



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

Davi de Simas

**Análise do Desempenho da Cadeia de Suprimentos em uma Empresa de  
Hardware: Perspectivas de Simulação**

Florianópolis  
2024

Davi de Simas

**Análise do Desempenho da Cadeia de Suprimentos em uma Empresa de  
Hardware: Perspectivas de Simulação**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Mecânica

Orientador: Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.-Ing.

Florianópolis

2024

de Simas, Davi

Análise do Desempenho da Cadeia de Suprimentos em uma Empresa de Hardware : Perspectivas de Simulação / Davi de Simas ; orientador, Enzo Morosini Frazzon, 2024.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Cadeia de Suprimentos. 3. Simulação. 4. Gestão Logística. I. Morosini Frazzon, Enzo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. III. Título.

Davi de Simas

**Análise do Desempenho da Cadeia de Suprimentos em uma Empresa de Hardware:**  
Perspectivas de Simulação

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico com Habilitação em Produção e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Produção Mecânica.

Local Florianópolis, 12 de dezembro de 2024.



Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.

Orientador



Prof. Lynceo Falavigna Braghirolli, Dr.

Instituição UFSC



Doutorando Silvio Luiz dos Santos Alvim

Instituição UFSC

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho ao meu pai, minha maior inspiração e herói, cuja memória vive em meu coração e guia meus passos todos os dias. E à minha vó Maria, por quem este sonho se torna realidade mais por ela do que por mim. É com amor e gratidão que entrego esta conquista em honra a vocês.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Enzo por acreditar em mim e no meu potencial. Tenho imensa gratidão pelas oportunidades que me proporcionou e pela inspiração como mentor. O crescimento que alcancei ao longo desses anos reflete o aprendizado que tive sob sua orientação. Admiro profundamente sua liderança.

Ao Silvio Alvim, grande amigo e parceiro no laboratório ProLogIS, minha gratidão por todo o apoio, pelas conversas valiosas e pelos conselhos que tanto me ajudaram em decisões importantes. Sua experiência é uma fonte constante de aprendizado. Também agradeço ao Robson Castro e Adalberto Oliveira pelo suporte essencial nas simulações que embasaram este trabalho.

Agradeço ao meu pai, Marcos, meu herói e melhor amigo. É uma honra ser seu filho e herdar sua inteligência e valores. A melhor época da minha vida foi ao seu lado, e você vive eternamente em meu coração. Em memória ao Boxy, agradeço a companhia e pelos momentos inesquecíveis da minha infância.

À minha mãe, Roseli, mulher de sabedoria e bondade ímpar, minha eterna gratidão pelo amor, apoio incondicional e pela força que você sempre me dá. Você é uma inspiração e uma ponte entre mim e Deus.

À minha irmã, Sara, minha parceira de vida, obrigado pela conexão e pelo apoio em todas as etapas. Ao meu cunhado, Matheus, agradeço por cuidar tão bem dela e do meu sobrinho e por todo o suporte que você sempre me deu.

A minha avó Maria Sabel, matriarca da família, e às minhas tias Rosi, Jô, Rosana e Jaina, mulheres sábias que sempre me apoiaram e me incentivaram. Sou grato por tudo o que fizeram por mim e pelo meu pai. Aos meus tios Toro, Ivo, Enilton e Marco, e a todos os meus primos, minha gratidão também. Rosi e Toro, agradeço a oportunidade de compartilhar a trajetória da minha graduação ao lado de vocês. Vocês são um exemplo de casal e me ensinaram muito com suas experiências e conselhos. Aos meus avós Selma e Zézinho, pela simplicidade e alegria que sempre trouxeram à família. Aos meus padrinhos, Cleusinha e Márcio, e à Márcia, pela presença e amizade genuína aos meus pais.

Agradeço também à Dayane, pelas boas memórias, amor e ao crescimento compartilhado. E aos meus amigos Motta e Rossi, obrigado pela amizade verdadeira.

