especificamente, utilizando o <i>software</i> Arena como ferramenta, os resultados se demonstram bastante satisfatórios.</p>
<p>Park et al., 2021 [69]</p>	<p>Este trabalho buscou como objetivo demonstrar a inserção e adaptação de veículos guiados automaticamente (AGVs) no processo de carregamento de vagões de navios cargueiros <i>Roll on-Roll off</i> (Ro-Ro) em comparação com o atual processo de carregamento.</p> <p>Os resultados revelaram que a inserção dos AGVs no processo de carregamento de vagões dos navios Ro-Ro otimiza a produtividade e resolve muitos problemas do atual processo de carregamento. Com no mínimo 21 AGVs, todo o tempo de processamento é semelhante ou um pouco menor que o processo de carregamento atual, porém, com 40 AGVs, permanece o mesmo. Identificou-se também que à medida que o número de AGVs aumenta, o tempo de transferência diminui, mas a fila de espera torna-se maior. Demonstrando os efeitos da adaptação do AGV, o estudo forneceu informações de grande valor prático para o desenvolvimento e preparação de diversas possíveis situações de tráfego nas operações portuárias navios cargueiros Ro-Ro.</p>
<p>Yemane et al., 2020 [70]</p>	<p>Este artigo estuda maneiras balancear a linha de produção, mais especificamente nas operações de costura do modelo de calças da polícia federal, da empresa Almeida Textil Plc combinando técnicas de otimização manual da linha com simulação computacional, utilizando o <i>software</i> ARENA, para encontrar a solução ideal, de modo a melhorar a produtividade. Após a coleta dos dados necessários, um modelo de simulação representando a linha de produção existente foi desenvolvido e executado em 160 replicações pelos autores, a fim de medir o desempenho atual do sistema em termos de utilização de recursos, WIP e tempo de espera. Os valores de utilização média dos sistemas existentes foram de 0,53 com uma eficiência da linha de 42%. Ao fim das simulações e análises, foi sugerido um novo modelo de linha de montagem de costura que aumentou a utilização do sistema para 0,69 com uma eficiência de linha de 58,42%, sem que custos adicionais fossem acrescentados.</p>

Tabela 6 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial (cont.).

Azizi et al, 2019 [71]	O trabalho apresentado, tem como objetivo investigar o número ideal de estações de trabalho, bem como o número de trabalhadores necessários, para alcançar o desempenho máximo viável em termos de taxa de produção, usando um sistema de simulação, onde a empresa automotiva, Saipa Corporation, foi o objeto de estudo. Os dados coletados foram analisados utilizando ferramentas do <i>software</i> ARENA, JaamSim e SPSS. Posterior à realização das simulações, foram identificadas as potenciais maneiras de otimizar a linha e o modelo foi avaliado adequadamente. Os resultados indicaram que aproximadamente 80% dos problemas existentes poderiam ser resolvidos através do planejamento correto da mão de obra, fornecimento a tempo da matéria-prima necessárias nas estações de trabalho e minimização do tempo de transporte entre as estações de trabalho. Concluindo assim, que o tempo de espera por estação poderia ser minimizado e ao mesmo tempo aumentar a taxa de produção.
McDonald et al., 2012 [72]	Este artigo aborda o desenvolvimento e análise de um modelo de simulação de uma nova linha de produção EVS de produção de motores, na empresa IM, em Juárez, México. O primeiro passo, foi a realização de análise da capacidade da linha para diferentes procuras de dois tipos de motores, onde um modelo de simulação, foi elaborado, para verificar, validar e determinar na produção diária quais eram as potenciais áreas problemáticas para os diversos níveis de procura. Os resultados obtidos mostraram que em todos os níveis de procura, exceto um, a linha de produção seria capaz de fabricar as necessidades dos clientes se o número de trabalhadores adequado estiver equilibrado para os tipos de operações a serem executadas. Já na exceção, que foi o nível de procura mais alto, os resultados da simulação indicaram que a linha não é capaz de atender à procura. Análises adicionais mostraram que múltiplas estações de trabalho podem ser problemáticas com pequenas variações da procura. E por fim, foram identificadas estações de trabalho problemáticas para cada setor de montagem e para a linha de produção como um todo.
Silva et al., 2017 [73]	Esse trabalho tem como objetivo realizar otimizações da linha de produção e análise do layout das operações de costura em uma indústria produtora de móveis domésticos. Foi, então, elaborado um modelo de simulação que demonstrasse o sistema real constituído de um layout com três grupos de cinco costureiras, produzindo variados tipos de produtos. Os resultados obtidos, foram elaborados três cenários relacionados à organização do layout de trabalho e a organização da linha de produção. Concluiu-se que o segundo cenário se mostrou o mais vantajoso, uma vez que apresentou maior produtividade em comparação a todos os outros cenários e ao sistema real, exemplificando assim, que a empresa pode aumentar sua capacidade de produção apenas modificando o layout e organizando o ambiente de trabalho.

Tabela 7 - Trabalhos realizados na área da simulação industrial (cont.).

<p>Šebalj, 2022 [74]</p>	<p>O objetivo deste estudo é desenvolver um modelo de simulação da distribuição gás natural para otimização de custos. Foi criado um modelo de simulação utilizando como ferramenta o <i>software</i> Arena. Os dados para o modelo de simulação foram coletados de uma distribuidora de gás natural, o conjunto de dados final foram de 8.754 registros.</p> <p>Os modelos denominados, <i>As-Is</i> e <i>To-Be</i>, separados em sete meses foram realizados, e então seus resultados foram comparados, onde mostraram que a energia de reequilíbrio positiva seria reduzida em 32% e a negativa em 34%. Concluindo assim, que o modelo simulado pode servir como um plano inicial para a análise e justificativa em se investir na implantação de uma solução técnica que gerencie a acumulação do sistema de distribuição.</p>
<p>Hasan et al. 2019 [75]</p>	<p>Neste artigo, tem como objetivo mapear as falhas do processo de uma linha de produção de iogurte na fábrica Abu Ghraib Dairy. Na segunda fase, após a validação do modelo, os resultados foram utilizados para apresentar um novo planejamento de processo a fim de aumentar a produtividade e lucro do sistema produtivo.</p>
<p>Dereje Oljira et al., 2020 [76]</p>	<p>Este trabalho objetivou, analisar os pontos em que o sistema possui gargalos e com isso poder otimizar o processo produtivos da linha de produção de uma empresa de água mineral. Após o desenvolvimento e aplicação dos modelos de simulação, foram possíveis encontrar e eliminar os gargalos, conferindo à linha de produção, um aumento de aproximadamente 54% do rendimento, bem como a redução de cerca de 35% do tempo de ciclo do processo, fazendo com que o processo fosse otimizado como um todo.</p>

Pode-se concluir, através dos trabalhos apresentados pela tabela acima, que o uso de modelos de apoio à decisão baseados em simulação, é uma ferramenta bastante interessante no sentido de otimização de processos industriais, que o emprego da mesma, pode-se se mostrar bastante útil em diversos seguimentos e áreas de atuação.



## 3. Descrição do Processo de Produção Real

Este capítulo tem como objetivo descrever o processo real das linhas de produção, que se iniciam com a entrada do material no começo das linhas e são finalizadas com a saídas das peças finais fundidas. A seguir, é exposto quais são os problemas e falhas ao longo da cadeia fabril, seguida da delineação das propostas e cenários elaborados para a resolução da problemática.

### 3.1. Descrição do processo e postos de trabalho das linhas de produção

O sistema de manufatura alvo deste estudo se trata de duas linhas de produção de peças de ferro fundido moldados em areia verde, onde essas linhas são divididas em sete postos de trabalho iguais em cada uma, como ilustrado Figura 10.

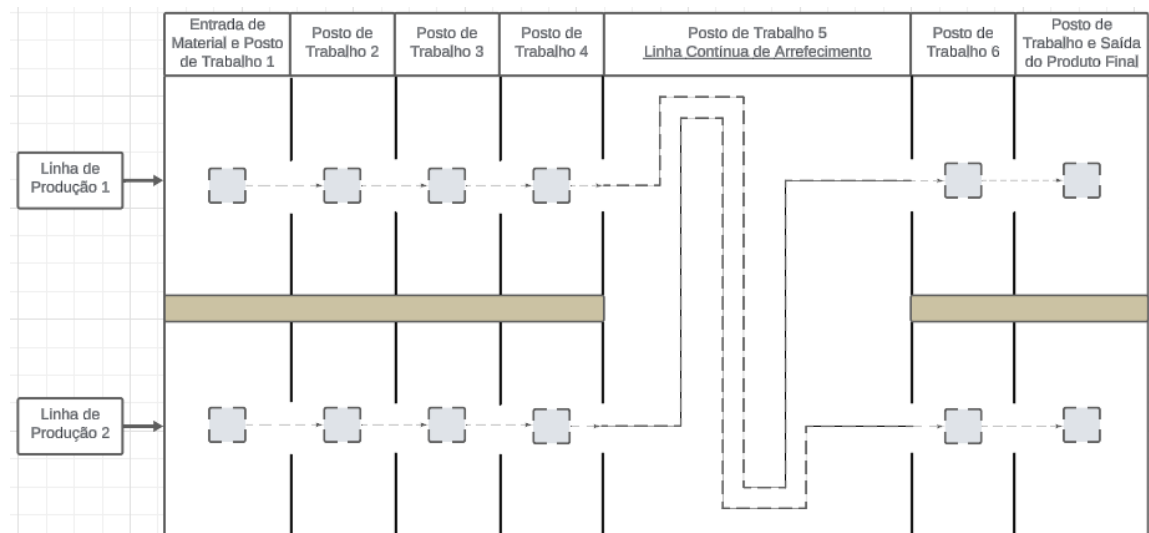


Figura 10 - Layout da linha de produção em estudo.

#### 3.1.1. Posto de trabalho 1

No posto de trabalho 1, indicado na Figura 11, ocorre o fabrico do molde em areia verde em duas máquinas de moldagem, FBO1 e FBO2, onde uma certa quantidade de areia é vertida em caixas, que estão encaixadas na máquina de moldagem, que posteriormente serão prensadas e

“curadas” no formado do perfil da peça em que se pretende produzir. Os moldes podem variar entre moldes “crus”, quando não há presença de machos e filtros, ou moldes “montados”, quando há a presença deles, como exemplificado na Figura 12. O processo é executado por 2 colaboradores em cada uma das linhas, sendo um operador da máquina e um auxiliar.



Figura 11 - Posto de Trabalho 1.

