

UNIVERSIDADE DO PLANALTO CATARINENSE – UNIPLAC

UNIVERSIDADE DO CONTESTADO – UNC

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS PRODUTIVOS - PPGSP

JOEL PEREIRA FERNANDES

DO MUNDO FÍSICO PARA O DIGITAL: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA *DIGITAL TWIN* NO SETOR DE
INDIVIDUALLY QUICK FROZEN (IQF) EM UM FRIGORÍFICO DE AVES

LAGES/SC

2026

JOEL PEREIRA FERNANDES

**DO MUNDO FÍSICO PARA O DIGITAL: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA *DIGITAL TWIN* NO SETOR DE
INDIVIDUALLY QUICK FROZEN (IQF) EM UM FRIGORÍFICO DE AVES**

Dissertação de Mestrado, vinculada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre(a) em Sistemas Produtivos.

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo Pedro Guimarães Filho

Coorientador: Prof. Dr. Jacir Favretto

LAGES/SC

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha Catalográfica

F363d

Fernandes, Joel Pereira

Do mundo físico para o digital : aplicação da tecnologia Digital Twin no setor de Individually Quick Frozen (IQF) em um frigorífico de aves / Joel Pereira Fernandes ; orientador Prof. Dr. Leopoldo Pedro Guimarães Filho ; coorientador Prof. Dr. Jacir Favretto. – 2026.

105 f. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense ; Universidade do Contestado ; Universidade do Extremo Sul Catarinense ; Universidade da Região de Joinville. Lages, SC, 2026.

1. Digital Twin. 2. Indústria 4.0. 3. Produtividade industrial. 4. Individually Quick Frozen (IQF). 5. Indústria de alimentos. I. Guimarães Filho, Leopoldo Pedro (orientador). II. Favretto, Jacir (coorientador). III. Universidade do Planalto Catarinense. IV. Universidade do Contestado. V. Universidade do Extremo Sul Catarinense VI. Universidade da Região de Joinville. VII. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos. VIII. Título.

CDD 658.5

Catálogo na fonte – Biblioteca Central

FOLHA DE APROVAÇÃO

JOEL PEREIRA FERNANDES

DO MUNDO FÍSICO PARA O DIGITAL: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA *DIGITAL TWIN* NO SETOR DE *INDIVIDUALLY QUICK FROZEN (IQF)* EM UM FRIGORÍFICO DE AVES

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a **Dissertação** apresentada no Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP, em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, a Universidade do Contestado – UNC, a Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e a Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, na Linha de Pesquisa 02 (Sistemas Produtivos e Sustentabilidade), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Sistemas Produtivos**.

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
LEOPOLDO PEDRO GUIMARAES FILHO
Data: 06/08/2026 17:18:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leopoldo Pedro Guimarães Filho – PPGSP/UNESC
Presidente da Banca / Orientador



Documento assinado digitalmente
JACIR FAVRETTO
Data: 07/08/2026 16:00:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jacir Favretto – PPGSP/UNC

Orientador



Documento assinado digitalmente
FELIPE RODRIGUES DA SILVA
Data: 11/08/2026 20:39:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Rodrigues da Silva – FIOCRUZ/RJ
Membro externo da banca



Documento assinado digitalmente
MARIANE BONATTI CHAVES
Data: 07/08/2026 22:27:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Mariane Chaves Bonetti – PPGSP/UNIVILLE
Membro interno da banca

Lages, SC, 26 de maio de 2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha esposa Fernanda, que esteve ao meu lado desde o primeiro momento da decisão de retornar aos estudos. Seu incentivo, paciência e compreensão foram fundamentais durante toda essa jornada. Foram muitas horas dedicadas a este trabalho, e seu apoio incondicional foi essencial para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao nosso pequeno Pedro, que nasceu durante o desenvolvimento deste projeto e que, em muitas noites, vinha me chamar para brincar enquanto eu escrevia algum trecho desta dissertação. Ele representa nossa maior motivação e a razão de todo esforço presente e futuro.

Ao Grande Arquiteto do Universo, que nos provê luz, sabedoria e discernimento para seguir evoluindo em nossa caminhada.

À Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, à Universidade do Contestado – UNC, à Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e à Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, instituições responsáveis pela construção e condução do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

À Coordenação geral e local do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP, pela condução do programa com excelência e pelo apoio prestado durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Leopoldo Pedro Guimarães Filho e Prof. Dr. Jacir Favretto, pela orientação, dedicação e apoio ao longo de todo o processo de desenvolvimento desta dissertação. Em especial ao Prof. Dr. Leopoldo, que muitas vezes dedicou seu tempo de descanso para contribuir com o avanço deste trabalho.

Aos professores que participaram das bancas de Seminários e Qualificação, cujas contribuições foram fundamentais para o amadurecimento da pesquisa e para o aprimoramento deste estudo.

Em especial, registro minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Vilson Menegon Bristot, que representou meu primeiro contato com o universo do mestrado. Seu incentivo, orientação inicial e confiança foram determinantes para que eu pudesse ingressar nesse caminho acadêmico. Sem seu apoio e suas palavras naquele momento inicial, provavelmente esta trajetória não teria sido possível.

Agradeço a todos os colegas, profissionais e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa e para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

FERNANDES, Joel Pereira. **DO MUNDO FÍSICO PARA O DIGITAL: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DIGITAL TWIN NO SETOR DE INDIVIDUALLY QUICK FROZEN (IQF) EM UM FRIGORÍFICO DE AVES.** (2026), 105 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos). Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, da Universidade do Contestado – UNC, da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Lages, 2026.

Contextualização: A indústria de alimentos passa por desafios constantes relacionados à produtividade, estabilidade operacional e utilização eficiente de recursos produtivos. Tecnologias ligadas à Indústria 4.0 têm sido incorporadas ao setor com o objetivo de ampliar a capacidade de análise e aumento da eficiência operacional. Destaca-se o *Digital Twin*, ferramenta que possibilita a representação digital de sistemas físicos e a simulação de cenários para suporte à tomada de decisão. Apesar da evolução dessas tecnologias, a aplicação no segmento de alimentos encontra-se em fase inicial, especialmente em processos específicos, como o setor de IQF (*Individually Quick Frozen*). Nesse contexto, torna-se relevante investigar de que forma a ferramenta de modelagem e simulação pode contribuir para o entendimento do fluxo operacional e para a sugestão de melhorias no desempenho do processo produtivo. **Objetivo:** Avaliar a produtividade do setor de IQF em um frigorífico de aves, utilizando o conceito do *Digital Twin* como instrumento de análise e apoio à tomada de decisão para identificação de restrições e proposição de ações na operação. A pesquisa se justifica na Agenda 2030 da ONU, especialmente nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 08, relacionado ao emprego digno e crescimento econômico, ODS 09, voltado à indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12 ligado ao consumo e produção responsáveis e ODS 13, relacionado ao combate às alterações climáticas. **Metodologia:** Esta pesquisa se caracteriza como aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, desenvolvida por meio de estudo de caso no ambiente industrial real. A pesquisa envolveu etapas de diagnóstico do processo produtivo, modelagem, simulação do cenário operacional e análise do resultado operacional. A coleta dos dados foi realizada por observação direta no setor produtivo, levantamento de informações e análise de dados de produção. A interdisciplinaridade da pesquisa se dá pela integração entre as áreas de engenharia da produção, transformação digital, gestão da operação e processo industrial do setor de alimentos. **Resultados:** Os resultados mostram que com a modelagem digital foi possível analisar o comportamento da operação sob uma perspectiva sistêmica, possibilitando identificar oportunidades que influenciam a estabilidade do fluxo de produção. A simulação do cenário operacional permitiu a identificação da principal restrição do sistema e a avaliação de ações para a melhoria do desempenho produtivo. A aplicação do *Digital Twin* evidenciou potencial como ferramenta de suporte para tomada de decisão em ambiente industrial, o que possibilitou a compreensão da gestão operacional e apoiou ações voltadas para o aumento de estabilidade do fluxo e da eficiência do setor. **Considerações finais:** O estudo evidencia que a utilização da modelagem e simulação digital contribuiu para a gestão de fluxos produtivos e na identificação de oportunidades de melhoria no contexto industrial. Dentre as principais conquistas destacam-se a análise estruturada do fluxo do setor, identificação dos gargalos críticos que impactam o desempenho da linha operacional e a aplicação do *Digital Twin* como ferramenta de apoio para tomada de decisão. Como contribuições, o trabalho contribui para ampliar as perspectivas sobre a aplicação da tecnologia na indústria de alimentos e demonstra a capacidade de apoiar a análise e melhoria do sistema produtivo. Como limitações, a aplicação foi realizada em um único setor produtivo e em um nível de maturidade tecnológica inicial do *Digital Twin*, indicando oportunidades para estudos futuros direcionados aos níveis mais avançados de integração entre físico e digital. **Palavras-chave:** *Digital Twin*, Indústria 4.0, Produtividade Industrial, IQF, Indústria de alimentos.

ABSTRACT

FERNANDES, Joel Pereira. **DO MUNDO FÍSICO PARA O DIGITAL: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DIGITAL TWIN NO SETOR DE INDIVIDUALLY QUICK FROZEN (IQF) EM UM FRIGORÍFICO DE AVES.** (2026), 105 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos). Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, da Universidade do Contestado – UNC, da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Lages, 2026.

Contextualization: The food industry faces persistent challenges related to productivity, operational stability, and the efficient use of production resources. Technologies associated with Industry 4.0 have increasingly been incorporated into industrial environments to enhance analytical capabilities and improve operational efficiency. Among these, the Digital Twin stands out as a tool that enables the digital representation of physical systems and the simulation of scenarios to support decision-making. Despite advancements in these technologies across various industrial sectors, their application in the food industry remains at an early stage, particularly in specific processes such as the Individually Quick Frozen (IQF) sector. In this context, it is relevant to investigate how modeling and simulation tools can contribute to a deeper understanding of operational flow and to the identification of improvements in production performance. **Objective:** To evaluate the productivity of the IQF sector in a poultry processing plant using the Digital Twin concept as a tool for analysis and decision support, with the aim of identifying operational constraints and proposing improvement actions. This research is also aligned with the United Nations 2030 Agenda, particularly the Sustainable Development Goals (SDGs): SDG 8 (decent work and economic growth), SDG 9 (industry, innovation, and infrastructure), SDG 12 (responsible consumption and production), and SDG 13 (climate action). **Methodology:** This study is characterized as applied research, adopting both qualitative and quantitative approaches, and developed through a case study in a real industrial environment. The research comprised stages of production process diagnosis, system modeling, operational scenario simulation, and performance analysis. Data collection was carried out through direct observation in the production sector, collection of operational information, and analysis of production data. The interdisciplinary nature of the study arises from the integration of production engineering, digital transformation, operations management, and industrial processes within the food sector. **Results:** The findings indicate that digital modeling enabled the analysis of operational behavior from a systemic perspective, allowing the identification of opportunities affecting production flow stability. Simulation of operational scenarios enabled the identification of the system's main constraint and the evaluation of actions aimed at improving production performance. The application of the Digital Twin demonstrated strong potential as a decision-support tool in industrial environments, contributing to a better understanding of operational management and supporting initiatives focused on increasing flow stability and overall sector efficiency. **Final Considerations:** The study demonstrates that digital modeling and simulation contribute to production flow management and to the identification of improvement opportunities in industrial contexts. The main contributions include a structured analysis of the sector's operational flow, identification of critical bottlenecks affecting line performance, and the application of the Digital Twin as a decision-support tool. Additionally, the research expands the understanding of Digital Twin applications in the food industry and demonstrates its capability to support the analysis and improvement of production systems. As limitations, the study was conducted within a single production sector and at an early stage of Digital Twin technological maturity, indicating opportunities for future research focused on more advanced levels of integration between physical and digital systems.

Keywords: Digital Twin; Industry 4.0; Industrial Productivity; IQF; Food Industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	<i>Integração de sistemas, disciplinas e ferramentas</i>	21
Figura 2	<i>Níveis de Maturidade do Digital Twin</i>	29
Figura 3	<i>Total de artigos</i>	39
Figura 4	<i>Publicações por ano</i>	40
Figura 5	<i>Base Scopus</i>	40
Figura 6	<i>Base WoS</i>	41
Figura 7	<i>Base compilada</i>	42
Figura 8	<i>Relação VOSviewer</i>	42
Figura 9	<i>Nuvem de palavras</i>	43
Figura 10	<i>Distribuição da produção</i>	54
Figura 11	<i>Volume de produção por semana</i>	56
Figura 12	<i>Fluxograma setor IQF</i>	56
Figura 13	<i>Principais MP's do setor de IQF</i>	57
Figura 14	<i>Planta baixa setor IQF</i>	57
Figura 15	<i>Etapas do setor de IQF</i>	58
Figura 16	<i>Setor de Embalagem e Pesagem do IQF</i>	63
Figura 17	<i>Balança Multicabeçal</i>	63
Figura 18	<i>Produto pós Túnel na Multicabeçal</i>	64
Figura 19	<i>Saída esteira de alimentação x Entrada Túnel de congelamento</i>	65
Figura 20	<i>Esteira de alimentação</i>	66
Figura 21	<i>Cuba de alimentação</i>	67
Figura 22	<i>Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) do processo IQF</i>	69
Figura 23	<i>Análise de causa e efeito das restrições operacionais do setor IQF</i>	70
Figura 24	<i>Mapeamento dos equipamentos</i>	73
Figura 25	<i>Dados estatísticos Pré-Projeto</i>	74
Figura 26	<i>Modelagem do Setor</i>	75
Figura 27	<i>Simulação Capacidade Nominal</i>	75
Figura 28	<i>Câmara Pulmão</i>	76
Figura 29	<i>Simulação Capacidade Real</i>	77

Figura 30	<i>Alimentação da esteira antes da intervenção</i>	79
Figura 31	<i>Padronização da alimentação</i>	80
Figura 32	<i>Instalação das guias de alimentação</i>	81
Figura 33	<i>Alimentação pós intervenção</i>	82
Figura 34	<i>Alinhamento das esteiras / Cuba de alimentação</i>	83
Figura 35	<i>Antes e Depois da Câmara pulmão</i>	84
Figura 36	<i>Produção Diária IQF Pré-Projeto</i>	86
Figura 37	<i>Produção Diária IQF Pós-Projeto</i>	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 <i>Resumo dos principais artigos</i>	45
Tabela 2 <i>Abordagem da pesquisa</i>	49
Tabela 3 <i>Método de pesquisa</i>	53
Tabela 4 <i>Definição estratégica</i>	59
Tabela 5 <i>Teste t</i>	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIA Associação Brasileira da Indústria de Alimentos

ABPA Associação Brasileira de Proteína Animal

APPCC Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle

BPF Boas Práticas de Fabricação

BRCGS *Brand Reputation through Compliance Global Standards*

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CD Centro de Distribuição

CPS *Cyber Physical System*

CTC-ES Conselho Técnico-Científico da Educação Superior

DT *Digital Twin*

ENEGEP Encontro Nacional de Engenharia de Produção

FQ Físico-químico

IA Inteligência Artificial

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFPB Instituto Federal da Paraíba

IoS *Internet of Services*

IoT *Internet of Things*

IQF *Individually Quick Frozen*

MAPA Ministério da Agricultura e Abastecimento

MB Microbiológicos

ME Mercado Externo

MI Mercado Interno

MP Matéria Prima

MIT *Massachusetts Institute of Technology*

ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU Organização das Nações Unidas

PCP Planejamento e Controle de Produção

PPGSP Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos

PPHO Procedimentos Padronizados de Higiene Operacional

PIB Produto Interno Bruto

SIE Sistema de Inspeção Estadual

SIF Sistema de Inspeção Federal

SIM Sistema de Inspeção Municipal

SKU *Stock Keeping Unit*

SZIT *Shenzhen Institute of Information Technology*

TAC Termo de Ajuste de Conduta

UNC Universidade do Contestado

UNESC Universidade do Extremo Sul Catarinense

UNIPLAC Universidade do Planalto Catarinense

UNIVILLE Universidade da Região de Joinville

VSM *Value Stream Mapping*



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	PROBLEMA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3.1	Inserção social da pesquisa.....	18
1.4	CARACTERIZAÇÃO INTERDISCIPLINAR E ADERÊNCIA AO PROGRAMA.....	19
1.4.1	Interdisciplinaridade e <i>Digital Twin</i> na Indústria.....	20
1.5	ESTRUTURA GERAL DO DOCUMENTO.....	22
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	REVISÃO NARRATIVA.....	23
2.1.1	O <i>Digital Twin</i> e a Indústria 4.0.....	24
2.1.2	A evolução do <i>Digital Twin</i>.....	25
2.1.3	A história da avicultura.....	31
2.2	<i>DIGITAL TWIN</i> NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA.....	34
2.2.1	Introdução.....	35
2.2.2	Resultado e Discussão.....	38
2.3	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	47
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	49
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	49
3.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	50
3.2.1	Descrição do local e população em estudo.....	50
3.2.2	Etapas da pesquisa.....	53
3.3	COLETA DE DADOS.....	54
3.4	ANÁLISE DE DADOS.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1	CONTEXTO DA OPERAÇÃO.....	61
4.2	ABORDAGEM DO PROCESSO PRODUTIVO.....	62
4.2.1	<i>Gemba Walk</i> e Observações.....	62
4.2.2	Mapeamento do Fluxo de Valor.....	67

4.2.3	Análise de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa).....	69
4.3	ANÁLISE E APLICAÇÃO DO <i>DIGITAL TWIN</i> NO SETOR.....	71
4.4	INTERVENÇÕES OPERACIONAIS.....	78
4.4.1	Alimentação da Esteira.....	78
4.4.2	Implementação da Câmara Pulmão.....	83
4.4.3	Gestão da Informação, Integração das Equipes e Padronização.....	85
4.5	RESULTADO OPERACIONAL.....	86
5	REPERCUSSÕES E CARÁTER INOVADOR DA PESQUISA.....	89
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
6.1	IMPACTOS DA PESQUISA.....	92
6.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	92
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento e desenvolvimento das empresas, é natural que se tornem mais competitivas, estratégicas e tecnológicas. No entanto, esse progresso exige conhecimento, tempo e profissionais especializados para garantir que a organização continue evoluindo de forma sustentável. Para o sucesso global, é essencial que cada área da empresa tenha uma equipe engajada e atuando em seu máximo potencial (Antonio et al., 2004).

O ambiente corporativo tem passado por uma transformação significativa, marcada pelo abandono dos modelos de produção fordistas e da gestão taylorista. Essa mudança tem levado as empresas a adotarem uma estrutura mais enxuta, com maior delegação de poder, fortalecimento do trabalho em equipe e avanços nos processos produtivos e nas tecnologias (Antonio et al., 2004).

O Brasil é o maior exportador mundial de alimentos em volume e o 5º em valor. Esse setor é o mais representativo da economia brasileira, respondendo por 10,8% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e gerando quase 2 milhões de empregos formais e diretos (ABIA, 2023).

O setor de alimentos cresce a cada ano, impulsionado pelo uso das tecnologias mais avançadas, que servem de base para o desenvolvimento e teste de novas soluções. Um dos principais segmentos dentro desse setor é a avicultura, na qual o Brasil é responsável por aproximadamente 35% das exportações globais de carne de aves, atendendo a mais de 150 países. Diante desse volume e impacto, o desenvolvimento de equipamentos e tecnologias torna-se essencial para suportar o aumento da demanda, reduzir custos, minimizar perdas e proporcionar maior agilidade nas tomadas de decisão (Lopes, 2010).

Na indústria de alimentos, muitos processos são monitorados automaticamente em tempo real, em função da busca contínua por melhoria, redução de custos, rendimentos, sustentabilidade e com a dificuldade de mão de obra no atual cenário, surge a necessidade de um sistema que torne todo o processo mais dinâmico e com redução das falhas, o *Digital Twin* (DT). O conceito dessa tecnologia é oferecer um modelo virtual de uma operação real, capaz de simular e prever comportamentos, pode ser aplicada desde a área aeroespacial até em cidades inteligentes. Em processos industriais, até aplicações na medicina (Tancredi et al., 2022).

Nos últimos anos, com a evolução da digitalização em conjunto com a indústria, o conceito do *Digital Twin* foi desenvolvido. Com a pressão global por maior produção de alimentos, redução de custos e escassez de mão de obra, a necessidade de tornar o setor mais competitivo é cada vez maior (Maheshwari, Kamble, Belhadi, Venkatesh, et al., 2023). Principalmente no que tange o ajuste dos equipamentos, uma vez que o *Digital Twin* é capaz de aprender parâmetros corretos e mostrar resultados com as simulações no software. Evitando assim possíveis perdas e trabalhando no máximo de capacidade de tempo, produto e qualidade.

1.1 PROBLEMA

A indústria de alimentos no mundo é uma das maiores cadeias na base econômica, buscando garantir o abastecimento mundial e o equilíbrio da balança comercial. É um setor extremamente competitivo, com alta capacidade de adaptação, desenvolvimento de pessoas, processos, custos e inovações (Pawlak & L, 2022). O setor de carnes está em fase de crescimento exponencial, favorecido por uma economia melhor, diversificação do perfil alimentar e pelo rápido desenvolvimento na industrialização (Moekti, 2020). Essa mudança faz com que a população aumente o consumo de proteínas e busque mais variabilidade, o que impulsiona cada vez mais o mercado (Ndanga et al., 2009).

O Brasil tem respondido a essa demanda crescente, ampliando seu portfólio em termos de quantidade, volume e qualidade e expandindo para nichos que até pouco tempo, eram dominados por poucos países (Ferreira & Vieira Filho, 2019). Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) em 2023, o valor produzido entre aves e suínos alcançou cerca de 125 bilhões de reais, sendo 55% destinado ao mercado externo, que posiciona o Brasil entre os principais produtores mundiais e o maior exportador global.

Um setor dessa magnitude, com tamanho impacto econômico e social, gera intensa competição entre empresas e *stakeholders*. Afinal, a cadeia de abastecimento para sustentar essa demanda é extremamente complexa e volumosa. Na indústria, alguns dos principais fatores estratégicos incluem a redução de custos, o aumento da produtividade, a qualificação da mão de obra e a qualidade do produto (Braga, 2010).

Esse desenvolvimento não está apenas relacionado a computadores e internet, mas equipamentos tecnológicos, sistemas e máquinas capazes de aprender, analisar bancos de dados e gerar resultados em pequenas frações de tempo, antecipar falhas com diagnóstico preventivos, reduzir custos com energias e matérias primas, diminuir desperdícios de alimentos e otimizar e agilizar processos dos colaboradores. A tecnologia vem transformando o setor, gerando resultados operacionais até então impossíveis e capaz de mudar totalmente as operações das indústrias (Gondo & Mbaiwa, 2022).

O *Digital Twin* é capaz de criar uma réplica virtual de uma operação física, permitindo seu acompanhamento em tempo real e sendo possível realizar alterações, correções, otimização e inúmeras análises no ambiente virtual, antes de aplicar no ambiente real, evitando assim possíveis perdas com paradas, quebras ou ganho por melhora de performance (ÖHLÉN et al., 2022).

Esta tecnologia propõe mudanças no comportamento das indústrias e o seu comportamento, quebrando paradigmas de resultados, alterando processo de tomadas de decisões e possibilitando a visão e simulação de vários cenários possíveis de um processo. Dessa forma é possível evitar possíveis perdas e impulsionar a economia de ativos para empresa e para a sociedade (Jiang & Alkhateeb, 2023).

No processo de manutenção o *Digital Twin*, contribui para organizar os fluxos e reduzir retrabalhos; na produção, permite aumentar a produtividade e reduzir os custos; e na qualidade, eleva o nível de satisfação do cliente. O foco está em maximizar os ganhos e minimizar as perdas (Tancredi et al., 2022).

Além desses benefícios, o *Digital Twin* tem um impacto significativo em questões sociais. Ele possibilita a redução do desperdício de alimentos e pode ajudar a enfrentar a escassez de mão de obra, promovendo, assim, um nível mais elevado de sustentabilidade nas indústrias (Maheshwari, Kamble, Belhadi, Mani, et al., 2023).

Junto com a Indústria 4.0 e seus pilares, internet das coisas (IoT) e *Big Data* e o *Digital Twin* possuem uma capacidade imensurável para trabalhar em ambientes complexos, com alto volume de dados, capacidade de aprendizagem e aplicação das evoluções (Salehi et al., 2023). Esta tecnologia tem capacidade de mudar o futuro das indústrias, seus processos e apoiar as tomadas de decisões. Porém, ainda é uma tecnologia nova e muitos pontos precisam ser considerados. Entre os principais desafios, destacam-se os custos associados à implementação da tecnologia, sua aplicabilidade em diferentes contextos operacionais e a disponibilidade de profissionais qualificados para interpretar as informações geradas e utilizá-las no processo de tomada de decisão (Awasthi et al., 2024). Baseado nesse contexto se propõe a questão de pesquisa: Como melhorar a produtividade do setor de *Individually Quick Frozen* (IQF) em um frigorífico de aves, por meio das ferramentas do *Digital Twin*?

1.2 OBJETIVOS

A fim de assegurar o rigor metodológico e a precisão analítica desta dissertação, apresentam-se as metas norteadoras da investigação. O objetivo geral e específicos que operacionalizam o estudo encontram-se estruturados nos itens 1.2.1 e 1.2.2.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a produtividade do setor de *Individually Quick Frozen* (IQF) de um frigorífico de aves localizado na região sul catarinense, a partir da análise do processo produtivo e da aplicação de modelagem baseada em *Digital Twin*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o processo produtivo do setor de IQF, por meio do mapeamento do fluxo e da identificação das principais etapas, recursos e variabilidades operacionais;
- Identificar as variáveis do processo de IQF, que apresentem potencial para análise e ajuste operacional com o auxílio do *Digital Twin*;
- Aplicar um modelo de *Digital Twin* do sistema produtivo de IQF para análise do comportamento operacional.

1.3 JUSTIFICATIVA

O *DT* tem se mostrado uma tecnologia estratégica e inovadora para promover a sustentabilidade das empresas de manufatura e prestadores de serviços, permitindo a criação de réplicas virtuais precisas de processos, produtos ou sistemas físicos, possibilitando a análise e o aprimoramento contínuo sem a necessidade de intervenção direta nos processos. Essa tecnologia contribui para promover condições de trabalho mais seguras, eficientes e inclusivas.

Por outro lado, é essencial compreender essa nova tecnologia para que ela se torne uma representação virtual dinâmica de um objeto, processo ou sistema físico para a empresa. Caso contrário, toda essa estrutura e todo esse processo poderão se tornar um peso para a organização, resultando em um custo elevado que não aumenta o volume de produção nem reduz os custos operacionais (Mercadé-Melé et al., 2021).

O *DT* contribui para a otimização das operações cotidianas. Na manutenção para organizar processos e reduzir retrabalhos, na produção para aumentar a produtividade e reduzir o custo, na qualidade para aumentar o nível de satisfação do cliente. Tudo gira em maximizar ganhos e minimizar perdas (Tancredi et al., 2022). Tão importante quanto esses pontos, o *DT* impacta nas causas sociais, já que com ele é possível buscar a redução de desperdícios de alimentos e uma

possível ação para a escassez de mão de obra, buscando patamares maiores na sustentabilidade das indústrias (Maheshwari, Kamble, Belhadi, Venkatesh, et al., 2023).