Ao Pedroso, por confiar em mim e me oferecer oportunidades. Admiro sua liderança e agradeço ao time da LSB por todo o aprendizado e crescimento.

A todos, minha mais profunda gratidão. Obrigado por serem parte essencial da minha história. Por fim, meu maior desejo é retribuir a cada um de vocês por tudo o que fizeram por mim.





## RESUMO

Este estudo analisa o desempenho da cadeia de suprimentos de uma empresa do setor de hardware de computadores, utilizando a metodologia de modelagem e simulação com o objetivo de avaliar três diferentes designs de rede: clássico, cruzado e sincronizado. O design clássico é simples e estável, com fluxos lineares de suprimentos. O design cruzado integra múltiplos pontos de conexão, proporcionando maior flexibilidade, enquanto o design sincronizado combina adaptabilidade e integração na resposta da rede às demandas. Os cenários simulados incluem operações sem interrupções e situações de falha no fornecedor, incapacidade de produção e variação na demanda. Os resultados indicam que o design clássico é o mais resiliente em cenários de interrupção moderada, enquanto o cruzado apresenta maior flexibilidade para atender flutuações na demanda. O design sincronizado, por sua vez, destaca-se por sua capacidade de integração, oferecendo uma resposta adaptável às mudanças no ambiente operacional, embora enfrente desafios relacionados aos custos operacionais. A análise quantitativa evidencia o impacto das interrupções nos níveis de serviço, tempos de ciclo e custos logísticos, destacando trade-offs entre eficiência e flexibilidade. Este estudo não apenas contribui para a compreensão dos fatores críticos na escolha do design da cadeia de suprimentos do setor, mas também reforça a importância de alinhar as operações logísticas à estratégia de negócio e aos objetivos financeiros na tomada de decisão.

**Palavras-chave:** Cadeia de suprimentos; Simulação; Gestão logística.

## ABSTRACT

This study analyzes the performance of the supply chain of a computer hardware company using modeling and simulation methodology to evaluate three different network designs: classic, cross-docking, and synchronized. The classic design is simple and stable, with linear supply flows. The cross-docking design integrates multiple connection points, offering greater flexibility, while the synchronized design combines adaptability and integration in responding to network demands. The simulated scenarios include operations without disruptions and situations of supplier failure, production incapacity, and demand variability. The results indicate that the classic design is the most resilient in moderately disruptive scenarios, while the cross-docking design demonstrates greater flexibility to handle demand fluctuations. The synchronized design, in turn, stands out for its integration capability, providing an adaptable response to changes in the operational environment, albeit facing challenges related to operational costs. The quantitative analysis highlights the impact of disruptions on service levels, cycle times, and logistics costs, emphasizing trade-offs between efficiency and flexibility. This study not only contributes to understanding the critical factors in selecting supply chain designs for the sector but also reinforces the importance of aligning logistics operations with business strategy and financial objectives in decision-making.

**Keywords:** Supply Chain; Simulation; Logistics Management.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.2	OPORTUNIDADE .....	14
1.3	OBJETIVO .....	15
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>15</b>
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
<b>1.4.1</b>	<b>Relevância e contribuição do trabalho</b> .....	<b>17</b>
1.5	INEDITISMO .....	18
1.6	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	19
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>21</b>
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
<b>2.1.1</b>	<b>Cadeia de Suprimentos (CS)</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Resiliência da Cadeia de Suprimentos (SCRES)</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Robutez da Cadeia de Suprimentos (SCROB)</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Resistência da Cadeia de Suprimentos (SCRESIS)</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Gêmeo Digital (DT)</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.6</b>	<b>Modelagem</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.7</b>	<b>Simulação</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.8</b>	<b>Oportunidades de Melhoria Identificadas na Literatura</b> .....	<b>27</b>
2.2	METODOLOGIA .....	28
<b>2.2.1</b>	<b>Estrutura Proposta para a Elaboração da Metodologia</b> .....	<b>30</b>
2.2.1.1	<i>Fase 1: Revisão da Literatura</i> .....	30
2.2.1.2	<i>Fase 2: Modelagem e Simulação</i> .....	31
2.2.1.3	<i>Fase 3: Análise de Resultados</i> .....	33
<b>2.2.2</b>	<b>Metodologia de Pesquisa</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Declaração do Problema</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Construção do Modelo</b> .....	<b>36</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Processos de Simulação</b> .....	<b>37</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Estatísticas da Simulação e Seleção de KPIs</b> .....	<b>37</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Experimentos de Simulação</b> .....	<b>38</b>

