

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISES APLICADAS À OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CARNE BOVINA NO BRASIL

COMPUTER SIMULATION AND APPLIED ANALYSIS FOR BEEF PRODUCTION OPTIMIZATION IN BRAZIL

Pedro Henrique de Almeida Lima Alexandrino¹

José Elmo de Menezes²

Cloves Gonçalves Rodrigues³

Resumo - O setor frigorífico brasileiro desempenha papel estratégico na economia global, mas enfrenta limitações relacionadas à eficiência produtiva, rastreabilidade e sustentabilidade, especialmente em unidades de pequeno e médio porte. A ausência de digitalização e o predomínio de decisões empíricas sobre layout aumentam os riscos de contaminação cruzada, desperdícios de recursos e acidentes ocupacionais. Este estudo desenvolve e aplica um modelo de simulação digital representacional para apoiar o redesenho de plantas frigoríficas, com ênfase na segregação higiênico-sanitária, logística do frio e rastreabilidade digital. A metodologia integrou a modelagem arquitetônica no Autodesk Revit, a imersão e experimentação de cenários no Twinmotion e o desenvolvimento de objetos tridimensionais complementares no Blender 4.5, garantindo maior realismo às simulações. A análise qualitativa dos cenários possibilitou identificar gargalos operacionais, propor alternativas de fluxo e antecipar impactos de eventuais intervenções físicas. Os resultados evidenciam o potencial da simulação computacional para reduzir riscos sanitários e ocupacionais, otimizar o uso de água e energia e alinhar os frigoríficos às exigências de conformidade regulatória e competitividade internacional. O estudo reforça a relevância da transformação digital como vetor de inovação, sustentabilidade e governança no setor de processamento de carne bovina.

Palavras-chave: Carne bovina; Gado de corte; Carne brasileira; Indústria de carne brasileira; Gado; Simulação computacional; Software de computador; Logística da indústria de alimentos; Frigorífico; Frigorífico no Brasil; Modelo numérico; Otimização do tempo de

¹ Mestrando em Engenharia Industrial e Inteligência Artificial (PUC Goiás), sendo bolsista da FAPEG via Chamada Pública 38/2022; Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (IPOG); Bacharel em Engenharia Elétrica e de Controle e Automação (PUC Goiás), sendo bolsista de Iniciação Científica BIC/PUC Goiás 12433. - Contato: phalexandrino.eng@gmail.com.

² Doutor em Estatística (USP) e Mestre em Matemática (UnB), com bacharelado em Engenharia Civil (PUC-GO) e Licenciatura em Matemática (UNESP). É Professor Adjunto na Escola Politécnica da PUC Goiás, atuando no Mestrado em Engenharia Industrial e Inteligência Artificial (PPGEIIA), e Professor Titular no Instituto Federal de Goiás (IFG). - Contato: jelmo.maf@gmail.com.

³ Doutor e Mestre em Física (UFG/UNICAMP), com Pós-Doutoramento Sênior em Física da Matéria Condensada (UNICAMP) e Bacharel em Física (UFG). É Professor Titular na Escola Politécnica e de Artes da PUC Goiás, atuando no Mestrado em Engenharia Industrial e Inteligência Artificial (PPGEIIA), e Coordenador do Grupo de Pesquisa em Ciências da PUC-GO. Contato: cloves@pucgoias.edu.br.

processo e processamento de carne; Otimização do tempo de processo e matadouro; Simulação; Matadouro; Simulação de matadouro; Efluentes de matadouro.

Abstract - The Brazilian meatpacking industry plays a strategic role in the global economy but faces constraints regarding productive efficiency, traceability, and sustainability, particularly in small and medium-sized enterprises. The lack of digitalization and the prevalence of empirical decision-making regarding facility layout increase the risks of cross-contamination, resource waste, and occupational accidents. This study develops and applies a representational digital simulation model to support the redesign of meatpacking plants, emphasizing hygienic-sanitary segregation, cold chain logistics, and digital traceability. The methodology integrated architectural modeling in Autodesk Revit, scenario immersion and experimentation in Twinmotion, and the development of complementary 3D objects in Blender 4.5, ensuring enhanced realism for the simulations. Qualitative analysis of the scenarios enabled the identification of operational bottlenecks, the proposal of flow alternatives, and the anticipation of impacts from physical interventions. The results demonstrate the potential of computational simulation to mitigate sanitary and occupational risks, optimize water and energy consumption, and align facilities with regulatory compliance and international competitiveness requirements. The study reinforces the importance of digital transformation as a driver of innovation, sustainability, and governance in the beef processing industry.

Keywords: Beef; Beef cattle; Brazilian meat; Brazilian meat industry; Cattle; Computer simulation; Computer software; Food industry logistics; Meatpacking plant; Meatpacking plant in Brazil; Numerical model; Process time optimization and meat processing; Process time optimization and slaughterhouse; Simulation; Slaughterhouse; Slaughterhouse simulation; Slaughterhouse wastewater.

I. INTRODUÇÃO

A indústria frigorífica brasileira, embora sustente uma posição de liderança no mercado global, atravessa um momento crítico marcado por desafios sanitários, ambientais e laborais que ameaçam sua legitimidade corporativa. A persistência de layouts industriais obsoletos e ineficientes agrava os riscos de contaminação cruzada do produto e perpetua índices elevados de acidentes de trabalho, violando normas regulamentadoras essenciais.

Para manter a competitividade e responder às pressões sociais por práticas mais éticas e alinhadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável, o setor precisa urgentemente transcender a busca exclusiva por volume produtivo, integrando princípios de economia circular e segurança ocupacional em suas operações. Nesse cenário, a modernização tecnológica surge como a solução estratégica para superar tais gargalos, exigindo uma abordagem que equilibre eficiência econômica com responsabilidade socioambiental.

Este estudo propõe a utilização da simulação computacional integrada como uma ferramenta metodológica capaz de preencher as lacunas do planejamento tradicional.

Ao permitir a análise prévia dos compromissos entre produtividade, segurança do trabalhador e consumo de recursos, a modelagem digital oferece uma base científica para o redesenho de plantas industriais, fundamentando uma transição tecnológica que garanta tanto a inocuidade do alimento quanto a integridade física dos colaboradores.

Na dimensão social, o setor registra o terceiro maior número de acidentes de trabalho no Brasil entre 2014 e 2020, com riscos persistentes associados ao ritmo intenso, ambientes frios e movimentos repetitivos.

Diante de controvérsias como o alto consumo de recursos e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), as grandes empresas buscam a aprovação social, dedicando "maior atenção em ganhar legitimidade moral, utilizando o alinhamento aos ODS e a demonstração de resultados de sustentabilidade para obter aprovação social" (SANTOS et al., 2024, p. 924).

Diante disso, a motivação científica deste trabalho reside em preencher a lacuna metodológica referente à aplicação integrada de tecnologias de simulação em plantas frigoríficas. O estudo propõe a utilização da modelagem digital para examinar os trade-offs complexos entre produtividade, uso de recursos e riscos operacionais, fundamentando uma modernização que garanta tanto a inocuidade do alimento quanto a integridade física dos colaboradores (DIGITAL TWINS IN FOOD PROCESSING, 2022; NOGUEIRA; LONGHINI, 2024).

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver e aplicar um modelo de simulação digital representacional para o redesenho de plantas frigoríficas, com foco na otimização da segregação higiênico-sanitária, logística do frio e rastreabilidade digital. Através da integração de modelagem arquitetônica (BIM), simulação 3D imersiva e análise quantitativa via programação científica, o estudo busca criar protótipos virtuais que permitam antecipar falhas operacionais e validar hipóteses de layout antes da execução física, garantindo conformidade normativa e eficiência econômica.

Os objetivos específicos compreendem a realização de uma revisão bibliométrica assistida por inteligência artificial para mapear tendências do setor e o desenvolvimento de simulações qualitativas e quantitativas utilizando ferramentas como Revit, Twinmotion e Python. Adicionalmente, o trabalho valida a sustentabilidade operacional sob a abordagem NEXUS (Água-Energia-Alimento) seguindo diretrizes da FAO, sistematiza uma metodologia escalável para a implementação de Gêmeos Digitais e consolida os resultados em artigos técnicos e na dissertação de mestrado.

II. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo é de natureza representacional de caráter exploratório e aplicado, estruturada pela combinação de revisão bibliográfica sistematizada, análise de dados setoriais e experimentação computacional com ferramentas de simulação digital (SILVA; SIQUEIRA; NOGUEIRA, 2022).

A Revisão Bibliográfica e a Análise Documental estabeleceram a base teórica e conceitual da pesquisa, sendo fundamentais para a consolidação do conhecimento científico, que se constrói a partir da proposição, comunicação e avaliação de ideias (SILVA; SILVA, 2022).

O processo de acesso às bases de dados científicas começou pelo Portal de Periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal), principal plataforma brasileira de acesso a conteúdos acadêmicos internacionais.

O login foi realizado por meio do CAFE (Comunidade Acadêmica Federada), sistema que autentica usuários vinculados a instituições de ensino superior, como a PUC Goiás, permitindo o acesso gratuito a bases de dados pagas.

Após a autenticação bem-sucedida no sistema CAFE, foi possível acessar as bases Scopus mantida pela Elsevier e Web of Science (WoS) gerida pela Clarivate Analytics, ambas reconhecidas pela alta qualidade e abrangência de seus conteúdos científicos.

Nessas plataformas, as buscas foram realizadas com as palavras-chave.