Seguindo a tendência tecnológica e em benefício da sociedade, as empresas estão tornando seus processos mais sustentáveis, buscando a otimização e o uso mais consciente de matérias-primas e energia (Miehe et al., 2021). Essa mudança está diretamente alinhada a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que representam um apelo global para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e prosperidade (ONU, 2024).

Dois exemplos de ODS relevantes relacionados com esta pesquisa são os ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico) cujo item 8.2 destaca a importância de alcançar altos níveis de produtividade por meio da modernização tecnológica e da inovação e o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), que promove a construção de infraestruturas resilientes, a industrialização sustentável e o incentivo à inovação em quase todos os seus itens.

Além disso, o comprometimento do Brasil e das grandes empresas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) reforça a busca por soluções que promovam o fim da pobreza, a proteção do clima e do meio ambiente, e a garantia de paz e prosperidade para todos. Para atender a essa demanda complexa e crescente, o desenvolvimento tecnológico surge como uma das principais soluções estratégicas.

1.3.1 Inserção social da pesquisa

O DT tem potencial para revolucionar o mundo dos negócios. A maneira como são operados e compreendido os processos, tomadas de decisões, investimentos e tudo o que está relacionado com tecnologia, automação e internet das coisas. Esses são conhecimentos fundamentais para um desenvolvimento sustentável e duradouro (Petrobras, 2024).

Este estudo demonstra como pessoas, processos e tecnologia estão relacionados entre si e o impacto que um pode causar ao outro (Neves et al., 2018). A pesquisa foi direcionada a operação do equipamento, gerando simulação na sua versão digital e aplicando as alterações fisicamente. Os resultados foram medidos antes e depois da aplicação da simulação, esses resultados geraram impacto direto nos indicadores da empresa, que serviram para composição de metas, planos estratégicos e cultura de gestão de pessoas.

O *Digital Twin* contribui diretamente para a redução de desperdícios, um dos principais pontos das práticas industriais sustentáveis. A velocidade e capacidade de monitoramento contínuo dos processos produtivos permite identificar as fragilidades e ineficiências, otimizando o uso das

matérias-primas, energia e mão de obra. Além disso, a tecnologia pode ser usada para as manutenções preditivas dos equipamentos, a fim de evitar falhas e paradas imprevistas e desperdícios associados (Miehe et al., 2021).

Essas práticas vão ao encontro dos interesses dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Este trabalho contribui com a inserção social, conforme a Agenda 2030 para desenvolvimento sustentável que engloba algumas áreas cruciais, entre elas pessoas, planeta, prosperidade, paz e parceria ((ONU), 2024).

Esta pesquisa representa uma oportunidade para avaliar a tecnologia empregada no setor de IQF, alinhada com o ODS 8 – Trabalho decente e crescimento econômico, buscando alcançar maiores índices de produtividade por meio de modernização tecnológica e inovação. Com o ODS 9 – Indústria, inovação e infraestrutura, pretende-se promover a inovação ao otimizar tecnologias e processos produtivos, fortalecendo a cadeia e tornando mais resiliente e sustentável. Em relação ao ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, a intenção é reduzir o uso desnecessário de recursos naturais e desperdícios, bem como facilitar a transição para uma economia circular, reduzindo os resíduos e subprodutos e está alinhada com ODS 13 – Ação contra mudança global do clima, levando em consideração a otimização do consumo de energia e redução das emissões de carbono, o *Digital Twin* faz parte da iniciativa de mitigação dos impactos climáticos ((ONU), 2024).

É relevante apontar que com a adoção do *Digital Twin*, pode trazer grandes desafios sociais e organizacionais. A crescente automação e digitalização dos processos produtivos exigem o desenvolvimento contínuo de novas competências técnicas e analíticas por parte dos trabalhadores. A introdução de tecnologias avançadas modifica as atribuições profissionais e demanda maior capacidade de interação com sistemas digitais, interpretação de dados e utilização das informações no processo de tomada de decisão. Nesse contexto, a ausência de estratégias voltadas à capacitação e ao desenvolvimento profissional pode ampliar as diferenças entre os trabalhadores com diferentes níveis de qualificação e favorecer processos de exclusão tecnológica. Dessa forma, a transformação digital deve estar associada a iniciativas de qualificação contínua e adaptação organizacional, de modo que os avanços tecnológicos contribuam não apenas para o desempenho dos sistemas produtivos, mas também para a valorização, participação e inclusão dos trabalhadores nesse processo de transformação (Miehe et al., 2021).

1.4 CARACTERIZAÇÃO INTERDISCIPLINAR E ADERÊNCIA AO PROGRAMA

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) publicou a tabela de áreas do conhecimento, organizada em quatro níveis, sendo: Grande área; Área de avaliação; Subárea; e Especialidade (CAPES, 2020b).

O Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos (PPGSP), foi aprovado em 2020 na 198ª reunião do Conselho Técnico-Científico da Educação Superior (CTC-ES) da CAPES (UNIPLAC, 2021). O programa é resultado da associação entre quatro universidades comunitárias sendo elas a UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE e está inserido na área de avaliação interdisciplinar, especialidade Engenharia/Tecnologia/Gestão (CAPES, 2020a).

Segundo a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), 2019), a complexidade dos problemas contemporâneos e as diferentes naturezas, necessitam de um diálogo não apenas das disciplinas próximas, na mesma área de conhecimentos, mas em disciplinas de áreas diferentes. Por este motivo, a necessidade das novas formas de produção ultrapassando a barreira que existe entre as áreas. Essas novas formas, pluralizam o campo da ciência, buscando conhecimentos mais amplos e saindo do pensamento convencional e compartimentado.

A multidisciplinaridade apresenta um avanço na investigação, porque estão envolvidas diferentes áreas com várias perspectivas, porém cada um preserva sua metodologia e independência. Assim geram-se novos conceitos para compreender a natureza múltipla dos problemas complexos. Qualquer junção de duas ou mais áreas do conhecimento de áreas diferentes, que possa contribuir para o avanço das áreas, gera novos conhecimentos e um novo profissional, capaz de entender e solucionar problemas cada vez mais complexos, e interdisciplinares (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), 2019).

Devido a isso, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) introduziu em 1999 esses conceitos nas pós-graduações brasileiras, a fim de solucionar os anseios da humanidade contemporânea.

1.4.1 Interdisciplinaridade e *Digital Twin* na Indústria

A transformação dos setores tradicionais para o mundo digital está redefinindo os processos e a forma como são geridos. O conceito de *Digital Twin* tem se consolidado como peça central dessa mudança, oferecendo modelos capazes de simular e prever comportamentos físicos. Entretanto, o avanço e a aplicação dessa tecnologia não dependem apenas de uma área do conhecimento, exige uma abordagem interdisciplinar, na qual diversas áreas, como ciência de dados, engenharia,

biotecnologia e ciências sociais, precisam colaborar para desenvolver soluções aplicáveis e eficazes (Tancredi et al., 2022).

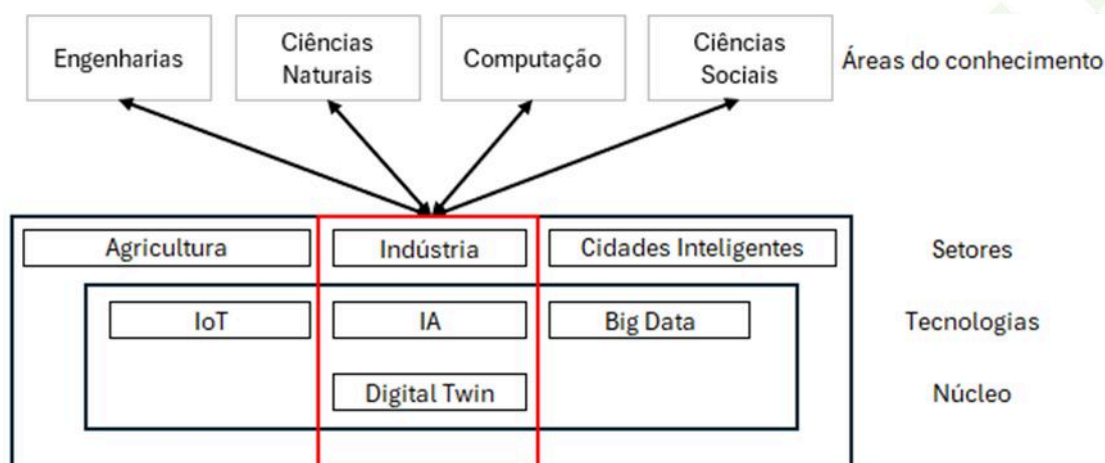
O DT está sendo aplicado para otimizar os processos produtivos, garantir o controle da qualidade e agilizar as tomadas de decisões, buscando a interação entre as áreas de engenharia de produção e informática para desenvolver os modelos virtuais que permitem prever falhas, melhorar a eficiência da produção e agilidade na tomada de decisões (Spyrou et al., 2024).

Em conceito mais amplo o DT pode ser utilizado para soluções mais complexas em cidades inteligentes, onde se aplica as novas tecnologias, mostrando que o conceito pode ser migrado da indústria para a gestão urbana. De tal forma, essa integração em tempo real e automatização de processos industriais para processos urbanos só evidenciam a relevância da interdisciplinaridade entre as engenharias, ciência de dado e ciência computacional (Tancredi et al., 2022).

A Figura 1 apresenta o *framework* conceitual que evidencia a interdisciplinaridade na aplicação do *Digital Twin* em setores como agricultura, indústrias e cidades inteligentes. A combinação das disciplinas de engenharias, ciências e computação é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos, como a segurança alimentar e a sustentabilidade. A adoção do DT permite que os processos sejam otimizados e ajustados em tempo real, evitando as perdas e reduzindo custos, criando um ecossistema gerido por dados. Essa inovação tecnológica depende da colaboração entre os setores de diferentes áreas, garantindo o sucesso operacional e menos interferências nos momentos de incertezas, como variabilidade e interrupções das matérias-primas.

Figura 1

Integração de sistemas, disciplinas e ferramentas



Desta forma a aderência deste trabalho que busca aplicar o *Digital Twin* na indústria, está estabelecido pelo Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivas, de forma associativa entre

as instituições UNIPLAC, UNC, UNESC, UNIVILLE na Linha de Pesquisa 2 cujo foco é investigar os sistemas produtivos por meio de conhecimentos científicos e/ou tecnológicos em distintos contextos. Propõe atuar de forma interdisciplinar as temáticas: estratégia e aprendizagem organizacional, gestão do conhecimento, inovação e sustentabilidade, inteligência empresarial, gestão de processos e produção (Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos, em forma associativa entre as instituições UNIPLAC, UNC, UNESC, 2024).

1.5 ESTRUTURA GERAL DO DOCUMENTO

Este estudo está dividido em sete capítulos. No primeiro apresenta-se a introdução, servindo como embasamento para o projeto, abordando problema, objetivos, justificativa e a caracterização interdisciplinar junto com a inserção social esperada. Em seguida, no segundo e terceiro capítulo, a revisão da literatura apresenta uma revisão integrativa e uma revisão narrativa como aplicação do *Digital Twin* relacionado a indústria de alimentos no Brasil e no mundo. Salienta-se que o capítulo três apresenta um artigo relacionado ao *Digital Twin* na indústria abordada, principais resultados e norteadores da pesquisa. O capítulo quatro está direcionado a mostrar a metodologia da pesquisa, a abordagem da pesquisa, delimitações, processo de coletas e análise dos dados. O capítulo cinco mostra os resultados e discussões. O capítulo seis que se considera uma inovação do programa apresenta as repercussões e o caráter inovador da pesquisa. Por fim o capítulo sete traz as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura foi organizada para oferecer uma compreensão ampla e contextualizada sobre o tema central da pesquisa, a aplicação do *Digital Twin* em uma empresa de alimentos, apresentando base conceitual e histórica. O foco foi estabelecer um referencial teórico que pudesse embasar a discussão proposta, identificando lacunas, tendências e oportunidades neste campo.

Com esse objetivo, a revisão foi dividida em duas partes. A primeira corresponde uma revisão narrativa, que reúne, interpreta e discute as contribuições e conceitos sobre o tema base da pesquisa. Já a segunda parte é composta por um artigo científico, estruturado em formato de revisão integrativa e análise bibliométrica, cujo intuito é mapear e sintetizar as produções acadêmicas sobre o uso do *Digital Twin* na indústria de alimentos, identificando sua evolução e o estado atual das pesquisas no Brasil e no mundo.

A revisão narrativa, foco deste capítulo, está estruturada em três eixos principais e interdependentes: *Digital Twin* e Indústria 4.0, que apresenta o panorama conceitual e tecnológico da Quarta Revolução Industrial e sua relação direta com o surgimento do *Digital Twin*. Evolução do *Digital Twin* com seu nível de maturidade, que descreve o desenvolvimento histórico e os avanços tecnológicos que permitiram a consolidação dessa tecnologia, com destaque para exemplos aplicados em diferentes setores industriais e a História e evolução da avicultura, que contextualiza o setor produtivo estudado, abordando sua trajetória, desafios e oportunidades de aplicação de tecnologias digitais.

De maneira integrada, esses três eixos fornecem a base teórica para compreender a inserção do *Digital Twin* na indústria de alimentos (foco para o setor avícola) e seu potencial para promover eficiência, sustentabilidade e competitividade.

2.1 REVISÃO NARRATIVA

A revisão narrativa foi utilizada como método para desenvolver o corpo teórico da pesquisa, permitindo explorar conceitos, ideias e correlações de forma interpretativa e abrangente. Segundo Matos (2015), esse tipo de revisão é indicado quando se pretende compreender a evolução de um tema, discutir fundamentos teóricos e contextualizar a produção científica existente.

No presente estudo, a revisão narrativa foi conduzida a partir da seleção e leitura crítica de publicações científicas nacionais e internacionais relacionadas aos conceitos de *Digital Twin*, Indústria 4.0 e avicultura, priorizando fontes recentes e relevantes para as áreas. Essa abordagem

permitiu fomentar diferentes perspectivas teóricas, demonstrando a interdisciplinaridade entre engenharia de produção, tecnologia da informação e gestão da qualidade, dimensões essenciais para a aplicação do *Digital Twin* em ambientes industriais.

2.1.1 O *Digital Twin* e a Indústria 4.0

O avanço da tecnologia, principalmente nas últimas décadas, vem exercendo uma grande influência em vários setores da indústria, reformulando o cenário de como o processo de produção e fabricação são executados. O fenômeno da Indústria 4.0, reconhecido como a Quarta Revolução Industrial, iniciou na Alemanha em 2013, que teve seu destaque durante a feira Hannover Messe, conhecida internacionalmente pelo seu foco em tecnologia industriais e inovação (Klingenberg & Antunes, 2017). Essa revolução transformadora é claramente marcada pela grande e extensa integração de tecnologias digitais avançadas em vários processos de produção, destacando os Sistemas Ciber-Físicos (CPS), na estrutura da Internet das Coisas (IoT) e na infraestrutura cada vez mais avançadas da Internet de Serviços (IoS). Esses sistemas facilitam a capacidade de observação e regulação em tempo real de inúmeros processos, promovendo um nível alto de conectividade e funcionalidade intelectual de todo o processo fabril, otimizando a eficiência e a produtividade (Sátyro; et al., 2018).

Segundo Quintino (2019) o conceito conhecido como Indústria 4.0 é construído sob uma base que compreende nove pilares essenciais, que são: *Big Data* e Análise, Robótica Autônoma, Simulação, Integração de Sistemas, Internet das Coisas, Cibersegurança, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva e Realidade Aumentada. Esses pilares servem para promover um ambiente próprio para inovação e para facilitar novas estratégias de negócios que podem melhorar significativamente o desempenho operacional e a eficiência produtiva nas organizações. A integração dessas tecnologias não é apenas uma tendência, mas sim uma abordagem revolucionária que capacita as organizações para prosperarem em um cenário cada vez mais competitivo e dinâmico.

Assim, integrando principalmente as tecnologias avançadas, simulação e a automação com aplicativos e sensores, tornaram-se cada vez mais viáveis os testes e simulações em ambientes virtuais, com tamanha qualidade que são chamadas de *Digital Twin* ou Gêmeos Digitais. Tais simulações precedem a implementação real em processos físicos, assim minimizam significativamente as falhas operacionais, aumentam a segurança e confiabilidade geral do projeto e reduzem custos (Almeida, 2019).

Para Schleich (2017), entre as tecnologias inovadoras em rápida expansão dentre os setores, o conceito conhecido como *Digital Twin*, surge como um dos conceitos mais relevantes que pode ser definido como uma representação digital ou réplica de objetos físicos tangíveis ou processos complexos que possui capacidade de prever comportamentos futuros e otimizar resultados gerais de desempenho (Parrott & Lane, 2017). A implementação dessa nova tecnologia de ponta na indústria de alimentos está em seus estágios iniciais de desenvolvimento (Melesse, Franciosi, Di Pasquale, et al., 2023), porém já começou a apresentar melhorias operacionais substanciais. Desde controle detalhado das variáveis operacionais, rastreabilidade mais assertiva em toda a cadeia e facilitação do monitoramento em tempo real de vários processos (Sipola & Kokkonen, 2023).

Assim, neste cenário atual da indústria de alimentos, a integração e adoção da Indústria 4.0 com o *Digital Twin*, tornaram-se essenciais para as empresas, quando se deparam com os desafios que vêm sendo impostos pela redução das margens de lucro, variabilidade da matéria-prima disponível, requisitos de mercados e desafios de sustentabilidade. Além do conjunto apresentado, é possível alinhar com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que defendem essas práticas inovadoras, sustentáveis e com responsabilidade ambiental, que são essenciais para poder atender as crescentes demandas globais por alimentos e recursos ((ONU), 2024).

2.1.2 A evolução do *Digital Twin*

O conceito do *Digital Twin*, vem atraindo cada vez mais interesse no setor industrial devido à sua capacidade de simular e otimizar com eficácia os processos que ocorrem no mundo real, de tal maneira que representa no mundo digital uma cópia virtual precisa do sistema físico, integrando vários elementos como sensores, IoT (internet das coisas) e análise avançada de dados, tudo para aprimorar a eficiência operacional e agilizar a tomada de decisão (Zhao et al., 2022). Além disso, o *Digital Twin* facilita a identificação antecipada de possíveis problemas e/ou defeitos no sistema digital, antes da sua ocorrência no mundo real, o que leva a melhores níveis de segurança, redução de perdas e aumenta a previsibilidade nos processos operacionais (Speicher & Defranco, 2023). Com todo esse avanço e com a capacidade de aprendizado da máquina, esses modelos digitais estão passando por constantes transformações significativas, a ponto de permitir simulações e ajustes em tempos reais (Krupitzer et al., 2022a).

O conceito do *Digital Twin*, que basicamente é a representação virtual de um objeto ou sistema físico, teve seu início nos anos 2000, apresentado pelo Dr. Michael Grieves como parte de um curso para gerenciamento de ciclo de vida do produto, com foco para criação de uma representação digital. Porém, uma das primeiras indústrias a adotar a tecnologia foi a aeroespacial,

que se deu pela necessidade de análises avançadas de dados e simulações complexas, associadas aos altos custos de projeto, fabricação e manutenção das aeronaves (Krupitzer et al., 2022a).

Desde então, houve a expansão desta tecnologia inovadora para as outras diversas áreas industriais e acadêmicas, aplicando modelos matemáticos em conjunto com algoritmos avançados de aprendizado para facilitar e produzir simulações cada vez mais precisas e confiáveis (Speicher & Defranco, 2023). Os avanços foram tão significativos que a adoção das outras áreas se estende da automação industrial, manufatura até a medicina (Ribeiro; et al., 2022), principalmente pela capacidade de antecipar e evitar as possíveis falhas que setores de alto risco estão adotando essa tecnologia, garantindo assim a precisão e resultado e a segurança e o bem estar de todos os envolvidos (Ding et al., 2012).

A transformação e evolução constante da tecnologia do *Digital Twin* está ligada diretamente aos grandes avanços na computação em nuvem e na internet das coisas (IoT), que proporcionaram a capacidade de coleta, acúmulo e análise de grandes bancos de dados em tempo reais, favorecendo as representações virtuais da ferramenta (Abideen et al., 2021). Esse processo exponencial não apenas abriu caminho para todas as aplicações e integrações, como reformulou e otimizou estruturalmente as eficiências operacionais, estratégias de manutenção e os processos de tomada de decisão em praticamente todas as áreas (Speicher & Defranco, 2023).

Com a incorporação dos conjuntos de dados do *Big Data* e com os algoritmos sofisticados da *Machine Learning*, aumentaram ainda mais a eficiência e capacidade desses modelos, permitindo avanço de diagnóstico que antes eram inatingíveis (Tancredi et al., 2022). Evidenciando o quão pode se expandir a tecnologia para as outras áreas, a integração do *Digital Twin* melhorou muito a eficácia dos programas de treinamento e simulações operacionais, o que permite ao usuário se envolver mais em um ambiente de trabalho real (Krupitzer et al., 2022a).

Outros grandes fatores impulsionadores do conceito inovador do *Digital Twin*, por exemplo é a oportunidade de reduzir a quantidade de resíduos gerados no processo de fabricação, indo de encontro com o conceito mais sustentável que as empresas estão adotando (Ding et al., 2012) e mais recentemente essa tecnologia está sendo implementada no ramo do agronegócio, como gerenciamento de animais, sistemas de refrigeração, refinamento das medidas de controle de qualidade e rastreabilidade nos processos sanitários (Ribeiro; et al., 2022).

Atualmente, a implementação e utilização dessa tecnologia está se tornando cada vez mais predominante em vários setores na Europa e nos Estados Unidos, onde ela foi destinada inicialmente para desenvolver as cidades inteligentes, gerenciamento da cadeia de suprimentos e melhorar a eficiência operacional em indústrias de alto desempenho (Abideen et al., 2021).

Empresas de ponta como a Siemens, simulando cirurgias cardíacas e a *General Electric*, prevendo falhas em turbinas eólicas, assumiram e desenvolvem compromissos substanciais para o avanço do *Digital Twin*. Com foco nos processos, custos e análise, e para a contribuição de uma maior sustentabilidade nos seus setores. Essa é uma tendência crescente e evidencia a importância dessa tecnologia no cenário atual, adaptação aos ambientes modernos e inteligentes, aos desafios urbanos e de mobilidade e reforça a vantagem competitiva para o sucesso em uma economia global cada vez mais conectada (Zhao et al., 2022).

Já no cenário brasileiro, a integração e implementação do *Digital Twin* ainda está em estágio inicial de desenvolvimento. Ainda se detém a aplicações mais primárias, empresas de tecnologia, automotivo e apoio da comunidade acadêmica para fomentar a tecnologia (Tancredi et al., 2022). Porém, existe um gama de iniciativas conduzidas por órgãos do governo e empresas privadas que vem defendendo o uso do *Digital Twin*, principalmente no setor de energias e processos industriais, que são fundamentais na base econômica e na parte de sustentabilidade do país (Speicher & Defranco, 2023).

Algumas das iniciativas, por exemplo, é o caso do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), que foi escolhido para receber um laboratório desta tecnologia em parceria com o Instituto de Tecnologia da Informação de Shenzhen (SZIT) da China, que visa desenvolvimento, inovação e colaboração com outros setores relacionados ao *Digital Twin* (Nogueira, 2023).

Há o caso da Petrobras, onde o *Digital Twin* é utilizado para criar versões digitais das refinarias, sendo assim com a possibilidade de simular diversos cenários com vários tipos de ambientes, antes da sua implementação no ambiente real. Essa aplicação já gerou ganhos de rentabilidade e otimização na de U\$200 milhões em apenas um ano (Petrobras, n.d.).

Por fim, o exemplo da aplicação nas cidades inteligentes se deu no Rio de Janeiro, que em parceria com o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), criou o programa Favelas 4D. Onde mapearam a favela da Rocinha com sensores e foi criado um *Digital Twin* da comunidade, com o intuito de prever melhorias em situações desde transporte público até gestão de resíduos (Poletti, 2024).

No Brasil, a área de imunobiológicos e biotecnologia tem se consolidado como uma das mais evoluídas tecnologicamente no contexto industrial. Instituições como Instituto de Tecnologia em Imunobiológicos (Bio-Manguinhos/Fiocruz), maior produtor de vacinas da América Latina, exemplificam a inovação científica desse setor, integrando inovação e desenvolvimento tecnológico com produção em larga escala. A digitalização, modelagem e simulação dos processos fazem parte de um plano estruturado para alcance de uma plena digitalização, para desenvolvimento de uma fábrica inteligente, conectando os mundos físicos e digitais e permitindo a adoção do *Digital Twin*

para simulações de cenários produtivos, otimização de operação física e treinamento de novos operadores através dos modelos virtuais construídos ((SILVA et al., 2024).

O setor agropecuário destaca-se entre os pioneiros na adoção de novas tecnologias. Sua aplicação abrange diferentes segmentos, como a cadeia de suprimentos, com o aumento da rastreabilidade; a pecuária e a avicultura, por meio do monitoramento e controle da qualidade; e os frigoríficos, com foco na melhoria da eficiência e do rendimento dos processos produtivos. (Ribeiro; et al., 2022).

A implantação e utilização do *Digital Twin* na agroindústria facilitam um monitoramento complexo e abrangente de todos os processos. É importante na parte de segurança alimentar e na redução de desperdícios e custos (Ribeiro; et al., 2022). Essa tecnologia é uma ferramenta muito robusta e eficaz, com sua grande capacidade de análises e previsibilidade, e consegue rastrear meticulosamente os padrões de qualidade e as métricas da produção (Ding et al., 2012)

Além disso, o *Digital Twin* em conjunto com a integração com os sensores, automação dos equipamentos, Internet da Coisas (IoT) e algoritmos de aprendizado da máquina, permite que sejam feitos ajustes automáticos em tempo real, garantindo níveis elevados de eficiência do processo (Krupitzer et al., 2022a).

De fato, a implementação do *Digital Twin* ocorre de forma gradativa e se adapta a realidade de cada empresa e tecnologia disponível. Conforme descreveu SILVA (2024) é possível classificar essa implementação por níveis de maturidade que podem ser desde a representação visual até a implantação de sistemas autônomos, conforme mostrado na Figura 02. Cada estágio da maturidade representa o grau de integração, automação e inteligência alcançados pela organização e está relacionado diretamente a disponibilidade de tecnologias, conectividade, banco de dados e capacidade analítica.

De acordo com os estudos apresentados por SILVA (2024) no XLIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), compreender esse níveis de maturidade do DT é essencial para condução, aplicação e desenvolvimento tecnológico nas indústrias brasileiras. Tal compreensão possibilita a transformação digital, permitindo que as indústrias tracem caminhos para alcançar seus modelos produtivos mais eficientes, sustentáveis e autônomos.