2.2.7.1	<i>Cenário 1: Rede Clássica da CS</i> .....	38
2.2.7.2	<i>Cenário 2: Rede Cruzada da CS</i> .....	39
2.2.7.3	<i>Cenário 3: Rede Sincronizada da CS</i> .....	40
2.3	<b>RESULTADOS</b> .....	42
2.3.1	<b>Cenário 1: Rede Clássica da CS</b> .....	44
2.3.2	<b>Cenário 2: Rede Cruzada da CS</b> .....	45
2.3.3	<b>Cenário 3: Rede Sincronizada da CS</b> .....	46
2.4	<b>DISCUSSÃO</b> .....	47
2.4.1	<b>Rede Clássica</b> .....	47
2.4.2	<b>Rede Cruzada</b> .....	48
2.4.3	<b>Rede Sincronizada</b> .....	48
2.4.4	<b>Comparação Geral e Implicações</b> .....	49
3	<b>CONCLUSÃO</b> .....	53
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	56

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No cenário dinâmico atual, as empresas do setor de hardware de computadores enfrentam desafios significativos relacionados à eficiência, flexibilidade e capacidade de resposta em suas Cadeias de Suprimentos. A entrega eficiente de produtos é essencial para atender às demandas dos clientes sem elevar os custos com estoques excessivos ou enfrentar o risco de obsolescência. Paralelamente, a capacidade de adaptação às flutuações de mercado confere uma vantagem competitiva, especialmente em um setor caracterizado por rápidas inovações tecnológicas.

Para atingir esses objetivos, é necessário otimizar processos de produção e logística, integrar tecnologias avançadas aos sistemas existentes e avaliar os impactos econômicos, ambientais e sociais dessas iniciativas (KUSIAK, 2018; BOGERS et al., 2016; HENRY et al., 2019). Neste contexto, este estudo caracteriza os principais desafios enfrentados por uma empresa de hardware e explora abordagens estratégicas para fortalecer a eficiência operacional e a resiliência da CS diante das exigências do mercado.

## 1.2 OPORTUNIDADE

A transição para a produção eficiente e ágil de hardware e serviços de computador representa uma oportunidade significativa para aumentar o valor gerado na cadeia de suprimentos. A capacidade de adaptar rapidamente a produção e a entrega de produtos tecnológicos em escala traz benefícios em termos de eficiência e flexibilidade para atender à demanda dinâmica do mercado.

Uma das principais oportunidades reside na necessidade de instalações de produção mais flexíveis, ágeis e modulares. A adoção de tecnologias emergentes permite uma produção mais adaptável, possibilitando mudanças rápidas entre produtos e a personalização das ofertas em resposta às necessidades do mercado em constante evolução. Isso oferece uma vantagem competitiva, pois as empresas podem ser mais ágeis e responsivas às necessidades dos clientes (KUSIAK, 2018).

Além disso, a produção sob demanda possibilita que as empresas atendam às exigências específicas dos clientes sem a necessidade de manter altos níveis de estoque de produtos acabados. Isso não apenas reduz os custos de armazenamento, mas também minimiza o risco de obsolescência de produtos, resultando em uma cadeia de suprimentos mais enxuta e eficiente (BOGERS et al., 2016).