O levantamento bibliográfico da pesquisa foi conduzido por meio de uma estratégia integrada que combinou buscas exploratórias iniciais em motores de busca tradicionais como Google, com o uso de ferramentas avançadas de análise bibliométrica e inteligência artificial, garantindo o rigor e a abrangência da base teórica. Para a curadoria e análise detalhada das citações, foram utilizados softwares específicos: o Publish or Perish (PoP - versão 8.18), desenvolvido para coletar citações acadêmicas e calcular indicadores como o índice h e o número total de citações e o VOSviewer (versão 1.6.20), empregado para a visualização de redes bibliométricas, mapeando coocorrências de palavras-chave, coautorias e citações para identificar as relações temáticas e tendências científicas nas áreas de simulação e automação.

De forma complementar, o Google Acadêmico (Google Scholar) foi empregado como fonte de apoio devido à sua vasta abrangência e facilidade de acesso, auxiliando na identificação de trabalhos recentes e citações adicionais ainda não indexadas em bases comerciais. Para otimizar o processo de compilação, refinamento de dados e estruturação da base teórica da dissertação, ferramentas de Inteligência Artificial Generativa, como o Google NotebookLM Pro, foram usadas para suporte na análise documental em larga escala, utilizadas para sumarizar documentos complexos e auxiliar na organização do acervo bibliográfico, maximizando a eficiência na obtenção da bibliografia.

A modelagem utilizou inicialmente o Autodesk Revit (BIM), o Twinmotion (para ambientes imersivos) e o Blender 4.5 (para objetos customizados). Esse conjunto viabilizou a construção de projeto inicial para padronização de Gêmeo Digital (Digital Twin) funcional. Foram elaborados dois cenários, o (Tradicional) representa o padrão de baixa adequação as tecnologias modernas industriais e o (Inteligente) está alinhado à Indústria 4.0/5.0, focando em automação adaptativa e centralidade humana. Tecnologias como IoT, Robótica (redução de riscos biológicos) e IA (visão computacional, gestão NEXUS) foram aplicadas.

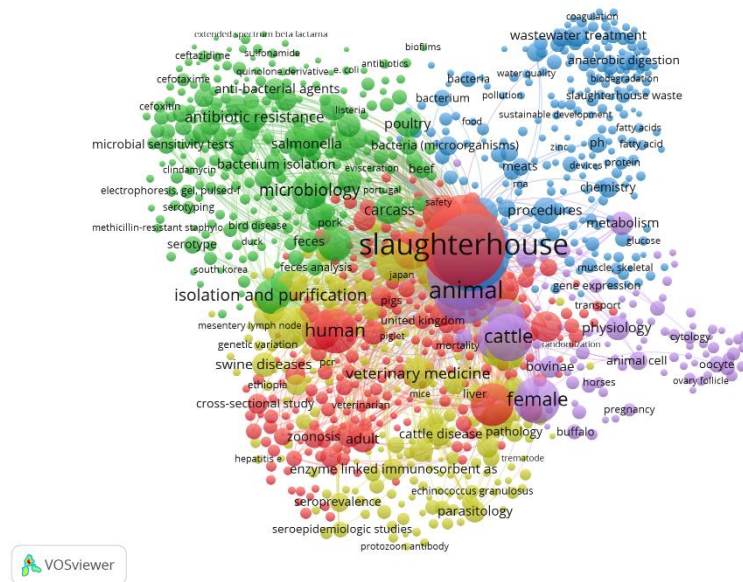
1. METODOLOGIA OBTENÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE

A pesquisa bibliográfica utilizou dois idiomas, Português e Inglês, sendo este último (termos Computer Simulation, Slaughterhouse) o dominante em volume de publicações. A seleção de termos seguiu uma metodologia de três fases: definição inicial (a priori), extração quantitativa de frequência e validação por relevância temática. Para análise bibliométrica, os resultados foram exportados em formato (.RIS). O software VOSviewer foi aplicado para visualizações Network, Overlay e Density, e o processo integrou indexações Keyword Plus (WoS) e Indexed Keywords (Scopus), assegurando precisão e abrangência terminológica na base conceitual.

As palavras-chave iniciais foram: 1 - Frigorífico; 2 - Slaughterhouse; 3 - Simulação Computacional; 4 - Computer Simulation. Em conjunto, essas visualizações proporcionam uma análise integrada e aprofundada das relações e tendências do campo estudado. Além disso, a seleção de palavras-chave seguiu três etapas complementares:

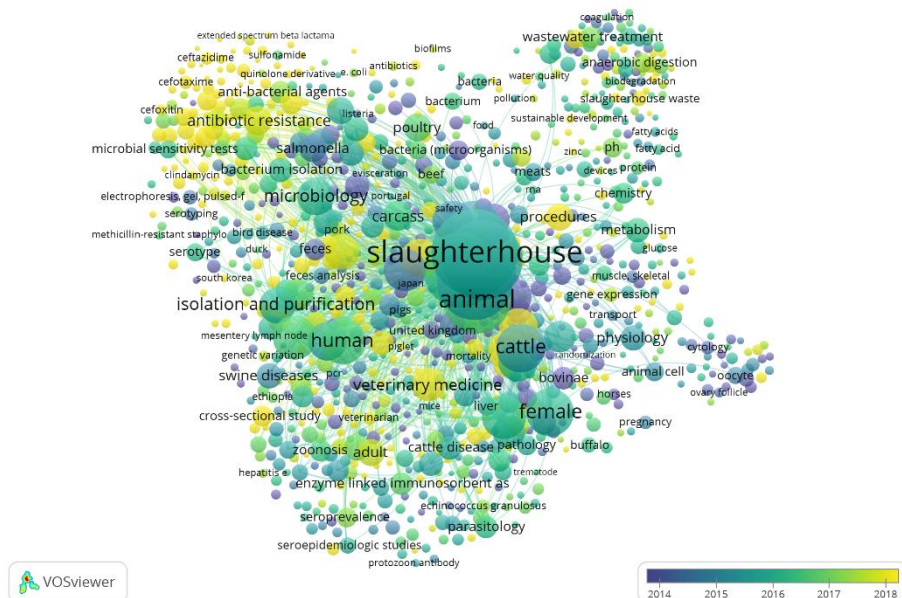
- a) termos iniciais definidos a prioridade;
- b) termos frequentes extraídos quantitativamente das bases; e
- c) análise qualitativa baseada na relevância temática observada nos dados.

Figura 1 - Resultados de recorrência das palavras-chave de artigos exportados da base de dados Scopus pelo termo “Slaughterhouse” em formato Network



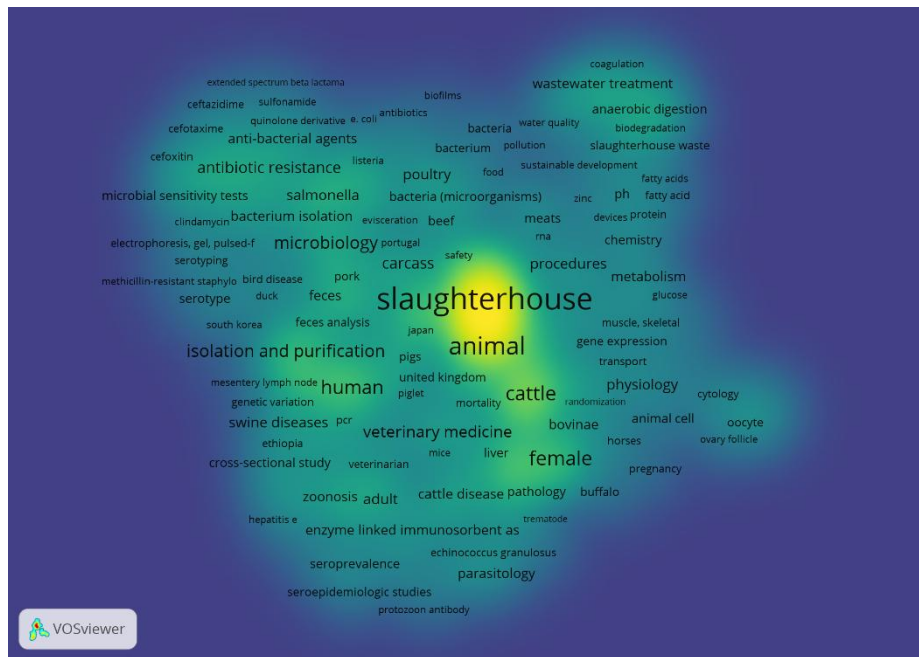
Fonte: Elaborada pelo autor com o software VOSviewer na versão 1.6.20 - Feita em: (04/10/2025)

Figura 2 - Resultados de recorrência das palavras-chave de artigos exportados da base de dados Scopus pelo termo “Slaughterhouse” em formato Overlay



Fonte: Elaborada pelo autor com o software VOSviewer na versão 1.6.20 - Feita em: (04/10/2025)

Figura 3 - Resultados de recorrência das palavras-chave de artigos exportados da base de dados Scopus pelo termo “Slaughterhouse” em formato Density



Fonte: Elaborada pelo autor com o software VOSviewer na versão 1.6.20 - Feita em: (04/10/2025)

Esse processo sistemático permitiu refinar e validar o conjunto final de palavras-chave, reforçando sua pertinência científica e representatividade temática no contexto da pesquisa demonstrado abaixo na tabela as demais pesquisas de palavras e bases de dados. Na sequência, foi esboçada uma tabela consolidando os resultados das pesquisas:

Tabela 01 - Comparação de palavras buscadas na base SCOPUS

BASE DE DADOS	TERMO DE BUSCA E IDIOMA	PALAVRAS-CHAVE ENCONTRADAS
SCOPUS	SLAUGHTERHOUSE (EN)	SLAUGHTERHOUSE, ANIMAL, CATTLE, FEMALE, ISOLATION AND PURIFICATION
	FRIGORÍFICO (PT)	SLAUGHTERHOUSE, ANIMAL WELFARE, CATTLE, ARTICLE, BRAZIL
	COMPUTER SIMULATION (EN)	COMPUTER SIMULATION, HUMAN, SIMULATION, COMPUTER SOFTWARE, NUMERICAL MODEL
	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (PT)	COMPUTER SIMULATION, COMPUTATIONAL SIMULATION, SIMULATION, COMPUTACIONAL FLUIDS DYNAMIC, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Fonte: Elaborada pelo autor com o Gamma AI APP - Feita em: (24/11/2025)

Tabela 02 - Comparação de palavras buscadas na base Web Of Science

BASE DE DADOS	TERMO DE BUSCA E IDIOMA	PALAVRAS-CHAVE ENCONTRADAS
WEB OF SCIENCE	SLAUGHTERHOUSE (EN)	SLAUGHTERHOUSE, PREVALENCE, SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER, CATTLE, ANAEROBIC DIGESTION
	FRIGORÍFICO (PT)	APOPTOSIS, CATTLE, BEEF, EXPRESSION, OXIDATIVE STRESS
	COMPUTER SIMULATION (EN)	COMPUTER SIMULATION, SIMULATION, COMPUTER SOFTWARE, NUMERICAL MODEL, MOLECULAR DYNAMICS
	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (PT)	GRAPHENE, DYNAMICS, MECHANICAL PROPERTIES, NETWORK, ELECTRONIC STRUCTURE

Fonte: Elaborada pelo autor com o Gamma AI APP - Feita em: (24/11/2025)

Para as demais palavras-chave, distribuídas nas três etapas do processo:

- Termos iniciais definidos a prioridade: 1 - Slaughterhouse, 2 - Frigorífico, 3 - Computer Simulation, 4 - Simulação Computacional;
- Termos frequentes extraídos quantitativamente das bases: 1 - Cattle, 2 - Simulation, 3 - Computer Software, 4 - Numerical Model;
- Análise qualitativa baseada na relevância temática observada nos dados: 1 - Beef, 2 - Beef Cattle, 3 - Slaughterhouse Wastewater, 4 - Brazilian Meat Industry, 5 - Brazil Meat, 6 - Slaughterhouse Simulation, 7 - Process Time Optimization and Meat Processing e 8 - Food Industry Logistics.

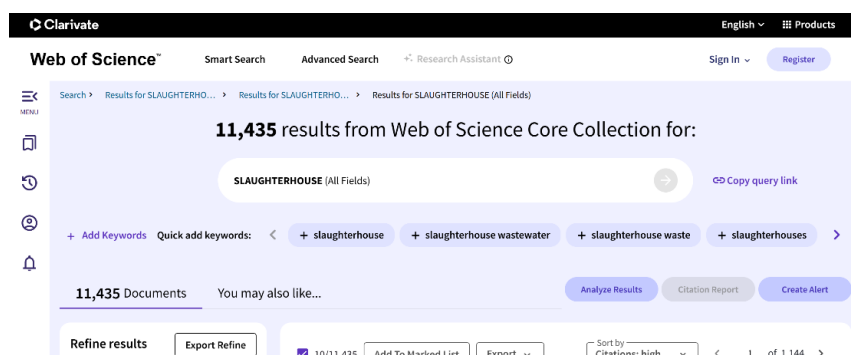
Dessa forma e adicionando qualitativamente também outros termos, fica concluindo as principais palavras-chave para a realização do levantamento bibliográfico da obra.

2. COLETA E ANÁLISE DA BIBLIOGRAFIA UTILIZADA

A metodologia de revisão sistemática foi otimizada para garantir a relevância dos dados e a viabilidade da análise. A seleção inicial de 16 palavras-chave foi definida via VOSviewer, com buscas realizadas no Google Scholar, Scopus e Web of Science, priorizando estudos publicados entre 2022 e 2025.

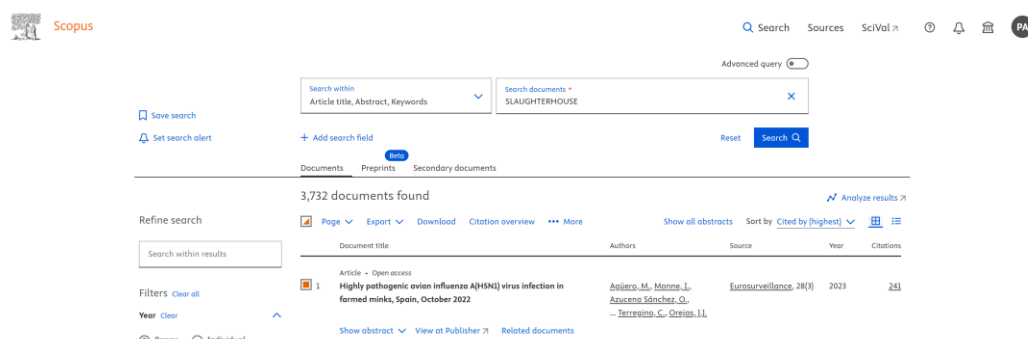
A estratégia de coleta, originalmente prevista para 480 documentos, foi ajustada para focar nos artigos mais citados de cada base: para as duas primeiras palavras-chave, foram documentados 10 artigos por base (60 totais), enquanto para as 14 remanescentes, a documentação restringiu-se aos 4 principais resultados por base (168 totais). Esse refinamento resultou em um corpus final de 228 artigos rigorosamente selecionados, equilibrando a abrangência da busca com a profundidade da análise qualitativa.

Figura 4 - Mais citados entre 2022 à 2026, pela palavra SLAUGHTERHOUSE da base Web of Science



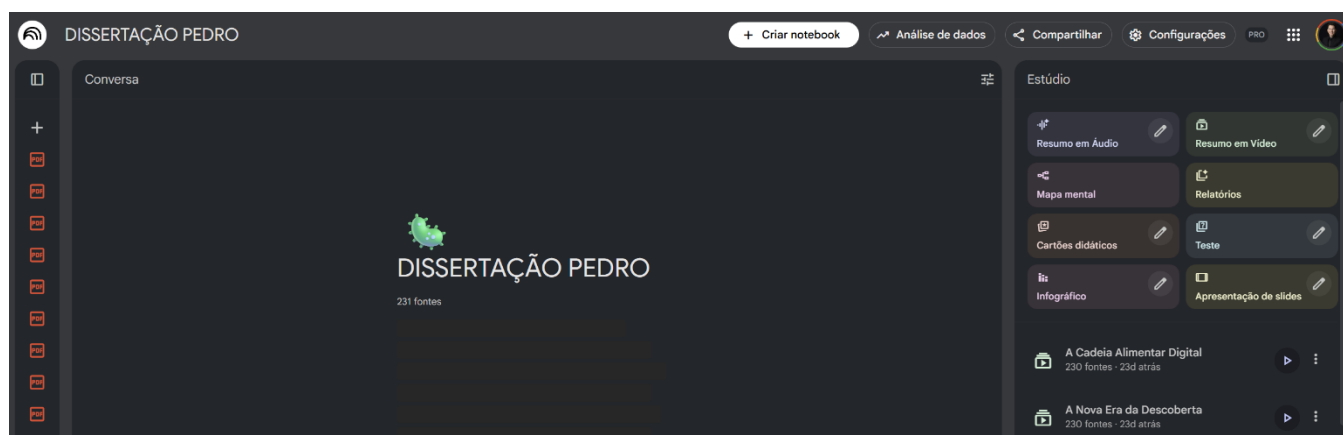
Disponível em: <<https://www-webofscience-com.ez280.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/summary/2c7b27df-1b9e-44c7-9079-6f0bbebcb1b2-017f24adcb/times-cited-descending/1>> - Acesso em: 08/10/2025

Figura 5 - Mais citados entre 2022 à 2026, pela palavra SLAUGHTERHOUSE da base SCOPUS



Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez280.periodicos.capes.gov.br/results/results.uri?st1=SLAUGHTERHOUSE&st2=&s=TITLE-ABS-KEY%28SLAUGHTERHOUSE%29&limit=10&origin=resultslist&sort=cp-f&src=s&sot=b&sdt=cl&sessionSearchId=baa9bbd0a261ee8a9f580c8020b3c184&yearFrom=2022&yearTo=2026>> - Acesso em: 08/10/2025

Figura 6 - Utilizando o NotebookLM para identificação de tendências



Disponível em: <<https://notebooklm.google.com/>> - Acesso em: 08/10/2025

Aplicando esses acessos a bases de dados, por exemplo para obtenção de informações padronizadas com o Search Report do Publish or Perish. Esse processo foi repetido para a base de dados SCOPUS e Web Of Science e foram realizados o download e tradução dos documentos. Por fim para auxiliar nas buscas e organização do texto foi utilizado a ferramenta NotebookLM da Google, buscando otimizar o processo de identificação de tendências.