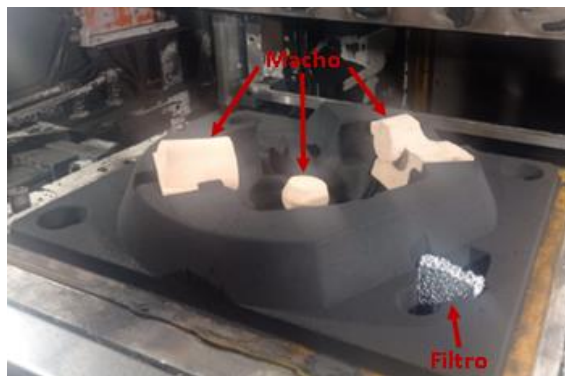


Figura 12 - Exemplo de Molde "montado".

### 3.1.2. Posto de trabalho 2

No posto de trabalho 2, que conta com um operador, os moldes são alocados em carros de transporte que comportam no máximo três moldes, onde os mesmos, são identificados e posteriormente transferidos para a plataforma de vazamento, como demonstrado nas Figuras 13 e 14.



*Figura 13 - Posto de Trabalho 2.*



*Figura 14 - Transferência do Carro com os moldes para a plataforma de vazamento.*

### **3.1.3. Posto de trabalho 3**

No posto de trabalho 3, é realizada a limpeza, com jatos de ar comprimido, do canal de vazamento do molde por onde o ferro fundido será inserido, seguida da organização, inspeção pré-vazamento dos moldes e movimentação dos carros até a linha de vazamento, como referenciado na Figura 15. Nesta etapa, estão alocados dois colaboradores em cada linha.



*Figura 15 - Posto de Trabalho 3.*

#### **3.1.4. Posto de trabalho 4**

No posto 4, ocorre uma etapa chamada de “pesagem”, onde é colocado sobre o molde, um peso de lastro, para evitar a força de levantamento durante o processo de vazamento. É nesta etapa, que ocorre também o vazamento de metal líquido nos moldes, como indicado na Figura 16. Nesta posição, estão a laborar três operadores.



*Figura 16 - Posto de Trabalho 4.*

#### **3.1.5. Posto de trabalho 5**

No posto de trabalho 5, identificado na Figura 17, os moldes aguardam, porém ainda em movimentação contínua da linha, o tempo de solidificação do metal para depois serem desmoldados. Nesta etapa, trabalham dois operadores, que realizam a primeira inspeção pós-vazamento, onde é identificada a existência de alguma não conformidade externa e visível nos moldes.



*Figura 17 - Posto de Trabalho 5.*

### **3.1.6. Posto de trabalho 6**

No posto de trabalho 6, o carro contendo os moldes, chega até o fim da linha de vazamento e é então movimentado para plataformas de desmolde, como representado na Figura 18, onde serão virados para o posto de trabalho seguinte, que consistem em esteiras de desmolde. Esta etapa é realizada por três operadores, um em cada uma plataforma.



*Figura 18 - Posto de Trabalho 6.*

### **3.1.7. Posto de trabalho 7**

No posto 7, o último posto desta linha de produção, é executada a desmoldagem, que consiste na separação da areia verde das peças fundidas através de duas esteiras vibratórias, esteira 1 e esteira 2. Nesta etapa, também é realizada a primeira inspeção visual direta nas peças, onde os quatro operadores, dois em cada esteira, alocados a este posto de trabalho, são responsáveis por retirar as peças da esteira, realizar a inspeção e enviar para o armazém subsequente, como representado na Figura 19 a seguir.



*Figura 19 - Posto de Trabalho 3.*

### **3.2. Análise da problemática**

O processo produtivo atual das linhas de produção objeto de estudo desse trabalho, enfrenta atualmente gargalos em dois postos de trabalho, no posto 2, onde são alocados os moldes em carros de transporte, e no posto 4, onde é realizado a vazamento e “pesagem” dos moldes. Estes problemas ocorrem devido, em ambas estações de trabalho, o tempo de execução ser superior aos das etapas anteriores, o que ocasiona uma fila de espera. No caso do processo de alocação em carros de transporte, esse tempo mais elevado se deve ao fato de a operação ser realizada de forma manual, ou seja, no tempo em que o operador as consegue executar. Já no caso do outro gargalo existente, o tempo elevado é derivado da operação “pesagem”, onde a máquina que executa esse passo do processo, apesar de possuir uma capacidade fixa e limitada, é operada sem atingir sua capacidade máxima.

Além destas duas situações, propõe-se resolver outro dilema, que é centrado no tempo de transporte dos moldes entre os postos de trabalhos 5 e 6, onde os mesmos, após passarem pela linha contínua de arrefecimento seguem para a plataforma de desmolde. Observou-se, que devido à má organização e disposição, juntamente com a limitada capacidade dos colaboradores, fizeram com que os tempos de transporte dos moldes fossem elevados.

Pretende-se, portanto, a elaboração de um modelo fundamentado em simulação, destinado a servir como uma ferramenta de suporte à tomada de decisão, visando a otimização dos recursos disponíveis. Este modelo será capaz de superar as dificuldades previamente identificadas, com o auxílio de hipotéticos cenários simulados.

### **3.3. Delineamento de estratégias a executar**

Foram adotadas diversas estratégias que objetivam a resolução dos problemas identificados. A seguir, serão apresentadas as estratégias elaboradas, bem como a descrição de cada uma no contexto dos modelos de simulação que serão desenvolvidos.

### **3.3.1. Cenário para validação do modelo**

Este cenário não se trata de uma otimização ou resolução dos problemas descritos anteriormente. Ele será usado exclusivamente para a validação do modelo desenvolvido. Em outras palavras, esta estratégia tem a função de confirmar se os dados coletados e o modelo de simulação criado estão em conformidade com o funcionamento real da linha de produção objeto de estudo.

### **3.3.2. Cenário 1 – Diminuição do tempo de operação do posto de trabalho 2**

Este cenário busca a resolução do gargalo existente na estação 2 da linha de produção, onde pretende-se aumentar a capacidade do posto, adicionando mais um recurso a ela, ou seja, mais um colaborador. Uma vez que essa etapa do processo é quase toda manual, ao aumentar um operador, espera-se que o tempo da operação realizada diminua, diminuindo assim, a fila de espera.

### **3.3.3. Cenário 2 – Aumento da capacidade das máquinas do posto de trabalho 4**

Similar ao cenário anterior, este procura dar resposta ao problema das filas de espera que ocorrem neste posto de trabalho. A máquina que realiza esta operação tem capacidade para colocar o peso de lastro em três moldes de uma só vez, no entanto, atualmente só coloca um peso de cada vez em cada linha. Com isto, pretende-se simular um cenário em que a capacidade máxima da máquina seja utilizada.

### **3.3.4. Cenário 3 – Diminuição do tempo de transporte entre os postos de trabalho 5 e 6**

Este cenário explora possibilidades de otimizar o tempo de transporte entre a saída dos moldes da linha contínua de arrefecimento e a entrada dos mesmos na plataforma de desmolde. Com isso, será analisada a possibilidade de utilizar meios de locomoção mais rápidos e eficazes, bem como a criação de um caminho dedicado a essa rota de transporte.

### **3.3.5. Cenário 4 – Combinação entre os cenários 1 e 2**

Este cenário consiste em combinar as medidas aplicadas nos cenários 1 e 2 descritos acima, com a intenção de analisar o emprego de mais de uma estratégia e quais são as implicações dessa metodologia.

### **3.3.6. Cenário 5 – Combinação entre os cenários 1, 2 e 3**

Em semelhança com o que foi descrito acima, este cenário aplica a metodologia onde se busca combinar os três primeiros cenários.

### 3.4. Recolha e tratamento dos dados

Este trabalho, por se tratar da análise e otimização do processo produtivo de uma linha de produção usando simulação, a recolha e o tratamento dos dados, tem de ser feito com especial atenção, pois o modelo construído deve ser o mais semelhante possível do real.

Os dados utilizados para a construção do modelo de simulação, e que foram fornecidos pela empresa, foram coletados de forma automática pelas máquinas e sensores ao longo das linhas de produção por um período de trinta dias, onde de forma semelhante à empresa, neste trabalho serão usados os tempos médios dos tempos recolhidos no decorrer desse intervalo, e a considerar um dia de 24 horas de produção.

Os tempos obtidos para cada etapa do processo podem ser mais bem observados nos anexos A, B, C, D, E, F e G:

- Anexo A – Tempo da entrada de material e tempo do processo de moldagem (Posto de trabalho 1);
- Anexo B – Tempo de operação de alocação dos moldes em carros de transportes (Posto de trabalho 2);
- Anexo C – Tempo de realização da operação de limpeza do canal de vazamento dos moldes (Posto de trabalho 3);
- Anexo D – Tempo da etapa de “pesagem” e vazamento (Posto de trabalho 4);
- Anexo E – Tempo percorrido pelo molde ao longo da linha contínua de arrefecimento (Posto de trabalho 5);
- Anexo F – Tempo da entrada nos moldes na plataforma de desmoldagem (Posto de trabalho 6);
- Anexo G – Tempo de realização do processo de desmoldagem nas esteiras (Posto de trabalho 7).

## 4. Sistema de Apoio à Decisão

Neste capítulo, descreve-se o desenvolvimento do sistema de apoio à decisão com base em modelos de simulação. Inicialmente, são apresentadas as diversas funcionalidades da ferramenta criada, do ponto de vista do utilizador. E por fim, aborda-se a estrutura básica do modelo de simulação, explicando-se de maneira sucinta cada bloco utilizado.

### 4.1. Modelo lógico

Com base nas informações e tempos recolhidos de cada posto de trabalho, e das linhas de produção como um todo, foi desenvolvido o modelo de simulação, utilizando o *software* de simulação *JaamSim*, conforme mencionado anteriormente. Este modelo tem como objetivo representar o sistema produtivo real, e também incorporar estratégias que permitam analisar possíveis melhorias a serem implementadas na cadeia de operações. Na Figura 20, está melhor representado o modelo criado, que posteriormente, e para uma melhor compreensão do mesmo, foi dividido em três partes: representação da entrada do material, representação dos postos de trabalho e representação da saída do produto final.

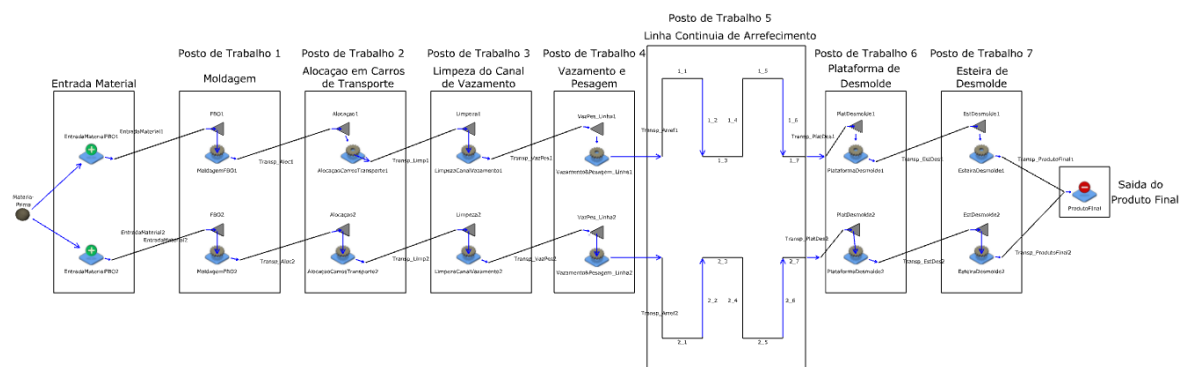


Figura 20 - Modelo de simulação gerado no software JaamSim.