Em suma, embora a personalização e a eficiência representem oportunidades para aumentar o valor gerado na cadeia de suprimentos, as empresas de hardware enfrentam desafios significativos para alcançar essa condição. Entre os principais desafios estão as incertezas associadas à demanda dinâmica do mercado, as complexidades na integração de tecnologias avançadas e as limitações de recursos operacionais. Tais fatores dificultam a obtenção de flexibilidade, agilidade e competitividade necessárias para atender às expectativas dos clientes e aos rigorosos requisitos de custo e tempo. Assim, torna-se essencial compreender as variáveis que impactam o desempenho da cadeia de suprimentos e propor estratégias que equilibrem eficiência e resiliência.

### 1.3 OBJETIVO

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos de uma empresa de hardware.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar oportunidades de melhoria nas análises de desempenho da cadeia de suprimentos.

Este objetivo visa compreender os principais gargalos, ineficiências e lacunas que comprometem os resultados operacionais, permitindo direcionar esforços para otimizar processos e melhorar a tomada de decisão.

- Propor um modelo de simulação para análise de desempenho da cadeia de suprimentos.

A construção de um modelo de simulação possibilita testar diferentes cenários, identificar soluções viáveis para os desafios da cadeia de suprimentos e embasar decisões estratégicas com maior precisão.

- Evidenciar o modelo em cenários de operação de distribuição física de produtos.

Aplicar o modelo em cenários reais demonstra sua utilidade prática, validando sua eficácia para resolver problemas como a alocação de recursos, tempos de ciclo e impacto financeiro.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A gestão eficaz da cadeia de suprimentos desempenha um papel estratégico para o sucesso das empresas no cenário atual, caracterizado por alta competitividade e a necessidade de respostas ágeis às demandas do mercado. Diversos estudos destacam como um gerenciamento eficiente pode transformar operações convencionais, reduzindo custos, aumentando a sustentabilidade e aprimorando a eficiência operacional (HENRY, 2019; KUSIAK, 2018).

Um exemplo relevante é o caso da Procter & Gamble (P&G), que adotou tecnologias emergentes como IoT, análise de big data e automação para aprimorar a gestão do fluxo de matérias-primas e otimizar a logística. A empresa conseguiu reduzir significativamente os custos de transporte e melhorar a previsibilidade das entregas, abandonando o modelo tradicional para implementar práticas de inteligência artificial e integração digital em sua cadeia de suprimentos. Esse movimento não apenas aumentou a eficiência, mas também reduziu o impacto ambiental associado à sua logística global.

A transformação das cadeias de suprimentos não se limita ao nível operacional. Ela redefine fluxos macroeconômicos, influenciando a redistribuição de empregos, a sustentabilidade e até mesmo a competitividade global de indústrias. Tecnologias emergentes como gêmeos digitais, blockchain e machine learning estão



possibilitando maior visibilidade, redução de riscos e otimização de processos em níveis antes inalcançáveis (BOGERS et al., 2016).

Portanto, compreender e explorar soluções inovadoras para os desafios das cadeias de suprimentos não é apenas uma vantagem competitiva, mas uma necessidade estratégica para empresas que desejam prosperar em mercados complexos e dinâmicos. Este estudo busca contribuir para essa discussão, explorando estratégias e ferramentas que possam promover eficiência e resiliência na gestão da cadeia de suprimentos.