Figura 7 - Extração de informações padronizadas com o Publish or Perish pela palavra SLAUGHTERHOUSE da base Google Scholar

Search terms	Source	Papers	Cites	Cites/year	h	g	hI, norm	hI, annual	hA	acc10	Search date	Cache date	Last ...
SLAUGHTERHOUSE from 2022	Google Scholar	200	3565	1188.33	28	42	13	4.33	17	52	07/10/2025	07/10/2025	0
ComputerSimulation.Scopus.ris	RIS/RefMana...	1000	654	654.00	11	12	3	3.00	11	12	04/10/2025	04/10/2025	0
Frigonifico.Scopus.ris [2025-10-0...	RIS/RefMana...	64	245	11.14	10	13	3	0.14	2	0	04/10/2025	04/10/2025	0
SimulacaoComputacional.Scopus...	RIS/RefMana...	67	103	3.22	5	6	2	0.06	2	0	04/10/2025	04/10/2025	0
ComputerSimulation.WebOfSci...	RIS/RefMana...	1000	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	04/10/2025	04/10/2025	0
Frigonifico.WebOfScience.ris [20...	RIS/RefMana...	128	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	04/10/2025	03/10/2025	0
SimulacaoComputacional.WebO...	RIS/RefMana...	70	0	0.00	0	0	0	0.00	0	0	04/10/2025	04/10/2025	0

Citation metrics	Value
Publication years:	2022-2025
Citation years:	3 (2022-2025)
Papers:	200
Citations:	3565
Cites/year:	1188.33
Cites/paper:	17.83
Cites/author:	1039.03
Papers/author:	58.57
Authors/paper:	4.02
h-index:	28
g-index:	42
hI, norm:	13
hI, annual:	4.33
hA-index:	17
Papers with ACC >= 1,2,5,10,20:	199,196,141,52,15

Cites	Per year	Rank	Authors	Title	Year	Publication	Publisher
189	189.00	10	V Mozhiarasi, TS N...	Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energ...	2025	Biomass conversion and bi...	Springer
95	95.00	6	KF Ovu, SC Izah, ...	Slaughterhouse facilities in developing nations: Sanitation and hygiene practices, microbial ...	2024	Food Science and ...	Springer
88	29.33	4	DY Limenh, T Tesf...	A comprehensive review on utilization of slaughterhouse by-product: Current status and pr...	2022	Sustainability	mdpi.com
72	24.00	3	M Ng, S Dalhatou, J...	Characterization of slaughterhouse wastewater and development of treatment techniques: a...	2022	Processes	mdpi.com
72	36.00	5	J Slade, E Alleyne	The psychological impact of slaughterhouse employment: A systematic literature review	2023	Trauma, Violence, & Abuse	journals.sar
66	33.00	7	S Ragasi, PC Sabu...	A critical review on slaughterhouse waste management and framing sustainable practices in...	2023	Journal of Environmental ...	Elsevier
65	32.50	1	J Garcia-Diez, S Sar...	The importance of the slaughterhouse in surveilling animal and public health: a systematic r...	2023	Veterinary ...	mdpi.com
59	29.50	200	A Al-Gheethi, NL M...	Biowastes of slaughterhouses and wet markets: an overview of waste management for disea...	2023	Science and Pollution ...	Springer
52	17.33	193	K Klaharn, D Pichpo...	Bacterial contamination of chicken meat in slaughterhouses and the associated risk factors: ...	2022	Plos one	journals.plk
47	23.50	19	EO Njoga, JU Ilo, O...	Pre-slaughter, slaughter and post-slaughter practices of slaughterhouse workers in Southea...	2023	PLoS ...	journals.plk
43	14.33	21	PV Ngoben, M Basi...	Treatment of poultry slaughterhouse wastewater using electrocoagulation: a review	2022	Water Practice & Technology	iwaponline
41	13.67	50	KE Adou, AR Kouak...	Coupling anaerobic digestion process and electrocoagulation using iron and aluminium ele...	2022	Scientific African	Elsevier
39	13.00	24	G Izdorzcyk, K Mik...	Valorization of poultry slaughterhouse waste for fertilizer purposes as an alternative for ther...	2022	Journal of Hazardous ...	Elsevier
37	12.33	9	M Kabeyi, O Olanre...	Slaughterhouse waste to energy in the energy transition with performance analysis and desi...	2022	Journal of Energy Manage...	jemat.org
37	12.33	12	MW Chowdhury, M...	Recycling slaughterhouse wastes into potential energy and hydrogen sources: An approach ...	2022	Bioresource Technology ...	Elsevier
37	18.50	22	RL Khan, AA Khraibi...	From waste to wealth: Repurposing slaughterhouse waste for xenotransplantation	2023	in Bioengineering and ...	frontiersin
37	12.33	55	M Abdallah, S Greig...	Investigating microbial dynamics and potential advantages of anaerobic co-digestion of che...	2022	Scientific Reports	nature.com
37	12.33	190	L Xu, F Wan, H Fu, ...	Emergence of Colistin Resistance Gene mcr-10 in Enterobacterales Isolates Recovered from ...	2022	Microbiology ...	journals.asi

Fonte : Elaborada pelo autor com o Publish or Perish - Versão 8.18.5091.9307 - Feita em: (11/11/2025)

3. SELEÇÃO E APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DIGITAIS DE SIMULAÇÃO

A etapa de seleção das ferramentas digitais teve como objetivo identificar plataformas capazes de integrar modelagem tridimensional, simulação interativa e análise ergonômica aplicadas ao ambiente frigorífico.

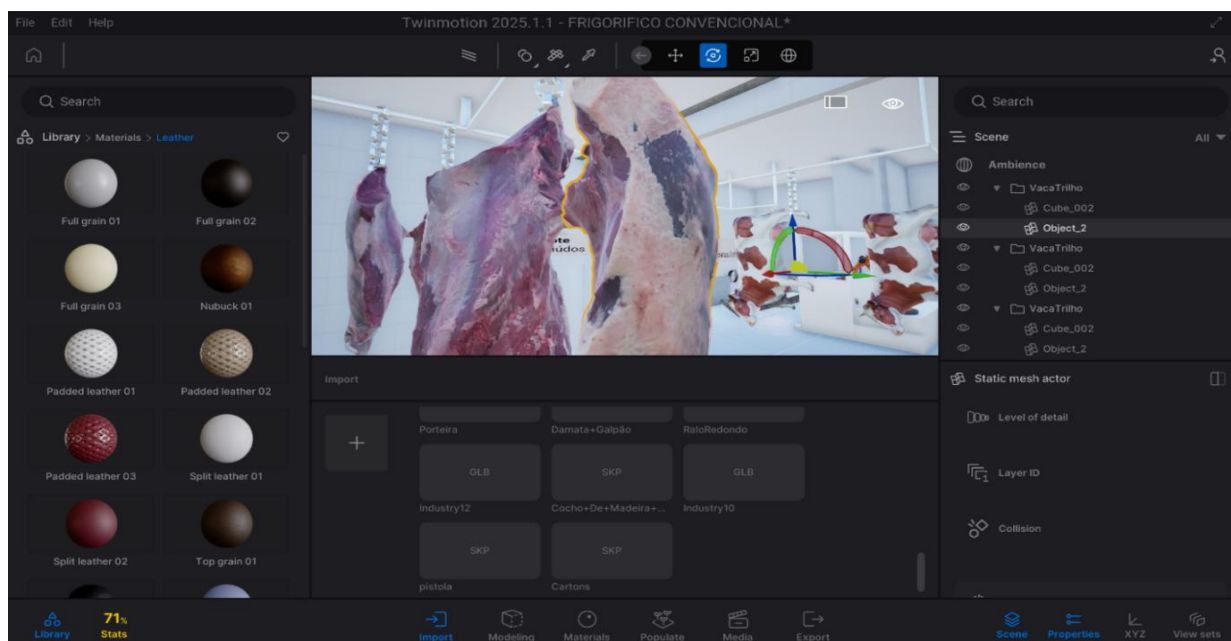
Após uma avaliação comparativa de soluções disponíveis, o Twinmotion foi definido como ferramenta principal de simulação, em virtude de sua capacidade de gerar ambientes imersivos e interativos, permitindo a análise de fluxos de pessoas, carcaças, equipamentos e recipientes sob diferentes condições operacionais.

Dessa forma, a combinação entre Twinmotion e Blender consolidou-se como solução metodológica eficaz para visualizar, analisar e otimizar o ambiente frigorífico sob a ótica produtiva, ergonômica e sanitária, contribuindo para o avanço da transformação digital no setor de processamento de carne bovina no Brasil.

Essa abordagem é coerente com tendências internacionais de digitalização industrial, nas quais modelos virtuais são utilizados para validar a eficiência operacional e o cumprimento de protocolos higiênico-sanitários antes de intervenções físicas (DIGITAL TWIN APPLICATIONS IN THE FOOD INDUSTRY, 2022; DIGITAL TWINS IN FOOD PROCESSING, 2022).