#### 4.1.1. Representação da entrada do material

A entrada da matéria-prima marca o início do processo produtivo das linhas, e é nesta etapa que o material é preparado para ser adicionado nas máquinas de moldagem, como representado na Figura 21.

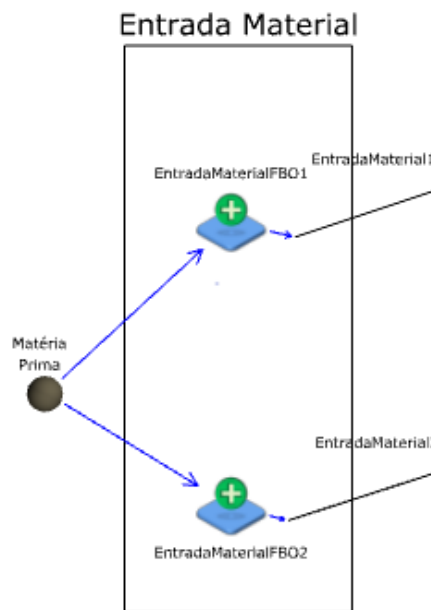


Figura 21 - Representação da Entrada da Matéria-prima.

A construção gráfica do modelo de simulação no *software* se dá ao adicionar blocos de comandos, onde nesta etapa, foram adicionados os blocos: *SimEntity*, *EntityGenerator* e *EntityConveyor*.

Logo ao início, foi implementado o bloco *SimEntity*, que é responsável pela representação gráfica do material que será carregado durante todas as etapas e postos de trabalho da simulação, podendo ele, ter vários formatos específicos, como ilustrado na Figura 22.

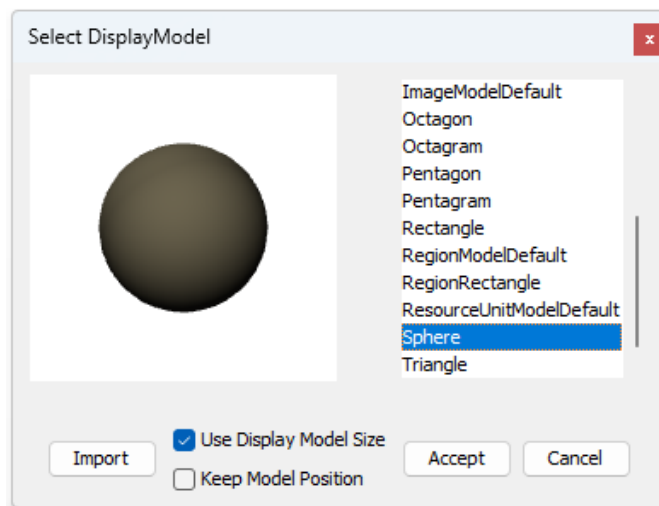


Figura 22 - Exemplo de configuração do bloco *SimEntity*.

O segundo comando, *EntityGenerator*, tem a finalidade de gerar a entidade que será posta na linha de produção, que neste caso, será a matéria-prima mencionada anteriormente, em formato esférico. Neste comando, podem ser definidos vários parâmetros de entrada, porém para o desenvolvimento do presente trabalho apenas foram alterados os intervalos de tempo em que entrarão uma nova quantidade de material, ou seja, de quanto em quanto tempo

entrará a matéria-prima na linha, e também foi definido para qual entidade o material deverá ir a seguir, conforme apontado na Figura 23.

Keyword	Default	Value
Description	None	
NextComponent	None	EntradaMaterial1
FirstArrivalTime	0.0 min	
InterArrivalTime	0.016666666666...	1.5 min
EntitiesPerArrival	1	
PrototypeEntity	None	Matéria
BaseName	Generator Name	
MaxNumber	Infinity	
InitialNumber	0	

Figura 23 - Exemplo de configuração do bloco EntityGenerator.

Em seguida, no comando *EntityConveyor*, é definido o tempo de deslocação do material de um ponto ao outro, e também serve para que a entidade, matéria-prima, seja representada graficamente na animação da simulação. Como representado na Figura 24, nesse bloco foram apenas definidos o tempo, como mencionado anteriormente, e para qual estação o material deverá ser transportado.

Keyword	Default	Value
Description	None	
NextComponent	None	FBO1
TravelTime	0.0 min	0.5 min
Length	0.0 m	
EntitySpace	0.0 m	
AccumulationLength	0.0 m	
Accumulating	FALSE	
MaxValidNumber	10000	

Figura 24 - Exemplo de configuração do bloco EntityConveyor.

#### 4.1.2. Representação dos postos de trabalho

Os conjuntos de comandos utilizados para gerar e representar na simulação todos os postos de trabalho, com exceção do posto de trabalho cinco, foram iguais, salvo a parametrização dos

tempos de operação, que, em cada posto de trabalho, tem um tempo diferente. Por isso, no ponto referente ao posto de trabalho 1, serão dados exemplos dos comandos utilizados, enquanto nos pontos referentes aos restantes postos de trabalho, será apresentada apenas a modelação gráfica correspondente.

- **Posto de trabalho 1:**

No primeiro posto de trabalho, é onde a matéria-prima será utilizada no processo de moldagem, ao ser conformada no perfil das peças que posteriormente serão fundidas e confeccionadas. Na Figura 25, é possível observar com maior detalhe como foi construída essa estação no modelo de simulação.

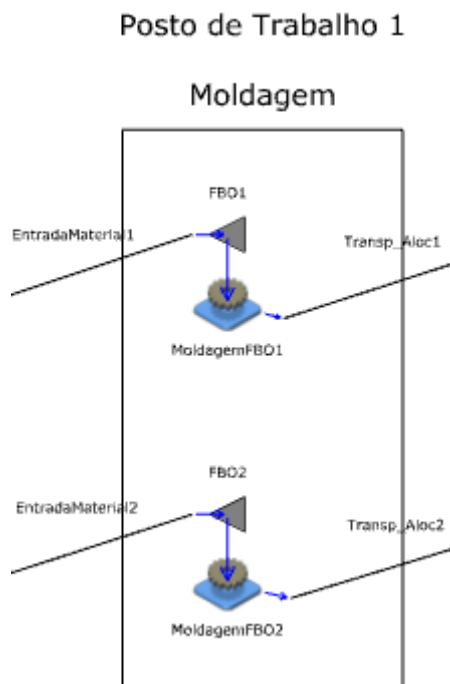


Figura 25 - Representação do Posto de Trabalho 1.

Para descrever, parametrizar e simular o posto de trabalho, foram usados os seguintes blocos de comando: *Server*, *Queue* e *EntityConveyor*.

Conforme representado na Figura 26, este posto de trabalho se inicia com o transporte e a adição do material nas máquinas moldagem, FBO1 e FBO2, que são representadas pelo comando *Server*. Esse comando representa na simulação, um processo ou operação a ser executado, que no caso desta estação, representa o processo de fabrico dos moldes em areia verde. Os parâmetros que foram modificados nesse comando foram os mesmos modificados em todos postos de trabalho, sendo eles o tempo de duração da operação, a fila de espera alocada a esse processo e a entidade seguinte que o material será transportado.

Keyword	Default	Value
Description	None	
NextComponent	None	Transp_Aloc1
WaitQueue	None	FBO1
Match	None	
SelectionCondition	None	
NextEntity	None	
WatchList	None	
ServiceTime	0.0 min	1 min

Figura 26 - Exemplo de configuração do bloco Server.

Ainda para completar a representação desse posto de trabalho, foi implementado o comando *Queue*, que tem a função de parametrizar e criar graficamente a fila de espera de cada operação. Semelhante ao bloco Server, descrito acima, o comando *Queue* também foi parametrizado uniformemente em todos os postos de trabalho. Na Figura 27, pode-se verificar um exemplo de aplicação desse bloco, do qual os parâmetros inseridos foram apenas o número de linhas e colunas a serem representadas graficamente no modelo animado.

Keyword	Default	Value
Spacing	0.0 m	
MaxPerLine	Infinity	7
MaxRows	Infinity	5
ShowEntities	TRUE	

Figura 27 - Exemplo de configuração do bloco Queue.

- **Representação do posto de trabalho 2**

O segundo posto de trabalho, corresponde à operação de alocação dos moldes em carros de transporte. Esta estação corresponde a um dos gargalos comentados anteriormente, e por isso, será uma das estações que terá parâmetros alterados em conformidade com o processo de otimização das linhas de produção. A Figura 28 ilustra os comandos utilizados no posto em questão.

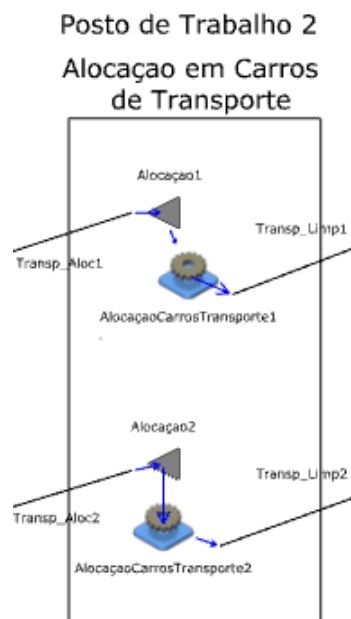


Figura 28 - Representação do Posto de Trabalho 2.

- **Representação do posto de trabalho 3**

No posto de trabalho 3, ocorre o processo de limpeza dos canais de vazamento, em conformidade com os blocos de comandos de simulação representados na Figura 29.

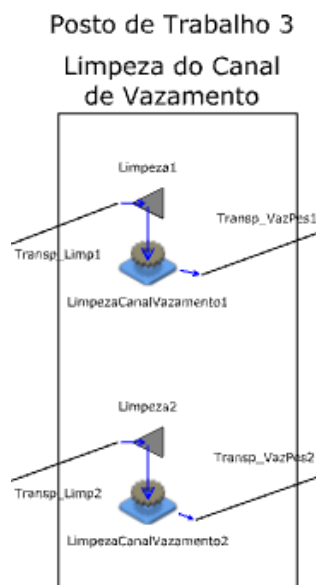


Figura 29 - Representação do Posto de Trabalho 3.

- **Representação do posto de trabalho 4**

Outro gargalo desse processo produtivo, como mencionado anteriormente, e proficientemente representado na Figura 30, ocorre no posto de trabalho 4, onde se decorre o vazamento do material fundido, seguido da adição do peso de lastro por cima dos moldes.