Figura 2

Níveis de Maturidade do Digital Twin



Fonte: Adaptado de SILVA (2024)

O primeiro nível de maturidade do *Digital Twin* é o *Virtual Twin* e representa o estágio inicial de digitalização dos ambientes produtivos. Nesse nível, cria-se uma visualização realista do ambiente físico por meio de modelos tridimensionais detalhados, apoiados por tecnologias de inteligência artificial. O objetivo principal é oferecer uma base virtual que reproduza o sistema real, permitindo compreender melhor os processos e estruturas das fábricas. Ainda que não haja interação direta com dados reais, o *Virtual Twin* proporciona uma visão clara do funcionamento físico, servindo como suporte para estudos de layout, simulações estáticas e análises visuais de desempenho. Essa etapa marca a transição entre o mundo físico e o digital, sendo o ponto de partida para a evolução em direção à manufatura inteligente (SILVA et al., 2024).

O segundo estágio é o *Simulation Twin*. Amplia as capacidades do nível anterior ao incorporar simulações dinâmicas dos processos produtivos. Nessa fase, o modelo digital começa a ser utilizado para testar cenários e identificar gargalos operacionais, promovendo melhorias contínuas no desempenho fabril. O *Simulation Twin* permite que o sistema virtual reproduza o comportamento real das operações, avaliando hipóteses e projetando respostas a variações de parâmetros de produção, sem interferir diretamente no ambiente físico. Essa virtualização facilita o desenvolvimento de processos mais eficientes, reduzindo custos com testes práticos e minimizando riscos de paradas não planejadas. Conforme destacado no ENEGEP 2024, essa etapa é fundamental

para o avanço das indústrias que buscam maior previsibilidade e controle de suas operações (SILVA et al., 2024).

O terceiro estágio é o *Connected Twin*. Essa etapa marca o ponto em que a conexão entre o mundo físico e o digital se torna efetiva. Aqui, há integração bidirecional de dados, o que ocorre no ambiente físico é refletido no digital, e vice-versa. Essa interligação é possível graças a sensores, redes IoT e sistemas ciberfísicos que transmitem informações em tempo real. O *Connected Twin* permite o monitoramento contínuo de máquinas, linhas de produção e variáveis de processo, possibilitando o controle e a gestão centralizada de recursos. Essa conectividade aumenta significativamente a agilidade na tomada de decisão e reduz o tempo de resposta diante de desvios operacionais. No contexto industrial, é o primeiro passo concreto para a implementação de fábricas inteligentes, onde a integração de dados é a base para a automação avançada (SILVA et al., 2024).

O quarto estágio de maturidade é o *Smart Twin*. O modelo digital atinge um patamar de inteligência superior, sendo capaz de interpretar informações, aprender com dados históricos e realizar previsões com base em algoritmos preditivos. Essa etapa caracteriza-se pela utilização de análises avançadas e de inteligência artificial para apoiar decisões estratégicas e operacionais. O *Smart Twin* transforma dados em conhecimento útil, possibilitando que gestores antecipem falhas, otimizem recursos e melhorem a qualidade do produto. Além disso, promove uma gestão proativa, baseada em simulações em tempo real e *insights* precisos. Segundo os estudos apresentados no ENEGEP 2024, esse estágio representa o início da era das fábricas cognitivas, em que o sistema virtual se torna um verdadeiro assistente inteligente do processo produtivo (SILVA et al., 2024).

O quinto estágio mais avançado é o *Autonomous Twin*. No qual o sistema digital é capaz de operar de forma autônoma, aprendendo, se ajustando e otimizando processos sem intervenção humana direta. Nessa fase, o *Digital Twin* atua como um agente independente, capaz de coordenar microdecisões em tempo real e aplicar melhorias contínuas de forma automática. O *Autonomous Twin* utiliza algoritmos de autoaprendizagem e sistemas de controle autônomo para aprimorar a produtividade e reduzir falhas operacionais. Esse nível de maturidade representa o futuro da manufatura inteligente, em que plantas industriais são autogeridas e baseadas em modelos digitais que garantem a integração total entre planejamento, execução e melhoria contínua. Conforme apresentado por SILVA (2024), esse estágio ainda está em desenvolvimento, mas já desponta como o horizonte tecnológico da indústria 4.0 e da transformação digital no setor produtivo.

Além da maturidade da integração do *Digital Twin* nos setores, o processo de implementação das tecnologias tem obstáculos significativos. Entre os desafios para a implementação do DT, destaca-se a necessidade de profissionais qualificados para operar, gerenciar e interpretar as informações geradas pelo sistema. Essa demanda pode ser atendida tanto pela

capacitação das equipes internas quanto pela contratação de profissionais especializados. Entretanto, a disponibilidade ainda limitada de mão de obra com competências específicas nessa área pode elevar os custos de contratação e dificultar a adoção e o desenvolvimento da tecnologia nas organizações. Além disso, possui elevado investimento financeiro para adoção inicial da tecnologia e a necessidade de uma infraestrutura tecnológica sofisticada e avançada, capaz de sustentar toda a operação efetiva desses sistemas, que são mais complexos (Abideen et al., 2021).

Por outro lado, o panorama das oportunidades apresenta-se consideravelmente abrangente e oferece uma variedade significativa de benefícios. Como por exemplo, maior eficiência operacional, redução significativa dos custos, avanços na área da automação, redução do desperdício de alimento, impacto sustentável e renovação de energias. Com esse cenário tem potencial para remodelar as práticas tradicionais com impacto até no estilo de vida e perfil de consumo mundial (Ding et al., 2012).

2.1.3 A história da avicultura

O contexto global mostra as particularidades do Brasil, abordando aspectos críticos da manufatura e o que impactou nos processos de industrialização que levou a transformação deste setor, juntamente com a aplicação das tecnologias, engajamento social e os mais variados desafios contemporâneos que a indústria enfrenta. Foram abordados os desafios futuros e o *Digital Twin* (Neethirajan & Kemp, 2021) que promete revolucionar o gerenciamento e eficiência do sistema de produção avícola.

A história agrícola, com sua origem na agricultura é uma atividade humana fundamental e para o desenvolvimento da humanidade. Pesquisas arqueológicas indicam que as primeiras domesticações de espécies avícolas ocorreram na região do sudeste asiático há mais de cinco milênios (Vlasenko et al., 2022). As aves contribuíam para alimentação, fornecendo carne e ovos e suas penas serviam para vários propósitos, assim como seu envolvimento em cerimoniais religiosos de grande importância cultural para a época (Krupitzer & Noack, 2022).

No leste asiático, na região da China, a cultura de criação de patos tem uma história de mais de três mil anos, mostrando quão antiga é a tradição de criação de aves nesta região (Krupitzer et al., 2022b). Os avanços nas primeiras práticas agrícolas, desempenharam um papel crítico para a definição das aves como fonte significativa e indispensável de proteína para a população, facilitando a rápida expansão ao longo do tempo. Além disso, o rápido avanço do conhecimento e das práticas de criação de aves foi amplamente possibilitada e facilitada pelas definições e manutenções das rotas comerciais e conquistas militares pelo mundo da época (Ding et al., 2012). Isso favoreceu a

introdução das aves nos territórios europeus, permitindo que se tornassem integrantes das práticas culturais, incluindo a civilização romana, que com sua presença e controle das regiões, favoreceu a propagação da criação das aves, alterando os hábitos alimentares de populações indígenas dos territórios dominados (Abideen et al., 2021).

Durante a idade média entre o século V e o século XV, a avicultura se transformou em um empreendimento agrícola nas comunidades monásticas e feudais. Nos mosteiros, os monges dedicavam a criação de várias espécies de pássaros, sendo fundamentais para os avanços relacionadas aos cuidados, manejo e seleção das raças das aves, desempenhando papel no aprimoramento das raças e de produtividade. No período do Renascimento, houve uma virada conceitual do pensamento humano e desenvolvimento cultural e um avanço no campo da pesquisa científica e experimental (Miroshnik et al., 2023), principalmente na área da avicultura, onde surgiram os primeiros documentos descritos e detalhados relacionado ao manejo e técnicas de reprodução que foram publicadas para a comunidade em geral.

A avicultura abrange as criações e produções de aves domesticadas e é um componente essencial da cadeia do agronegócio mundial, desempenhando um papel indispensável no fornecimento desta proteína, que além de ser uma das mais acessíveis é de alta qualidade. O que se torna necessário para atender as necessidades da população que além de estar cada vez maior, está mais exigente dia após dia (Lopes, 2010).

A produção mundial de aves, principalmente as variedades para carne e ovos, foram impulsionadas pelo aumento constante da demanda por essas proteínas, que pode estar ligado diretamente ao crescimento populacional, aumento do êxodo rural e alteração nas preferências alimentares da população (Belusso & Hespanhol, 2010). Em 2022, os Estados Unidos e a China, emergiram como grandes produtores em escala global, mostrando resultados expressivos em torno de 20,4 milhões de toneladas e 15,6 milhões de toneladas respectivamente (Schmidt & Silva, 2018).

Com o avanço das tecnologias, incluindo a inteligência artificial, os processos de automação e a análise em bancos de dados extensos, favoreceram a otimização da gestão do gerenciamento e metodologias da produção, resultando um aumento de 30% na eficiência geral, principalmente da produção avícola (Rodrigues et al., 2015). Em contrapartida, a indústria enfrenta um pacote de desafios complexos, que abrangem desde as implementações dos regulamentos sanitários, que estão cada vez mais rigorosos até o desafio ambiental, onde sempre há a necessidade de mitigar e controlar as repercussões que são associadas a atividade da produção. Esse cenário exige que seja desenvolvido cada vez mais soluções inovadoras e sustentáveis para garantir a viabilidade e a sustentabilidade ecológica a longo prazo, junto com a evolução da indústria 4.0 (Neethirajan & Kemp, 2021; Piantkoski & Bertollo, 1967).

O Brasil se posicionou com uma grande força global de produção e exportação de carne de frango, com alguns pontos que convergem para este resultado são as condições climáticas que favorecem a produção, a oferta de insumos básicos e o apoio e investimento significativo na área de tecnologias e pesquisas, vem em conjunto para o aumento da eficiência e produção de frangos de corte (Schmidt & Silva, 2018).

O Brasil representa em torno de 35% do total das exportações de carne de frango, oferecendo uma variedade expressiva de cortes para mais de 150 países no mundo (Lopes, 2010). No ano de 2023, o Brasil foi responsável por 14.833 mil toneladas de produção de carne de frango, ficando atrás apenas do Estados Unidos com uma produção de 21.095 mil toneladas de produção de carne de frango. Em exportação, o Brasil é o primeiro país com 5.139 mil toneladas, depois Estados Unidos com 3.300 mil toneladas e União Europeia com 1.715 mil toneladas de carne de frango. A exportação teve um aumento de 2020 com 4.231 mil toneladas para 2024 com 5.139 mil toneladas de produção de carne de frango, o maior aumento sendo contabilizado desde 2013 (ABPA, 2024).

A utilização do sistema integrado de produção no setor, aprimorou significativamente a sistemática para garantir e assegurar os padrões de controle da qualidade e de segurança sanitárias. Esse fato resultou em uma redução nas perdas de 12% (Neethirajan & Kemp, 2021; Piantkoski & Bertollo, 1967). Entretanto, os desafios existem e devem ser tratados conforme regulamentação ambiental, isso é possível de entender com as grandes barreiras que ainda são impostas na obtenção de novos mercado, exigindo uma grande articulação e soluções estratégicas para o mercado brasileiro continuar sendo um dos maiores do mundo (Rodrigues et al., 2015).

A chegada da Indústria 4.0 no setor da avicultura, favoreceu mudanças profundas e longo prazo que mudaram radicalmente as práticas tradicionais, desenvolvendo assim um nível a outro patamar de automação e aumentando a capacidade de gestão de inúmeros processos de produção inimaginável antes dessa virada (Rodrigues et al., 2015). A integração de sensores inteligentes e a implantação de técnicas para análises de dados em tempo real, vem desempenhando um papel fundamental para o ganho operacional, redução de perdas, redução de custos e maior velocidade no tempo de tomada de ação, levando a reduções no custo operacional estimados em até 15% (Lopes, 2010).

Um exemplo da aplicação do *Digital Twin* no setor está na alimentação da aves, resultando em redução de até 10% no desperdício de ração, o que é impactante na questão de custo e é um aspecto crítico na sustentabilidade do setor (Belusso & Hespanhol, 2010).

O DT, representa uma transformação sem precedentes no campo da avicultura. A possibilidade de representação e modelagem virtual do sistema de produção oferece luz para prever vários cenários potenciais em todas as áreas, desde a criação da ave até seu processamento na

indústria e transporte, gerando muitas matrizes para tomada de decisão rápida e mais assertivas em relação as práticas já existentes (Piantkoski & Bertollo, 1967). O impacto que essa tecnologia pode causar em toda a cadeia, relacionado a eficiência, custo, produtividade e sustentabilidade sugere um possível aumento em produtividade em até 20% (Rodrigues et al., 2015). Esse avanço e contínua integração dessas tecnologias tem o poder de alterar os aspectos econômicos da produção de aves (Schmidt & Silva, 2018).

Porém, apesar dos avanços e inovações dos últimos anos, é de conhecimento que o setor enfrenta grandes desafios relacionado a disponibilidade e qualificação da mão de obra. Outro aspecto relevante refere-se aos elevados custos associados à implementação de novas tecnologias que, somados às crescentes exigências do mercado internacional, impõem desafios significativos ao desenvolvimento e à competitividade do setor. (Lopes, 2010).

A busca contínua por metodologias sustentáveis que visem à qualificação da mão de obra, à elevação dos padrões de bem-estar animal e à mitigação das emissões de carbono tem orientado as novas diretrizes da avicultura. Aliada à projeção de crescimento de 14% no consumo global até o ano de 2030, essa tendência consolida os rumos do setor para a próxima década (Rodrigues et al., 2015).

O Brasil, como um dos principais protagonistas do setor, vem mostrando sua adaptabilidade e inovação, despontando como referência mundial no setor (Lopes, 2010). Junto com as transformações digitais que estão ocorrendo e a facilidade que está trazendo para a gestão e busca por melhores resultados (Belusso & Hespanhol, 2010), vem demonstrando um caminho promissor para o aumento dos resultados e cada vez mais participação no mercado externo, consolidando o Brasil como um país estratégico e líder na avicultura (Piantkoski & Bertollo, 1967).

2.2 *DIGITAL TWIN* NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo dá continuidade ao referencial teórico apresentado na revisão narrativa, aprofundando a análise sobre o *Digital Twin* na indústria, com ênfase na sua aplicação na área de alimentos. Diferente da abordagem conceitual e histórica desenvolvida anteriormente, este capítulo apresenta um artigo científico, construído a partir de uma análise bibliométrica e de uma revisão integrativa da literatura, voltadas a compreender como a tecnologia tem sido aplicada no setor.

A escolha por esse formato proporciona uma visão abrangente e sistêmica da produção científica sobre o tema, permitindo identificar tendências, lacunas e oportunidades da pesquisa. Desta forma, enquanto a revisão narrativa buscou compreender as origens, os fundamentos teóricos e o vínculo interdisciplinar do *Digital Twin* com a Indústria 4.0 e a avicultura, esta etapa volta-se à

investigação das publicações disponíveis em bases de dados internacionais, evidenciando a evolução e o amadurecimento das pesquisas na área.

O artigo está estruturado em duas partes: a primeira corresponde à análise bibliométrica, que apresenta o panorama quantitativo da produção acadêmica, destacando a evolução temporal, os principais autores, países e periódicos envolvidos. Para Oliveira (2012) a bibliometria é uma aplicação capaz de mensurar a atuação do pesquisador e/ou periódicos, possibilitando o entendimento do perfil e suas tendências. E a segunda, à revisão integrativa da literatura, que aprofunda a análise dos estudos, sintetizando contribuições teóricas, metodológicas e práticas (Souza et al., 2010). Juntas, essas abordagens fornecem uma base científica consolidada para compreender o papel do *Digital Twin* na transformação digital da indústria de alimentos e sua relevância para a indústria de uma forma geral.

Este artigo utilizou as bases Scopus e Web of Science para pesquisar os trabalhos encontrados em todo o período disponível. Dentre os filtros das bases de pesquisa, foi utilizada a opção de publicações de acesso aberto para facilitar as leituras e análises futuras. Com a ajuda das ferramentas de análise de dados dos sites de pesquisa, o software VOSviewer e o Microsoft Excel foram utilizados para realizar as análises estatísticas sobre a produção de artigos relacionados às três palavras-chave que serão a base dessa pesquisa: *Digital Twin*, *Food and Industry*.

2.2.1 Introdução

A indústria mundial de alimentos tem impacto no desenvolvimento econômico, na garantia da segurança e da qualidade alimentar e no fomento do comércio local, entre países e continentes. A capacidade de adaptação e competitividade das empresas está presente na agilidade desse setor. Isso ocorre por meio de inovação, estratégias de marketing e da necessidade do consumidor. Economicamente, a indústria de alimentos tem um impacto tão grande que consome uma parcela substancial do Produto Interno Bruto (PIB) dos países. Com alta demanda comercial e a livre demanda imposta pelos países, tende a haver uma relação positiva entre a balança comercial e a competitividade com os outros países a longo prazo (Pawlak & L, 2022).

O mercado de carnes, passa por uma fase de crescimento, impulsionado pelo alto poder de compra, a maior taxa de crescimento da urbanização, o êxodo rural e a mudança nas preferências alimentares nas diversas regiões do mundo. Esta evolução é evidenciada pela aderência do setor na industrialização, mecanização das práticas e desenvolvendo do negócio para acompanhar a tendência global que busca esse avanço para atender a demanda crescente. A mudança da economia faz com o que os indivíduos busquem mais proteínas e carnes processadas. Países como

China e Índia, com o desenvolvimento e aumento do poder de compra vem estimulando o mercado e aumentando a demanda dos vários tipos de carnes. O que gera a necessidade do atendimento do mercado em velocidade e quantidade (Moekti, 2020; Ndanga et al., 2009 e Sebastian, 2013).

Em nível mundial, inovação e tecnologia são tendências neste setor, mostrando que não apenas o desenvolvimento de produtos mais nutritivos e com melhor qualidade, mas sim em equipamentos e métodos que possam proporcionar competitividade, seja em custo, rendimento, produção, viabilidade e sustentabilidade. Fatores que se tornaram essenciais para países e empresas que buscam as pequenas vantagens competitivas destes mercados (Logotheti, 2020).

O impacto da indústria de alimentos na cadeia nacional desde sua produção, geração de renda primária, mão de obra, consumo até a exportação e impacto na balança comercial é algo difícil de entender e medir, tamanha a sua grandeza. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a indústria de alimentos tem o maior número de pessoas, responsável por 22,8% dos empregos gerados. Para efeito de comparação, logo após a indústria de alimentos o setor do vestuário é o segundo maior empregador com 5,9%.

O setor de alimentos é composto por toda a cadeia, da criação a exportação ou o próprio comércio interno, agregando áreas de transporte, matérias primas e grãos principalmente. Dados divulgados pela Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA, 2023), mostram que aproximadamente 61% de toda a produção agropecuária é processada pela indústria de alimentos nacional e que 18,3% de todas as exportações do Brasil são desta área.

Assim como o crescimento ocorreu no mundo, na área de carnes não poderia ser diferente no Brasil, levando em consideração que o país é um dos líderes e maiores influentes no cenário global destas proteínas. Da mesma maneira, o aumento da produtividade, condições econômicas favoráveis, aumento de demanda dos importadores foram os principais fatores que promoveram o ambiente para essa expansão (Ferreira & Vieira Filho, 2019).

Baseando-se em relatórios publicadas pela Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2023) o valor bruto da produção de aves em 2023 foi de R\$ 91,64 bilhões de reais com 65% direcionado ao Mercado Externo (ME), ficando no segundo lugar como maior produção, atrás apenas dos Estados Unidos maior exportador dessa proteína. A produção de suínos teve o valor bruto da produção de R\$ 34,17 bilhões de reais com 23,8% direcionado ao ME, ficando em quarto lugar como maior produção, atrás de China, União Europeia e Estados Unidos e Canadá.

O mercado brasileiro tem a principal estratégia de diversificar o negócio, seja por meio de incorporações ou por aquisições até expansão e desenvolvimento de novos nichos de mercado (Ferreira & Vieira Filho, 2019). Um grande setor com tantas ramificações, alto volume de exportação, intensivo de mão de obra gera competição entre os *stakeholders*. A cobrança por produtividade,

redução de custos, fatias de mercados e melhores preços pelas empresas com interesse em comum é muito elevada (Braga, 2010).

A tecnologia representa um recurso fundamental para a obtenção de resultados na indústria alimentícia. Não apenas relacionado a computadores e internet, mas a equipamentos tecnológicos, máquinas inteligentes que possam aprender em tempo real de uma linha específica, prever problemas com diagnóstico preventivos. A tecnologia vem transformando o setor, possibilitando resultados exponenciais e capaz de mudar as operações das indústrias (Gondo & Mbaiwa, 2022).

Devido a evolução da digitalização em conjunto com a indústria, o conceito do *Digital Twin* foi desenvolvido. A pressão global por maior produção de alimentos aumentou sobremaneira a competitividade do setor (Maheshwari, Kamble, Belhadi, Venkatesh, et al., 2023).

O *Digital Twin* quebra a barreira da inovação em qualquer setor por criar réplicas digitais de objetos físicos, permitindo seu gerenciamento em tempo real, seja ela de qualquer natureza, trazendo melhorias significativas para a organização (ÖHLÉN et al., 2022). Esse conceito que está em plena evolução, foi introduzido pioneiramente por Michael Grieves em 2002, com a ideia de representação digital de objetos físicos (Singh et al., 2021).

A funcionalidade do DT é a representação exata e dinâmica digital do objeto real, com a opção de interação e reflexão a qualquer tipo de alteração para poder medir os resultados (ÖHLÉN et al., 2022). Concomitante com a indústria 4.0, internet das coisas, *Big Data*, possui a capacidade praticamente infinita de trabalhar em ambientes complexos, evolução do método de trabalho (Salehi et al., 2023). E com cada vez mais dados nas bases para tomadas de decisões, mais agilidade no processamento, mais conhecimento adquirido pelo sistema, tende a trazer melhor eficiência para as organizações (Jiang & Alkhateeb, 2023).

Esta tecnologia poderá mudar a indústria, processos e tomadas de decisões. Porém, em contrapartida, por ser relativamente nova, sua usabilidade ainda há muitos pontos a serem considerados. Será que todos os sistemas poderão ter a interface com o *Digital Twin*? A empresa conseguirá ter uma coleta de informações de dados e gerenciamento de dados efetivas? (Awasthi et al., 2024).

No setor de alimentos, essa tecnologia está no início da aplicação segundo Melesse (2023), e mesmo com avanços ainda haverá muitos desafios em toda a cadeia de suprimentos das indústrias de alimentos. Porém as transformações já estão mudando cenários das indústrias de alimentos, aumentando eficiência e sustentabilidade em toda cadeia. A capacidade de monitoramento e otimização online dos processos aborda um grande desafio deste setor que é a variabilidade dos insumos (Sipola & Kokkonen, 2023).

Neste setor com alta concorrência, margens apertadas, custos altos e grande variabilidade da matéria prima, o *Digital Twin* serve para aumentar a visão do fluxo e reduzir as perdas e gargalos, diminuindo custos de operação, melhor atendimento de mix, agilidade e melhor satisfação de cliente (Melesse, Franciosi, Pasquale, et al., 2023). Para garantir a segurança alimentar o DT passa a ser indispensável pela sua estabilidade e confiança (Krupitzer et al., 2022b).

O artigo deste capítulo teve por objetivo de avaliar por meio de revisão integrativa da literatura, a aplicação e os impactos da tecnologia de *Digital Twin* na indústria de alimentos, com foco específico no setor de frigoríficos.

A relevância deste estudo justifica-se pelo seu alinhamento com a Agenda 2030 da ONU, destacando-se a contribuição para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) ao fomentar a modernização digital, e para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) ao otimizar a eficiência energética e reduzir o desperdício na cadeia de frio. Ao propor soluções baseadas em simulação digital a pesquisa promove a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental, consolidando o DT como uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais resilientes e éticos.

Para o desenvolvimento deste capítulo, cujos resultados estão expostos abaixo, foi realizado pesquisa bibliográfica. Quanto aos objetivos o trabalho caracteriza-se como revisão integrativa da literatura. Nesse contexto, essa pesquisa segue etapas estruturadas, partido da definição do problema e questão da pesquisa, critérios de inclusão e exclusão dos estudos, realização das buscas nas bases científicas, análises das publicações selecionadas e síntese das evidências encontradas.

2.2.2 Resultado e Discussão

Após a definição da pergunta de pesquisa e do protocolo metodológico, procedeu-se à coleta de dados nas bases Scopus (Scopus, 2024) e Web Of Science (Web Of Science, 2024). A escolha dessas plataformas justifica-se por sua abrangência e reconhecimento acadêmico na indexação de produções científicas de alto impacto. Para garantir a reprodutibilidade e mitigar vieses, as estratégias de busca foram aplicadas de forma idêntica e simultânea em ambas as bases, entre os dias 07 e 11 de agosto de 2024.

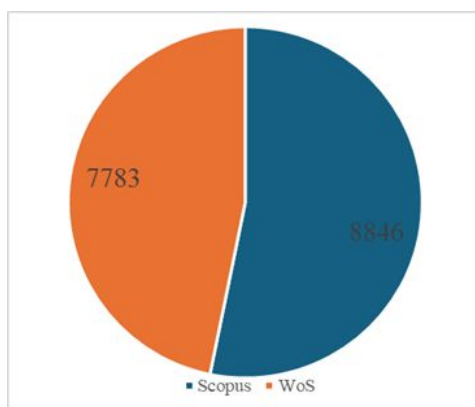
Inicialmente, utilizou-se o descritor abrangente “*Digital Twin*” para um mapeamento exploratório, resultando em mais de 25.000 documentos na Scopus e 16.000 na Web of Science. Diante desse volume e visando a viabilidade da análise integral dos textos, aplicou-se o filtro de Open Access. Adicionalmente, empregou-se o operador booleano de truncamento (*Digital Twin**) para capturar variações no plural ou termos derivados.

Após a análise exploratória inicial, refinou-se a estratégia de busca utilizando a string *"Digital Twin" AND Food AND Industr*****, aplicada a artigos em regime de *Open Access*. O objetivo dessa combinação foi manter uma abrangência que permitisse mapear o perfil das publicações e sua convergência com o escopo desta pesquisa, utilizando operadores de truncamento (*) para capturar variações morfológicas e plurais dos termos em qualquer seção dos documentos.

A Figura 3, mostra o total dos artigos publicados sobre assuntos com o filtro aberto.