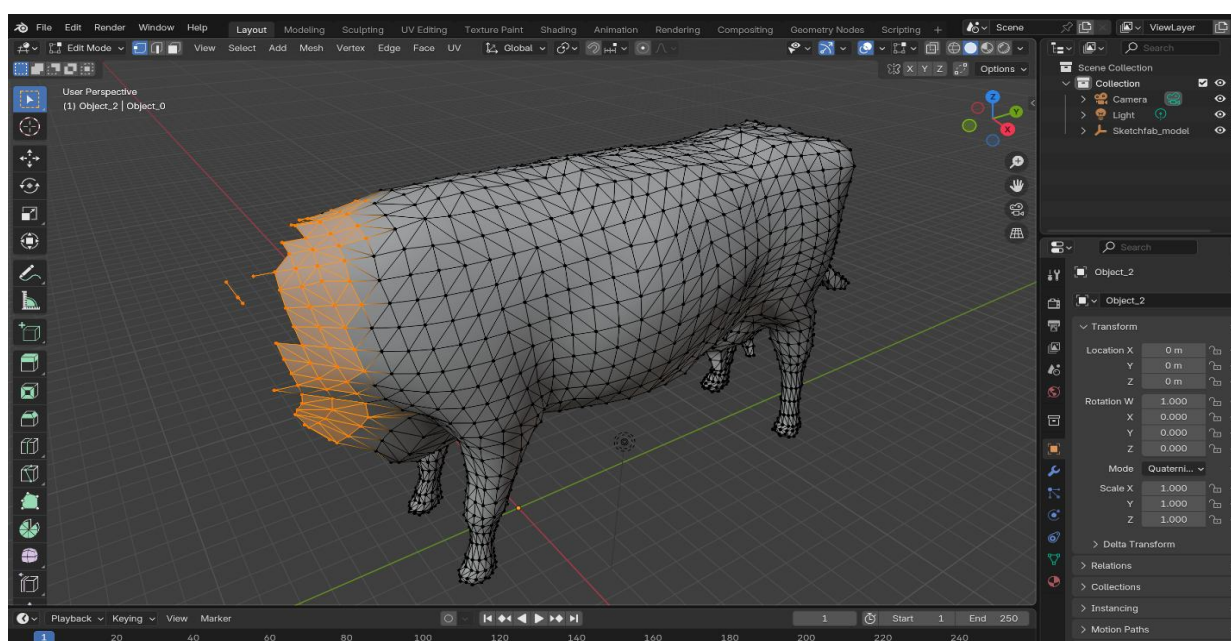
O uso de simulações tridimensionais também favorece o planejamento de zonas limpas e sujas, conforme as diretrizes da Organização Mundial de Saúde Animal (WOAH, 2023) e do Codex Alimentarius, que preveem separação física entre áreas de abate, processamento e armazenamento para prevenir contaminações cruzadas (AN INTELLIGENT CHITOSAN GELATIN FILM, 2023). Dentre utilização de ferramentas digitais para análise qualitativa foram:

Figura 8 - Exemplo do Twinmotion da Epic Games



Fonte: Elaborada pelo autor com a interface Twinmotion 2025.1.1 da Epic Games - Feita em: (08/10/2025)

Figura 9 - Exemplo de uso do Blender da Blender Foundation



Fonte: Elaborada pelo autor com Blender 4.5.2 LTS da Software Open Source Blender Foundation - Feita em: (08/10/2025)

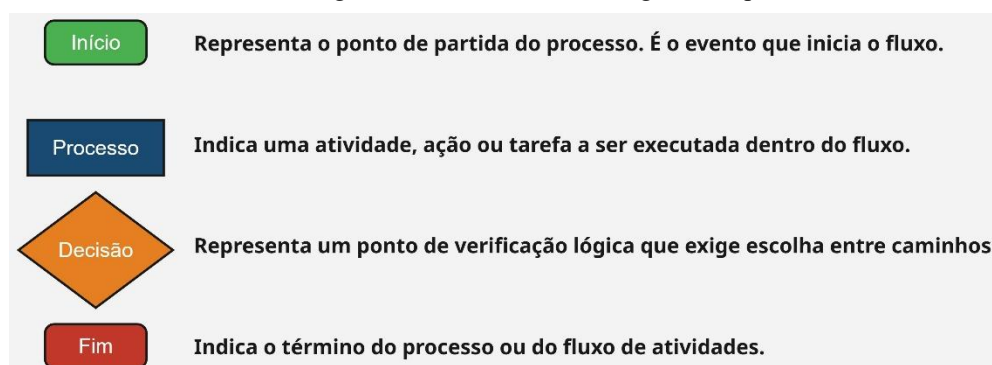
4. SIMULAÇÃO APLICADA AO PROCESSO PRODUTIVO DA CARNE BOVINA

A ferramenta central selecionada para a modelagem digital foi o Twinmotion, escolhido por sua capacidade de gerar ambientes imersivos e interativos em tempo real, permitindo a análise dinâmica dos fluxos (pessoas, carcaças, equipamentos). Essa abordagem é crucial para validar a setorização higiênico-sanitária (separação de áreas limpas e sujas), atendendo às diretrizes do RIISPOA (BRASIL, 2017) e do Codex Alimentarius (CODEX ALIMENTARIUS, 2020). Complementarmente, utilizou-se o Blender 4.5 (software de código aberto) para desenvolver objetos tridimensionais customizados (utensílios, barreiras), aumentando a fidelidade da simulação. Essa integração permitiu a representação realista de riscos ergonômicos e operacionais, em conformidade com normas como NR-36 (BRASIL, 2013) e NR-17 (FUNDACENTRO, 2021).

O uso combinado do BIM (Revit) e dessas ferramentas viabilizou a construção de um Gêmeo Digital (Digital Twin) funcional, alinhado à Indústria 4.0 e 5.0. O modelo suporta a análise de indicadores críticos de conformidade internacional: eficiência energética (ISO 50001, 2018), consumo de água (CONAMA 430/2011), rastreabilidade (ISO 22005, 2007) e segurança ocupacional (ISO 45001, 2018). Essa estratégia permite a experimentação virtual para apoiar decisões estratégicas e validar a conformidade antes de investimentos físicos.

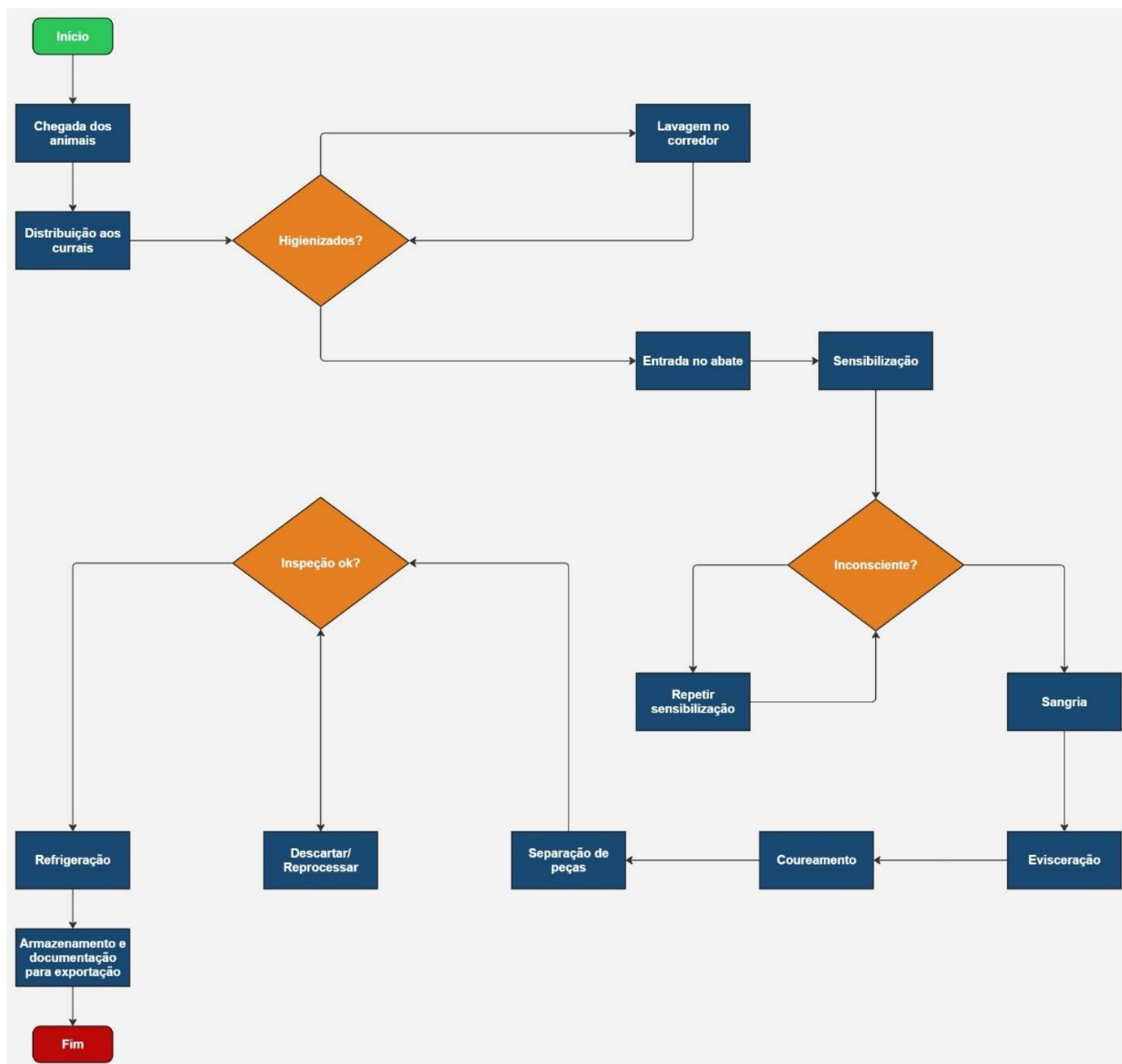
O modelo representacional é estruturado para servir de base para futuras análises quantitativas, como a Simulação a Eventos Discretos (DES), uma técnica consolidada para a otimização de sistemas produtivos complexos (PRODUCTIVITY INCREASE IN A LARGE SIZE SLAUGHTERHOUSE, 2022, p. 2). O diagrama é uma ferramenta essencial para mapear processos de forma estruturada, ajudando as equipes a compreenderem o escopo do processo antes de detalhá-lo. Ele fornece uma visão clara e concisa dos principais elementos envolvidos: fornecedores (Suppliers), entradas (Inputs), processo (Process), saídas (Outputs) e clientes (Customers). Para descrever esse processo abaixo a representação de uma legenda para um fluxograma com base da adaptação de normas e boas práticas de modelagem de processos (ABNT NBR ISO 5807:1989 e BPMN):