#### Posto de Trabalho 4

##### Vazamento e Pesagem



Figura 30 - Representação do Posto de Trabalho 4.

- **Representação do posto de trabalho 5**

Como referido anteriormente, o quinto posto de trabalho é o único posto que não foi modelado na simulação com a utilização dos mesmos blocos de comando. Isso se deve ao fato de que nessa etapa não é realizada nenhuma operação, e sim, os moldes passam pelo processo de solidificação e arrefecimento das peças fundidas em uma linha contínua de arrefecimento. Para a modelação desse posto de trabalho, foi utilizado apenas o comando *EntityConveyor*, como demonstrado na Figura 31.

#### Posto de Trabalho 5

##### Linha Contínua de Arrefecimento

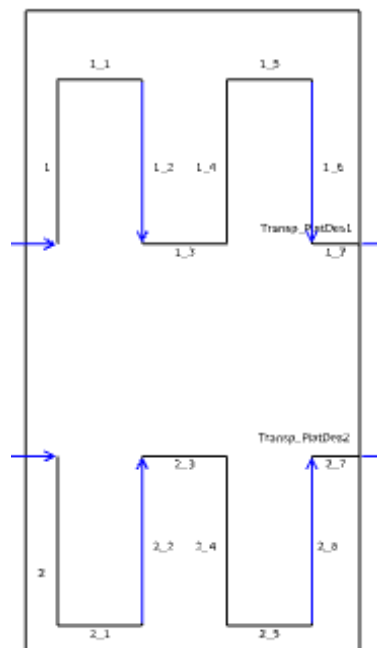


Figura 31 - Representação do Posto de Trabalho 5.

- **Representação do posto de trabalho 6**

No posto de trabalho 6, de igual maneira aos demais, é modelado com os mesmos blocos de comando dos 4 primeiros blocos. Nesse posto, é realizada a operação de transferência dos moldes para a plataforma de desmolde, onde eles posteriormente serão lançados na esteira de desmolde. Pode-se melhor visualizar na Figura 32, a modelação realizada para essa etapa do processo.

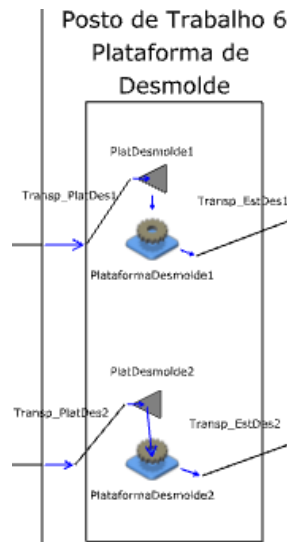


Figura 32 - Representação do Posto de Trabalho 6.

- **Representação do posto de trabalho 7**

O sétimo e último posto de trabalho, marca o fim do processo de produção das linhas, onde os moldes passam por esteiras de vibração para a retirada do excesso de areia de moldagem. A partir dessa etapa, e no que diz respeito a esse processo produtivo em linhas, o produto que sai, é considerado um produto final, e posterior a esse processo é encaminhado para um armazém local. A Figura 33 é a representação gráfica desse posto no modelo de simulação.

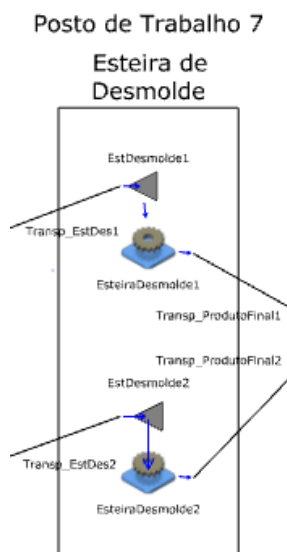


Figura 33 - Representação do Posto de Trabalho 7.

### 4.1.3. Representação da saída do produto final

Essa etapa não corresponde a uma etapa ou estação de trabalho do processo produtivo analisado nessa linha de produção. Essa representação só existe para fins de construção do modelo de simulação, uma vez que o produto final ao sair do último posto de trabalho seguirá para um armazém interno. E é isso que é representado nessa etapa do modelo, que através dos comandos *EntityConveyor*, já descritos anteriormente, e do comando *EntitySink*, a simulação é encerrada, conforme ilustrado na Figura 34.

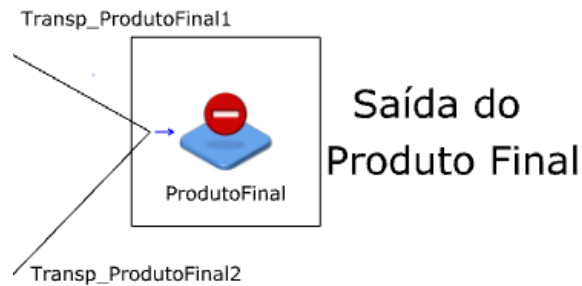


Figura 34 - Representação da Saída do Produto Final.

O comando *EntitySink* tem a função de receber todas as entidades, ou nesse caso, peças, geradas ao longo da produção das linhas. Por se tratar de um bloco de finalização, para a formulação desse modelo, não foi necessária a parametrização de nenhuma variável.



## 5. Validação do Modelo de Simulação e Análise de Resultados

Neste capítulo, foi descrita a validação do modelo de simulação desenvolvido nesta dissertação, sendo posteriormente apresentados, analisados e comentados os resultados relativos aos cenários de otimização propostos.

### 5.1. Validação do modelo de simulação

Uma vez que o modelo de simulação é construído, é necessário proceder com sua validação, isto é, determinar se o modelo criado consegue descrever e entregar os mesmos resultados do sistema real. Isto é feito comparando os valores provenientes do sistema real com os valores obtidos no modelo de simulação, utilizando os mesmos parâmetros de entrada, tempos de operações e tempos de deslocamentos.

Conforme mencionado anteriormente, os dados fornecidos e recolhidos, foram coletados continuamente durante um período de trinta dias, e com isso, os valores utilizados, tanto no desenvolvimento quanto na validação do modelo simulado, foram médias calculadas, uma vez que são esses mesmos valores que a empresa adota em seus tratamentos estatísticos, no qual os valores das produções diárias durante esse período de trinta dias são apresentados no Anexo H. A Tabela 2 apresenta a quantidade de peças produzidas pelo processo atual da empresa e os resultados obtidos através do modelo de simulação.

*Tabela 8 - Validação do Modelo Desenvolvido*

<b>Intervalo de Produção (Dias)</b>	<b>Quantidade de Peças Produzidas</b>	
	<b>Processo Real</b>	<b>Modelo de Simulação</b>
30	1412	1395

Ao analisar os valores apresentados na tabela acima, encontra-se uma diferença em termos absolutos de aproximadamente 1,2%. Por conseguinte, conclui-se que o modelo de simulação desenvolvido é válido, não só para representar as linhas de produção desse processo produtivo, como também pode ser utilizado como ferramenta de apoio à tomada de decisões.

## 5.2. Análise de Resultados – Cenários propostos

De acordo com o exposto no ponto 3.3 deste trabalho, foram sugeridos cinco cenários com propostas de melhorias, onde o objetivo é investigar quais são as mudanças que surgem ao longo das linhas de produção e qual o impacto na produção ao aplicar as alterações contidas nos cenários. E no fim esses valores serão comparados com os valores do sistema real, que nesse caso serão adotados os valores encontrados no modelo validado.

### 5.2.1. Análise de Resultado: Cenário 1 – Diminuição do tempo de operação do posto de trabalho 2

Esse cenário contempla a proposta de diminuição do tempo de operação do posto de trabalho 2, e para tal, é sugerida a adição de um colaborador no processo. De forma a implementar valores reais ao cenário simulado, foi pedido para os responsáveis da produção, realizarem a operação em questão com o uso de um trabalhador extra, onde na Tabela 3, são apresentados dez valores registados dos tempos da operação realizada no posto 2, e na Tabela 4, a comparação entre a média desses valores e o valor do sistema real.

*Tabela 9 - Tempos de operação com um trabalhador extra*

<b>Operação</b>	<b>Tempo (minutos)</b>
<b>1</b>	1,23
<b>2</b>	1,27
<b>3</b>	1,23
<b>4</b>	1,01
<b>5</b>	1,32
<b>6</b>	1,16
<b>7</b>	1,21
<b>8</b>	1,28
<b>9</b>	1,04
<b>10</b>	1,21

*Tabela 10 - Média dos tempos de operação do posto de trabalho 2*

<b>Média dos tempos de operação do posto de trabalho 2 (minutos)</b>	
<b>Processo real</b>	<b>Cenário 1</b>
1,6	1,2

Com a admissão do novo valor de tempo da operação do posto de trabalho 2, procedeu-se com a execução do modelo de simulação do cenário 1. Os resultados em termos de produção são exibidos na Figura 35.

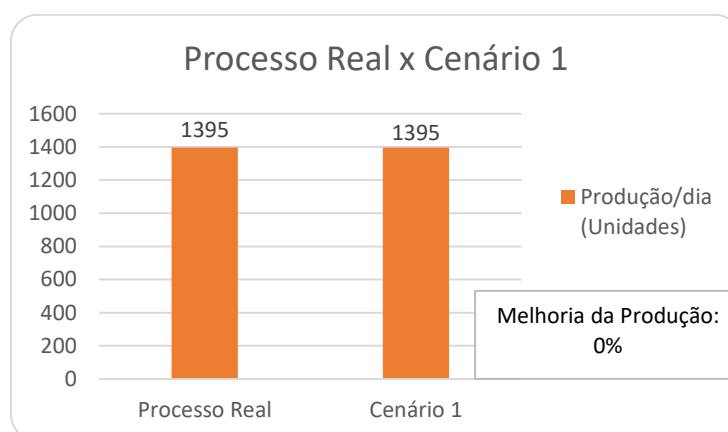


Figura 35 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 1.

Ao analisar os resultados desse primeiro cenário, é possível observar que em termos de valores de produção diária, não se alcançou nenhuma melhoria, entretanto o problema da fila de espera que ocorria no posto de trabalho em questão deixou de existir. No decorrer da simulação, observou-se também, que a fila de espera do posto de trabalho 4 aumentou a mesma quantidade de moldes que deixou de existir na fila de espera do posto de trabalho 2, denotando assim, que a aplicação das premissas aplicadas nesse cenário, não funcionaria se implementada como única sugestão de otimização.

### 5.2.2. Análise de Resultado: Cenário 2 – Aumento da capacidade do posto de trabalho 4

Foi proposto através desse cenário que no posto de trabalho 4, fosse utilizada nas duas linhas de produção, a capacidade máxima das máquinas que adicionam o peso de lastro. No processo produtivo atual, são utilizados três dos quatro possíveis pesos que a máquina tem capacidade de inserir sobre os moldes.