Figura 3

Total de artigos

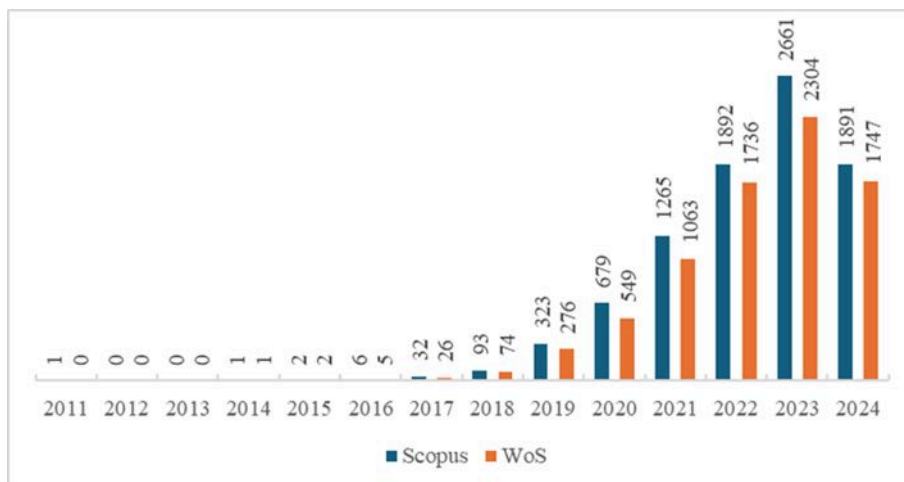


Observa-se que os registros iniciais datam de 2011 na base Scopus e de 2014 na WoS ambos até 2024. Sem a imposição de recortes temporais, a amostra refinada totalizou 8.846 artigos na *Scopus* e 7.783 na *WoS*.

A Figura 4, mostra que a produção científica sobre o tema apresenta um crescimento exponencial recentemente, visto que o triênio 2022-2024 concentra 72,8% de toda a literatura publicada, o que ratifica a contemporaneidade e a relevância do assunto.

Figura 4

Publicações por ano



Salienta-se que nos artigos pioneiros com acesso aberto, constatou-se que as publicações iniciais focavam majoritariamente no setor aeroespacial, abordando o uso do *Digital Twin* para o monitoramento do ciclo de vida de aeronaves, simulações estruturais e otimização de protocolos de manutenção preditiva.

Conforme detalhado na Figura 5, o processo de filtragem na base *Scopus* revelou que a busca pelo termo isolado *Industr** retornou 498.922 documentos; ao associá-lo ao descritor *Food**, que isoladamente apresenta mais de 693.300 registros, a amostra foi reduzida para 82.759 artigos e ao aplicar o filtro "*Digital Twin*"* de acesso aberto, o resultado foi de 51 artigos, que compõem o *corpus* de análise específica desta revisão.

Figura 5

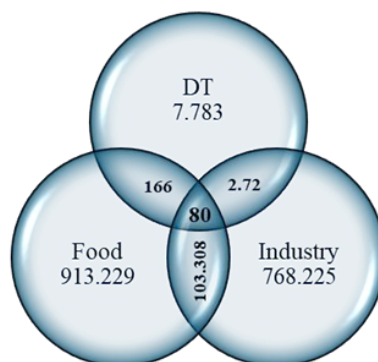
Base Scopus



Aplicando o mesmo raciocínio metodológico à base *Web of Science* (WoS), conforme detalhado na Figura 6, obteve-se um panorama comparativo robusto.

Figura 6

Base WoS



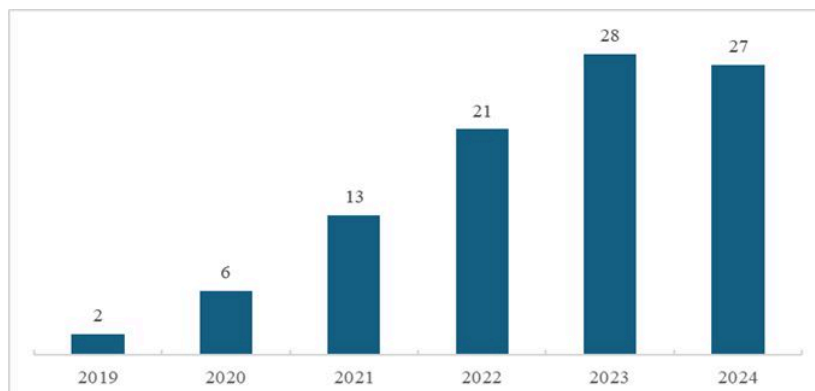
Inicialmente, a busca pelo termo *Industr**, sem restrições de filtros, retornou 768.225 documentos. A inclusão do descritor *Food**, que isoladamente apresenta um volume superior a 913.229 registros, refinando-se a amostra obteve-se 103.308 artigos. Por fim, ao integrar a expressão "*Digital Twin*"* sob o critério de *Open Access*, o resultado foi de 80 artigos disponíveis para análise.

Em seguida decidiu-se selecionar palavras-chave ou filtros, já que a pesquisa apresentava um número satisfatório de resultados, e começou a analisar todos os artigos. A primeira ação foi exportar o resultado das duas pesquisas para a extensão ".bib", cujo objetivo foi retirar os arquivos duplicados.

A soma das duas pesquisas resultou em 131 artigos, dos quais 34 eram repetidos nas duas bases e foram excluídos do arquivo, resultando em 97 artigos para sequenciar o tratamento de dados. A Figura 7 mostra que o volume e o tempo de publicação reduziram, sendo o artigo mais antigo publicado em 2019 e a maioria das publicações concentrada entre 2022-2024, reforçando a característica de um campo de pesquisa emergente e em evolução.

Figura 7

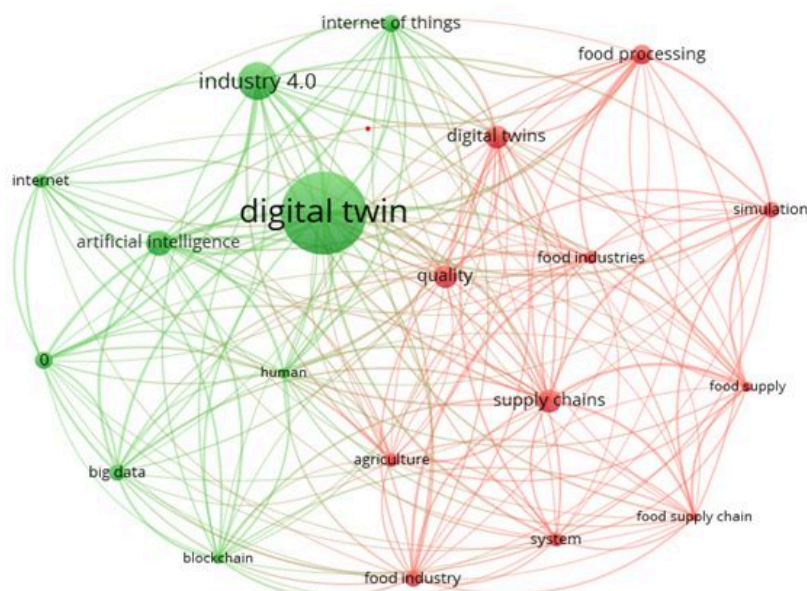
Base compilada



A partir da base de dados consolidada e exportada em formato “.ris”, pelo software Zotero, realizou-se o mapeamento bibliométrico por meio do software VOSviewer (VOSviewer, 2024). Essa etapa permitiu a análise de ocorrência de palavras-chave dos 97 artigos selecionados, organizando-os em *clusters* que evidenciam as principais frentes temáticas e suas correlações, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8

Relação VOSviewer



A rede de interação revela a divisão da literatura em dois agrupamentos principais. O primeiro, em vermelho, de maior densidade, concentra-se em dimensões operacionais, abrangendo

as áreas de produção, logística e planejamento. O segundo, em verde, apresenta as correlações mais fortes com o descritor central *Digital Twin(s)*, estando intrinsecamente ligado aos pilares tecnológicos da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA).

A interdependência entre esses eixos é corroborada pelas linhas de conexão, que demonstram a fluidez entre a tecnologia e a operação. Cabe ressaltar, como ponto de inflexão, a presença das áreas de Ciências Humanas e Gestão da Qualidade. Embora em proporção menor, esses nós estabelecem ligações transversais com quase todos os elementos da rede, ratificando o caráter interdisciplinar do tema e a necessidade de abordagens que integrem o capital humano e os padrões normativos ao ecossistema digital.

Porém, a análise com esse volume ainda era complexa, tendo em vista que a maioria dos artigos lidos não estavam diretamente correlacionados com o tema do trabalho. Por esse motivo, foi necessário fazer mais uma classificação antes da leitura definitiva. Na classificação realizada em seguida, foram feitas leituras dos artigos por título e palavras-chave, sendo eliminados 67 artigos que não estavam relacionados ao tema e à relevância para o trabalho. Esses artigos estavam ligados principalmente a outras áreas, como alimentícia, agrícola e estudos em cadeias de frio. Após a leitura dos resumos de 30 artigos, mais 16 foram desclassificados por não se enquadrarem na proposta. A maioria estava relacionada à área de microbiologia, processamento térmico, planejamento e controle da produção (PCP) e à cadeia de frio.

A Figura 9 apresenta a nuvem de palavras derivada do subconjunto de 14 artigos selecionados para a análise qualitativa, sintetizando graficamente os termos com maior incidência de ocorrência no corpus.

Figura 9

Nuvem de palavras



Essa representação visual ratifica e coloca em evidência a centralidade semântica dos descritores, bem como as dimensões proporcionais à frequência de aparecimento, e os eixos temáticos predominantes na intersecção entre o *Digital Twin* e as operações de processamento de alimentos. A centralidade de descritores como, *Digital Twin*, *Industry 4.0* e *Supply Chains*, cujas dimensões proporcionais à sua frequência evidenciam as principais tendências e o foco temático da produção científica atual sobre a intersecção entre *Digital Twin* e a indústria de alimentos. A Tabela 1 mostra o resumo dos 7 artigos elencados como fonte de interesse da pesquisa.

Tabela 1

Resumo dos principais artigos

Título / Autores / Ano Publicação	Objetivos	Metodologia	Resultados
"Planejamento, monitoramento e controle em tempo real pelo <i>Digital Twins</i> da cadeia de suprimentos" Maheshwari, P; Kamble, S; Belhadi, A; Venkatesh, M; Abedin, MZ 2023	Este artigo aborda a necessidade de melhores estratégias de aquisição, produção e distribuição nas cadeias de abastecimento de alimentos por meio da aplicação da tecnologia <i>Digital Twin</i> .	Revisão abrangente da literatura para identificar o estado atual da pesquisa e as lacunas no campo das cadeias de abastecimento.	Os resultados indicam melhorias significativas na produtividade da cadeia de suprimentos. Como principais pontos: níveis de serviço de 94% alcançado por meio de simulação em tempo real para pontos de reabastecimento, aumento na taxa de utilização de equipamentos e redução na lista de pendências, aumentando a eficiência operacional geral
"Realizando cadeias de valor sem desperdício por meio de S&OP impulsionado pelo <i>Digital Twins</i> : Um caso de varejo de alimentos" Sengupta, S; Dreyer, H 2023	Os objetivos do artigo giram em torno do aproveitamento do <i>Digital Twin</i> para alcançar cadeias de valor com desperdício zero no varejo de alimentos, ampliando os conceitos existentes da manufatura e melhorando a tomada de decisões e a eficiência operacional na cadeia de suprimentos.	Envolve o <i>Digital Twin</i> para processos de tomada de decisão. Ênfase na integração da análise de dados e abordagens de modelagens para fornecer uma representatividade significativa.	Este artigo apresenta descobertas significativas que defendem a integração do <i>Digital Twin</i> nos processos de S&OP para alcançar cadeias de valor com desperdício zero no varejo de alimentos, destacando as contribuições teóricas e as implicações práticas para os gerentes do setor
"Ontologia Central para Descrever Equipamentos de Produção de Acordo com a Produção Inteligente" Vlasenko, L; Lutska, N; Zaiets, N; Korobiichuk, I; Hrybkov, S 2022	O objetivo deste artigo é desenvolver uma ontologia central que sistematize o conhecimento teórico e os conceitos básicos relacionados a equipamentos de produção, especialmente no contexto da Indústria 4.0. Visa criar uma base robusta que sistematize o conhecimento existente e de suporte a inovação e a eficiência na operação de equipamentos de produção na era da Indústria 4.0.	Desenvolve uma ontologia para descrever os conhecimentos sobre as partes técnicas e tecnológicas, incluindo monitoramento e previsão dos equipamentos de produção.	Os resultados deste artigo refletem a eficácia e a aplicabilidade da ontologia central desenvolvida para descrever equipamentos de produção. Demonstram que não apenas organiza o conhecimento existente, mas serve como uma ferramenta valiosa para a inovação e a eficiência na operação de equipamentos de produção na era da Indústria 4.0.
"A Aplicação da Inteligência Artificial e <i>Big Data</i> na Indústria Alimentar" Ding, HH; Tian, JW; Yu, W; Wilson, DI; Young, BR; Cui, XH; Xin, X; Wang, ZY; Li, W 2023	Os objetivos deste artigo são: Explorar as aplicações de IA e <i>Big Data</i> , Identificar desafios e soluções, examinar o Impacto da Indústria 4.0, promover a Segurança Alimentar, analisar o Futuro da Indústria Alimentar. Refletindo a intenção de fornecer uma visão abrangente sobre como a IA e o big data estão moldando o futuro da indústria alimentícia, ao mesmo tempo em que abordam questões críticas de segurança e sustentabilidade.	Pesquisa em banco de dados e estudo da literatura relevante sobre a IA e <i>Big Data</i> no período de anos.	Os resultados apresentam várias conclusões importantes sobre o impacto e as implicações da inteligência artificial (IA) e da big data na indústria alimentícia, como potencial transformador, integração de tecnologias, avanços tecnológicos, sustentabilidade e inovação. Destacando a importância crescente da IA e da big data na indústria alimentícia, tanto os benefícios quanto os desafios que essas tecnologias trazem para o setor.

Continuação

Título / Autores / Ano Publicação	Objetivos	Metodologia	Resultados
"Implementação do <i>Digital Twin</i> na cadeia de abastecimento alimentar: uma revisão e uma estrutura conceitual" Huang, Y; Ghadge, A; Yates, N 2024	Os objetivos do artigo giram em torno de compreender o papel do <i>Digital Twin</i> nas cadeias de abastecimento de alimentos, revisar a literatura existente, desenvolver uma estrutura conceitual, delinear as etapas de implementação e sugerir direções futuras de pesquisa.	Revisão sistemática da literatura para explorar o <i>Digital Twin</i> nas cadeias de alimentos. Abordagens quali e quanti, estudos de caso, revisão de literatura e artigos conceituais.	Os resultados enfatizam a importância <i>Digital Twin</i> no aprimoramento das cadeias de abastecimento de alimentos, fornecem uma estrutura abrangente para sua implementação e sugerem direções de pesquisa futuras para explorar ainda mais essa tecnologia inovadora.
"Um byte pode melhorar nossa mordida? Uma Análise do <i>Digital Twin</i> na Indústria Alimentar" Henrichs, E; Noack, T; Piedrahita, AMP; Salem, MA; Stolz, J; Krupitzer, C 2022	Este artigo tem como objetivo principal fornecer uma visão abrangente sobre as aplicações do <i>Digital Twin</i> na indústria alimentícia, com o propósito de informar e estimular discussões sobre o futuro do <i>Digital Twin</i> na indústria alimentícia.	Revisão de literatura e estudos de mapeamento sistemático, direcionada para o <i>Digital Twin</i> na cadeia de alimentos.	O resultado revelou que tecnologia é amplamente utilizada para monitoramento e previsões, mas apenas uma fração delas é dedicada à integração em sistemas autônomos ou à oferta de recomendações para os usuários. Além disso, os principais desafios identificados incluem a necessidade de combinar conhecimentos de diversas disciplinas e a dificuldade em garantir a disponibilidade de dados suficientes para a criação de modelos eficazes, o que pode limitar a adoção do <i>Digital Twin</i> na prática.
"<i>Digital Twins</i> de Alimentos Combinando Ciência de Dados e Ciência de Alimentos: Modelo de Sistema, Aplicações e Desafios" Krupitzer, C; Noack, T; Borsum, C 2022	O artigo discute a complexidade da produção de alimentos, que é influenciada por diversos processos precisam ser controlados para transformar ingredientes em produtos. Além disso, destaca que os processos de produção devem ser adaptados à variabilidade dos ingredientes, especialmente devido às flutuações sazonais na qualidade das matérias-primas.	Uso de sensores e tecnologia para coletar dados	O resultado apresenta uma estrutura conceitual para a criação do <i>Digital Twin</i> de alimentos, que visam aprimorar o rastreamento e o gerenciamento dos processos de produção de alimentos. Os resultados indicam que a integração de dados em tempo real com a modelagem tradicional da ciência de alimentos pode melhorar significativamente a adaptabilidade e a eficiência dos sistemas de produção de alimentos.

Os artigos apresentam uma forte convergência ao apontar o *Digital Twin* como uma tecnologia disruptiva essencial para a modernização da indústria de alimentos, destacando benefícios comuns como a otimização do planejamento de vendas e operações, o aumento da eficiência operacional e a significativa redução de desperdícios, que pode chegar a um terço da produção. Há um consenso sobre os obstáculos para a sua implementação em larga escala, citando consistentemente a necessidade de altos investimentos financeiros, a carência de mão de obra qualificada para lidar com sistemas complexos e os desafios técnicos relacionados à integração e segurança de dados entre diferentes plataformas.

Por outro lado, as divergências manifestam-se principalmente no nível de maturidade e no foco de aplicação da tecnologia entre os diferentes setores estudados. Enquanto os artigos voltados para a indústria geral e aeroespacial apresentam modelos de *Digital Twins* mais maduros, com foco em monitoramento do ciclo de vida e manutenção preditiva autônoma, os estudos aplicados ao setor de alimentos ainda se encontram em estágios iniciais, focando majoritariamente no monitoramento passivo. Além disso, nota-se uma variação na abordagem metodológica: alguns autores priorizam a criação de estruturas conceituais e ontologias para organizar o conhecimento técnico, enquanto outros focam em análises quantitativas para medir o impacto financeiro direto da digitalização nos resultados das empresas.

2.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A investigação empregou uma revisão integrativa da literatura com o objetivo de identificar e analisar a relação entre o *Digital Twin* e a indústria de alimentos, por meio do exame das publicações científicas no período de 2019 a 2024. Os resultados obtidos permitiram alcançar o objetivo proposto e ampliar a compreensão sobre as aplicações e potencialidades dessa tecnologia no contexto industrial. Além de contribuir para a sistematização do conhecimento existente, a análise possibilitou identificar informações relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como tendências e perspectivas capazes de subsidiar estudos futuros sobre a aplicação do *Digital Twin* na indústria de alimentos e em outros contextos produtivos.

Possivelmente será o próximo passo na revolução das indústrias, junto com a indústria 4.0, IoT e *Big Data*. A capacidade de análise, simulação de resultados, velocidade para tomada de decisão e assertividade do DT serão amplamente utilizados nas indústrias de manufatura e prestadoras de serviços, aumentando a competitividade, reduzindo perdas e custos, melhorando resultados operacionais, tornando as empresas cada vez mais sustentáveis.

Porém, destaca-se que essa ferramenta ainda não é de fácil acesso. As indústrias precisam estar preparadas estruturalmente para aplicá-las. É necessário que haja um mínimo exigido para que o *Digital Twin* possa ser executado e obtido resultados. Bancos de dados precisam ser criados para os desenvolvimentos dos modelos. Tal estrutura e suporte ainda desprende um valor considerável, que as empresas precisam estar preparadas para suportar.

Outro ponto evidenciado é o desenvolvimento das pessoas para trabalhar com o sistema. Seja para suporte técnico da “máquina”, seja para análise e entendimentos dos resultados obtidos. Precisa-se de mão de obra especializada, desenvolvimento de hard skills, este é um ponto que necessita ser levado em consideração.

Apesar dos resultados positivos apresentados pelos estudos analisados, bem como das contribuições relacionadas às técnicas e definições do *Digital Twin*, observa-se que a aplicação dessa tecnologia na cadeia de alimentos ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento. Em outros setores, como o aeronáutico, sua utilização ocorre há mais tempo e apresenta maior nível de maturidade. Esse cenário contribui para explicar a limitada disponibilidade de estudos diretamente relacionados à aplicação do *Digital Twin* na indústria avícola, evidenciando uma lacuna na literatura e, conseqüentemente, uma oportunidade para o desenvolvimento de novas pesquisas nessa área. A dificuldade de uma maior compreensão de como essa tecnologia se portaria de fato neste mesmo negócio.

Em função disso, recomenda-se que futuras análises busquem aplicar a tecnologia em linha de produção de indústria avícola para estudos de casos reais. Se sugere um estudo de caso direcionado a mão de obra específica para trabalhar com o *Digital Twin* e indústrias 4.0, tendo em vista que a quantidade profissional nestas áreas está relacionada com suas recentes aplicações nos negócios. Por fim, cabe uma revisão de artigos relacionados a capacidade multidisciplinar do assunto, tendo em vista o quão esse assunto foi mencionado nos artigos lidos e a importância dele para o meio acadêmico e as indústrias.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este estudo estabeleceu a relação entre o processo produtivo de um setor específico em uma empresa avícola com a tecnologia *Digital Twin*, sob o ponto de vista da eficiência produtiva, controle de perdas e medições de resultados da qualidade. Esse capítulo está dividido em: Abordagem da pesquisa; Delimitação do estudo; Processo de coleta de dados e Procedimentos éticos da pesquisa.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A Tabela 2, apresenta um resumo detalhado da abordagem metodológica adotada nesta pesquisa, destacando os objetivos específicos, a caracterização da pesquisa, fontes dos dados utilizados e resultados esperados.

Tabela 2

Abordagem da pesquisa

Objetivo	Caracterização	Coleta de dados	Resultados
Avaliar o processo do setor de IQF em uma indústria de alimentos no sul do Brasil	Descritivo-exploratório Aplicada	Bases de dados de pesquisa e sites do agronegócio. Cenário da indústria: dados e informações da empresa. Estudo de Caso	Entender a situação do negócio e as possibilidades da aplicação da ferramenta, aplicações futuras em outras unidades, desenvolvimento do projeto e embasamento para pesquisa futuras, conhecimento para a sociedade e academia.
Mapear o processo de IQF, identificando as etapas operacionais, fluxos de trabalho e recursos utilizados	Qualitativo	Empresa pesquisada: monitoramentos do processo, resultado dos indicadores, dados de planta baixa, entrevista com os operadores e controladores	Obteve-se o conhecimento do fluxo, foram compreendidas as entradas e saídas do equipamento, entender as variáveis que o equipamento e processo possam ter.
Simular cenários e condições operacionais, identificando oportunidades para otimização do processo com auxílio de um <i>software</i>	Quantitativo	Indicadores e dados de monitoramento do equipamento. De antes e após aplicação da tecnologia	Esperava-se que, após a aplicação da tecnologia, houvesse impacto de cunho econômico e qualidade tangível.
Analisar as recomendações derivadas dos resultados obtidos na simulação do <i>Digital Twin</i>	Quantitativo	Dados gerados do <i>software</i>	Entender a maneira como os dados podem ser aplicados e sua capacidade de absorção pela empresa.

Quanto aos procedimentos metodológicos o projeto se classifica como: pesquisa aplicada, com abordagem quali-quantitativa. A abordagem se caracteriza qualitativa por buscar a compreensão dos processos, fluxos e interações dos colaboradores que atuam diretamente no processo do setor de IQF. Na perspectiva quantitativa, refere a coleta detalhadas e análise sistemática dos indicadores operacionais, servindo para comparação dos cenários existentes após a implementação da tecnologia do DT, baseada em uma estrutura de análise estatística para garantir a validade do resultado (Schneider et al., 2017).

O objetivo é descritivo-exploratório, pois visa descrever fluxo produtivos e explorar aspectos específicos que ainda não possuem formulações hipotéticas definidas com base nas informações obtidas por meio de estudo empírico (Gil, 2008).

A base da pesquisa científica é aplicada, orientando para solução de problemas práticos específicos. Busca-se compreender como as tecnologias podem otimizar os processos (Zanella, 2013). O projeto foi desenvolvido de forma estruturada, com acompanhamento contínuo das atividades e avaliação dos resultados qualitativos obtidos ao longo de sua execução. Esse processo possibilitou à equipe envolvida realizar os ajustes metodológicos necessários, de acordo com as demandas e particularidades identificadas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Adicionalmente, esta pesquisa é configurada como um estudo de caso devido à sua aplicação direta em um ambiente produtivo específico, permitindo uma análise detalhada e contextualizada das informações coletadas diretamente no local do estudo, favorecendo a relevância e precisão dos resultados obtidos (Prodanov & Freitas, 2013).

3.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Considerando a estrutura organizacional, as atividades de produção e os processos tecnológicos extensos e complexos, este estudo foi delimitado especificamente a um equipamento responsável pela produção do IQF (cortes de frango congelados rápido e individualmente) em um frigorífico situado sul do Brasil. A escolha desse equipamento busca fornecer compreensão do problema, facilitando uma avaliação criteriosa da condição atual do processo e após isso a compilação de dados para a aplicação do estudo proposto. Entre os principais fatores que influenciaram a pesquisa, destaca-se a localização geográfica, a colaboração dos profissionais envolvidos, a tecnologia empregada e o rendimento e custos do processo.

3.2.1 Descrição do local e população em estudo

A empresa selecionada para esta pesquisa é reconhecida internacionalmente como uma das maiores no segmento de processamento de proteína animal. Sua atuação é abrangente, compreendendo segmentos que atendem aos mercados nacional e internacional. A estrutura organizacional da empresa é composta por negócios independentes, com unidades produtivas localizadas em várias regiões do mundo. O presente estudo concentra-se especificamente no negócio de aves, em uma unidade situada na região sul do estado de Santa Catarina, Brasil. A unidade possui mais de 2.000 funcionários no chão de fábrica, com fluxo contínuo de produção e possui equipamentos totalmente automatizados e alguns com tecnologia de ponta e inteligência artificial.

A seguir é apresentado o fluxo produtivo da unidade, da incubação de ovos até expedição do produto. O fluxo é contínuo e subdividido em etapas claramente definidas e estruturadas, sendo as principais detalhadas a seguir:

Incubatório: apesar de existir etapas anteriores ao IQF, é a primeira etapa dedicada a região onde encontra-se a unidade objeto do estudo. O processo tem início no incubatório, local destinado a recepção, desinfecção, armazenamento e incubação de ovos férteis. O ambiente do incubatório é totalmente controlado quanto a temperatura, umidade, ventilação e acima de tudo, biossegurança.

Alojamento e criação: as aves recém-nascidas são transportadas em caminhões com controle de ambiente e rígidos protocolos de biossegurança até os aviários nas propriedades rurais integradas. Integração é um sistema de produção onde a empresa e um produtor rural firmam parceria para criar as aves. Os aviários são preparados seguindo padrão de biossegurança e qualidade, com ambiente térmico controlado mecanicamente. O período que ficam nos aviários é suficiente para alcançar o peso de abate entre 2,700 e 3,000 kg.

Transporte: após atingirem o peso para abate, as aves são transportadas em gaiolas e caminhões que atendem as normas do bem-estar animal.

As etapas a seguir são exclusivamente do abatedouro, que seguem as leis do Sistema de Inspeção Federal (SIF) que é composta por múltiplos setores independentes que foram projetados para segurança alimentar e atender os padrões e legislações nacionais e internacionais baseado nas portarias do Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA).

Linha de recepção e abate: após chegada as aves são descarregadas e penduradas manualmente em uma linha automatizada e encaminhada a insensibilização elétrica, seguida da sangria automática com revisão manual, nessa etapa o foco é garantir o bem-estar animal e a retirada de todo o sangue. Na etapa seguinte, as aves passam pela escaldagem, que são tanques

com água aquecida entre 40º e 54º para facilitar a depenagem. Após esse processo, as aves são evisceradas de forma automática.