Quadro 01: Legenda de elementos do fluxograma de processo



Fonte: Feito pelo autor utilizando soluções de inteligência artificial da Miro - Disponível em: <<https://miro.com/pt/>> - Acesso em: 15/11/2025

Fluxograma 01 - Diagrama esquemático do fluxo produtivo de frigorífico



Fonte: Feito pelo autor utilizando soluções de inteligência artificial da Miro - Disponível em:
<<https://miro.com/pt/>> - Acesso em: 15/11/2025

5. ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS

O conceito do frigorífico inteligente é a materialização da Indústria 4.0, baseada na integração de sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA) para gerar dados e autoajustes operacionais na planta (KAGERMANN et al., 2013; DIGITAL TWIN APPLICATIONS IN THE FOOD INDUSTRY, 2022). Essa evolução direciona-se ao paradigma da Indústria 5.0, que, embora mantenha o foco tecnológico, reforça a centralidade humana, a cooperação homem-máquina e os objetivos de sustentabilidade (DEMIR; TÜRKÖĞLU, 2022; INDUSTRY 5.0, 2023).

A digitalização, nesse contexto, não é vista apenas como substituição de mão de obra, mas como uma transformação qualitativa do trabalho, que exige um novo perfil de colaborador, mais técnico e estratégico, apto a tomar decisões baseadas em dados.

Essa delegação é eficaz na redução da alta incidência de DORTs (Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho) no setor. Indústria 5.0 visa alavancar a criatividade humana, atribuindo aos especialistas tarefas que exigem pensamento crítico, enquanto o treinamento digital utiliza simulação imersiva e Gêmeos Digitais (como Twinmotion e Blender) para a aprendizagem ergonômica (LOPES; WILTGEN, 2022).

6. ANÁLISE QUALITATIVA E COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS

Do ponto de vista econômico e da sustentabilidade, a digitalização se estabelece como um investimento estratégico. A integração de tecnologias IoT e a modelagem digital suportam a Abordagem NEXUS (Água–Energia–Alimento), que permite o monitoramento e o controle adaptativo do sistema. O potencial de otimização de recursos é significativo, com projeções de redução de até 20% no consumo energético e 30% no consumo de água nas linhas de produção (FAO, 2021; DIGITAL TWIN APPLICATIONS IN THE FOOD INDUSTRY, 2022).

Esses ganhos estão diretamente alinhados às metas de ESG e aos compromissos globais da ONU (2020) de redução de emissão de gases, além de permitir que o modelo BIM/VR garanta a conformidade do layout com o RIISPOA e facilite a obtenção de certificações internacionais (HACCP e ISO 22000).

A integração do BIM (Revit) com ferramentas de ambientação viabilizou a construção de um cenário compatível com o conceito de Gêmeo Digital (Digital Twin), alinhado aos preceitos da Indústria 4.0 e 5.0, permitindo a experimentação virtual para validar a conformidade com normas críticas de eficiência energética (ISO 50001:2018), ambiental (CONAMA 430/2011), rastreabilidade (ISO 22005:2007) e segurança ocupacional (ISO 45001:2018) antes da execução física. A validação qualitativa do modelo assegurou a adequação dos fluxos, a integridade da cadeia do frio e a ergonomia, em consonância com as normas regulamentadoras NR-12, NR-17 e NR-36. Conclui-se que a digitalização e a automação constituem vetores essenciais para a competitividade e sustentabilidade do setor frigorífico, fortalecendo a governança da segurança alimentar por meio de auditorias transparentes e refletindo uma lógica pró-social comprometida com o bem-estar coletivo.

Imagens retiradas de forma geral da simulação do frigorífico:



Figura 10 - Entrada pela rodovia

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025



Figura 11 - Estacionamento

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

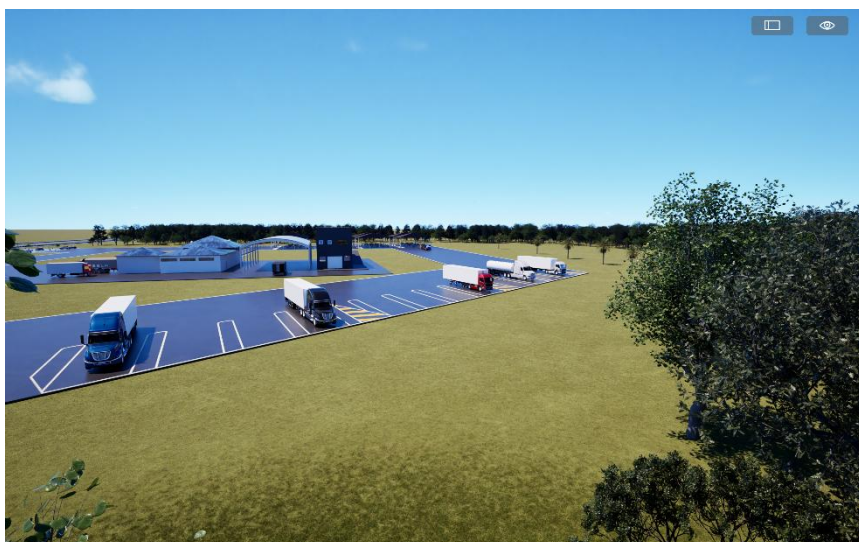


Figura 12 - Estacionamento de caminhões

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025



Figura 13 - Vista superior

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025



Figura 14 - Recepção dos bovinos

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

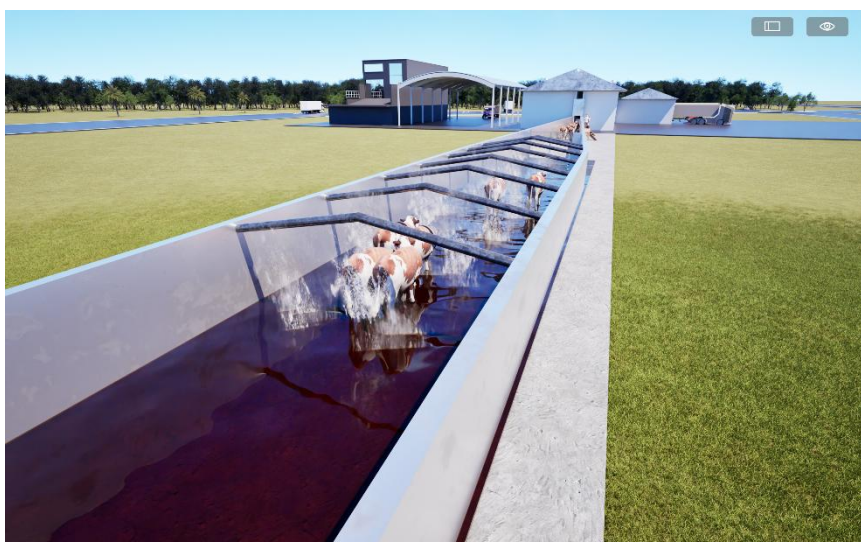


Figura 15 - Limpeza e entrada do abatedouro

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

A análise comparativa demonstrou que a Simulação atua como um instrumento decisivo de governança e inovação. Permite a validação virtual de layouts e fluxos antes da implementação física, o "Frigorífico Inteligente" consolida-se como um sistema resiliente, fundamentado na integração ciberfísica da Indústria 4.0 e na centralidade humana da Indústria 5.0.

A construção de cenários comparativos é uma etapa crítica para evidenciar o impacto da digitalização no setor frigorífico. Essa metodologia permite não apenas visualizar os gargalos de um sistema tradicional, mas também projetar e mensurar os benefícios de um frigorífico inteligente. A abordagem comparativa foi estruturada em dois cenários extremos para que as diferenças sejam perceptíveis e mensuráveis no ambiente simulado, servindo como ferramenta de decisão estratégica para gestores e engenheiros. Sendo o cenário 1 (Tradicional ou atual) e cenário 2 (Inteligente ou modernizado), havendo similaridades e contrastes.



Figura 16 - Etapa de sensibilização

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025



Figura 17 - Etapa de sensibilização (modernizado)

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

O frigorífico contemporâneo deve ser compreendido como parte integrante da transformação digital global da indústria alimentícia, na qual a convergência entre automação, inteligência artificial, sensoriamento e conectividade redefine a forma de projetar, operar e gerir sistemas produtivos. Os conceitos de Indústria 4.0, baseados na integração ciberfísica, Internet das Coisas (IoT), sistemas inteligentes e rastreabilidade digital e de Indústria 5.0, que enfatiza a cooperação homem-máquina, centralidade humana e sustentabilidade, formam o arcabouço teórico que sustenta a aplicação da simulação computacional como instrumento de inovação e governança setorial (MEAT 4.0, 2022; INDUSTRY 5.0, 2023).