#### **1.4.1 Relevância e contribuição do trabalho**

A análise de cadeias de suprimentos em empresas de hardware é um tema relevante e atual, com potencial para trazer avanços significativos às práticas de produção e logística. Uma gestão eficiente permite melhorar a agilidade e a flexibilidade das operações, reduzir custos e desperdícios, além de atender de forma eficaz às demandas de mercados dinâmicos. Exemplos práticos destacam como estratégias inovadoras podem transformar a logística e distribuição no setor. A Dell, por exemplo, tornou-se referência global ao implementar o modelo de manufatura sob demanda (Build-to-Order), que reduz estoques e acelera o atendimento às necessidades dos clientes, promovendo personalização e eficiência. Da mesma forma, a Lenovo utiliza centros de distribuição estrategicamente localizados para otimizar fluxos logísticos e reduzir tempos de entrega, assegurando maior competitividade global. Já a Samsung combina a integração de suas fábricas com o uso de tecnologias avançadas, como IoT e inteligência artificial, para prever demandas e ajustar a produção de forma ágil e precisa.

Este trabalho contribui para o desenvolvimento de uma base de conhecimento robusta, fornecendo insights valiosos para empresas que desejam otimizar suas operações logísticas e de distribuição. Além disso, os resultados obtidos poderão apoiar a adoção de tecnologias emergentes e melhores práticas no setor, promovendo um entendimento mais profundo das dinâmicas logísticas em um ambiente competitivo e em constante evolução.

## 1.5 INEDITISMO

O presente trabalho se distingue por abordar a análise de cadeias de suprimentos no contexto específico de uma empresa de hardware, explorando as particularidades desse setor, que ainda carece de estudos aprofundados em comparação com áreas mais amplamente analisadas, como a manufatura tradicional. Embora haja contribuições significativas na literatura sobre cadeias de suprimentos, a especificidade dos desafios enfrentados por empresas de hardware, como a alta dependência de componentes tecnológicos e as rápidas mudanças na demanda, evidencia a necessidade de estudos direcionados que preencham essa lacuna.

Além disso, o foco deste trabalho em estratégias de otimização da cadeia de suprimentos é contextualizado por eventos disruptivos globais recentes, como a escassez de componentes eletrônicos, tensões geopolíticas, e eventos climáticos extremos, incluindo inundações, ondas de calor e tempestades, que afetam diretamente os fluxos logísticos e de produção. A análise desses fatores destaca a relevância de desenvolver soluções robustas e adaptáveis para enfrentar tais desafios.

A utilização de métodos de modelagem e simulação para a avaliação do desempenho logístico permite explorar cenários diversos com base em dados fornecidos, proporcionando uma análise detalhada que pode auxiliar na tomada de decisão estratégica. Embora esse enfoque seja amplamente discutido na literatura da área, o presente trabalho se posiciona como uma extensão prática ao aplicar essas abordagens ao setor de hardware, considerando suas especificidades e explorando sua aplicabilidade em um contexto de disrupções e incertezas.

Por fim, este estudo avalia a aplicabilidade de propostas e estratégias já utilizadas em outros setores para o setor de hardware, sugerindo adaptações que possam contribuir para a melhoria das práticas de gestão da cadeia de suprimentos. Dessa forma, não apenas oferece reflexões críticas sobre as abordagens tradicionais, mas também apresenta uma contribuição prática e teórica para o avanço do conhecimento na área.

## 1.6 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho foca na análise de cadeias de suprimentos de uma empresa de hardware, denominada ABC (nome fictício para preservar o anonimato), com as seguintes delimitações:

1. **Contexto Setorial:** A pesquisa aborda exclusivamente a indústria de hardware, excluindo setores de manufatura tradicional e serviços que não estejam diretamente ligados ao fornecimento de hardware.
2. **Geografia:** O estudo concentra-se nas operações da ABC na América do Norte e América Latina, regiões escolhidas devido às particularidades logísticas e de mercado, especialmente no contexto de interrupções globais recentes.
3. **Foco Temporal:** A análise cobre um período de dois anos, com foco em eventos atuais que impactam a cadeia de suprimentos, como a escassez de chips de inteligência artificial, tensões geopolíticas e eventos climáticos. Não inclui uma análise histórica detalhada.
4. **Escopo Metodológico:** Utiliza-se uma abordagem qualitativa baseada em modelagem e simulação. Os resultados refletem as condições específicas da ABC e não são generalizáveis para outros contextos ou setores.
5. **Limitações de Dados:** Os dados analisados incluem informações fornecidas pela ABC e fontes secundárias relevantes, como custo de produtos, histórico de vendas e projeções de demanda. A ausência de dados históricos abrangentes e detalhados foi considerada durante o estudo, restringindo parcialmente a análise, mas sem comprometer os objetivos propostos.