Foi modificada a capacidade da máquina de “pesagem” para quatro pesos de lastro ao invés de três, e a seguir o cenário 2 foi simulado. Na Figura 36, é possível avaliar os resultados desse modelo face aos valores do processo real.

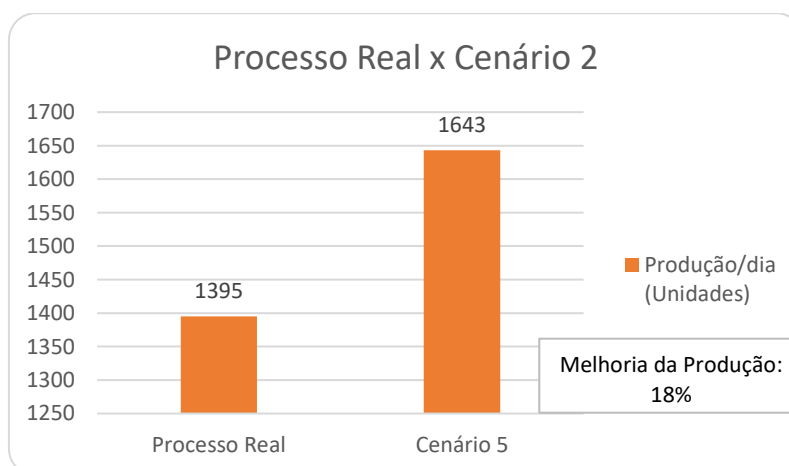


Figura 36 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 2.

Como observado no gráfico acima, o aumento da capacidade das máquinas de “pesagem” tem um impacto positivo no processo. Esse resultado de 18% de melhoria foi atingido, como referido assim, apenas com incremento da capacidade das máquinas desse posto de trabalho. Com esse resultado, notou-se que a fila de espera dessa etapa foi reduzida em aproximadamente 85%, fazendo com que essa proposta melhorasse não só a resposta final, como também o fluxo produtivo.

### 5.2.3. Análise de Resultado: Cenário 3 – Diminuição do tempo de transporte entre os postos de trabalho 5 e 6

Este cenário busca atingir melhores indicativos do processo através da hipótese de diminuição do tempo de transporte entre o fim da linha contínua de arrefecimento e a entrada dos moldes na plataforma de desmolde, que apesar da curta distância, para se atravessar de um posto para outro, é preciso um largo manéjo. Por isso, é proposto neste cenário, a criação de um corredor logístico interno, onde não seja preciso se desviar, tão pouco estar à espera de outros trabalhos, para que tal transporte seja executado, e com isso acarrete a diminuição do tempo do deslocamento. Na Figura 37, é possível notar a comparação entre os resultados do sistema real e do modelo com a aplicação das hipóteses do cenário 3.

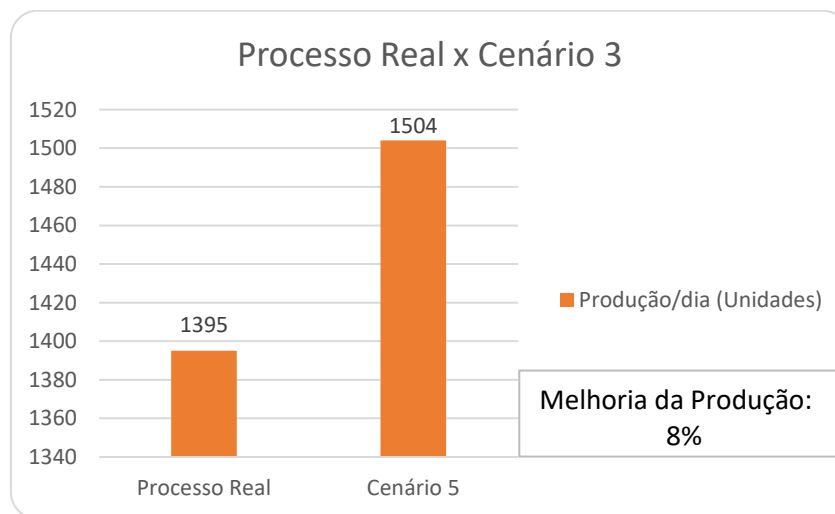


Figura 37 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 3.

O gráfico da Figura 37, ilustra os resultados obtidos pela implementação das propostas do cenário 3, onde uma melhoria de 8% foi registrada. Esse desempenho se deve ao fato de se ter reduzido o tempo de transporte de 3 minutos para 2 minutos. Chegou-se no valor dessa redução de tempo admitindo uma mudança conservadora do atual processo de transporte. Essa configuração, além da melhoria apontada, não proporcionou ao modelo nenhum outro incremento ao processo de fabrico, e isso deve ao fato, de que os dois elos mais fracos das linhas de produção estão em etapas anteriores a essa.

#### 5.2.4. Análise de Resultado: Cenário 4 – Combinação entre os cenários 1 e 2

Esta estratégia busca estudar a influência que a união entre os cenários 1 e 2 proporciona no modelo, ou seja, a combinação entre reduzir o tempo de operação do posto de trabalho 2 e aumentar a capacidade de trabalho das máquinas na etapa 4. Em seguida, na Figura 38, apresenta-se a análise relativa aos resultados do cenário 4.

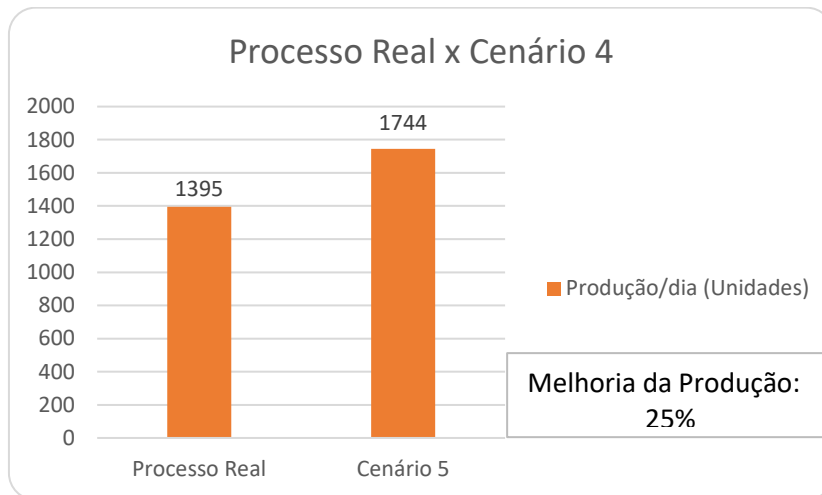


Figura 38 - Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 4.

Como referido no gráfico acima, com a aplicação deste cenário, há um aumento da produção diária em aproximadamente 25%, sendo esse, um valor mais interessante se comparado aos cenários anteriores. Para além desse resultado, observou-se que o problema do acúmulo gerado na fila de espera do posto 4, pela diminuição do tempo de operação no posto 2, foi significativamente menor, em cerca de 75%.

#### 5.2.5. Análise de Resultado: Cenário 5 – Combinação entre os cenários 1, 2 e 3

Através da Figura 39, é possível identificar os efeitos da combinação entre os três primeiros cenários.

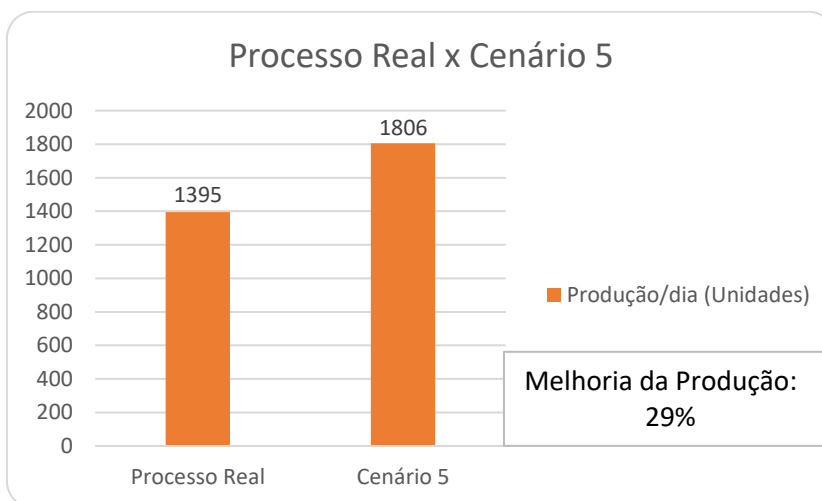


Figura 39 – Comparação de Valores entre o Processo Real e o Cenário 5.

A utilização do cenário 5 demonstrou um aumento na quantidade na saída de produtos finais, tanto em comparação com o sistema real, com as duas estratégias individuais, e também com o outro cenário combinado no ponto 5.2.4. É possível aferir a otimização da produtividade de peças em aproximadamente 29%, e uma redução global das filas de espera em cerca de 92,5%.

### 5.2.6. Síntese dos resultados apresentados

Uma breve avaliação dos cinco cenários implementados é apresentada na Figura 40, em que está presente um gráfico comparativo dos valores de produção associados a cada uma delas. Em seguida, serão tiradas conclusões com base nesses dados, tomando como ponto de partida a estratégia que mais se sobressai, e abordando possíveis formas de aumentar o impacto de cada cenário.

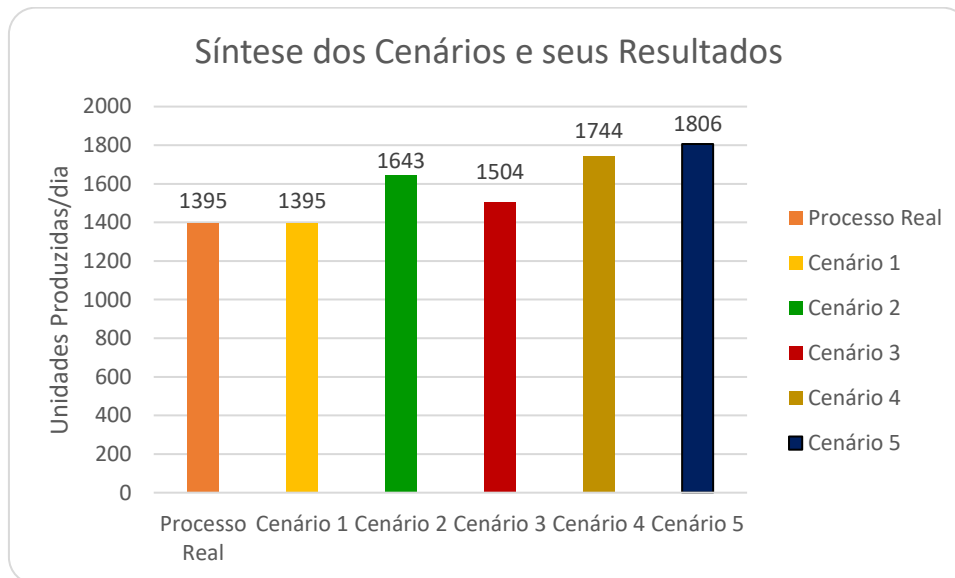


Figura 40 – Resultados compilados dos 5 cenários.