Os resultados confirmam que a transformação digital gera benefícios mensuráveis em três frentes principais: Segurança e Conformidade, garantindo rastreabilidade transparente e governança na segurança alimentar; Eficiência de Recursos, com otimização significativa de água e energia alinhada a metas ESG; e Saúde Ocupacional, mitigando riscos ergonômicos através da automação.



Figura 18 - Etapa de insensibilização

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

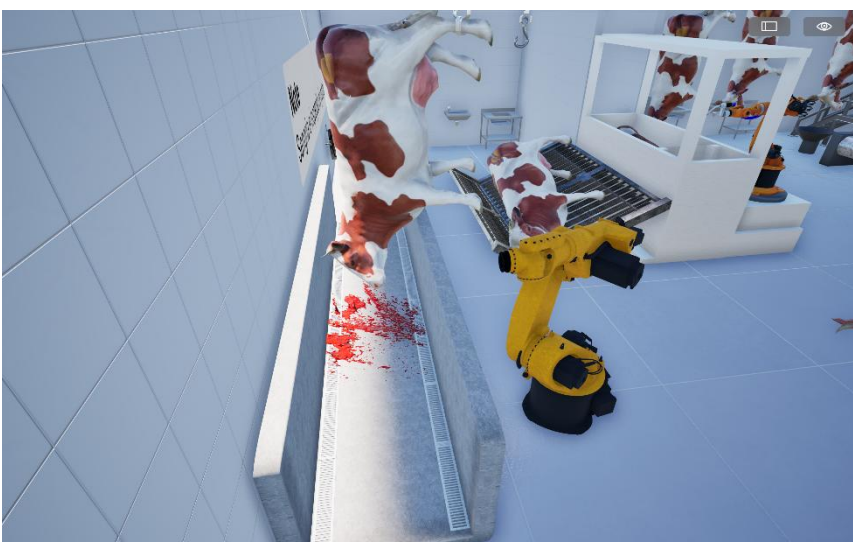


Figura 19 - Etapa de insensibilização (modernizado)

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

Nesse contexto, a inserção de robótica avançada e inteligência artificial transcende a mera substituição de mão de obra, promovendo uma qualificação do trabalho. Ao delegar tarefas insalubres e perigosas (como o trabalho em áreas frias e de corte) a sistemas inteligentes, a operação eleva o trabalhador a um perfil estratégico e analítico. Conclui-se, portanto, que a tecnologia cumpre uma função pró-social: assegurar a competitividade global e a sustentabilidade entre execução do trabalho e produto final.

Dentre as vantagens, destacam-se: Condições ergonômicas e redução do esforço físico percepção de conforto e segurança do trabalhador; Fluidez dos fluxos produtivos percepção de agilidade e organização operacional; Sustentabilidade e alinhamento ao NEXUS (água-energia-alimento) integração ambiental percebida; Capacitação e adaptação da equipe nível de treinamento e aceitação das novas tecnologias; Confiabilidade e integração digital rastreabilidade e comunicação entre setores; Imagem corporativa e competitividade de mercado reputação, inovação e posicionamento internacional.



Figura 20 - Etapa de coureamento

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025



Figura 21 - Etapa de coureamento (modernizado)

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Twinmotion 2025.1.1

Feita em: 2025

7. ANÁLISE QUANTITATIVA

Para conferir rigor matemático à validação visual apresentada anteriormente, desenvolveu-se uma rotina de simulação em linguagem Python focada na análise quantitativa dos indicadores de desempenho. Essa modelagem algorítmica foi projetada para processar as variáveis críticas de fluxo, consumo de recursos e eficiência operacional, traduzindo os cenários conceituais em dados estatísticos concretos. O objetivo central consiste em transformar as observações qualitativas do modelo tridimensional em métricas exatas para permitir uma avaliação objetiva dos ganhos proporcionados pela modernização.

A arquitetura da simulação fundamenta-se na definição da classe Workstation, responsável por parametrizar cada posto de trabalho com dados essenciais de consumo hídrico, demanda energética, tempos de ciclo e carga ergonômica, distinguindo claramente entre a operação humana e a robótica. Toda a lógica é orquestrada pela classe FrigoríficoSimulation, a qual gerencia o fluxo temporal e produtivo de um turno completo ao controlar a entrada e saída de carcaças, bem como a ocupação das estações ao longo do tempo.

Essa estrutura computacional permite contrastar diretamente o cenário tradicional, caracterizado por transporte manual e alta incidência de movimentos repetitivos, com o cenário inteligente, pautado pela automação e eficiência da Indústria 4.0. Ao processar as variáveis de entrada, o algoritmo gera um relatório comparativo robusto, cujos resultados apresentados na sequência oferecem a comprovação numérica da superioridade do modelo modernizado e detalham os avanços em produtividade e sustentabilidade. Resultados de execução do código:

Figura 22 - Resultados obtidos com 10 horas de funcionamento e 400 carcaças na fila inicial

```
PS C:\Users\phale> & C:/Users/phale/AppData/Local/Programs/Python/Python313/python.exe c:/Users/phale/Desktop/simulação_frigorifico.py
Iniciando simulação quantitativa de frigoríficos...

--- RELATÓRIO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ---

Cenário | Tradicional: Tradicional | Inteligente: Inteligente (Indústria 4.0)

--- PRODUTIVIDADE ---

Carcaças Processadas | Tradicional: 70 | Inteligente: 103
Produtividade (carcaças/hora) | Tradicional: 7.00 | Inteligente: 10.30

--- CONSUMO DE RECURSOS ---

Consumo Total de Água (litros) | Tradicional: 28758.00 | Inteligente: 11814.00
Consumo Total de Energia (kWh) | Tradicional: 74.91 | Inteligente: 91.91

--- ERGONOMIA E TRABALHO ---

Distância Manual Percorrida (metros) | Tradicional: 1495.83 | Inteligente: 0.00
Total de Movimentos Repetitivos (humanos) | Tradicional: 14100 | Inteligente: 510
PS C:\Users\phale>
```

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Visual Studio Code na versão 1.104.2 - Feita em:
(13/10/2025)

Resultado para: DURACAO_TURNO_HORAS = 10 e CARCACAS_NA_FILA_INICIAL = 400

Figura 23 - Resultados obtidos com 10 horas de funcionamento e 450 carcaças na fila inicial

```
PS C:\Users\phale> & C:/Users/phale/AppData/Local/Programs/Python/Python313/python.exe c:/Users/phale/Desktop/simulação_frigorifico.py
Iniciando simulação quantitativa de frigoríficos...

--- RELATÓRIO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ---

Cenário | Tradicional: Tradicional | Inteligente: Inteligente (Indústria 4.0)

--- PRODUTIVIDADE ---

Carcaças Processadas | Tradicional: 70 | Inteligente: 103
Produtividade (carcaças/hora) | Tradicional: 7.00 | Inteligente: 10.30

--- CONSUMO DE RECURSOS ---

Consumo Total de Água (litros) | Tradicional: 28758.00 | Inteligente: 11814.00
Consumo Total de Energia (kWh) | Tradicional: 74.91 | Inteligente: 91.91

--- ERGONOMIA E TRABALHO ---

Distância Manual Percorrida (metros) | Tradicional: 1495.83 | Inteligente: 0.00
Total de Movimentos Repetitivos (humanos) | Tradicional: 14100 | Inteligente: 510

PS C:\Users\phale>
```

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Visual Studio Code na versão 1.104.2 - Feita em:
(13/10/2025)

Resultado para: DURACAO_TURNO_HORAS = 10 e CARCACAS_NA_FILA_INICIAL = 450

Figura 24 - Resultados obtidos com 10 horas de funcionamento e 500 carcaças na fila inicial

```
PS C:\Users\phale> & C:/Users/phale/AppData/Local/Programs/Python/Python313/python.exe c:/Users/phale/Desktop/simulação_frigorifico.py
Iniciando simulação quantitativa de frigoríficos...

--- RELATÓRIO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ---

Cenário | Tradicional: Tradicional | Inteligente: Inteligente (Indústria 4.0)

--- PRODUTIVIDADE ---

Carcaças Processadas | Tradicional: 86 | Inteligente: 128
Produtividade (carcaças/hora) | Tradicional: 8.60 | Inteligente: 12.80

--- CONSUMO DE RECURSOS ---

Consumo Total de Água (litros) | Tradicional: 35688.00 | Inteligente: 14739.00
Consumo Total de Energia (kWh) | Tradicional: 93.00 | Inteligente: 114.71

--- ERGONOMIA E TRABALHO ---

Distância Manual Percorrida (metros) | Tradicional: 1853.97 | Inteligente: 0.00
Total de Movimentos Repetitivos (humanos) | Tradicional: 17555 | Inteligente: 635

PS C:\Users\phale>
```

Fonte: Elaborada pelo autor com o software Visual Studio Code na versão 1.104.2 - Feita em:
(13/10/2025)

Resultado para: DURACAO_TURNO_HORAS = 10 e CARCACAS_NA_FILA_INICIAL = 500

Em suma, a validação via código Python confere rigor matemático às propostas de layout e fluxo, demonstrando que a digitalização é um vetor de competitividade indispensável. A integração entre IoT, rastreabilidade e robótica cria um sistema resiliente capaz de atender às exigências sanitárias internacionais e aos mercados premium. As imagens apresentadas a seguir ilustram os relatórios gerados pelo sistema, detalhando graficamente as métricas de produtividade, consumo de recursos e impacto ergonômico discutidas.