Resfriamento: após evisceração completa e inspeção, as carcaças são submetidas ao pré-resfriamento etapa fundamental para redução da carga microbiológica do produto, garantindo a segurança alimentar.

Corte e desossa: após resfriamento as carcaças são direcionadas para a sala de cortes, onde são divididas automaticamente em 03 famílias: peito, perna e asa. Cada grupo possui linha específica, com equipamentos de alta precisão para cortes e com controles de perdas, rendimento e qualidade. Cada família, pode gerar vários *Stock Keeping Unit (SKU's)* que depende do mix de produção. Os principais em cada família são: Peito: Meio peito, filé de peito, peito inteiro e peito em cubos. Perna: Perna desossada, com várias gramaturas, coxa, sobrecoxa, filé de perna e cubos de perna desossada e Asa: Meio da asa, coxinha da asa e meio com coxinha da asa. Desta etapa, os cortes podem seguir 02 caminhos: Embalagem primária ou IQF.

IQF: Setor que representa uma das etapas mais tecnológicas e estratégicas do frigorífico. Nesta etapa, os cortes, que podem ser de qualquer família, são congelados individualmente de forma rápida, 30 min a 120 min, dependendo do tamanho. O processo ocorre por meio de um túnel de ar forçado com temperatura entre -35ºC a -45ºC. A tecnologia do IQF permite que as características dos produtos sejam mantidas e após o seu descongelamento mantenha a sua textura natural. A vantagem mercadológica é considerável, visto que o produto tem ciclo de congelamento rápido, validade grande e a possibilidade de o consumidor utilizar a quantidade de peças que quiser. O produto congelado individualmente permite seu consumo unitário. Este processo é controlado por sistemas que monitoram tempo, temperatura, velocidade e fluxo de ar. Neste mesmo setor, o produto logo em seguida é pesado e embalado automaticamente, aferido peso, passa por um detector de metais e segue para embalagem secundária.

Embalagem primária e secundária: após os cortes realizados, os produtos são inseridos em suas embalagens primárias, processo que pode ser no final da linha. Nesta etapa, os produtos são aferidos conforme peso, são adicionados os carimbos com validade e rastreabilidade. Na etapa seguinte, embalagem secundária, são acondicionados em caixas de papelão e a seguir são encaminhadas ao congelamento e expedição.

Congelamento: após a acomodação nas caixas, os produtos são direcionados para o túnel de congelamento, semelhante ao IQF que opera com ar forçado com temperatura entre -25ºC a -35ºC. Porém, por já estarem com o produto embalado em caixas de papelão e com um volume maior, o tempo para atingir a temperatura desejada é em torno de 24 horas.

Armazenamento e expedição: os produtos acabados são armazenados em câmaras frias, com controle de temperatura para manter os produtos congelados a temperatura em torno de - 21°C. A expedição é organizada conforme programação logística e mercado. As cargas são conferidas por sistemas eletrônicos e obedecem aos critérios de liberação do SIF e normas para transporte de alimentos e perecíveis vigentes.

Transporte e Distribuição: o transporte dos produtos acabados, congelados ou resfriados, são realizados por meio de veículos frigorificados ou contêineres, equipados com registradores de temperatura em tempo real e sistema de rastreamento, assegurando o controle e manutenção da cadeia de frio por todo o percurso. A distribuição abrange Centro de Distribuição (CDs) nacionais e internacionais e podem ser dedicadas ao cliente com rotas definidas pela programação logística.

Toda a operação segue protocolos de autocontrole (BPF – Boas Práticas de Fabricação, PPHO - Procedimentos Padronizados de Higiene Operacional e APPCC - Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle), atendendo a requisitos para certificação internacional da qualidade e segurança alimentar.

3.2.2 Etapas da pesquisa

Na Tabela 3, foi elaborado um esquema apresentado o método da pesquisa até maneira prevista para análise de dados.

Tabela 3

Método de pesquisa

Fase	Etapas	Técnicas / Metodologias Utilizadas	Descrição
Fase 1 Planejamento da Pesquisa	Definição do problema e objetivos	Pesquisa exploratória; análise documental; observação de campo inicial.	Identificação do problema de pesquisa, formulação dos objetivos geral e específicos e justificativa.
Fase 2 Revisão da Literatura	Revisão narrativa	Revisão narrativa; análise teórica e contextual.	Fundamentação teórica sobre <i>Digital Twin</i> , Indústria 4.0 e avicultura, definindo conceitos e relações teóricas.
	Revisão integrativa e bibliometria	Revisão integrativa; bibliometria; uso de software VOSviewer e Microsoft Excel.	Levantamento sistemático em Scopus e Web of Science (acesso aberto), análise com VOSviewer e Excel.
Fase 3 Estruturação e Delimitação do Estudo	Estrutura conceitual e proposições	Análise dedutiva; modelagem conceitual; correlação teórico-empírica.	Construção do modelo conceitual e alinhamento com objetivos e hipóteses do estudo.
	Caracterização do estudo	Pesquisa aplicada; estudo de caso; abordagem qualitativa e quantitativa.	Definição do tipo de pesquisa, local, população e recorte (setor IQF da indústria de alimentos).
Fase 4 Coleta e Análise de Dados	Planejamento da coleta de dados	Planejamento experimental; definição de indicadores de desempenho (produtividade, rendimento, perdas).	Seleção das variáveis e indicadores; elaboração dos instrumentos e fontes de coleta.

Coleta de dados	Observação direta; coleta documental; registro de dados operacionais.	Mapeamento do processo produtivo (IQF), coleta de registros históricos e dados em tempo real.
Análise de dados	Estatística descritiva; análise comparativa; síntese interpretativa.	Tratamento e consolidação dos dados; análise estatística descritiva; cálculo de produtividade, rendimento e perdas.

Fonte: Adaptado de Programação de atividades para subempreiteiros de pequenos serviços: proposta baseada em estudo de caso de Guimarães Filho, 2003

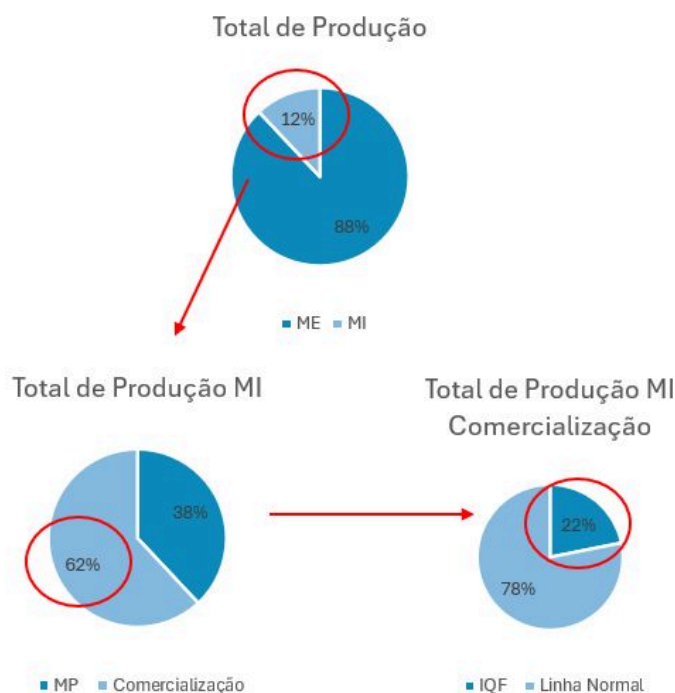
Na fase 1, foi realizado a definição do problema e elaboração dos objetivos, com a finalidade de sanear um problema existente. Na fase 2, buscou-se entender o estado da arte das principais áreas envolvidas na pesquisa. Na fase 3, ocorreu as delimitações no local de estudo e por fim, na fase 4 foram preconizados os tipos de coletas e o tratamento para os dados.

3.3 COLETA DE DADOS

A presente pesquisa foi realizada no setor de IQF (*Individual Quick Freezing*) em um frigorífico de aves. A escolha desse setor deve-se a fatores técnicos, operacionais e estratégicos, que justificam a sua relevância para a aplicação do estudo. A unidade produz em média 320 toneladas de produto acabado por dia. Do total desse volume, em torno de 88% é direcionado para o Mercado Externo (ME) e 12% é direcionado para Mercado interno (MI). Desses 12%, o que é equivalente a 38,4 toneladas diárias de produção, 38% são direcionados para Matéria Prima (MP) e 62% para comercialização, equivalente a 23,8 toneladas, destas 22% são direcionados ao IQF. A Figura 10, mostra os percentuais em cada produção.

Figura 10

Distribuição da produção



Para o ME, são necessárias habilitações para exportações, essas habilitações ocorrem após auditorias que avaliam os requisitos para os países ou regiões em conjunto com as conformidades exigidas pelo SIF.

As vendas são realizadas em médio e longo prazo previamente, a produção para o ME é estável e contínua e toda e qualquer ação em linha irá repercutir em meses. Para o MI, há três exigências legais: o Sistema de Inspeção Municipal (SIM), Sistema de Inspeção Estadual (SIE) e Sistema de Inspeção Federal (SIF). O SIM é o regulamento e fiscalização para produtos que serão comercializados dentro do Município, o SIE é o regulamento e fiscalização para produtos que serão comercializados dentro do Estado e o SIF que é necessário para poder comercializar dentro do país e para exportações. No caso do frigorífico em estudo que possui o SIF, automaticamente abrange os outros sistemas de inspeção.

A negociação de venda para o MI é mais rápida, apesar de existir um plano de produção previamente definido que acaba flutuando conforme o consumo do mercado. Existe itens de produção que em apenas 10 horas após a produção estão no mercado. Assim qualquer ação no MI tem retorno muito mais rápido.

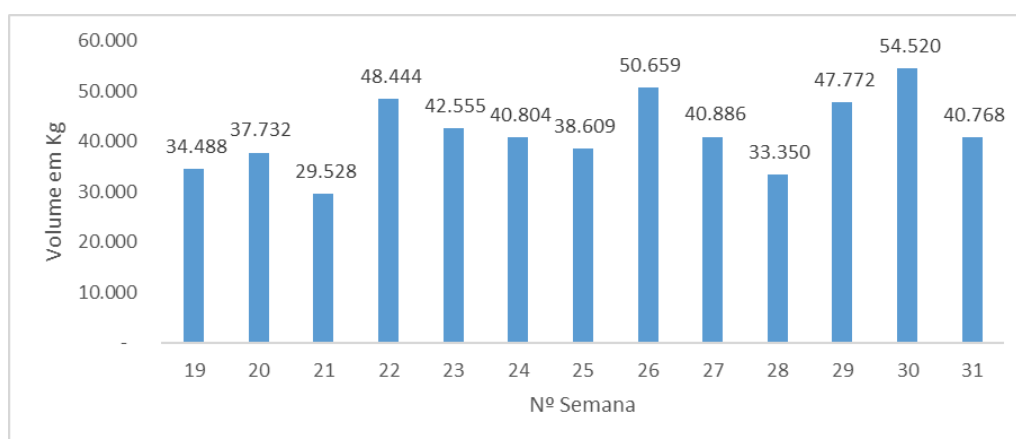
Dentro do MI está incluído a produção de IQF em torno de 41,5 toneladas por semana, média de Maio a Julho produzidos. Isso representa em torno de 15% da produção do MI da

unidade. O IQF pelo seu volume de produção, velocidade de produção, *shelf life* (prazo de validade) permite mais tempo em gondola e alto valor agregado, é o item com maior capacidade de retorno para a unidade.

Em relação ao volume, a produção não está estável, percebe-se uma variação de produção entre as semanas no período, conforme observa-se na Figura 11. Abaixo, é possível ver semanas com produção entre 29 e 33 toneladas e semanas de mais de 50 toneladas. Uma diferença de mais de 17 toneladas.

Figura 11

Volume de produção por semana



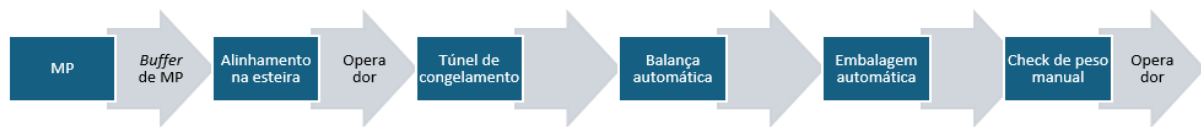
Ligado a essa diferença de produção, pode-se citar problemas como a instabilidade da produção que pode gerar ruptura no cliente e custos para a unidade com contratos e volumes não atendidos. A insatisfação com a marca vai reduzindo a parcela do mercado para determinado item perdendo a fatia, além do valor agregado reduzido do faturamento, há o aumento do poder da concorrência e o problema de gestão do setor produtivo.

Vale salientar que com o tempo ocorre a desmotivação e a saída dos colaboradores do setor ou até mesmo da unidade, buscando novos desafios. Além da equipe com baixo desempenho, não atende a produção e o cliente, assim os problemas acabam voltando para a unidade.

A Figura 12 mostra o fluxograma do setor do IQF, na entrada do processo, o primeiro ponto que envolve a matéria prima é o *buffer*, local onde é armazenado o produto proveniente da sala de cortes.

Figura 12

Fluxograma setor IQF



A composição é baseada no mix disponível pela unidade para comercialização, basicamente é composta por 11 SKU's: 02 de coxinha da asa, 01 de coxa, 01 meio da asa, 02 de sobrecoxa, 02 de file de sobrecoxa, 02 de file de peito e 01 de filezinho. Na Figura 13, apresentado os SKU's de coxa, coxinha da asa, peito, meio da asa e filezinho.

Figura 13

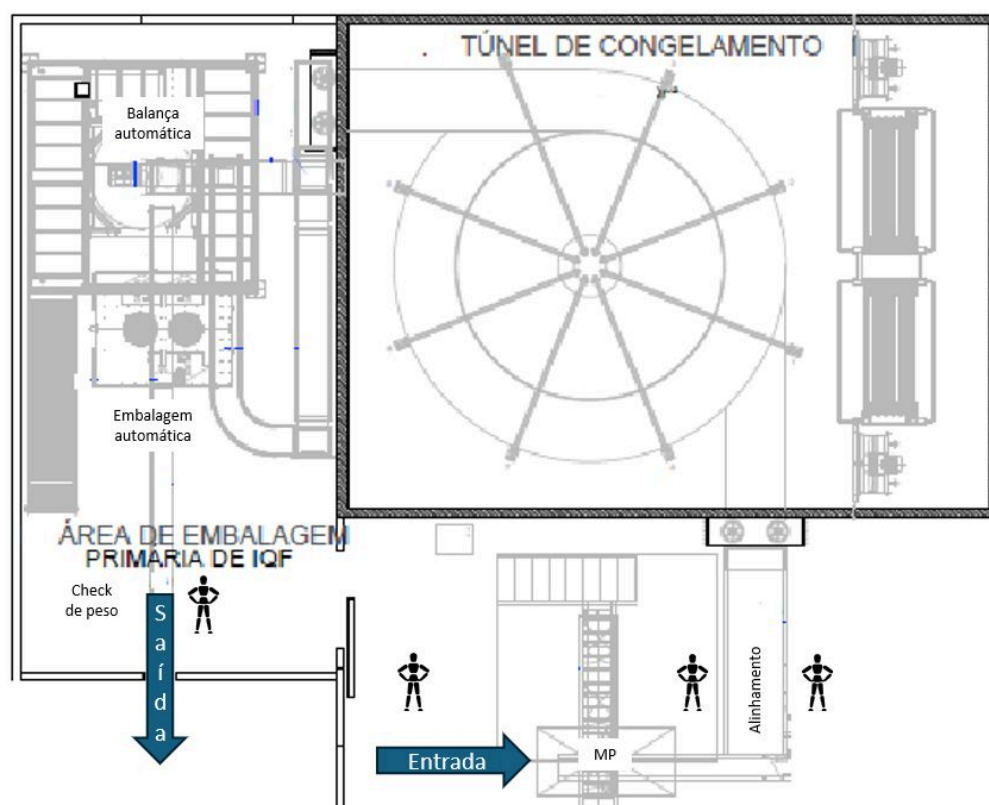
Principais MP's do setor de IQF



Para apresentar o setor, foram incluídas as Figuras 14 e 15. Na Figura 14, observa-se a planta baixa do setor, complementando o fluxograma da Figura 12.

Figura 14

Planta baixa setor IQF



A Figura 15 mostra as principais etapas do setor de IQF.

Figura 15

Etapas do setor de IQF



O *buffer* é abastecido pela sala de cortes, Figura 15 - imagem 01 e assim que o produto é consumido, logo é repostado por um dos itens citados. O produto segue por esteiras onde dois colaboradores, Figura 15 - imagem 02, distribuem e alinham o produto na esteira que vai alimentar o túnel de congelamento. Como o produto é congelado individualmente a necessidade dessa função é evitar que o produto fique sobreposto e consequentemente perca sua principal característica. Esses colaboradores devem ficar 100% do tempo nos seus postos, por ser uma demanda dedicada e indispensável para o atendimento da produção, qualidade e rendimento do IQF.

No fim dessa esteira, o produto entra no túnel de congelamento, Figura 15 - imagem 03, que possui uma esteira de 430 metros de comprimento e recebe ar forçado entre -35°C a -45°C, onde as peças são congeladas de maneira rápida e uniformemente. Após esse processo as peças não irão mais aderir umas às outras e é possível armazená-las por um período de até um ano. Na saída do túnel de congelamento, Figura 15 - imagem 04, as peças são direcionadas por esteira para uma balança automática, que é composta por um carrossel de bandejas com sensores de peso, Figura 15 - imagem 05. A partir desse ponto as peças vão deslocando, por gravidade ou manualmente para as bandejas e quando uma determinada composição atende ao peso alvo estipulado na máquina, 600 ou 1.000 gramas, será encaminhada para a próxima etapa.

Na próxima etapa, o volume de peças corresponde ao peso alvo, cai por um funil e fica alojado na base de um filme plástico, o equipamento força o filme pelo funil, fazendo ele tomar forma de embalagem e fecha a lateral e o topo do filme, transformando assim na própria embalagem do produto (Figura 15 - imagem 06). Na sequência segue por uma esteira para a conferência do peso (Figura 15 - imagem 07), para garantir que o produto está com mínimo do peso alvo e informado na embalagem que o consumidor adquirirá.

No setor, estão presentes operadores de máquinas, responsáveis pelas regulagens dos equipamentos e operadores de produção. Esses processos demandam decisões constantes por parte dos operadores, criando um ciclo contínuo de interação. Para cada etapa há padrões e parâmetros específicos para serem cumpridos, bem como indicadores que medem essas etapas e que servem de garantia para os processos seguintes. Esses operadores constituíram os principais participantes do projeto, contribuindo para a coleta de dados e para o desenvolvimento e a implementação das ações de melhoria propostas a partir dos resultados da pesquisa.

Por fim e mais importante, o grande motivador do projeto de pesquisa ser no setor de IQF foi por solicitação da empresa. A Tabela 4, apresenta a definição estratégica da necessidade de aumento de produção do IQF.

Tabela 4*Definição estratégica*

Estratégia	Motivos Principais
Mercado e Receita	Demanda MI, valor agregado, novos contratos, diversificação de clientes
Operação e Eficiência	Eliminar gargalos, reduzir perdas, melhorar rendimento e uso energético
Gestão e Competitividade	Inovação, imagem institucional e sustentabilidade

A unidade possui a meta de aumentar a produção de IQF, com a seguinte proposição: i) atender a demanda crescente do mercado, sem a possibilidade de canibalização do ME; ii) aumentar o valor agregado do Mix de produção da unidade, levando em consideração que o IQF possui maior margem comparada ao produto normal e maior *shelf life* considerando com o produto resfriado; iii) reduzir perdas, visto que o IQF é possível aproveitar peças menores e iv) melhorar equilíbrio na fábrica, levando em consideração que quando parte do produto sai da linha principal e do congelamento principal fazem o fluxo completo no IQF, reduzindo a carga dos outros setores, ganho logístico e de armazenamento.

A coleta de dados foi realizada de forma sistemática e estruturada, buscando informações sobre o estado atual e os impactos com base nas alterações propostas. O processo da coleta contemplou dados quantitativos, oriundos dos processos internos da empresa e dados qualitativos.

Os dados operacionais foram obtidos a partir do apontamento de produção do setor, foram registrados diariamente e sistematicamente por operadores de produção. Em complemento, entrevistas direcionadas e observações diretas foram realizadas, com o intuito de avaliar outras variáveis que afetavam o desempenho do processo e como se deu a tomada de decisão.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

Após a etapa de coleta, os dados foram submetidos a um processo de análise comparativa, visando identificar os efeitos da aplicação da tecnologia no desempenho operacional do setor onde foi feito o estudo. Para isso, foram utilizados recursos estatísticos por meio do software IBM SPSS, com o apoio técnico, a fim de assegurar a acurácia na interpretação dos resultados.

A análise foi conduzida com base nos dados coletados antes e depois da implementação da proposta do *Digital Twin*, o que possibilitou a avaliação de diferenças significativas entre o

cenário. Este processo visou oferecer suporte empírico à validação da eficácia da tecnologia aplicada, contribuindo para o embasamento de futuras decisões operacionais e acadêmicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os trabalhos realizados no chão de fábrica, sistemática das tarefas, reuniões da equipe e discussões sobre os resultados encontrados.

4.1 CONTEXTO DA OPERAÇÃO

O setor de congelamento rápido individual IQF, é uma área crítica e estratégica no processamento industrial de carnes de aves, desempenha um papel essencial em garantir a padronização térmica do produto e ao mesmo tempo preservar suas características sensoriais, físico-químicas e microbiológicas essenciais para manter os padrões da qualidade e segurança alimentar do produto (GUIMARÃES, 2022). A eficiência e o desempenho deste setor na cadeia de processamento de aves têm influência direta na qualidade do produto acabado, na produtividade da indústria e na eficiência energética do processo geral de congelamento de todo o sistema da produção. Esses são pontos vitais para um resultado operacional que justifique toda a energia despendida.

Na indústria de alimentos, os sistemas produtivos têm elevada interdependências entre os processos, variabilidade e características da matéria prima. Esses pontos tornam a análise sistêmica do processo produtivos fundamental para identificar oportunidades de melhorias, qualidade e produtividade.

Sob a perspectiva operacional, o processo do IQF é complexo e depende de vários fatores. A regularidade do fluxo de produção de matéria prima de processos anteriores, padronização e constância da alimentação das esteiras e túnel de congelamento, estabilidade dos procedimentos operacionais do túnel são variáveis no fluxo de entrada que podem resultar em instabilidade ou paradas de produção fora da programação que tem o potencial de comprometer o processo e consequentemente diminuir o desempenho e eficiência de todo o sistema.

Além disso, o setor de IQF possui interdependência das etapas subsequentes. O setor de embalagem e expedição precisam estar em operação contínua e sincronizada para reduzir os riscos dos gargalos internos, ociosidade dos equipamentos e desperdícios operacionais que impactam na produtividade e qualidade. Nessa estrutura, o desempenho geral e eficiência do sistema produtivo não dependem somente dos equipamentos do setor do IQF, mas, da integração e estabilidade do fluxo de produção.

Neste contexto de ambientes de produção complexos, dinâmicos e exigentes, a tarefa de identificar os gargalos operacionais por meio da observação, apresenta grandes limitações, já que

o número de fatores que podem influenciar no resultado é relacionado com as variáveis operacionais, organizacionais e tecnológicas que podem variar constantemente. Em contrapartida, há a necessidade de adotar metodologias analíticas capazes de representar o sistema de maneira holística, facilitando a compreensão da dinâmica e identificação das oportunidades para melhorias e otimizações contínuas.

4.2 ABORDAGEM DO PROCESSO PRODUTIVO

4.2.1 *Gemba Walk* e Observações

Para iniciar os trabalhos, foi definido uma equipe multidisciplinar dos colaboradores. Em conversas preliminares, viu-se a necessidade de pessoas de todas as áreas. Para tal, foram envolvidos colaboradores da produção, sendo eles coordenadores, supervisores e líderes do setor. Do setor da qualidade, foram envolvidos dois analistas. Do setor de manutenção foi envolvido o coordenador, o supervisor e dois manutentores. Além disso, participaram um coordenador de PCP e uma coordenadora da gestão. Esse foi o público fixo e frequentemente também eram consultados outros colaboradores, como o responsável pela segurança do trabalho, higienização e operadores diretos.

A fim de deixar os envolvidos com uma compreensão mais abrangente do processo de produção e identificar os fatores que influenciam nos resultados, foi proposto um *Gemba Walk* no setor no IQF. O *Gemba Walk*, teve como objetivo levar os coordenadores e time gerencial para o chão de fábrica a fim de encontrar oportunidades, melhorias e sugestões para aumentar a produtividade. Essa caminhada envolveu observações sobre o trabalho e a busca por entender o comportamento dos colaboradores e operação, permitindo melhorias e agregando valor para a operação (FERREIRA, 2020). Essa atividade foi crucial para o engajamento e colaboração da equipe multidisciplinar.

Por meio dessa observação, foi possível realizar a análise do fluxo operacional, permitindo a identificação de variáveis na taxa de produção, além de facilitar a compreensão das interações que ocorrem entre o equipamento, operadores e materiais envolvidos no processo. A abordagem facilitou a identificação de ineficiências, desperdícios e desvios de processos que frequentemente permaneciam ocultos quanto aos indicadores de processos, que são analisados isolados.

A seguir, são apresentados os pontos observados no *Gemba Walk*. Na Figura 16, apresenta-se o primeiro local da visita, setor de embalagem e pesagem do IQF pós saída do túnel

de congelamento. Houve um consenso predominante no grupo de que o principal gargalo de produtividade residia nesse segmento específico.

Figura 16

Setor de Embalagem e Pesagem do IQF



A Figura 17 é apresenta o equipamento que faz a pesagem das partes das aves para ir ao setor de empacotamento.

Figura 17

Balança Multicabeçal



Este equipamento é um sistema automatizados de alta precisão utilizado para pesar e embalar partes das aves. Na Figura 18, observa-se exemplos de como as peças saem do túnel de congelamento.

Figura 18

Produto pós Túnel na Multicabeçal



É possível perceber que algumas peças estão “aderidas”. Tal situação prejudica a produção, capacidade de congelamento, empacotamento, pesagem e qualidade percebida do produto. Na Figura 19 observa-se duas etapas no mesmo fluxo.

Figura 19

Saída esteira de alimentação x Entrada Túnel de congelamento



A ausência de uma transição orgânica, potencializada pelo descasamento de velocidades e pela distância excessiva entre os equipamentos, compromete o acondicionamento sistemático das peças. Esta falha mecânica não apenas interrompe a fluidez do processo, mas caracteriza um desperdício tangível de matéria-prima, entre as esteiras. Tal cenário demanda intervenções de engenharia de métodos para sincronização de cadência e ajustes estruturais de transpasse, visando a integridade do produto e a maximização do rendimento. A Figura 20, evidencia um ponto até então pouco questionado, a capacidade de peças na esteira.