A análise do gráfico revela que somente a proposta do cenário 1 não provoca melhoria em termos de produção diária, e em contra partida todos os outros cenários implementados têm um efeito positivo no sistema produtivo.

Referindo às propostas que deram resultados otimizados, e em sentido isolado, cenários 2 e 3, destaca-se a proposta 2, que demonstra aumentos de produção de cerca de 18%, e diminuição da fila de espera em 85% no seu respectivo posto de trabalho. Esta estratégia concentra-se em utilizar a capacidade e disponibilidade máxima das máquinas de “pesagem”.

Quando se considera os cenários combinados, cenários 4 e 5, o segundo produz resultados superiores, com um incremento na produção de 29%, e redução global de 92,5% das filas de espera das linhas.

É importante notar que este modelo de simulação, apesar de usar valores médios de um período de trinta dias, contempla a avaliação de apenas um dia de produção, e por esse motivo, é razoável afirmar que, ao escalar o período de observação, os ganhos de produção poderão ser ainda mais significativos.

## 6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões resultantes da análise e melhoria do funcionamento de uma linha de produção industrial utilizando simulação. É então realizada a discussão dos resultados obtidos com a aplicação de técnicas de simulação, evidenciando as melhorias alcançadas nos processos produtivos e os impactos positivos na eficiência operacional.

O capítulo também aborda os desafios enfrentados durante a implementação das soluções propostas e as estratégias adotadas para superá-los. Além disso, são identificadas as limitações do estudo, oferecendo uma visão crítica sobre os aspectos que poderiam ser aprofundados em pesquisas futuras.

O capítulo é concluído com recomendações para futuros trabalhos, sugerindo novas abordagens e ferramentas que possam complementar e expandir os resultados obtidos, contribuindo para o contínuo aperfeiçoamento das linhas de produção industrial.

### 6.1. Conclusões finais

O modelo desenvolvido foi construído por meio do *software* de simulação *JaamSim* e contemplou a construção de uma interface gráfica que permite, através da visualização animada, a percepção de funcionamento do sistema, e posteriormente, determine a melhor estratégia a implementar para o otimizar. A análise dos resultados realizada no capítulo anterior demonstrou que, através da simulação e do desenvolvimento cenários hipotéticos, existem possibilidades de melhoria para o sistema atual em evidência. Descreve-se na Tabela 5, a análise de desempenho efetuada.

Tabela 11 - Resultados da Avaliação de Cenários Realizada

<b>Cenário</b>	<b>Proposta</b>	<b>Desempenho</b>
1	Diminuição do tempo de operação do Posto de trabalho 2.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Não proporcionou aumento da produção;</li><li>• Eliminou a fila de espera do posto de trabalho2;</li><li>• Aumento a fila de espera do posto de trabalho 4.</li></ul>
2	Aumento da capacidade das máquinas do Posto de trabalho 4.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aumentou a produção em 18%;</li><li>• Diminuiu a fila de espera do posto 4 em 85%.</li></ul>

3	Diminuição do tempo de transporte entre os postos de trabalho 5 e 6.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da produção em 8%.</li> </ul>
4	Combinação entre os cenários 1 e 2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da produção em 25%;</li> <li>• Diminuição da fila de espera do posto 4 em 75%.</li> </ul>
5	Combinação entre os cenários 1, 2 e 3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da produção em 29%;</li> <li>• Diminuição global das filas de espera das linhas em aproximadamente 92,5%.</li> </ul>

Através dos dados apresentados na Tabela 5, conclui-se que os cenários 2, 3, 4, e 5 podem ser implementados no sistema real, uma vez que há provas da existência de melhorias significativas no processo produtivo, destacando-se, dentre todos, o cenário 5, que possui os resultados mais expressivos.

## 6.2. Desafios encontrados

Os principais desafios e dificuldades durante a elaboração deste projeto foram:

- Familiarização com o *software JaamSim*

O desafio inicial foi a familiarização e o processo de aprendizagem do *JaamSim*, um *software* de simulação relativamente menos popular em comparação com outras ferramentas, como por exemplo o ARENA ou Simul8. O processo de aprendizagem incluiu a compreensão das funcionalidades da ferramenta, a sua interface e a forma de implementação de modelos de simulação complexos. A ausência de uma vasta comunidade de utilizadores e de recursos didáticos amplamente disponíveis tornou este processo mais demorado.

- Modelagem precisa da linha de produção

A criação de um modelo que representasse com precisão a linha de produção industrial foi um desafio significativo. A necessidade de captar todas as variáveis e processos reais, desde o fluxo de materiais até os tempos de ciclo e de transporte, exigiu um levantamento de dados e tratamento dos mesmos de forma cuidadosa. Qualquer imprecisão nos dados poderia comprometer a validade das simulações e, conseqüentemente, dos resultados e conclusões obtidos.

- Integração de dados reais

Outro desafio foi a integração de dados reais no modelo de simulação. Dados inconsistentes ou incompletos exigiram um trabalho adicional de validação e ajuste. Além disso, a necessidade de atualizar constantemente os dados para refletir mudanças operacionais na linha de produção adicionou uma camada extra de complexidade ao processo de simulação.

### 6.3. Projeções de trabalhos futuros

Considerando os resultados obtidos e os desafios enfrentados durante a elaboração desta dissertação, foi possível identificar algumas oportunidades e áreas para trabalhos futuros que podem servir como projeções para orientar investigações posteriores:

- Refinamento do Modelo de Simulação

Uma forma de dar continuidade ao trabalho aqui elaborado, é contínuo refinamento do modelo de simulação desenvolvido, buscando uma representação ainda mais fiel ao processo real, através da inserção de mais detalhes operacionais, bem como a consideração de fatores adicionais que influenciam o desempenho da linha de produção e a validação do modelo com dados em tempo recolhidos em real.

- Avaliação de Estratégias Alternativas

Explorar e avaliar estratégias alternativas de melhoria para a linha de produção. Isso pode incluir a análise de diferentes layouts de fábrica, a implementação de novas tecnologias e/ou o ajuste de parâmetros operacionais para otimizar o desempenho do sistema.

- Análise de Sensibilidade

Realizar uma análise de sensibilidade mais abrangente pode ajudar a entender melhor como diferentes variáveis e parâmetros afetam o desempenho das linhas de produção. Isso pode incluir a identificação de parâmetros críticos e a avaliação do impacto de incertezas ou variações nas condições operacionais.

- Integração de Sistemas de Controlo em Tempo Real

Explorar a integração de sistemas de controlo em tempo real com o modelo de simulação pode permitir a implementação de estratégias de controlo mais adaptativas e conseqüentemente mais reativas. Isso pode aumentar a capacidade e velocidade do sistema de responder a mudanças ao longo do processo produtivo e melhorar a eficiência global das linhas de produção.

- Investigação de Novas Tecnologias e Tendências Industriais

Investigação de tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e fabricação aditiva, a fim de trazer novas inspirações e novas direções de pesquisas e aplicações, e incluir estudos de como essas tecnologias podem ser integradas para melhorar ainda mais o funcionamento do sistema.



# Referências Bibliográficas

- [1] F. Bleicher, F. Duer, I. Leobner, I. Kovacic, B. Heinzl, and W. Kastner, "Co-simulation environment for optimizing energy efficiency in production systems," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 63, no. 1, pp. 441–444, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.122.
- [2] F. Hosseinpour and H. Hajihosseini, "Importance of Simulation in Manufacturing," *World Acad Sci Eng Technol*, vol. 51, no. 3, pp. 292–295, 2009.
- [3] N. Sakurada and D. Miyake, "Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços," *Gestão & Produção*, vol. 16, pp. 25–43, 2009.
- [4] M. Heshmat, M. E. Sharief, and M. E. Sebaie, "Simulation modelling and analysis of a production line," *Int. J. Simulation and Process Modelling*, vol. 12, pp. 369–376, 2017.
- [5] K. P. White and R. G. Ingalls, "The Basics of Simulation," *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2018.
- [6] C. Oliveira, "Lean manufacturing paradigm in the foundry industry," *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, vol. 4, no. 3, pp. 218–230, Jan. 2009, doi: 10.4013/ete.20083.07.
- [7] C. Laroque and M. Leissau, "Backward Simulation for Production Planning - Recent Advances in a Real-world Use-case," *2021 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2021.
- [8] F. Poswa, O. T. Adenuga, and K. Mpofo, "Productivity Improvement Using Simulated Value Stream Mapping: A Case Study of the Truck Manufacturing Industry," *MDPI - Processes*, vol. 10, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.3390/pr10091884.
- [9] S. H. Huang *et al.*, "Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis," *Int J Prod Res*, vol. 41, no. 3, pp. 513–527, Feb. 2003, doi: 10.1080/0020754021000042391.
- [10] F. Jovane *et al.*, "The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 57, no. 2, pp. 641–659, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.010.
- [11] A. Rashid, T. Masood, J. A. Erkoyuncu, B. Tjahjono, N. Khan, and M. ud din Shami, "Enterprise systems' life cycle in pursuit of resilient smart factory for emerging aircraft industry: a synthesis of Critical Success Factors' (CSFs), theory, knowledge gaps, and implications," *Enterp Inf Syst*, vol. 12, no. 2, pp. 96–136, Feb. 2018, doi: 10.1080/17517575.2016.1258087.
- [12] O. Benedettini and B. Tjahjono, "Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, no. 1–2, pp. 191–199, Jul. 2009, doi: 10.1007/s00170-008-1686-z.