Essas delimitações garantem foco e sistematização no alcance dos objetivos do estudo, considerando as restrições e especificidades do tema.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em partes:

1. **Fundamentação Teórica:** Apresenta a revisão da literatura sobre as principais teorias e conceitos relacionados às cadeias de suprimentos, com foco nas particularidades do setor de hardware. São exploradas tendências

atuais, desafios como interrupções globais, e ineficiências na gestão das cadeias de suprimentos.

2. **Metodologia:** Detalha os procedimentos adotados na pesquisa, incluindo as etapas de coleta, organização e análise de dados, identificação de variáveis-chave, modelagem, simulação e interpretação dos resultados.
3. **Resultados e Discussões:** Apresenta os resultados obtidos, discutindo-os à luz da metodologia aplicada e das questões levantadas no início do trabalho. São destacados os achados mais relevantes e suas implicações.
4. **Considerações Finais:** Fornece as conclusões da pesquisa, destacando as contribuições do estudo para a área e sugerindo direções para futuras pesquisas, especialmente no contexto de cadeias de suprimentos do setor de hardware.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **2.1.1 Cadeia de Suprimentos (CS)**

Uma Cadeia de Suprimentos (CS) é considerada uma meta-organização composta por organizações interdependentes que integram sistemas de negócios entre si e constroem relacionamentos interorganizacionais. Portanto, ela envolve todas as organizações pertencentes aos processos de design, fabricação, distribuição, marketing e varejo de um produto ou serviço, tornando o seu gerenciamento complexo e desafiador (OH; MOON; ZHONG, 2020).

As tarefas pertencentes à rede da CS, são: o gerenciamento das relações entre as diferentes partes envolvidas, como fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes, rastreamento de itens e controle de processos (CHAMEKH et al., 2018). A rede da CS é essencialmente uma rede dinâmica orientada para o fluxo de informações com a operação de fluxo de material e fluxo de caixa (LONG, 2014). Por exemplo, uma cadeia de suprimentos do segmento de hardware é estruturada com fornecedores em diversas regiões e com uma operação de distribuição global, o que evidencia a complexidade da rede.

Nesta linha, o ambiente externo e o interno e a relação entre a oferta e a demanda dão origem a complexidade da CS. A coordenação das funções de negócios tanto internas a uma empresa quanto entre os participantes da CS é realizada no gerenciamento da CS, e este tem como objetivo a melhoria do desempenho de longo prazo das empresas individuais e da CS na sua totalidade (WEI; PRYBUTOK; SAUSER, 2021).

Desta forma, o principal objetivo ao projetar uma CS é preservar sua eficácia atendendo a demanda do cliente e manter-se competitiva no mercado. Para que tal objetivo possa ser atingido, os riscos que incidem na CS devem ser identificados, avaliados e priorizados (SABOUHI; PISHVAEE; JABALAMELI, 2018).

Em resumo, a CS é uma integração de processos de negócios ou organizações e para que a gestão do impacto das interrupções ocorra, é necessário o conhecimento mais amplo dessa integração (DUONG; CHONG, 2020). A

vulnerabilidade da CS a riscos e interrupções varia conforme a probabilidade da ocorrência e impacto (KAUPPI et al., 2016).