Figura 20

Esteira de alimentação



Conforme observou-se na Figura 20, a capacidade operacional da esteira não é plenamente utilizada. Essa subutilização pode ser atribuída à disponibilidade intermitente de matéria-prima ou a limitações impostas pelas diretrizes operacionais, resultando em um fluxo visualmente inferior à capacidade máxima do equipamento. Na Figura 21, pode-se observar o início da esteira de alimentação.

Figura 21

Cuba de alimentação



O sistema dispõe de uma cuba de acumulação de produtos, projetada para garantir a continuidade do fluxo e permitir que os operadores realizem o abastecimento da esteira sem interrupções ou tempos improdutivos.

A aplicação do *Gemba Walk* atuou como ferramenta de observação e viabilizou a construção de uma visão compartilhada entre os diversos setores que impactam, direta ou indiretamente, a produtividade do IQF. Essa prática promoveu uma compreensão holística e sistêmica do processo, gerando ideias críticas que fundamentaram as etapas subsequentes da pesquisa.

4.2.2 Mapeamento do Fluxo de Valor

A partir das observações conduzidas durante o *Gemba Walk*, um mapeamento detalhado do fluxo de valor *Value Stream Mapping* (VSM) do setor do IQF foi preparado sistematicamente, com o objetivo de representar e entender o fluxo de informações correspondentes em todo o processo de produção do setor, de maneira coerente e estruturada.

O VSM é uma ferramenta utilizada para construir cenários, levando em consideração o fluxo de materiais e o fluxo de informações, ajudando no processo de visualização da situação atual e preparação para construção futura. É uma ferramenta de baixa tecnologia, apesar de existir *softwares* para montar modelagens complexas, o básico feito em lápis e papel é encorajado

pela empresa, para fazer os envolvidos entenderem o fluxo de valor e buscar cada vez mais a redução de *lead time* do sistema (Vieira, 2006).

A implementação do *Value Stream Mapping* (VSM) viabilizou a identificação das etapas do processo, incluindo tempos de processamento, pontos de espera e interdependências entre as operações. Essa ferramenta proporcionou uma visão sistêmica do fluxo de produção, elemento crítico para a compreensão da dinâmica operacional. Além disso, a abordagem permitiu a distinção entre as atividades que agregam valor e aquelas que constituem desperdício, revelando oportunidades estratégicas para a melhoria contínua e para a elevação da eficiência geral do sistema.

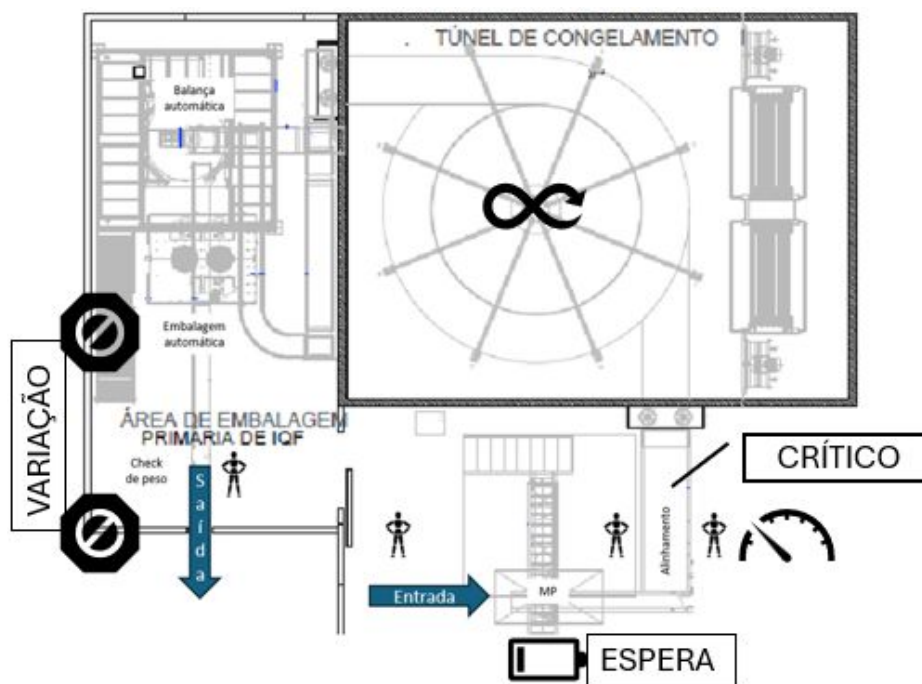
A análise revelou que a estabilidade do fluxo de produção é determinante no desempenho operacional, destacando sua importância para alcançar a eficiência do setor. No período do exercício do mapeamento, foram observadas rupturas no fluxo e variações no ritmo de alimentação do túnel de congelamento, o que resultou em períodos alternados de ociosidade operacional, gerando baixas no processo. Essas oscilações comprometem o fluxo de produção e influenciam no resultado geral de produtividade do setor.

Do ponto de vista da gestão enxuta, identificou-se o desperdício relacionado ao tempo de espera, a variação do fluxo de produção e baixa utilização da capacidade produtiva. Esses desperdícios prejudicam a eficiência operacional e reduzem a previsibilidade dos resultados. Além disso, outros pontos observados que influenciam a estabilidade do processo é a consistência de alimentação do túnel, sincronia entre as etapas do setor e a disponibilidade de matérias primas.

Essas variações na entrada de matéria prima impactam significativamente a uniformidade do processo de congelamento e a utilização efetiva da capacidade disponível do túnel de congelamento. Após o túnel de congelamento, os equipamentos operam em capacidade inferior ao projetado, contudo, ainda podem gerar rupturas no processo e desencadear paradas operacionais, devido à ausência de sistemas de amortecimento de fluxo, pulmões, o que limita a absorção de variações provenientes das etapas anteriores. A Figura 22 apresenta o mapeamento do fluxo de valor para o setor de IQF

Figura 22

Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) do processo IQF



Observa-se na Figura 22 as etapas, pontos de espera e interdependências de cada área. A análise do VSM evidenciou pontos de ociosidade no fluxo produtivo, principalmente na alimentação do túnel de congelamento. Observou-se a existência de tempos de espera entre etapas e variações na disponibilidade de matéria prima. Foi possível identificar falhas de sincronismo entre equipamentos durante o processo. Esses fatores comprometem a estabilidade do fluxo e impactam diretamente na produtividade do setor.

A informações obtidas pela implementação do VSM forneceu embasamento para a modelagem digital do processo, permitindo a representação do comportamento de partes do sistema e a avaliação das simulações geradas. Dessa forma, o mapeamento do fluxo de valor possibilitou compreender a dinâmica operacional do setor IQF e suas interdependências, atendendo ao objetivo específico de mapear o processo produtivo e estabelecendo a base analítica necessária para a identificação das variáveis críticas e para a aplicação do *Digital Twin* nas etapas subsequentes.

4.2.3 Análise de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa)

A fim de aprimorar a compreensão sobre restrições operacionais que foram identificadas durante o *Gemba Walk* e durante o mapeamento de fluxo de valor, foi realizado uma análise de

causa e efeito utilizando o Diagrama de Ishikawa. Esta análise foi conduzida com a participação ativa da equipe multidisciplinar envolvida no processo produtivo. A finalidade do diagrama é identificar a estrutura de causas associadas a um problema específico, permitindo organizar fatores que influenciam o desempenho do processo sob diferentes fatores de produção. Sua aplicação favorece uma análise sistêmica e evita abordagens simplificadas baseadas em causas isoladas, possibilitando compreender a interação entre variáveis operacionais e organizacionais (E. C. de; Oliveira et al., 2024).

Na investigação atual, o foco analítico foi direcionado para variáveis que influenciam na estabilidade do fluxo de produção, juntamente com o desempenho geral do setor de IQF. As possíveis causas associadas foram categorizadas nas dimensões do diagrama, especificamente: Método, Máquina, Matéria prima e Mão de obra. A Figura 23 apresenta o Diagrama de Ishikawa elaborado para a análise das causas associadas à instabilidade do fluxo produtivo no setor IQF.

Figura 23

Análise de causa e efeito das restrições operacionais do setor IQF



No que se refere ao Método, os fatores relacionados envolveram a padronização da alimentação da matéria prima na esteira de alimentação. Observou-se que variações na forma de distribuição do produto sobre a esteira e diferenças nos procedimentos operacionais entre turnos contribuíram sobremaneira, afetando a uniformidade do congelamento e a estabilidade do fluxo.

A análise identificou gargalos críticos na balança multicabeçal, onde a irregularidade nas etapas precedentes dificulta a composição no número de peças para o peso programado. Essa instabilidade reflete diretamente na inspeção de peso, que opera de forma intermitente, ora com subutilização da capacidade, ora sob sobrecarga, evidenciando a ausência de um fluxo contínuo.

Por fim, embora o impacto da Programação e Controle da Produção (PCP) seja de difícil mensuração devido às oscilações do processo, a área foi elencada como causa raiz. A necessidade de intervenção no PCP é estratégica, visando mitigar as variações que comprometeram a previsibilidade e a eficiência global das operações.

Nas máquinas foram identificadas paradas operacionais decorrentes de ajustes, intervenções corretivas e limitações operacionais de alguns sistemas no processo após o túnel. Observou-se que equipamentos operam abaixo da capacidade nominal, porém podem gerar rupturas no fluxo devido à ausência de “pulmões” no processo, tornando o fluxo sensível às variações das etapas anteriores. Três etapas da embalagem apresentaram essa mesma condição. A balança multicabeçal, a seladora e a balança/esteira em função da inspeção de peso.

Em relação aos fatores relacionados à matéria-prima, pode-se observar que as oscilações na entrada de produto influenciam diretamente o ritmo de alimentação do túnel IQF e a percepção dos funcionários referente a ausência de MP em determinados momentos, essas variações impactam a continuidade do fluxo e comprometem o aproveitamento da capacidade instalada.

Sobre a mão de obra, verificou-se diferenças na execução das atividades, especialmente no controle da alimentação sobre a esteira antes do túnel e na resposta às variações de alteração de *mix*. Aspectos como treinamento, experiência e comunicação entre operadores e supervisores, entre setores e os turnos, influenciam a padronização das atividades e a agilidade na tomada de decisão.

A análise conduzida evidenciou que o desempenho do sistema não pode ser atribuído a apenas uma variável, mas ao contrário, é influenciada pela interação de variáveis técnicas, operacionais e organizacionais, reforçando a complexidade inerente ao processo produtivo onde o sistema opera. Além disso, observou-se que as variáveis na alimentação e disponibilidade de matéria prima, juntamente com paradas operacionais, criam um efeito cascata que interrompe o fluxo produtivo.

A utilização do Diagrama de Ishikawa provou ser uma ferramenta valiosa, pois facilitou a abordagem estruturada para a compreensão das causas associadas as restrições operacionais, agilizou a identificação dos gargalos críticos do no processo de produção e orientou a definição das intervenções propostas nas etapas seguintes. A análise estruturada das causas ligadas as restrições operacionais, foi possível identificar variáveis com potencial de ajuste, atendendo ao objetivo específico de identificar fatores críticos que influenciam no desempenho produtivo.

4.3 ANÁLISE E APLICAÇÃO DO *DIGITAL TWIN* NO SETOR

O diagnóstico operacional, conduzido por meio da aplicação do *Gemba Walk*, o mapeamento de fluxo de valor (VSM) e a análise do diagrama de Ishikawa evidenciaram a instabilidade recorrente no fluxo no produtivo do setor de IQF, com oscilações e flutuações no ritmo de alimentação do túnel de congelamento e períodos de subutilização dos equipamentos e dos recursos. Observou-se que esses fenômenos eram tratados de forma empírica, sem aplicação de métricas ou padronização para quantificar seu efeito sobre o desempenho e eficiência geral dos processos. Diante disso, adotou-se a modelagem por *Digital Twin*, no nível de simulação para representar o sistema físico e validar a identificação de restrições e avaliação de cenários. Vale ressaltar que a necessidade de melhoria do setor de IQF partiu de uma necessidade da empresa, para atendimento de mercado, melhor produtividade, redução de custo e perdas e impacto sustentável.

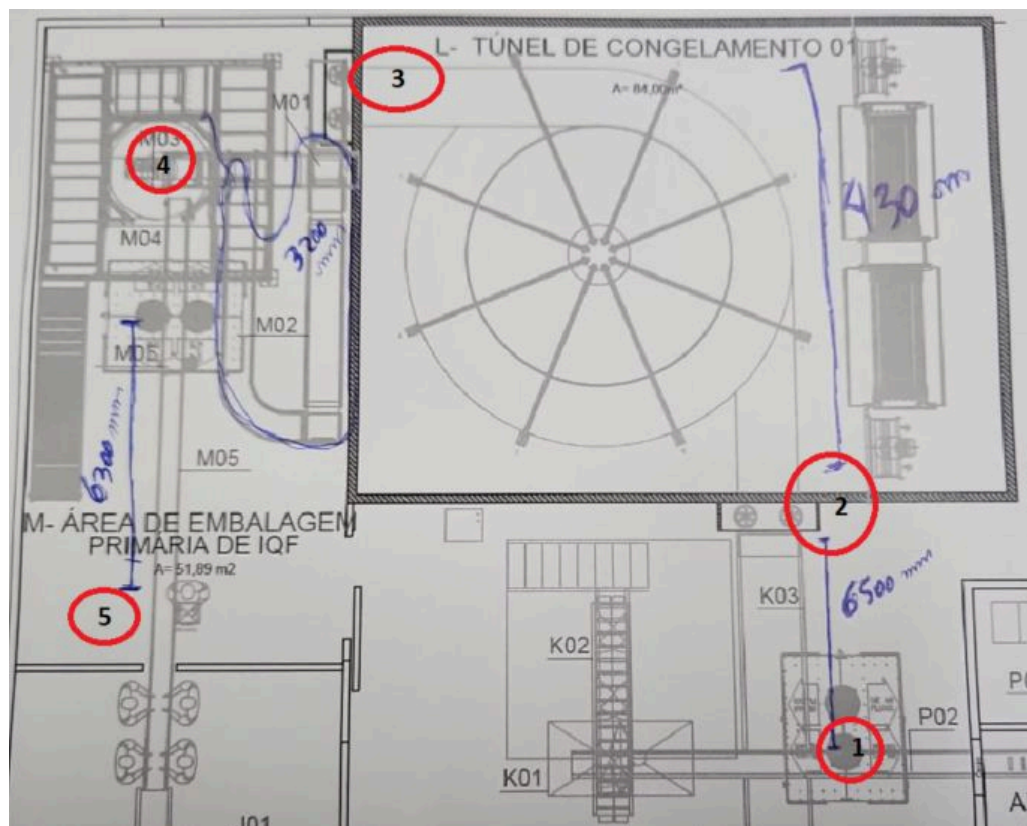
Do ponto de vista da engenharia de produção, o desempenho dos sistemas é condicionado pela interação entre as etapas interdependentes e pela dinâmica do fluxo, não pela eficiência isolada de cada etapa, assim a variabilidade do fluxo tende a amplificar perdas do sistema produtivo (Spearman, 2014). Nesse contexto, identifica-se que a falta de estabilidade do fluxo representa um fator que deve ser considerado para compreender e analisar as perdas de produtividade que podem surgir no setor.

Com base nisso, o conceito inovador do *Digital Twin* foi empregado como uma tecnologia para a modelagem do fluxo de produção, facilitando a representação virtual dos componentes e permitindo a avaliação do cenário operacional de uma maneira que não impacte ou interfira no ambiente real da operação. Para modelar o fluxo de produção foi utilizado o *software Plant Simulation* da Siemens, onde foram parametrizados os tempos médios de processamento de cada equipamento, as capacidades nominais, os registros históricos de produção, os eventos de parada, as dependências entre as etapas e as variabilidades observadas na alimentação. Esses parâmetros foram levantados a partir de observação direta, medições e dados históricos do setor.

A partir desse diagnóstico, a primeira tarefa foi identificar a distância entre os equipamentos. No caso do setor do IQF, conforme Figura 24 identifica-se a forma de alimentação da esteira, desconsiderando o impacto da disponibilidade da matéria prima.

Figura 24

Mapeamento dos equipamentos



Entre a etapa 1 (cuba da alimentação) e a etapa 2 (entrada do túnel) existe 6,5 metros. A distância que separa a etapa 2 e etapa 3 (saída do túnel) é de 4,30 metros. A distância da etapa 3 e a etapa 4 (balança multicabeçal) é de 3,2 metros e pôr fim a distância entre a etapa 4 e etapa 5 (check de peso) é de 6,3 metros. A exceção das etapas 2 e etapa 3 saída do túnel, que o tamanho foi informado pelo fornecedor, todas as outras etapas foram medidas pelo pesquisador junto com algum membro da equipe multidisciplinar.

Este levantamento entre as distancias das etapas foi necessário para representar os tempos de transportes e a capacidade física de matéria prima entre as etapas, permitindo avaliar o efeito de *buffers* do layout e seu impacto na estabilidade do fluxo. Após isso, foram verificadas as capacidades nominais de cada equipamento do setor. Admitindo que a disponibilidade de matéria prima não fosse um problema e teria disponibilidade conforme demanda, iniciou-se pela alimentação da esteira. A esteira é operada por dois funcionários, porém tem posição física e disponibilidade de mão de obra para até quatro operadores, no entanto mesmo operando com metade do contingente, já supre a necessidade da demanda. Neste caso, optou-se para cronometrar estas posições em um segundo momento, após a adequação do projeto.

O segundo equipamento foi a esteira de alimentação que, segundo orientação do fabricante, possui uma capacidade de 8 quilos por metro linear e uma velocidade que pode ser regulada entre 4,1 e 5,8 metros por minuto. Nominalmente ela tem capacidade para 46,4 quilos por minuto ou 2.784 quilos por hora.

O terceiro equipamento estudado foi o túnel de congelamento, cuja capacidade é de 3.000 kg /hora. Para servir de efeito de comparação, conforme Figura 25, a média aparada, tendência central que calculou a média aritmética após remover 0,5% dos valores extremos da amostra, da produção diária entre maio e julho de 2025, período anterior as ações, foi de 6.977 quilos por dia, o equivalente a pouco mais de duas horas de produção do túnel, bem abaixo de sua capacidade.

Figura 25

Dados estatísticos Pré-Projeto

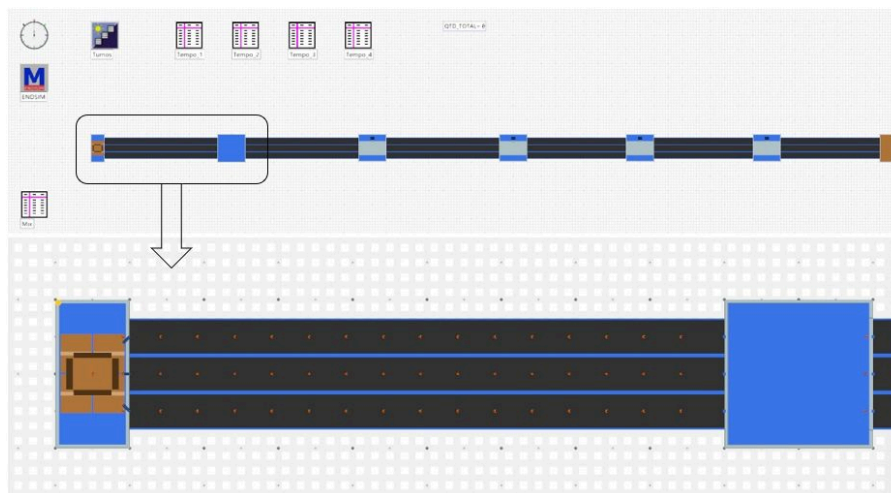
Período			Estatística	Erro Padrão
Volume (Kg)	Pre	Média	6918,1519	299,49613
		95% Intervalo de Confiança para Média	Limite inferior	6321,9009
			Limite superior	7514,4029
		5% da média aparada	6977,7328	
		Mediana	6820,0000	
		Variância	7086136,793	
		Desvio Padrão	2661,97986	
		Mínimo	48,00	
		Máximo	12036,00	
		Intervalo	11988,00	
		Intervalo interquartil	2852,00	
		Assimetria	-,361	,271
		Curtose	-,004	,535

O quarto equipamento foi o conjunto da embalagem, composto por uma balança multicabeçal que distribui as peças e seladora que empacota e sela os pacotes, que possui uma capacidade nominal de 40 pacotes por minuto. Os SKU's disponíveis para produção são apresentados em pacotes de 600 ou 1000 gramas. No cenário de 600 gramas, considerando 40 pacotes por minutos, a seladora poderia fazer até 1.440 quilos em uma hora de produção.

Com esses dados, distância, velocidade e volumes, foi possível modelar e simular a capacidade nominal do setor, mostrando o fluxo contínuo, áreas interdependentes e não possuírem *buffers* de alimentação, conforme Figura 26 e Figura 27.

Figura 26

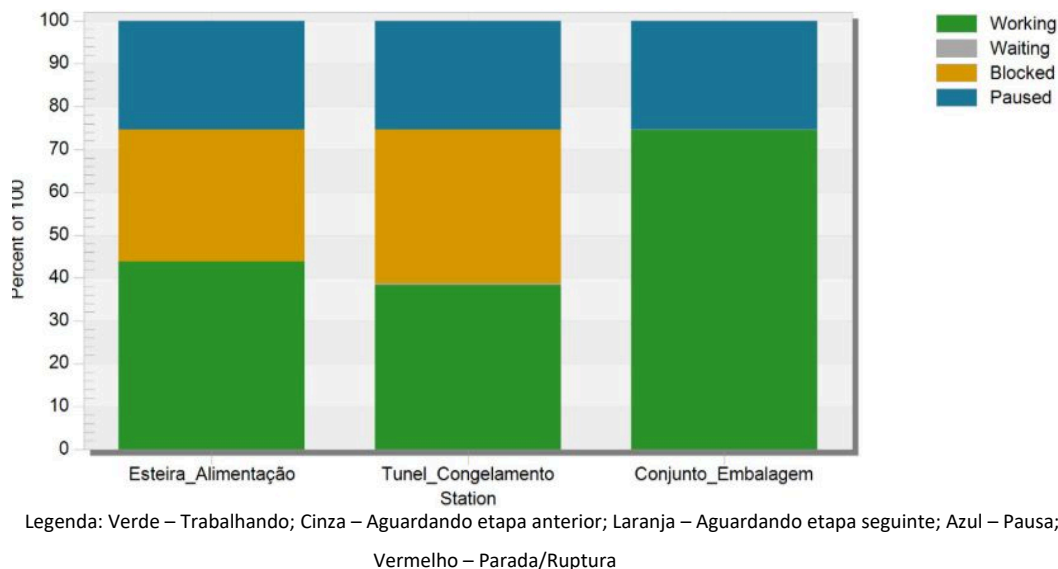
Modelagem do Setor



A modelagem, resultante do *software*, mostra o setor no ambiente virtual com suas etapas distintas, é possível identificar que não há *buffer* entre as etapas definidas.

Figura 27

Simulação Capacidade Nominal



A lista em laranja mostra o tempo parado pela etapa seguinte, no caso o limitante acabou por ser do equipamento da embaladora, com menor capacidade, limitando a produção total em até 1.440 quilos por hora. Apesar dessa condição do equipamento limitante, sem paradas de equipamentos e com matéria prima disponível, o tempo de produção, desconsiderando as paradas para refeições, higienização dos equipamentos, trocas de turno e paradas para o Termo

de Ajusta de Conduta (TAC), fica um saldo de 14 horas de operação, a produção diária tem capacidade nominal de chegar próximo a 20.000 quilos por dia. Número muito superior aos 6.977 quilos produzidos de média.

A partir da modelagem inicial inseriu-se os dados da operação e após isso, analisou-se uma possível ação. Como complemento do diagnostico operacional e parte das saídas do *Gemba Walk* e Diagrama de Ishikawa, foram realizadas entrevistas exploratórias com os profissionais do setor, operadores, supervisores e coordenadores de turno. O objetivo desse acompanhamento foi identificar os fatores que impactam o desempenho do setor. As evidências levantadas foram tratadas como hipóteses operacionais e incorporadas a modelagem de simulação.

De forma convergente, os funcionários relataram a falta de matéria prima frequente no início de cada turno de produção, isso impacta no fluxo contínuo do túnel. A condição implica em perda de produção, impacto na alimentação e desperdício de energia. A Figura 28, mostra o *buffer* temporário para matéria prima do setor para momento de parada e término e início de produção de cada turno.

Figura 28

Câmara Pulmão



Observa-se que no momento a câmara pulmão estava vazia. Cada turno ficava em torno de 40 minutos sem operação, aguardando a disponibilidade de matéria prima do seu próprio turno para início da operação. Esse tempo de 40 minutos, considerando o equipamento com

menor capacidade nominal, resulta em um desperdício em torno de 1.000 quilos por turno, 3.000 quilos por dia.

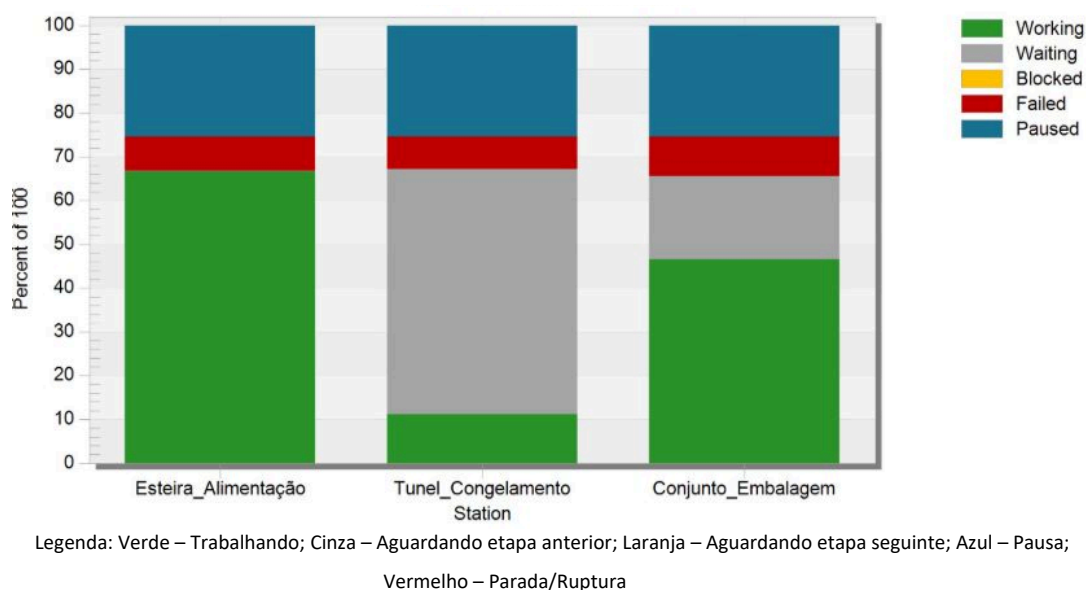
Ainda foram apontadas ocorrências diárias de paradas na etapa de embalagem, desde parada para regulagens operacionais até por quebra e substituição de peças do equipamento. Foi identificado que o equipamento da embalagem opera diariamente com 50% de sua capacidade, na tentativa de se tornar uma etapa com menos ruptura e evitar mais desperdícios. Isso significa que a capacidade nominal que é de 1.440 quilos por hora, na prática observou-se 720 quilos por hora.