Os resultados da simulação computacional para um turno de 10 horas evidenciaram a eficácia da modernização industrial ao registrar um aumento de produtividade de aproximadamente 48% no cenário inteligente que processou 128 carcaças contra apenas 86 do modelo tradicional. A gestão de recursos apresentou um importante balanço sustentável no qual a redução drástica do consumo de água de 35.688 para 14.739 litros compensou o incremento esperado na demanda energética de 93,00 para 114,71 kWh inerente à operação robotizada. Do ponto de vista da saúde ocupacional os dados foram definitivos ao zerar a distância de transporte manual de quase 2 quilômetros e reduzir a incidência de movimentos repetitivos de 17.555 para apenas 635 confirmando que a tecnologia não apenas otimiza o fluxo fabril mas protege a integridade física do trabalhador.

III. RESULTADOS

Os resultados confirmam que a aplicação de simulação computacional e Gêmeos Digitais atua como um instrumento decisivo para a modernização da indústria frigorífica, validando cenários antes da implementação física. A comparação entre modelos tradicionais e inteligentes demonstrou que a digitalização e a automação dos fluxos eliminam gargalos produtivos e fortalecem a governança sanitária. Ao integrar tecnologias de monitoramento e inteligência artificial, o sistema assegura uma rastreabilidade robusta e reduz riscos de contaminação, garantindo que a eficiência operacional caminhe lado a lado com a inocuidade do produto final e a transparência exigida pelo mercado.

Além dos ganhos produtivos, a abordagem evidenciou que a transformação digital é essencial para a sustentabilidade e o bem-estar ocupacional, alinhando-se aos conceitos da Indústria 5.0. A otimização dos layouts resultou em um uso muito mais racional de recursos críticos, como água e energia, diminuindo a pegada ambiental da atividade. Simultaneamente, a automação de tarefas perigosas e repetitivas protege a saúde do trabalhador, reduzindo acidentes e riscos ergonômicos, o que consolida a tecnologia não apenas como vetor de lucro, mas como uma estratégia pró-social que integra eficiência econômica e responsabilidade humana.

A aplicação da modelagem tridimensional e da simulação em ambiente virtual consolidou-se como uma ferramenta robusta de diagnóstico preventivo, permitindo a identificação e correção de gargalos críticos no layout industrial. A análise comparativa dos cenários possibilitou eliminar o cruzamento entre fluxos limpos e sujos antes da execução física, garantindo a segregação higiênico-sanitária exigida por normas internacionais. Essa antecipação valida o uso de Gêmeos Digitais como um instrumento estratégico para evitar custos corretivos e assegurar que a eficiência operacional esteja em total conformidade com a segurança dos alimentos.

Sob a ótica da sustentabilidade e da abordagem NEXUS (Água-Energia-Alimento), a digitalização demonstrou ser essencial para equilibrar a eficiência produtiva com a responsabilidade ambiental. A capacidade de otimização preditiva permite gerenciar os trade-offs entre o consumo de recursos, viabilizando estratégias que reduzem o uso de água e energia e fomentam a economia circular através do aproveitamento de resíduos. Esse alinhamento aos objetivos globais de sustentabilidade fortalece a legitimidade moral da indústria, provando que a modernização tecnológica é o caminho para uma operação economicamente viável e de baixo impacto ambiental.

A cadeia produtiva da carne bovina brasileira, embora consolidada como potência global, enfrenta uma dicotomia estrutural onde a excelência tecnológica dos grandes exportadores contrasta com a baixa maturidade digital de unidades menores, resultando em gargalos sanitários e operacionais críticos. A persistência de processos

manuais e obsoletos agrava a incidência de patologias como a cisticercose e lesões por manejo inadequado, o que acarreta elevados índices de condenação de carcaças e prejuízos financeiros diretos que depreciam o valor do produto final. Nesse contexto, a transição para a manufatura inteligente transcende a mera atualização técnica, tornando-se uma condição imperativa para garantir a rastreabilidade, a adequação às rígidas normas internacionais de inocuidade e a mitigação de riscos biológicos que ameaçam a credibilidade do setor.

Sob a ótica econômica, a modernização impõe o desafio estratégico de equilibrar o investimento de capital em automação e robótica, cujos custos variam significativamente entre o mercado de novos e usados, com os prejuízos recorrentes gerados pela ineficiência produtiva. Embora a aquisição de tecnologias avançadas exija um aporte inicial considerável, esta despesa é justificada a médio prazo pela redução drástica de passivos trabalhistas e pelo aproveitamento racional de recursos hídricos e energéticos segundo a abordagem NEXUS. Dessa forma, estratégias como o retrofit de equipamentos e o uso de simulação digital emergem como soluções viáveis para assegurar a sustentabilidade financeira, transformando a prevenção de perdas e a conformidade sanitária em vantagens competitivas robustas.

Por fim, a discussão reafirma a centralidade humana proposta pela Indústria 5.0, onde a automação não visa substituir, mas qualificar o trabalho e proteger a vida. Ao transferir atividades insalubres, repetitivas e perigosas para sistemas robóticos, a tecnologia mitiga drasticamente os riscos ergonômicos e de acidentes, elevando o trabalhador a funções de supervisão técnica. A aplicabilidade do modelo estende-se ao treinamento imersivo e à validação de normas de segurança, servindo como um elo indispensável para transformar plantas convencionais em ambientes de trabalho seguros, inteligentes e resilientes.

IV. CONCLUSÃO

A pesquisa consolidou que a integração entre modelagem BIM e simulação imersiva constitui uma metodologia robusta e indispensável para a modernização do setor frigorífico. O desenvolvimento do Gêmeo Digital validou-se como uma ferramenta de governança preventiva, capaz de antecipar falhas de layout e riscos sanitários antes de qualquer intervenção física. Sob a ótica da Abordagem NEXUS, o estudo comprovou que a digitalização é o elo necessário para equilibrar a eficiência produtiva com a sustentabilidade, demonstrando ser viável reduzir drasticamente o consumo de recursos hídricos e energéticos enquanto se amplia a capacidade operacional e a aderência à economia circular.

Além dos indicadores de desempenho, a transição para a Indústria 5.0 revelou-se um vetor de proteção social e saúde pública. A automação de tarefas insalubres retira o trabalhador de zonas de risco, mitigando acidentes e doenças ocupacionais, ao mesmo tempo em que a rastreabilidade digital e a inteligência artificial elevam o rigor da vigilância sanitária. Dessa forma, a tecnologia transcende a função operacional para conferir legitimidade moral às empresas, alinhando o setor às exigências globais de transparência, inocuidade do produto e bem-estar corporativo.

Como recomendação estratégica, sugere-se que o setor adote a simulação virtual como etapa obrigatória de pré-investimento, integrando futuramente modelos matemáticos quantitativos para refinar métricas de capacidade. A indústria deve priorizar uma automação orientada a riscos e investir na gestão de dados para rastreabilidade total, assegurando que a modernização tecnológica resulte em um ecossistema produtivo resiliente, ambientalmente responsável e seguro para a sociedade.

V. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

VI. REFERÊNCIAS

1. ALBRECHT, T.; CROOTOFF, A.; SCOTT, C. A. The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods and tools. *Water*, v. 10, n. 1, p. 1-19, 2018.
2. ALMEIDA, F. et al. Aplicações de tecnologias de rastreabilidade digital na indústria alimentícia: RFID e blockchain. *Journal of Food Engineering*, v. 256, p. 32–45, 2019.
3. BRASIL. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Aprova o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA). Brasília, DF, 2017.
4. BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. NR 36 – Segurança e Saúde no Trabalho em Empresas de Abate e Processamento de Carnes e Derivados, de 18 de abril de 2013.
5. CODEX ALIMENTARIUS. Código Internacional de Práticas Recomendadas - Princípios Gerais de Higiene dos Alimentos (CXC 1-1969). Roma: FAO/OMS, 2020.
6. DIGITAL TWIN APPLICATIONS IN THE FOOD INDUSTRY: a review of current trends, applications, and challenges. Artigo de Periódico, 2022.
7. FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. The State of Food and Agriculture (SOFA): Agricultural innovation for family farmers. Rome: FAO, 2021.
8. HOW TO BUILD VALID AND CREDIBLE SIMULATION MODELS. *Journal of Operations Management*, v. 67, n. 4, p. 509-528, 2021.
9. INDUSTRY 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, v. 30, 100371, 2023.
10. LOPES, M. L.; WILTGEN, F. Análise e estudo de preenchimento de cavidades em injeção plástica via simulação computacional. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (SETI). 2022.
11. NOGUEIRA, M.; LONGHINI, M. Ergonomia e fadiga ocupacional em frigoríficos: revisão e desafios. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, v. 49, e13, 2024.
12. OCORRÊNCIA DE CISTICERCOSE BOVINA EM ABATEDOUROS FRIGORÍFICOS e a importância da inspeção sanitária para diagnóstico e controle da doença: Revisão de Literatura. *GETEC*, v. 11, n. 35, p. 91-109, 2022.
13. PRODUCTIVITY INCREASE IN A LARGE SIZE SLAUGHTERHOUSE. *International Journal of Lean Six Sigma*, v. 13, n. 4, p. 802-823, 2022.
14. SILVA, E. P. C.; SILVA, F. C. Da simulação computacional ao uso das representações visuais: desenvolvendo práticas epistêmicas em aulas de Química. *Educação*, v. 47, 2022. DOI: 10.5902/19846444444488.

15. WORK ACCIDENTS IN BRAZILIAN REFRIGERATORS and their relation to work environment and organizational factors: a systematic review. Research, Society and Development, v. 11, n. 11, e272111133356, 2022.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.