- [13] L. P. Ferreira, E. Ares Gómez, G. Peláez Lourido, and B. Tjahjono, "Optimization of a Multiphase Multiproduct - Production Line based on Virtual Cells," *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE)*, vol. Vol. 1, 2011.
- [14] D. Mourtzis, M. Doukas, and D. Bernidaki, "Simulation in manufacturing: Review and challenges," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2014, pp. 213–229. doi: 10.1016/j.procir.2014.10.032.
- [15] J. Xu, E. Huang, L. Hsieh, L. H. Lee, Q. S. Jia, and C. H. Chen, "Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet," *Journal of Simulation*, vol. 10, no. 4, pp. 310–320, Nov. 2016, doi: 10.1057/s41273-016-0037-6.
- [16] C. S. Longo and C. Fantuzzi, "Simulation and optimization of industrial production lines," *At-Automatisierungstechnik*, vol. 66, no. 4, pp. 320–330, Apr. 2018, doi: 10.1515/auto-2017-0126.
- [17] L. Ferreira, E. Gómez, G. Lourido, and Tjahjono. B., "Optimization of a multiphase multiproduct production line based on virtual cells," *Proc. World Congr. Eng. 2011*, vol. 1, pp. 616–621, 2011.
- [18] S. Jain, R. R. Creasey, J. Himmelspach, K. P. White, M. Fu, and Institute of Electrical and Electronics Engineers., "Introduction to Simulation," *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, 2011.
- [19] A. Ingemansson, T. Ylipää, and G. S. Bolmsjö, "Reducing bottle-necks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 16, no. 6, pp. 615–628, 2005, doi: 10.1108/17410380510609474.
- [20] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, "Shifting Bottleneck Detection," *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002.
- [21] P. Faget, U. Eriksson, and F. Herrmann, "Applying discrete event simulation and an automated bottleneck analysis as an aid to detect running production constraints," *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 2005.
- [22] J. S. Baldwin, P. M. Allen, and K. Ridgway, "An evolutionary complex systems decision-support tool for the management of operations," *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 30, no. 7, pp. 700–720, 2010, doi: 10.1108/01443571011057308.
- [23] W. R. Nyemba and C. Mbohwa, "Modelling, Simulation and Optimization of the Materials Flow of a Multi-product Assembling Plant," *Procedia Manuf*, vol. 8, pp. 59–66, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.007.
- [24] J. F. O'kane, J. R. Spenceley, and R. Taylor, "Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems," *J Mater Process Technol*, vol. 107, no. 1–3, pp. 412–424, 2000.
- [25] S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson, "Introduction to modeling and simulation," *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 1997.

- [26] J. Montevechi, A. Leal, and F. Martins, "Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry," *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, 2007.
- [27] S. Robinson, R. E. Nance, R. J. Paul, M. Pidd, and S. J. E. Taylor, "Simulation model reuse: Definitions, benefits and obstacles," in *Simulation Modelling Practice and Theory*, Nov. 2004, pp. 479–494. doi: 10.1016/j.simpat.2003.11.006.
- [28] R. Sargent, "Verification and validation of simulation models," *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference.*, 2010.
- [29] A. T. Nguyen, S. Reiter, and P. Rigo, "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis," *Applied Energy*, vol. 113. Elsevier Ltd, pp. 1043–1058, 2014. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- [30] A. Maria, "Introduction to modeling and simulation," *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 1997.
- [31] R. Kranz and N. Zupick, "Arena simulation software: introduction and overview," *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 2014.
- [32] R. E. Shannon, "Introduction to the art and science of simulation," *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998.
- [33] M. Centeno, "An introduction to simulation modeling," *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, 1996.
- [34] R. Ingalls, "Introduction to simulation," *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [35] B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, M. W. Rohrer, C. Mclean, and S. Leong, "The expanding role of simulation in future manufacturing," *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [36] J. Banks, "Introduction to Simulation," *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [37] M. Rosseti, *Simulation Modeling and Arena*, vol. 2. 2016.
- [38] W. David. Kelton, R. P. Sadowski, and N. B. Zupick, "Simulation with Arena," *McGraw-hill Series in Industrial Engineering and Management Science*, vol. Sixth edition, 2002.
- [39] W. de Paula Ferreira, F. Armellini, and L. A. De Santa-Eulalia, "Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review," *Comput Ind Eng*, vol. 149, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106868.
- [40] G. Lugaresi and M. Matta, "Real-time simulation in manufacturing systems: challenges and research directions," *Winter Simulation Conference (WSC).*, 2018.
- [41] M. Ciavotta, A. Bettoni, and G. Izzo, "Interoperable meta model for simulation-in-the-loop," *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018.

- [42] S. Shamim, S. Cang, H. Yu, and Y. Li, "Management Approaches for Industry 4.0," *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 2016.
- [43] X. Li and C. Zhang, "Some new trends of intelligent simulation optimization and scheduling in intelligent manufacturing," *Service Oriented Computing and Applications*, vol. 14, no. 3. Springer, pp. 149–151, Sep. 01, 2020. doi: 10.1007/s11761-020-00299-6.
- [44] J. , April, M. , Better, F. , Glover, J. , Kelly, and M. Laguna, "ENHANCING BUSINESS PROCESS MANAGEMENT WITH SIMULATION OPTIMIZATION," *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 2006.
- [45] S. I. Shafiq, E. Szczerbicki, and C. Sanin, "Proposition of the methodology for Data Acquisition, Analysis and Visualization in support of Industry 4.0," in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2019, pp. 1976–1985. doi: 10.1016/j.procs.2019.09.370.
- [46] S. Sanchez, "Simulation experiments: better data, not just big data," *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 2014.
- [47] T. Ören, "Impact of Data on Simulation: From Early Practices to Federated and Agent-Directed Simulation," *EUROSIM 2001 Congress*, 2001.
- [48] W. Dangelmaier, M. Fischer, J. Gausemeier, M. Grafe, C. Matysczok, and B. Mueck, "Virtual and augmented reality support for discrete manufacturing system simulation," *Comput Ind*, vol. 56, no. 4, pp. 371–383, May 2005, doi: 10.1016/j.compind.2005.01.007.
- [49] I. Rojek, M. Macko, D. Mikołajewski, M. Sága, and T. Burczyński, "Modern methods in the field of machine modelling and simulation as a research and practical issue related to Industry 4.0," *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES*, vol. 69, no. 2, 2021.
- [50] M. M. Gunal and M. Karatas, "Industry 4.0, Digitisation in Manufacturing, and Simulation: A Review of the Literature," in *Springer Series in Advanced Manufacturing*, Springer Nature, 2019, pp. 19–37. doi: 10.1007/978-3-030-04137-3\_2.
- [51] D. Guerra-Zubiaga, V. Kuts, K. Mahmood, A. Bondar, N. Nasajpour-Esfahani, and T. Otto, "An approach to develop a digital twin for industry 4.0 systems: manufacturing automation case studies," *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 34, no. 9, pp. 933–949, 2021, doi: 10.1080/0951192X.2021.1946857.
- [52] D. Mourtzis, M. Doukas, and D. Bernidaki, "Simulation in manufacturing: Review and challenges," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2014, pp. 213–229. doi: 10.1016/j.procir.2014.10.032.
- [53] A. G. Uriarte, A. H. C. Ng, and M. U. Moris, "Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2018, pp. 586–593. doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.097.
- [54] A. Tolk, "Using Simulation Systems for Decision Support," *Intelligent Systems in Operations: Methods, Models and Applications in the Supply Chain*, pp. 253–272, 2010, [Online]. Available: [https://digitalcommons.odu.edu/msve\\_fac\\_pubs/53](https://digitalcommons.odu.edu/msve_fac_pubs/53)

- [55] N. Gunreddy, I. Gupta, I. Poddar, A. P. Menon, R. Srivastava, and A. K. Saxena, "Bottleneck Analysis for Gear Manufacturing Unit by Using Discrete Event Simulation Using ARENA," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Oct. 2022. doi: 10.1063/5.0110454.
- [56] S. Kukla, "Modelling and Optimization of Organization of Workplaces in a Foundry," *Archives of Foundry Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 55–58, Sep. 2016, doi: 10.1515/afe-2016-0049.
- [57] A. Talib Bon and N. Nasihah Shahrin, "Assembly Line Optimization using Arena Simulation," *Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2016.
- [58] S. Nallusamy, "Productivity Enhancement in a Small Scale Manufacturing Unit through Proposed Line Balancing and Cellular Layout," 2016.
- [59] R. Calderón-Andrade, E. S. Hernández-Gress, and M. A. Montufar Benítez, "Productivity improvement through reengineering and simulation: A case study in a footwear-industry," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 16, Aug. 2020, doi: 10.3390/app10165590.
- [60] S. Kukla, "Improving quality and occupational safety on automated casting lines," *Archives of Foundry Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 69–72, Sep. 2017, doi: 10.1515/afe-2017-0093.
- [61] S. J. Abrishami, M. Zeraatkar, R. Esrafilian, S. A. Vafaei, and S. M. Zahraee, "Application of Computer Simulation for Productivity Improvement of Welding Unit in a Heater Manufacturing Industry: A Case Study Based on Arena," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Nov. 2018. doi: 10.1051/mateconf/201822501004.
- [62] K. Swate, G. Muyengwa, and Y. N. Mawane, "Modelling and Simulation of a Shearcut Process Flow at a Steel Processing Company," *MATEC Web of Conferences*, vol. 312, p. 05003, 2020, doi: 10.1051/mateconf/202031205003.
- [63] S. M. Javadi, S. J. Sadjadi, and A. Makui, "Identification and fixing bottlenecks of a food manufacturing system using a simulation approach," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-39025-5.
- [64] C. L. Yang and C. C. Hsieh, "A production scheduling simulation model for improving production efficiency," *Cogent Eng*, vol. 1, no. 1, 2014, doi: 10.1080/23311916.2014.950059.
- [65] A. V. Araújo *et al.*, "Increasing yoghurt daily production with modeling and simulation process," *Ciencia Rural*, vol. 49, no. 1, 2019, doi: 10.1590/0103-8478cr20180187.
- [66] D. H. Utku, "The Evaluation and Improvement of the Production Processes of an Automotive Industry Company via Simulation and Optimization," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15032331.
- [67] S. A. Valente, E. C. Cecone, L. A. P. Alvim, and D. A. Cassiano, "Optimization of a Semiconductor Manufacturing Process Using a Reentrant Model," *Exacta*, vol. 13, no. 2, p. 275, Dec. 2015, doi: 10.5585/exactaep.v13n2.5850.

- [68] M. A. B. M. Said and N. B. Ismail, "Improvement of production line layout using arena simulation software," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 1340–1346. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1340.
- [69] S. Park, J. Hwang, H. Yang, and S. Kim, "Simulation modelling for automated guided vehicle introduction to the loading process of ro-ro ships," *J Mar Sci Eng*, vol. 9, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/jmse9040441.
- [70] A. Yemane, G. Gebremicheal, T. Meraha, and M. Hailemicheal, "Productivity improvement through line balancing by using simulation modeling (case study almeda garment factory)," *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 153–165, Mar. 2020, doi: 10.22094/JOIE.2019.567816.1565.
- [71] A. Azizi and M. S. Masouleh, "Simulation and optimization model of the performance of processes at signoff units (A Case Study in Automotive Industry: Saipa Corporation)," *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, vol. 30, no. 4, pp. 489–505, 2019, doi: 10.22068/ijiepr.30.4.489.
- [72] T. McDonald, E. Van Aken, and K. Ellib, "Utilizing simulation to evaluate production line performance under varying demand conditions," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 3, no. 1 SUPPL, pp. 3–14, Jan. 2012, doi: 10.5267/j.ijiec.2011.08.011.
- [73] A. N. Silva, A. V. Araújo, L. C. Godoy, L. J. Minette, and J. A. Suzuki, "Contribuição da simulação computacional para análise de layout em uma indústria moveleira," *Revista Arvore*, vol. 41, no. 2, 2017, doi: 10.1590/1806-90882017000200001.
- [74] D. Šebalj, "Simulation model of natural gas supply chain in a function of costs optimization: the case of Croatia," *SN Appl Sci*, vol. 4, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1007/s42452-021-04901-0.
- [75] K. A. Mohammed Hasan, A. H. Kadhum, and A. H. Morad, "Evaluation and Improvement of Manufacturing System Using Computer Software Arena," *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 71–78, Dec. 2019, doi: 10.22153/kej.2019.10.003.
- [76] D. G. Oljira, T. G. Abeya, G. Ofgera, and M. Gopal, "Manufacturing System Modeling and Performance Analysis of Mineral Water Production Line using ARENA Simulation," *Int J Eng Adv Technol*, vol. 9, no. 5, pp. 312–317, Jun. 2020, doi: 10.35940/ijeat.D8033.069520.