De modo geral, os relatos iniciais indicavam a embaladora como a possível restrição do processo, em razão de sua operação abaixo da capacidade nominal. Entretanto, após a inserção dos dados operacionais no modelo de DT, a simulação indicou uma capacidade produtiva de 10.080 quilos diários, valor aproximadamente 3.000 quilos superior à produção realizada no período pré-projeto. Essa diferença evidenciou que o desempenho do setor não estava condicionado exclusivamente à capacidade de um equipamento específico, mas às interações e variabilidades presentes ao longo do fluxo produtivo, o que reforçou a necessidade de uma análise sistêmica do processo para a identificação das restrições que efetivamente impactavam a produtividade.

A percepção inicial apontava que o possível gargalo era a etapa da embalagem, em função da sua baixa capacidade e frequentes paradas operacionais para regulagens e intervenções corretivas. Porém a simulação mostrou resultado diferente, a embalagem absorvia o volume resultante do túnel de congelamento, sem formação de acúmulo no setor. Segundo a teoria das restrições, restrição é o recurso que limita o desempenho geral do sistema, limitando o rendimento organizacional (Watson et al., 2007). Com os dados atualizados no *software*, conforme Figura 29, fica evidente que após a esteira de alimentação, as etapas seguintes ficam esperando produto, possível visualizar pela cor cinza.

Figura 29

Simulação Capacidade Real



Conforme simulação, o gargalo foi na alimentação do túnel. Neste caso, a restrição não era estrutural, mas dinâmica, oriunda da instabilidade do fluxo. A alimentação irregular impediu a utilização total do túnel e da embalagem, impactando no rendimento do setor. O setor da embalagem após a estabilização da alimentação do túnel, se torna o gargalo.

A aplicação do *Digital Twin*, por meio das etapas de modelagem e simulação promoveram uma transição de um modelo reativo para uma abordagem baseada em simulação. Conforme Tao (2018), a integração entre físico e o DT constitui um dos pilares da indústria 4.0, permitindo análises, simulações e decisões estratégicas. O estudo atende assim o objetivo de identificar as variáveis do processo de IQF, que apresentem potencial para análise e ajuste operacional com o auxílio do *Digital Twin*.

Ressalta-se que a jornada do *Digital Twin* está entre os níveis de maturidade 01 *Virtual Twin* e o nível 02 *Simulation Twin*, utilizados para representação e simulação de cenários produtivos, sem interação em tempo real com sistema físico, nível de maturidade 03 – *Connected Twin* e consequentemente sem as etapas seguinte. Essa delimitação é coerente com a maturidade tecnológica disponível no ambiente analisado. A partir desse diagnóstico fundamentado, foram avaliadas as intervenções, descritos na seção seguinte.

4.4 INTERVENÇÕES OPERACIONAIS

A identificação da alimentação do túnel como restrição do fluxo de produção, exigiu intervenções dedicadas a estabilização do sistema. Quando em sistema produtivos interdependentes, o desempenho global é condicionado a etapa que restringe o volume e a melhoria do conjunto depende da atuação sobre essa restrição (Watson et al., 2007).

Com base nas evidências por meio da simulação do sistema produtivo no ambiente de *Digital Twin*, foram avaliados cenários com o objetivo de reduzir a variabilidade do fluxo e elevar a utilização da capacidade instalada do processo. As intervenções implementadas no setor foram definidas a partir dessas análises, buscando estabilizar a alimentação do túnel de congelamento e melhorar a continuidade do fluxo produtivo.

4.4.1 Alimentação da Esteira

A simulação mostrou que a principal fonte de ruptura estava ligada as flutuações e variabilidades associadas a alimentação do túnel de congelamento. Estudos e investigações em dinâmica de sistemas produtivos demonstram que mesmo pequenos desvios ou flutuações no início de um fluxo de produção podem amplificar significativamente a variabilidade em toda a linha de produção, comprometendo o desempenho geral e a eficiência do sistema como um todo (Disney & Towill, 2003).

A ausência de ritmo e volume de alimentação gerava flutuações na ocupação do túnel e etapas seguinte, reduzindo a eficiência operacional. A estabilidade permite um desempenho sustentável das etapas interdependentes.

Com base nas evidências da simulação, definiu-se ações direcionadas para à etapa de alimentação do túnel de congelamento. As intervenções visaram a estabilização do fluxo e a mitigação de desperdícios, destacando-se:

- 1 – Padronização do método da alimentação e definição de parâmetros operacionais visuais;
- 2 – Qualificação dos operadores quanto procedimento operacional;
- 3 – Controle da uniformidade do abastecimento da cuba da alimentação;
- 4 – Intervenção da manutenção para melhorias sistemáticas no setor.

A Figura 30 apresenta a esteira de alimentação, durante o turno de produção.

Figura 30

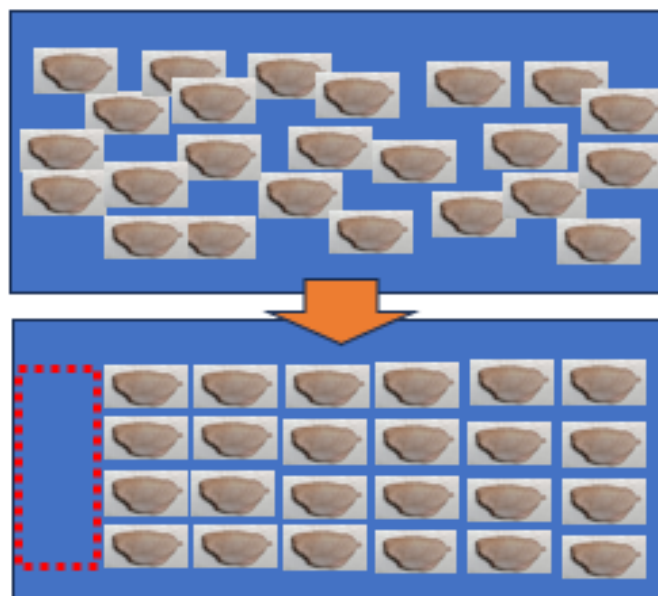
Alimentação da esteira antes da intervenção



Observa-se que a esteira estava sendo subaproveitada, resultante da maneira de alimentação. Para avaliar a capacidade de melhoria na ocupação da esteira, foi realizado um teste operacional com 24 peças posicionados na linha de alimentação. A Figura 31 mostra a esteira organizada conforme procedimento de padronização proposto.

Figura 31

Padronização da alimentação



A reorganização das peças de forma alinhada e padronizada possibilitou a inclusão de 04 unidades no mesmo espaço físico, representando um incremento de aproximadamente 16% na

ocupação. A partir disso iniciou-se o trabalho de gestão da equipe, treinamento sobre a padronização e uniformização da esteira, padrão visual das peças bem próximas umas das outras, mas não sobrepostas para não impactar na qualidade após congelamento e o mais importante a padronização das informações entre os turnos com as mesmas informações para uma gestão de resultado e pessoas. A Figura 32 mostra a instalação das guias de alimentação da esteira.

Figura 32

Instalação das guias de alimentação



Uma das intervenções da manutenção foi a instalação de guias para facilitar a distribuição das peças sobre a esteira, além de tornar a etapa mais visual para os operadores. O resultado da ação nessa etapa, conforme Figura 33, foi uma maior taxa de ocupação da esteira e consequentemente maior ocupação, sem impactar no fluxo atual ou alguma restrição.

Figura 33

Alimentação pós intervenção



Essa melhoria na ocupação da esteira, contribuiu sobremaneira para maior estabilidade na alimentação, reduzindo flutuações no fluxo operacional. Nos processos interdependentes, a estabilidade é fundamental para garantir o fluxo contínuo do setor. Uma segunda intervenção da manutenção foi realizada, buscando melhorar o fluxo entre as etapas e o desperdício da matéria prima, conforme Figura 34.

Figura 34

Alinhamento das esteiras / Cuba de alimentação



No lado esquerdo observa-se o alinhamento e aproximação da esteira de alimentação com a esteira da entrada do túnel de congelamento. Inicialmente estavam em alturas diferentes e mais afastadas, de tal maneira que os produtos após a transferência não ficavam bem-posicionados ou por vezes caíam da esteira.

Uma ação futura, é a redução do tamanho da cuba da alimentação. Atualmente é muito grande e não é ergonômica para os operadores, a manutenção está viabilizando um projeto para que ela seja menor e inclinada, fazendo com que a operação fique mais confortável. Essas ações não foram identificadas por simulação, mas foram sugestões oriundas do *Gemba Walk* e Ishikawa. A redução da variabilidade da entrada da matéria prima, demonstra estabilização no fluxo e aumenta a eficiência, reduzindo perdas por ociosidade (Hopp & Spearman, 2004).

4.4.2 Implementação da Câmara Pulmão

A simulação revelou que o sistema apresentava pouca capacidade de absorção das variações operacionais durante o fluxo, antes ou após o túnel de congelamento. Essa baixa capacidade tornava o sistema suscetível a rupturas de produção. Pesquisas na área gerenciamento de operações, sugerem que *buffers* sejam estruturados e posicionados a fim de reduzir a dispersão da variabilidade e aumentam a resiliência do sistema como um todo, este recurso é utilizado para manter a estabilidade da produtividade do setor (Hopp & Spearman, 2004).

Neste contexto e analisando o fluxo do setor e a interdependência das etapas, a ação foi implementar uma câmara pulmão (*buffer*) no início do setor, sendo o único local possível de execução dessa ação. A câmara já existia no setor, porém era conduzida apenas na gestão dentro de cada turno. Entre turnos não era utilizado, tendo em vista que cada turno é responsável pelo apontamento de produção no período que cabe sua jornada, disponibilizar matéria prima para o turno seguinte era redução de volume apontado no seu próprio turno.

Vale salientar que essa ação resultava em aproximadamente 40 minutos de parada no setor, aguardando a matéria prima do próprio turno ser disponibilizada. Três principais ações foram tomadas para mitigar esse problema:

1 – Reunião com o PCP a fim de melhorar a gestão das matérias primas a fim de evitar paralizações no plano de produção e para sequenciar da melhor forma a composição do mix. Decisões de produção impactam diretamente na variabilidade do sistema e na utilização da capacidade do setor.

2 – Padronização na distribuição da matéria prima para 40 minutos de operação do setor de IQF para o turno seguinte. Essa ação ocorreu junto com a ação tomada PCP, é uma gestão compartilhada entre os turnos e o planejamento. A Figura 35 mostra o antes e depois das ações. Reforça o comprometimento da equipe para o resultado como um todo do setor.

Figura 35

Antes e Depois da Câmara pulmão



3 – Para garantir as ações 1 e 2, foi desenvolvido junto com o setor da qualidade o controle da câmara pulmão.

A planilha de controle possui as principais informações para rastreabilidade e acompanhamento do histórico da matéria prima, como: a hora de entrada, o volume, o produto, a temperatura, a data e horário da saída, a temperatura de saída e quem utilizou a matéria prima. Essa planilha é informada diariamente a cada início e fim de turno para toda a equipe no grupo onde são passadas as informações de produtividade e planejamento. Dessa forma, todos os turnos e gestores acompanham em tempo real se a ação está sendo cumprida.

A introdução de *buffers* podem aumentar significativamente a estabilidade operacional, sem necessidade de ampliação ou reestruturação de fluxo da estrutura física (Donk et al., 2005). Com ações de gestão de equipe, controle de fluxo e operacionais foi possível ter mais estabilidade na produção. Essa ação gerou impacto na alimentação da esteira.

4.4.3 Gestão da Informação, Integração das Equipes e Padronização

A aplicação do DT, trouxe as evidências que decisões anteriores eram em sua maioria, baseadas em percepção operacional, baseada no conhecimento empírico da operação. Estudos relacionados à maturidade digital indicam que a integração entre modelagem, simulação e tomada de decisão contribui para aumentar a qualidade das intervenções e reduzir as incertezas operacionais (Krupitzer et al., 2022a).

A utilização da modelagem possibilitou a visualização integrada do sistema, avaliação detalhada da simulação e a fundamentação técnica para as intervenções. Esta transição de tecnologia está alinhada com evidências empíricas que apontam para sistemas produtivos orientados por dados resultam em maior capacidade de adaptação e desempenho superior (Ivanov; & Dolgui, 2020).

Estudos na área da melhoria contínua e operacional, revelam que a padronização de processos e fluxos são as condições para redução da variabilidade e estabilidade de ganhos (Netland et al., 2016). Todo o projeto, reuniões, ações e implementação das intervenções exigiram alinhamento entre os operadores, supervisores e coordenação, especialmente na parte ligada a disponibilidade de matéria prima e alimentação do túnel de congelamento.

Nesse período foram realizados treinamentos estruturados e conduzidos pelos gestores e áreas técnicas, formalização e padronização de ações operacionais, alinhamentos entre os turnos e áreas de apoio, fortalecimento da equipe multidisciplinar. Segundo Shah & Peter T. Ward (2007), as melhorias sustentáveis em ambientes produtivos dependem da interação entre as áreas técnicas e alinhamento organizacional.

As intervenções implementadas foram obtidas a partir das análises sistêmicas realizada pelo *Digital Twin*, evidenciando a aplicação prática da simulação como ferramenta de análises e suporte a decisão. A atuação sobre a restrição primária identificada e redução da variação do fluxo de produção, as ações propostas atenderam ao objetivo específico de propor melhorias para o processo do setor de IQF.

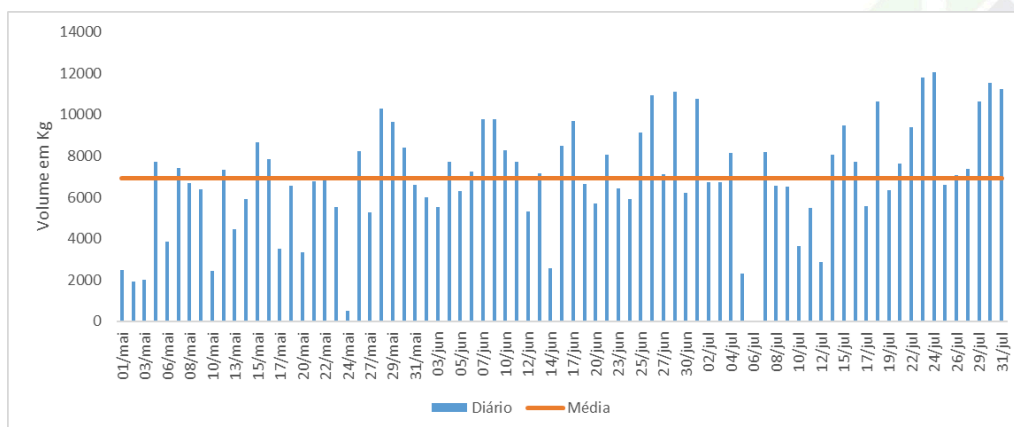
4.5 RESULTADO OPERACIONAL

Após a implementação das ações no setor, foram avaliados os impactos operacionais no setor de *Individually Quick Frozen* (IQF), conduzida por análise comparativa da produção diária em dois períodos distintos da operação. O período pré-projeto, que compreendeu os meses entre maio e julho de 2025, representando a operação anterior a qualquer melhoria oriunda do projeto (análise de fluxo, Gemba Walk, Ishikawa e *Digital Twin*) e o período pós-projeto, correspondente aos meses de setembro a outubro de 2025, momento em que as principais ações já tinham sido implementadas no processo.

A análise utilizou os dados diários de produção, esse nível de detalhamento permitiu observar as variações da operação e facilitou a identificação de alterações na estabilidade do fluxo produtivo na análise de linha do tempo. Dessa forma, foi possível observar as oscilações referentes ao processo produtivo e avaliar de forma mais robusta os efeitos das intervenções. A Figura 36 mostra a produção diária do IQF.

Figura 36

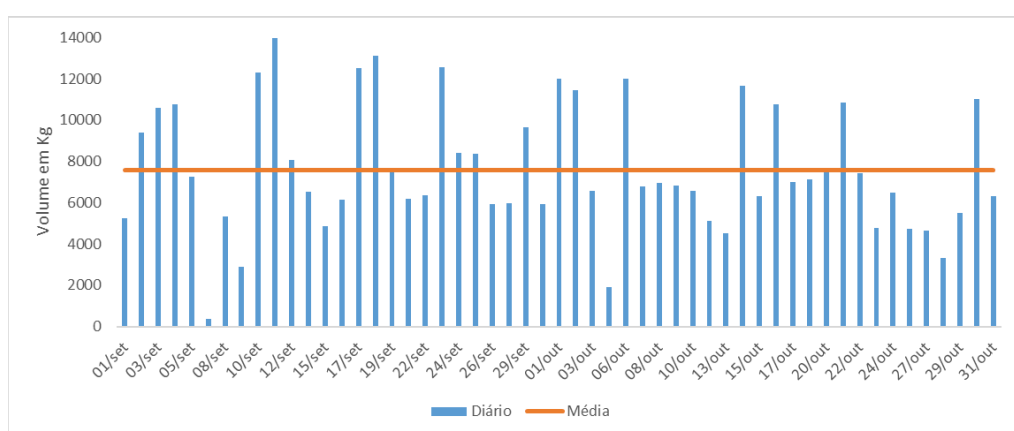
Produção Diária IQF Pré-Projeto



Observa-se que o comportamento da produção diária no período antes das ações propostas evidenciava alta variabilidade operacional, caracterizada por rupturas no volume produzido ao longo dos dias analisados. Essas variações, são associadas as instabilidades identificadas durante o diagnóstico do setor, principalmente relacionadas a irregularidade da alimentação do túnel e a falta de um *buffer* para absorver as variações no fluxo. A Figura 37 mostra a produção diária do setor de IQF após as ações de intervenção propostas.

Figura 37

Produção Diária IQF Pós-Projeto



Observa-se uma maior regularidade no perfil da produção diária. Apesar de apresentar variações inerentes ao processo, é possível perceber maior capacidade do setor em manter níveis mais elevados de produção, indicando maior aproveitamento da capacidade dos equipamentos e maior estabilidade do fluxo de produção.

A análise estatística descritiva evidencia um aumento de produção média diária após a implementação das ações durante o projeto. A média de produção passou de 6.918,15 quilos/dias no período pré-projeto para 7.590,57 quilos/dias no período pós-projeto, representando um adicional de aproximadamente 9,7% na produção média diária. Além do aumento da média de produção diária, é possível observar a ampliação do valor máximo de produção diária, que passou de 12.036 quilos para 13.948 quilos, respectivamente nos dois períodos comparados, evidenciando que o sistema passou a atingir níveis produtivos superiores após a estabilidade do fluxo. Esse resultado implica em melhor utilização da capacidade do setor e maior eficiência do sistema.

Com o objetivo de avaliar estatisticamente a diferença entre os dois períodos analisados, foi aplicado o *test t* de *Student* para amostras independentes, considerando nível de significância de 5%. Conforme Tabela 5, o teste resultou em valor-p de 0,182, indicando que a diferença entre

as médias não apresenta significância estatística a nível de 5%. Ainda assim, é possível observar o aumento consistente na produção média e na capacidade de produção, evidenciando que houve melhoria operacional do setor após as ações do projeto.

Tabela 5

Teste t

	Período		Valor-p (teste t)
	Maio a Julho n = 79	Setembro e Outubro n = 53	
Volume de produção (Kg)			0,182
Média ± DP	6918,15 ± 2661,98	7590,57 ± 3050,76	
Mediana (mín. – máx.)	6820 (48 – 12036)	6826 (384 – 13948)	

Com base no *ticket* médio comercializado dos produtos IQF de aproximadamente R\$11,00 por quilo de produto, o aumento de 672,42 quilos/dia na produção representa um adicional de R\$7.396,62 por dia. Considerando os 53 dias analisados no período pós-projeto, esse ganho estimado corresponde a 35.638 quilos de produtos, o que impacta em um incremento de R\$392.020,00 no período analisado.

Esse resultado evidencia que as ações implementadas no setor, orientadas pela análise do processo e pela simulação do *Digital Twin*, contribuíram para a estabilização do fluxo e geraram impacto econômico relevante para operação como um todo. Do ponto de vista operacional, os resultados obtidos corroboram as evidências identificadas na simulação, que indicaram a alimentação do túnel como principal restrição. Ao reduzir a variabilidade desta etapa e implementar um *buffer*, foi possível aumentar a utilização efetiva da capacidade e melhorar o desempenho global do setor.

5 REPERCUSSÕES E CARÁTER INOVADOR DA PESQUISA

Esta pesquisa analisou a aplicação do conceito do *Digital Twin* em um sistema produtivo do *Individually Quick Frozen* (IQF) em uma indústria avícola, com o objetivo de compreender o fluxo produtivo, identificar as restrições e propor melhorias voltadas a produtividade e estabilidade do fluxo operacional. O caráter inovador integra o diagnóstico operacional, modelagem digital e simulação de cenário produtivo para suporte a tomada de decisão na indústria. Essa pesquisa evidencia a aplicação de tecnologias ligadas à Indústria 4.0 para otimizar e aprimorar processos na indústria de alimentos, contribuindo para a ampliação do conhecimento existente sobre implementação e eficácia do conceito do *Digital Twin* em ambientes industriais.

A investigação é multidisciplinar, mesclando noções de engenharia de produção, gestão de operações, transformação digital e processamento industrial de alimentos.

- I. Repercussão social: *a melhoria da eficiência operacional, contribuiu para o fortalecimento da cadeia de produção e para a sustentabilidade econômica da organização. Ao promover maior estabilidade no processo de produção e melhorar a utilização da capacidade instalada, a pesquisa acadêmica defende ambientes industriais mais organizados e previsíveis, contribuindo para a manutenção dos empregos e reforçando a competitividade no setor. Esses resultados estão alinhados com os princípios do ODS 8, que busca emprego digno e crescimento econômico.*
- II. Repercussão educacional: *a investigação aprimorou o avanço acadêmico ao apresentar uma implementação prática do Digital Twin em ambiente indústria, fornecendo um estudo de caso pertinente para programas de engenharia, gestão de produção e transformação digital. A utilização de modelagem e simulação digital, amplia as oportunidades de ensino e pesquisa nas áreas de inovação industrial e desenvolvimento tecnológico, de acordo com os princípios do ODS 9, que trata da indústria, inovação e infraestrutura.*
- III. Repercussão tecnológica: *do ponto de vista tecnológico, a pesquisa ressalta o potencial do Digital Twin como instrumentos de apoio à análise e otimização de processos produtivos. A modelagem digital permitiu simular cenário operacional e compreender a dinâmica da linha de produção, possibilitando identificar gargalos que não eram plenamente perceptíveis por observações diretas. Essa abordagem fortalece o papel das tecnologias digitais na modernização dos sistemas produtivos e na promoção digital da indústria, de acordo com os princípios do ODS 9, que trata da indústria, inovação e infraestrutura.*
- IV. Repercussão econômica: *os resultados obtidos demonstraram um aumento no resultado produtivo do setor após a execução das ações operacionais, derivadas da análise do Digital Twin. O aumento da produção média diária significa que o aproveitamento da capacidade instalada foi*

maior e gerou maior potencial de valor econômico para a empresa. Esse ganho contribui para fortalecer a competitividade e sustentabilidade industrial para a operação. Aspectos relacionados a ODS 8, que trata de emprego digno e crescimento econômico.

V. Repercussão profissional: *a pesquisa contribui para a formação e desenvolvimento de profissionais capazes de unir conhecimento de engenharia, análise de dados e tecnologias digitais aplicadas na indústria. O emprego das ferramentas de simulação e análise, facilita a preparação de profissionais para operar em ambientes produtivos cada vez mais direcionados por dados e tecnologias digitais, contribuindo para a proliferação de competências associadas a inovação industrial e transformação digitais, elementos promovidos pelo ODS 9, que trata da indústria, inovação e infraestrutura.*

VI. Repercussão ambiental e desenvolvimento territorial: *a otimização do processo produtivo e o melhor aproveitamento da capacidade instalada podem facilitar a utilização mais eficiente de recursos energéticos operacionais. Processos produtivos mais estáveis e eficientes tendem a diminuir as perdas operacionais e os desperdícios, favorecendo práticas industriais alinhadas aos princípios de produção responsável e sustentabilidade ambiental. Os resultados da pesquisa estão com os objetivos delineados nos ODS 12 e 13, que tratam do consumo e produção responsáveis e combate as alterações climáticas.*

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou avaliar a produtividade do *Individually Quick Frozen* (IQF) em um frigorífico de aves, localizado na região sul catarinense, por meio da implementação do conceito de *Digital Twin* como tecnologia analítica e suporte para a tomada de decisões em um contexto industrial. O estudo partiu da necessidade de compreender sistematicamente a operação do processo produtivo e identificar os fatores que impactam no desempenho operacional do setor.

Inicialmente, o mapeamento do processo produtivo foi delineado por meio de observações diretas no meio operacional, aplicação do *Gemba Walk*, elaboração do Mapeamento do Fluxo de Valor e análise de causa e efeito. Essas ferramentas de gestão permitiram a compreensão do fluxo de produção, a identificação das principais variáveis da operação e o conhecimento dos fatores que influenciaram a estabilidade do processo.

A partir dessa avaliação, a representação digital do processo produtivo foi desenvolvida, permitindo a representação virtual da dinâmica do sistema e a avaliação da simulação de cenários produtivos. A aplicação desenvolvida caracteriza-se como uma ferramenta de *Digital Twin* em nível inicial/intermediário de maturidade tecnológica, entre os estágios *Virtual Twin* e *Simulation Twin*, em que o modelo digital é predominantemente utilizado para representar o sistema físico e simular o comportamento do processo sobre diferentes condições operacionais.

Por meio da simulação dos parâmetros operacionais dos equipamentos e análise da dinâmica do fluxo, tornou-se possível identificar a alimentação do túnel de congelamento como a restrição primária do sistema fluxo produtivo do setor. Essa evidência diferiu da percepção inicial da equipe operacional, que indicava a fase de embalagem como a principal limitação do processo. A análise revelou que, apesar de operar abaixo de sua capacidade nominal, a etapa da embalagem ainda possuía capacidade suficiente para absorver o fluxo proveniente do congelamento, enquanto a irregularidade na alimentação do túnel comprometia o aproveitamento ideal da capacidade instalada.

Com base nos resultados das simulações, foram propostas e implementadas ações operacionais voltadas a regularização da alimentação do túnel, alinhamento da programação produtiva e a implementação de uma câmara pulmão para estabilizar o fluxo produtivo. Essas intervenções contribuíram para reduzir a variação do processo e aprimorar a continuidade operacional. O resultado observado após execução dessas ações indicou um aumento de volume médio diário de produção do setor, evidenciando que a estabilização do fluxo produtivo e a melhora da organização das operações contribuíram para o aumento da eficiência do sistema produtivo.

Os resultados obtidos demonstram que a análise sistêmica do processo produtivo, associado com a modelagem digital e a simulação, permitiu a compreensão mais precisa do comportamento do sistema produtivo e a identificação dos principais fatores que influenciava no desempenho do setor. A utilização dos conceitos de *Digital Twin* permitiu a avaliação de diferentes condições operacionais, identificar a principal restrição do processo e o suporte para implementar as ações com poder de melhorar a estabilidade do fluxo de produção e eficiência operacional.