# Declaração de Integridade

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

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

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

NOME: Lucas de Souza Reis

ISEP, Porto, 02 de julho de 2024



# Anexos

## Anexo A - Tempo da entrada de material e tempo do processo de moldagem (Posto de trabalho 1)

Tabela 12 - Médias dos tempos diários da entrada de material e do processo de moldagem (Posto de trabalho 1).

<i>Dia</i>	<i>Tempo entrada de material – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo do processo de moldagem – Linha 1 (minutos)</i>	<i>Tempo entrada de material – Linha 2 (Minutos)</i>	<i>Tempo do processo de moldagem – Linha 2 (minutos)</i>
1	1,47	1,06	1,55	1,04
2	1,46	1,05	1,54	1,03
3	1,47	0,96	1,53	1,02
4	1,49	0,96	1,52	1,01
5	1,48	0,98	1,51	1
6	1,51	1,08	1,5	0,99
7	1,5	1	1,49	0,98
8	1,54	0,95	1,48	0,97
9	1,53	0,9	1,47	0,96
10	1,52	1	1,46	0,95
11	1,46	1,08	1,45	0,94
12	1,52	1,05	1,44	0,93
13	1,5	0,91	1,43	0,92
14	1,55	1,07	1,54	0,91
15	1,46	1,08	1,53	0,9
16	1,52	1,01	1,52	0,89
17	1,49	0,95	1,51	0,88
18	1,46	0,91	1,5	0,87
19	1,48	0,95	1,49	0,86
20	1,51	1,05	1,48	0,95
21	1,46	0,98	1,47	0,94
22	1,48	1,07	1,46	0,93
23	1,48	0,89	1,45	0,92
24	1,5	1,04	1,44	0,91
25	1,5	1,04	1,55	0,9
26	1,54	0,98	1,54	0,89
27	1,52	1,01	1,53	0,88
28	1,5	1,01	1,52	0,87
29	1,55	0,97	1,51	1,03
30	1,53	1,03	1,5	1,01
<b>Média</b>	<b>1,49</b>	<b>1,00</b>	<b>1,52</b>	<b>1,02</b>

## Anexo B - Tempo de operação de alocação dos moldes em carros de transportes (Posto de trabalho 2)

Tabela 13 - Médias dos tempos diários da operação de alocação dos moldes em carros de transporte (Posto de trabalho 2).

<i>Dia</i>	<i>Tempo da operação – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo da operação – Linha 2 (minutos)</i>
1	1,79	1,78
2	1,41	1,45
3	1,69	1,71
4	1,42	1,46
5	1,63	1,62
6	1,43	1,47
7	1,66	1,68
8	1,44	1,48
9	1,75	1,6
10	1,45	1,49
11	1,46	1,5
12	1,74	1,72
13	1,47	1,51
14	1,7	1,7
15	1,48	1,52
16	1,61	1,64
17	1,49	1,53
18	1,73	1,76
19	1,5	1,54
20	1,62	1,61
21	1,51	1,55
22	1,71	1,67
23	1,52	1,56
24	1,64	1,66
25	1,53	1,57
26	1,78	1,65
27	1,54	1,58
28	1,67	1,69
29	1,55	1,59
30	1,76	1,73
<b>Média</b>	<b>1,58</b>	<b>1,61</b>

## Anexo C - Tempo de realização da operação de limpeza do canal de vazamento dos moldes (Posto de trabalho 3);

Tabela 14 - Média dos tempos de realização da operação de limpeza do canal de vazamento dos moldes (Posto de trabalho 3);

<i>Dia</i>	<i>Tempo da operação – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo da operação – Linha 2 (minutos)</i>
1	0,74	0,73
2	0,9	0,95
3	0,82	0,78
4	0,97	0,88
5	0,69	0,82
6	0,8	0,89
7	0,86	0,68
8	0,91	0,79
9	0,83	0,85
10	0,79	0,8
11	0,77	0,71
12	0,93	0,74
13	0,71	0,86
14	0,84	0,91
15	0,85	0,94
16	0,75	0,76
17	0,88	0,9
18	0,89	0,84
19	0,76	0,83
20	0,92	0,77
21	0,94	0,72
22	0,78	0,69
23	0,95	0,92
24	0,7	0,7
25	0,98	0,93
26	0,87	0,96
27	0,72	0,75
28	0,73	0,98
29	0,81	0,81
30	0,68	0,87
<b>Média</b>	<b>0,82</b>	<b>0,81</b>

## Anexo D - Tempo da etapa de “pesagem” e vazamento (Posto de trabalho 4)

Tabela 15 - Média dos tempos da etapa de “pesagem” e vazamento (Posto de trabalho 4);

<i>Dia</i>	<i>Tempo das operações – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo das operações – Linha 2 (minutos)</i>
1	1,86	1,87
2	1,88	1,95
3	1,9	2,04
4	1,92	1,94
5	1,94	1,92
6	1,96	1,86
7	1,98	1,99
8	2	2,01
9	2,02	2,07
10	2,04	1,9
11	2,06	2,05
12	2,08	1,85
13	2,1	2,06
14	2,11	1,84
15	2,09	1,88
16	2,07	2,02
17	2,05	1,91
18	2,03	1,93
19	2,01	1,89
20	1,99	2,08
21	1,97	2
22	1,95	1,98
23	1,93	1,97
24	1,91	1,96
25	1,89	1,83
26	1,87	1,82
27	1,86	2,03
28	1,88	2,08
29	1,9	1,97
30	2,07	1,83
<b>Média</b>	<b>2,05</b>	<b>1,98</b>

## Anexo E - Tempo percorrido pelo molde ao longo da linha contínua de arrefecimento (Posto de trabalho 5)

Tabela 16 - Média dos tempos percorridos pelos moldes ao longo da linha contínua de arrefecimento (Posto de trabalho 5);

<i>Dia</i>	<i>Tempo do percurso – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo do percurso – Linha 2 (minutos)</i>
1	34,1	33,45
2	33,2	34,73
3	33,98	34,35
4	33,44	33,05
5	34,22	34,93
6	33,8	34,53
7	33,32	33,95
8	33,62	33,35
9	33,74	34,63
10	34,52	34,05
11	33,56	33,85
12	34,28	34,33
13	33,92	35,03
14	34,24	33,75
15	32,84	34,55
16	34,46	34,15
17	34,34	34,85
18	35,08	33,25
19	33,86	35,05
20	33,68	33,55
21	33,14	34,25
22	33,38	33,95
23	34,16	34,95
24	32,9	33,15
25	33,02	34,45
26	34,4	34,83
27	34,58	34,65
28	34,52	34,53
29	34,5	34,43
30	34,52	33,65
<b>Média</b>	<b>32,20</b>	<b>32,35</b>

## Anexo F - Tempo da entrada nos moldes na plataforma de desmoldagem (Posto de trabalho 6)

Tabela 17 - Média dos tempos da entrada nos moldes na plataforma de desmoldagem (Posto de trabalho 6);

<i>Dia</i>	<i>Tempo da operação – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo da operação – Linha 2 (minutos)</i>
1	0,31	0,33
2	0,33	0,37
3	0,35	0,35
4	0,37	0,31
5	0,39	0,38
6	0,41	0,32
7	0,32	0,39
8	0,34	0,34
9	0,36	0,31
10	0,38	0,37
11	0,4	0,36
12	0,31	0,33
13	0,33	0,39
14	0,35	0,35
15	0,37	0,32
16	0,39	0,38
17	0,41	0,34
18	0,32	0,31
19	0,34	0,37
20	0,36	0,36
21	0,38	0,33
22	0,4	0,39
23	0,31	0,35
24	0,33	0,32
25	0,35	0,38
26	0,37	0,34
27	0,39	0,31
28	0,41	0,37
29	0,32	0,36
30	0,34	0,33
<b>Média</b>	<b>0,37</b>	<b>0,35</b>

## Anexo G - Tempo de realização do processo de desmoldagem nas esteiras (Posto de trabalho 7)

Tabela 18 - Média dos tempos de realização do processo de desmoldagem nas esteiras de desmoldagem (Posto de trabalho 7).

<i>Dia</i>	<i>Tempo da operação – Linha 1 (Minutos)</i>	<i>Tempo da operação – Linha 2 (minutos)</i>
1	0,37	0,38
2	0,34	0,38
3	0,42	0,43
4	0,38	0,35
5	0,41	0,39
6	0,36	0,36
7	0,35	0,41
8	0,4	0,35
9	0,39	0,39
10	0,38	0,36
11	0,36	0,41
12	0,41	0,42
13	0,34	0,42
14	0,42	0,37
15	0,35	0,39
16	0,4	0,38
17	0,37	0,43
18	0,39	0,4
19	0,38	0,38
20	0,34	0,42
21	0,42	0,41
22	0,35	0,35
23	0,36	0,4
24	0,41	0,36
25	0,38	0,39
26	0,37	0,37
27	0,34	0,41
28	0,39	0,4
29	0,4	0,36
30	0,36	0,38
<b>Média</b>	<b>0,38</b>	<b>0,39</b>

## Anexo H – Produções diárias em um período de 30 dias consecutivos

Tabela 19 - Valores das produções diárias em um período de 30 dias consecutivos.

<b>Dia</b>	<b>Produção diária – Linha 1 (unidades)</b>	<b>Produção diária – Linha 2 (unidades)</b>
1	1415	1399
2	1410	1401
3	1414	1419
4	1405	1406
5	1403	1398
6	1413	1411
7	1394	1409
8	1406	1408
9	1395	1400
10	1409	1395
11	1418	1412
12	1402	1402
13	1415	1397
14	1421	1413
15	1424	1417
16	1396	1396
17	1407	1404
18	1405	1405
19	1404	1395
20	1422	1415
21	1412	1410
22	1398	1418
23	1423	1395
24	1392	1416
25	1416	1403
26	1408	1407
27	1419	1414
28	1420	1420
29	1401	1397
30	1411	1401
<b>Média</b>	<b>1412</b>	