Dessa forma, a pesquisa demonstra que a utilização de modelos digitais para análise e simulação de processos produtivos podem significar uma ferramenta pertinente para facilitar a tomada de decisões em ambientes industriais complexo, contribuindo para a melhoria do desempenho operacional e para o avanço da transformação digital na indústria de alimentos.

6.1 IMPACTOS DA PESQUISA

Os resultados da investigação atual possuem impactos relevantes em diferentes dimensões. Do ponto de vista econômico, o aumento observado na produção média diária indica uma utilização superior da capacidade instalada do sistema produtivo, contribuindo para uma maior eficiência operacional e potencial geração de valor econômico para a organização. A implementação de ferramentas digitais para a análise e otimização do processo produtivo pode ajudar as empresas do setor de alimentos a aumentar a competitividade e melhorar sua gestão dos recursos produtivos.

Na dimensão social, a pesquisa contribui para fortalecimento da cadeia produtiva da industrial de alimentos, setor de grande relevância e impacto para a economia regional e nacional. A melhoria da eficiência produtiva promove a sustentabilidade das indústrias, contribuindo para a preservação dos empregos e para desenvolvimento econômico das regiões onde as empresas estão inseridas.

Sob a perspectiva cultura e institucional, a pesquisa incentiva a proliferação de cultura organizacional orientada por dados e baseadas na análise sistêmica dos processos produtivos. A aplicação de ferramentas digitais para facilitar a tomada de decisões, promove a valorização do conhecimento técnico e na inovação tecnológica das organizações, fomentando a adoção de práticas associadas a transformação digital.

Além disso, os resultados obtidos apresentam alinhamento com os princípios da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, relacionados com o ODS 8 (Emprego Digno e

Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Combate as Alterações Climáticas).

6.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Apesar das contribuições apresentadas, algumas restrições devem ser consideradas. A utilização do *Digital Twin* neste estudo, concentrou-se na modelagem e simulação do processo produtivo, não contemplado a integração total e em tempo real entre o ambiente físico e o modelo digital. Principalmente em função da disponibilidade tecnológica do setor, dessa forma, o modelo desenvolvido representa um estágio inicial de maturidade tecnológica, caracterizado principalmente pela simulação de cenários operacionais.

Nesse contexto, mais dois pontos são extremamente relevantes, a disponibilidade de mão de obra técnica para operar o sistema e a viabilidade do sistema para *Digital Twin*. Por ser relativamente novo, as duas situações caminham lado a lado. Não há profissionais disponíveis com conhecimento no mercado de trabalho e o custo para aquisição, implantação e manter um *Software* ainda é demasiado elevado.

Além disso, o estudo foi aplicado em um único setor produtivo, de uma indústria específica. O que pode restringir a aplicação direta dos resultados para outros contextos industriais. Porém, a metodologia utilizada pode ser ajustada e implementada em diferentes ambientes produtivos, contribuindo assim para análises e otimização de processos em outras organizações.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em conta as limitações identificadas e as perspectivas do avanço tecnológico associado ao conceito do *Digital Twin*, recomenda-se estudo futuros que explorem mais os níveis avançados de integração entre sistemas físicos e digitais.

Uma primeira possibilidade consiste na expansão do modelo para outros setores do processo produtivo, permitindo analisar as interdependências existentes entre diferentes etapas da cadeia industrial. Outra possibilidade está relacionada ao avanço do nível de maturidade tecnológica do *Digital Twin*. A integração do modelo digital com sensores, sistemas de aquisição de dados, Internet das Coisas e bancos de dados operacionais poderá permitir maior aproximação entre o comportamento do sistema físico e sua representação digital.

A incorporação de dados históricos e informações provenientes dos equipamentos também representa uma oportunidade para o desenvolvimento de aplicações preditivas. Estudos futuros poderão investigar a utilização do *Digital Twin* para identificar tendências operacionais, padrões de comportamento e condições que antecedem falhas, quebras e paradas não programadas. A análise integrada dessas informações poderá contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preditiva, permitindo identificar tendências de degradação do desempenho dos equipamentos e estimar a probabilidade de ocorrência de falhas.

Outra possibilidade relevante consiste na integração entre o *Digital Twin*, a gestão da manutenção e o Planejamento e Controle da Produção (PCP). A utilização conjunta de informações relacionadas à condição dos equipamentos, disponibilidade dos recursos, capacidade produtiva e programação da produção poderá contribuir para o desenvolvimento de modelos de decisão mais integrados.

Recomenda-se, ainda, a realização de estudos em outras unidades industriais, setores produtivos e contextos organizacionais. A replicação da abordagem metodológica utilizada nesta pesquisa poderá contribuir para avaliar sua aplicabilidade em diferentes condições operacionais e ampliar a compreensão sobre os fatores tecnológicos, organizacionais e humanos que influenciam a implementação do *Digital Twin* na indústria de alimentos.

Por fim, futuras pesquisas poderão investigar a evolução do modelo desenvolvido em direção a níveis superiores de maturidade tecnológica, avançando progressivamente de uma abordagem baseada na representação e simulação do processo para sistemas conectados, preditivos e prescritivos.

Essa evolução representa uma oportunidade para ampliar a contribuição do *Digital Twin* na gestão dos sistemas produtivos, especialmente em ambientes industriais caracterizados por elevada complexidade e variabilidade operacional. A continuidade dos estudos poderá fortalecer a integração entre pessoas, processos e tecnologias, ampliando a utilização de dados e simulações como suporte à produtividade, à estabilidade operacional, à eficiência dos recursos e à sustentabilidade dos sistemas produtivos.

REFERÊNCIAS

- ABIA. (2023). *Números do setor de alimentos*. <https://abia.org.br/numeros-setor#:~:text=A indústria brasileira de alimentos,seus alimentos para 190 países>
- Abideen, A. Z., Sundram, V. P. K., Pyeman, J., Othman, A. K., & Sorooshian, S. (2021). Food Supply Chain Transformation through Technology and Future Research Directions—A Systematic Review. *Logistics*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/logistics5040083>
- ABPA. (2023). *No Title*. <https://abpa-br.org/estatisticas-setoriais/>
- ABPA. (2024). Relatório Anual 2024. *Associação Brasileira de Proteína Animal*, 28–29. https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf
- Almeida, P. S. de. (2019). *INDÚSTRIA 4.0 - PRINCÍPIOS BÁSICOS, APLICABILIDADE E IMPLANTAÇÃO NA ÁREA INDUSTRIAL*.
- Antonio, A., Bittencourt, V., Alves, A., & Alves, D. L. (2004). Trabalho em Equipe, Manutenção Produtiva Total, Engenharia Simultânea, Tecnologia Integrada por Computador, Célula de Produção, Produção. *Framework*, 372–399.
- Awasthi, K., Padwekar, K., & Misra, S. C. (2024). *Digital Twin* (pp. 1–18). <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7366-5.ch074>
- Belusso, D., & Hespanhol, A. N. (2010). A evolução da avicultura industrial brasileira e seus efeitos territoriais. *Revista Percurso*, 2(1), 25–51. <http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/Percurso/article/view/9855>
- Braga, M. J. (2010). Redes, alianças estratégicas e intercooperação: O caso da cadeia produtiva de carne bovina. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(SUPPL. 1), 11–16. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300002>
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). (2019). Área 45: Interdisciplinar. *Área 45: Interdisciplinar*, 1–23.
- Ding, H., Tian, J., Yu, W., Wang, Z., Li, W., Wilson, D. I., Young, B. R., Cui, X., & Xin, X. (2012). The Application of Artificial Intelligence and Big Data in the Food Industry. *Encyclopedia of Immigrant Health*, 710–711. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5659-0_297
- Disney, S. M., & Towill, D. R. (2003). *The Effect of Vendor Managed Inventory (VMI) Dynamics on the Bullwhip Effect in Supply Chains*. 85(2), 199–215. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00110-5.1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00110-5.1)
- Donk, D. P. Van, Soman, C. A., & Gaalman, G. (2005). *A DECISION AID FOR MAKE-TO-ORDER AND MAKE-TO-STOCK CLASSIFICATION IN FOOD PROCESSING INDUSTRIES*. 1997, 7–8.

- FERREIRA, G. D. S. (2020). *Gemba Kaizen : sua aplicabilidade em uma empresa do setor logístico para melhoria de processo e pessoas.*
- Ferreira, M. D. P., & Vieira Filho, J. E. R. (2019). Inserção no mercado internacional e a produção de carnes no Brasil. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada*, 2479, 42.
- FILHO, L. P. G. (2003). *PROGRAMAÇÃO DE ATIVIDADES PARA SUBEMPREENHEIROS DE PEQUENOS SERVIÇOS: PROPOSTA BASEADA EM ESTUDO DE CASO.*
- Gil, A. C. (2008). Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. In Atlas (Ed.), *Annals of Ophthalmology* (Vol. 10, Issue 1). Editora Altas SA.
- Gondo, R., & Mbaiwa, J. E. (2022). O impacto da tecnologia na indústria de alimentos e bebidas. In *The Palgrave Handbook of Urban Development Planning in Africa* (pp. 75–103).
https://doi.org/10.1007/978-3-031-06089-2_4
- GUIMARÃES, G. M. (2022). *INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE CONGELAMENTO NA.*
- Henrichs, E., Noack, T., Piedrahita, A. M. P., Salem, M. A., Stolz, J., & Krupitzer, C. (2022). Can a byte improve our bite? An analysis of digital twins in the food industry. *Sensors*, 22(1).
<https://doi.org/10.3390/s22010115>
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2004). *To Pull or Not to Pull : What Is the Question ?* 6(2), 133–148.
<https://doi.org/10.1287/msom.1030.0028>
- Huang, Y., Ghadge, A., & Yates, N. (2024). Implementation of digital twins in the food supply chain: a review and conceptual framework. *International Journal of Production Research*, 62(17), 6400–6426. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2305804>
- IBGE. (2022). *Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais.*
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html?=&t=destaques>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). *Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak.* 2904–2915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>
- Jiang, S., & Alkhateeb, A. (2023). *Digital Twin Based Beam Prediction : Can we Train in the Digital World and Deploy in Reality ? i.*
- Klingenberg, C. O., & Antunes, J. A. do V. (2017). Industry 4.0: what makes it a revolution? *EurOMA* 2017, July, 1–10.
- Krupitzer, C., & Noack, T. (2022). *DigiFoodTwin : Digital Biophysical Twins Combined with Machine Learning for Optimizing Food Processing †.*
- Krupitzer, C., Noack, T., & Borsum, C. (2022a). Digital Food Twins Combining Data Science and Food Science: System Model, Applications, and Challenges †. *Processes*, 10(9).

<https://doi.org/10.3390/pr10091781>

Krupitzer, C., Noack, T., & Borsum, C. (2022b). Digital Food Twins Combining Data Science and Food Science: System Model, Applications, and Challenges. *Processes*, 10(9), 1781.

<https://doi.org/10.3390/pr10091781>

Logotheti, A. D. Z. A. (2020). *INNOVATION ACTIVITIES AND ENTREPRENEURIAL STRATEGIES IN INTERNATIONAL FOOD SECTOR*. 2(02), 54–67.

Lopes, J. C. O. (2010). *Técnico em Agropecuária - Avicultura*.

Maheshwari, P., Kamble, S., Belhadi, A., Mani, V., & Pundir, A. (2023). Digital twin implementation for performance improvement in process industries- A case study of food processing company. *International Journal of Production Research*, 61(23), 8343–8365.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2104181>

Maheshwari, P., Kamble, S., Belhadi, A., Venkatesh, M., & Abedin, M. Z. (2023). Digital twin-driven real-time planning, monitoring, and controlling in food supply chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 195(April 2022), 122799.

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122799>

Matos, P. de C. (2015). Tipos de revisão de literatura. *Faculdade de Ciências Agronomicas UNESP Campus de Botucatu*, 9.

Melesse, T. Y., Franciosi, C., Di Pasquale, V., & Riemma, S. (2023). Analyzing the Implementation of Digital Twins in the Agri-Food Supply Chain. *Logistics*, 7(2), 33.

<https://doi.org/10.3390/logistics7020033>

Melesse, T. Y., Franciosi, C., Pasquale, V. Di, & Riemma, S. (2023). *Analyzing the Implementation of Digital Twins in the Agri-Food Supply Chain*. 1–17.

Mercadé-Melé, P., Fandos-Herrera, C., & Velasco-Gómez, S. (2021). How corporate social responsibility influences consumer behavior: An empirical analysis in the Spanish agrifood sector. *Agribusiness*, 37(3), 590–611. <https://doi.org/10.1002/agr.21693>

Miehe, R., Waltersmann, L., Sauer, A., & Bauernhansl, T. (2021). Sustainable production and the role of digital twins—Basic reflections and perspectives. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 3(2), 1–21. <https://doi.org/10.1002/amp2.10078>

Miroshnik, A., Gorlov, I., & Slozhenkina, M. (2023). Approaches to Developing New Complex Meat Products with Preset Quality. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(4), 698–709. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2471>

Moekti, G. R. (2020). Industrial livestock production: A review on advantages and disadvantages. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 492(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/492/1/012094>

- Ndanga, L. Z. B., Rooyen, J. Van, & Chikazunga, D. (2009). *Modelling Wine Choice: Investigating the determinants of wine choice among of the “Black Diamonds.”*
- Neethirajan, S., & Kemp, B. (2021). Digital twins in livestock farming. *Animals*, 11(4).
<https://doi.org/10.3390/ani11041008>
- Netland, T. H., Kasra Ferdows, & McDonough. (2016). *The S-Curve Effect of Lean Implementation*. 25(6), 1106–1120.
- Neves, M. L. C., Varvakis, G. Jean, & Fialho, F. A. P. (2018). Pessoas, processos e tecnologia na gestão do conhecimento: uma revisão da literatura. *Revista de Ciências Da Administração*, 2, 152–167.
<https://doi.org/10.5007/2175-8077.2018v20n51p152>
- Nogueira, P. (2023). *IFPB ganhará laboratório de tecnologia em gêmeo digital*.
<https://www.ifpb.edu.br/noticias/2023/09/ifpb-ganhara-laboratorio-de-tecnologia-em-gemeo-digital-em-parceria-com-empresa-chinesa>
- ÖHLÉN, P., JOHNSTON, C., OLOFSSON, H., TERRILL, S., & CHERNOGOROV, F. (2022). *Network digital twins – outlook and opportunities*. 2–11.
- Oliveira, E. C. de;, Gomes;, C. B., Andrade;, J. A. dos S., Batista;, M. C. dos S., & Batista, M. C. dos S. (2024). *Diagrama de ishikawa* (Issue 2024, pp. 12–19).
<https://doi.org/https://doi.org/10.22533/at.ed.61624101>
- Oliveira, S. C. M., Barbosa, E. de S., Rezende, I. C. C., Silva, R. P. A., & Albuquerque, L. S. (2012). Bibliometria em artigos de contabilidade aplicada ao setor público. *Anais Do XX Congresso Brasileiro de Custos*, 7, 8526.
- (ONU), O. das N. U. (2024). *ODS*. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- Parrott, A., & Lane, W. (2017). Industry 4.0 and the digital twin. *Deloitte University Press*, 1–17.
<https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
- Paula, A., Fbv, S., Aurélio, M., & Pinho, B. De. (2010). *Estudo bibliometrico sobre custo em organizações da construção civil : contribuições do congresso brasileiro de custo de 1996 a 2010* *Estudo bibliometrico sobre custo em organizações da construção civil : contribuições do congresso brasileiro de custo de 1*.
- Pawlak, K., & L, J. E. L. C. (2022). *Determinants for international competitiveness of the food industry in 43 countries worldwide : evidence from panel models* *Introduction The food industry is a branch of the economy involved in the production of final and intermediate food products to meet*. 17(3). <https://doi.org/10.24136/eq.2022.022>
- Petrobras. (n.d.). *Digital Twins na Petrobras: como criamos gêmeos digitais para impulsionar a eficiência operacional*. 2024. <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/inovacao/digital-twins->

na-petrobras-impulsionam-eficiencia-operacional-1-1

Petrobras. (2024). *Digital Twins na Petrobras: como criamos gêmeos digitais para impulsionar a eficiência operacional*. [https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/inovacao/digital-twins-na-petrobras-impulsionam-eficiencia-operacional-1-1?](https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/inovacao/digital-twins-na-petrobras-impulsionam-eficiencia-operacional-1-1?_gl=1*nx4c70*_gcl_au*NjMwNTEyMzYyLjE3MjA1NzY3NDU.*_ga*MTk3ODM3Njc3MS4xNzlwNTc2NzQ2*_ga_9TG5WL85H3*MTcyMDY2MjkwMi4yLjEuMTcyMDY2Mjk1OS4zLjAuMA)

[_gl=1*nx4c70*_gcl_au*NjMwNTEyMzYyLjE3MjA1NzY3NDU.*_ga*MTk3ODM3Njc3MS4xNzlwNTc2NzQ2*_ga_9TG5WL85H3*MTcyMDY2MjkwMi4yLjEuMTcyMDY2Mjk1OS4zLjAuMA](https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/inovacao/digital-twins-na-petrobras-impulsionam-eficiencia-operacional-1-1?_gl=1*nx4c70*_gcl_au*NjMwNTEyMzYyLjE3MjA1NzY3NDU.*_ga*MTk3ODM3Njc3MS4xNzlwNTc2NzQ2*_ga_9TG5WL85H3*MTcyMDY2MjkwMi4yLjEuMTcyMDY2Mjk1OS4zLjAuMA)

Piantkoski, J., & Bertollo, E. C. (1967). AVICULTURA: RELAÇÕES E DESAFIOS COM A INDÚSTRIA 4.0. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 7(November), 14–25.

Poletti, V. (2024). *Gêmeos Digitais e o futuro das cidades: uma revolução virtual*.

<https://cidadesinteligentes.org.br/artigo/gemeos-digitais-e-o-futuro-das-cidades-uma-revolucao-virtual/243>

Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. de. (2013). Metodologia do Trabalho Científico - 2ª Edição. In *Novo Hamburgo: Feevale*.

Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivas, de forma associativa entre as instituições UNIPLAC, UNC, UNESC, U. (PPGSP). (2024). *Linha de Pesquisa*. 2021. <https://ppgsp.net/linhas-de-pesquisa/>

Quintino,, L. F., Silveira,, A. M. da, Aguiar,, F. R. de, Ruwer,, L. M. E., & Quadros,, M. L. de. (2019). *Indústria 4.0*.

Ribeiro,, A. de O., Brandalise, N., Sabbadini, F. S., & Costa, K. A. (2022). *PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS NA ADMINISTRAÇÃO FINANCEIRA PÚBLICA: UM MODELO PARA O CONTROLE INTERNO NA GESTÃO DO PROGRAMA DE VACINAÇÃO BRASILEIRO*.

Roberge, G., Bédard-Vallée, A., & Rivest, M. (2021). Bibliometrics Indicators for the Science and Engineering Indicators 2022 Technical Documentation. In *Science-Metrix Inc* (Issue September 2021).

Rodrigues, W. O. P., Garcia, R. G., Nääs, I. de A., Rosa, C. O. da, & Caldarelli, C. E. (2015). Evolução Da Avicultura De Corte No Brasil. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1(April), 1666–1684.

Salehi, B., Demir, U., Roy, D., & Pradhan, S. (2023). *Multiverse at the Edge : Interacting Real World and Digital Twins for Wireless Beamforming*.

Sátyro,, W. C., Sacomano,, J. B., Gonçalves,, R. F., & Silva,, S. H. B. T. da. (2018). *Indústria 4.0 : conceitos e fundamentos*. 2018.

integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521213710/

Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 141–144.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>

Schmidt, N. S., & Silva, e C. L. da. (2018). Pesquisa e Desenvolvimento na Cadeia Produtiva de Frangos de Corte no Brasil. *Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560307>

Schneider, E. M., Fujii, R. A. X., & Corazza, M. J. (2017). Pesquisas Quali-Quantitativas: Contribuições Para a Pesquisa Em Ensino De Ciências. *Revista Pesquisa Qualitativa*, 5(9), 569–584.

Scopus. (2024). <https://www.scopus.com/>

Sebastian, S. (2013). *Aktualny i przewidywany stan rynku mięsa wieprzowego na świecie*. 13(28), 9.

<https://doi.org/10.22004/ag.econ.190943>

Sengupta, S., & Dreyer, H. (2023). Realizing zero-waste value chains through digital twin-driven S&OP: A case of grocery retail. *Computers in Industry*, 148(September 2022), 103890.

<https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103890>

Shah, R., & Peter T. Ward; (2007). *DEFINING AND DEVELOPING MEASURES OF LEAN PRODUCTION*. 614, 1–44.

SILVA, F. R. DA, CAVALCANTI, F. S., COSTA, F. D. S., LIMA, J. C. X. DE, & LAZO-VASQUEZ, D. A. (2024). *a Jornada Do Digital Twin Aplicada À Avaliação De Processos Fabris Para Produção De Vacinas E Biofármacos Na Fiocruz*. 1, 0–14.

https://doi.org/10.14488/enegep2024_tce_411_2014_47800

Singh, S., Shehab, E., Higgins, N., Fowler, K., Reynolds, D., Erkoyuncu, J. A., & Gadd, P. (2021). *Data management for developing digital twin ontology model*. 235(14), 2323–2337.

<https://doi.org/10.1177/0954405420978117>

Sipola, T., & Kokkonen, T. (2023). *applied sciences Digital Twin of Food Supply Chain for Cyber Exercises*.

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology : An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104(July), 333–339.

<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>

Sousa, A. S. de, Oliveira, G. S. de, & Alves, L. H. (2021). *A PESQUISA BIBLIOGRÁFICA : PRINCÍPIOS E*. 64–83.

Souza, M. T. De, Dias, M., & Carvalho, R. De. (2010). *Revisão integrativa : o que é e como fazer*. 8, 102–106.

Spearman, M. L. (2014). *Of Physics and Factory Physics*. 23(11), 1875–1885.

<https://doi.org/10.1111/poms.12188>

Speicher, T. L., & Defranco, J. F. (2023). Industry 4.0 and Digital Twins. *Computer*, 56(6), 84–88.

<https://doi.org/10.1109/MC.2023.3243450>

- Spyrou, O., Verdouw, C., & Hurst, W. (2024). A digital twin reference architecture for pharmaceutical cannabis production. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(6), 726–746. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2257635>
- Tancredi, G. P., Vignali, G., & Bottani, E. (2022). Integration of Digital Twin, Machine-Learning and Industry 4.0 Tools for Anomaly Detection: An Application to a Food Plant. *Sensors*, 22(11), 4143. <https://doi.org/10.3390/s22114143>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). *Digital twin-driven product design , manufacturing and service with big data*. 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Vieira, M. G. (2006). *APLICAÇÃO DO MAPEAMENTO DE FLUXO DE VALOR PARA AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO*.
- Vlasenko, L., Lutska, N., Zaiets, N., Korobiichuk, I., & Hrybkov, S. (2022). Core Ontology for Describing Production Equipment According to Intelligent Production. *Applied System Innovation*, 5(5), 1–13. <https://doi.org/10.3390/asi5050098>
- VOSviewer. (2024). <https://www.vosviewer.com/>
- Watson, K. J., Blackstone, J. H., & Gardiner, S. C. (2007). *The evolution of a management philosophy : The theory of constraints*. 25, 387–389. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2006.04.004>
- Web Of Science. (2024). <https://mjl.clarivate.com/search-results>
- Zanella, L. C. H. (2013). Metodologia de Pesquisa 2013 2ª edição reimpressa. *Departamento de Ciências Da Administração/ UFSC*, 134.
http://arquivos.eadadm.ufsc.br/EaDADM/UAB_2014_2/Modulo_1/Metodologia/material_didatico/Livro texto Metodologia da Pesquisa.pdf
- Zhao, J., Guo, L., & Li, Y. (2022). Application of Digital Twin Combined with Artificial Intelligence and 5G Technology in the Art Design of Digital Museums. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8214514>
- Zotero. (2024). <https://www.zotero.org/>

APÊNDICE A

TERMO DE ORIGINALIDADE E DE USO OU NÃO USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) PARA ENTREGA DA DISSERTAÇÃO PARA DEFESA

Eu, **JOEL PEREIRA FERNANDES**, estudante do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos em forma associativa entre UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE, declaro, para os devidos fins, que a minha dissertação, intitulada **DO MUNDO FÍSICO PARA O DIGITAL: APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DIGITAL TWIN NO SETOR DE INDIVIDUALLY QUICK FROZEN (IQF) EM UM FRIGORÍFICO DE AVES**, foi desenvolvido exclusivamente por mim, resultado de pesquisa original e que todas as fontes utilizadas estão devidamente citadas e referenciadas segundo as normas definidas pelo Programa. E quanto ao Uso de Inteligência Artificial (IA) Regenerativa ou Instrumentos Assistidos de Outros Tipos/Classificações (por Capacidade, Funcionalidade, ...):

() Declaro que **NÃO UTILIZEI** quaisquer instrumentos de Inteligência Artificial (IA), de qualquer tipo, mas não se limitando a modelos de linguagem generativos (como ChatGPT, Bard, etc.), ferramentas de geração de imagens, áudio, vídeo ou código, ou qualquer outra tecnologia baseada em IA, em qualquer etapa da concepção, desenvolvimento, escrita ou revisão desta Dissertação. **Todo o conteúdo e ideias apresentados são de minha autoria exclusiva, baseada na literatura que apoiou o desenvolvimento desta pesquisa.**

(X) Declaro que **UTILIZEI** instrumentos de Inteligência Artificial (IA) no desenvolvimento desta Dissertação, primando pelo uso responsável, de forma ética e transparente, de acordo com as etapas abaixo indicadas. A supervisão e a autoria intelectual de todo o trabalho permanecem de minha responsabilidade exclusiva.

() **Concepção do Estudo/Pesquisa/Problema, Justificativa:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

() **Panorama teórico:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

() **Metodologia da Pesquisa:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

() **Coleta, Análise, Resultados, Discussão e Interpretação de Dados:**

() Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

() Finalidade:

() Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

(X) **Melhoria da Linguagem e Revisão de Texto:**

(X) Ferramenta(s) de IA utilizada(s):

Chat GPT

(X) Finalidade:

Correções de linguagem, pontuações e traduções

(X) Materialidade (indicar a localização na estrutura do texto):

No decorrer de todo o texto

Declaro que estou ciente da necessária integridade da pesquisa acadêmica e que a utilização de instrumentos de Inteligência Artificial deve ser declarada e eventualmente utilizada de forma a complementar e auxiliar meu trabalho, sem comprometer a originalidade e a autoria intelectual da Dissertação. Por tudo isso, eu assumo integralmente a responsabilidade pelo conteúdo final apresentado e por esta declaração, de acordo com as estipulações legais e responsabilidades que regulam esta matéria.

Declaro, ainda, que não utilizei trabalho de outros autores sem a devida menção, nem reproduzi, integral ou parcialmente, trabalhos de terceiros. As ideias e interpretações apresentadas são de minha inteira responsabilidade

Documento assinado digitalmente



JOEL PEREIRA FERNANDES
Data: 04/09/2026 14:31:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Lages/SC 26/05/2026.

54640 (UNESC) / 149394 (UNIPLAC) – JOEL PEREIRA FERNANDES

Código e Assinatura do Estudante

CPF: 054.765.849-43