### **2.1.2 Resiliência da Cadeia de Suprimentos (SCRES)**

Ribeiro e Barbosa-Póvoa (2018) definem SCRES como a capacidade de preparar, responder e recuperar de perturbações, mantendo operações estáveis com custos e tempos aceitáveis. Rahman et al. (2022) revisam estratégias chave para SCRES, mas destacam a escassez de estudos que utilizem simulação e abordem grandes interrupções na cadeia de suprimentos.

Al-Banna et al. (2022), Aldrighetti et al. (2023) e Manuj et al. (2024) reforçam que SCRES envolve resposta eficaz e recuperação de eventos inesperados enquanto mantém desempenho planejado e controle estrutural. Para Luevano e Barrientos (2022), as cadeias de suprimentos, modeladas como Sistemas Adaptativos Complexos (CAS), são compostas por agentes interconectados que se adaptam às incertezas, reforçando o papel da SCRES em gerenciar interrupções.

As abordagens fundamentais incluem recuperação, terceirização (Kazancoglu et al., 2024), gestão de inventário (Alikhani et al., 2023) e tecnologias como gêmeos digitais (Ivanov e Dolgui, 2019; 2020) e inteligência artificial (Modgil et al., 2022). Contudo, há uma lacuna na integração prática dessas ferramentas para mitigar interrupções e aprimorar a resiliência.

Faggioni et al. (2024) identificam três atributos principais: flexibilidade, adaptabilidade e ambidestria. Exemplos incluem a reconfiguração de cadeias durante a pandemia de COVID-19 e a adaptação à escassez de semicondutores (Frieske e Stieler, 2022; Phadnis, 2024). Apesar do avanço conceitual, métodos claros para analisar ou fortalecer a SCRES permanecem insuficientes (Kovačić et al., 2023).

Conclui-se que a SCRES é essencial para mitigar riscos e manter competitividade. No entanto, é necessário desenvolver metodologias mais práticas e unificadas para guiar as organizações na implementação de estratégias resilientes de maneira integrada.

### 2.1.3 Robutez da Cadeia de Suprimentos (SCROB)

A robustez é uma abordagem proativa para lidar com turbulências, mudanças ou interrupções. Ela reflete a capacidade de uma organização de sustentar seu desempenho esperado, apesar das interrupções. Isso significa que as operações podem continuar sem serem interrompidas durante uma perturbação. Alvarenga et al. (2023) afirmam que o foco da robustez da cadeia de suprimentos (SCROB) está em manter o desempenho operacional em um determinado nível, apesar das interrupções.

Yang et al. (2023) expandem essa definição, descrevendo SCROB como "a capacidade de manter a eficiência operacional e sustentar os benefícios da cadeia de suprimentos diante de interrupções causadas por incertezas internas e externas". Uma definição clara de SCROB requer mais estudos para desenvolver um conceito uniforme e abrangente. Estudos existentes oferecem interpretações variadas, por isso, refinar a definição e suas aplicações é essencial para uma abordagem padronizada.

Uma cadeia de suprimentos robusta pode ser descrita como resistente a flutuações. Vieira e Lemos (2009) e Artsiomchyk e Zhivitskaya (2013) destacam a importância da resistência a variações no fluxo de materiais e informações. Durach et al. (2015) e Sawik (2016) enfatizam a necessidade de estratégias para mitigar os impactos de interrupções. Alshurideh et al. (2023) discutem a robustez no contexto da sustentabilidade e resiliência a crises. Já Ivanov e Dolgui (2019) abordam como a diversificação e a agilidade na resposta contribuem para garantir a disponibilidade ideal e eficiência de custos.

Além disso, a robustez tem ganhado destaque por aumentar a competitividade das cadeias de suprimentos e garantir a continuidade das operações durante interrupções naturais ou artificiais. À medida que essas interrupções se tornam mais frequentes e complexas, a capacidade da cadeia de suprimentos de permanecer robusta torna-se cada vez mais crítica para a sustentabilidade a longo prazo (Alvim et al., 2024). Para fortalecer a SCROB, a integração de recursos tecnológicos e inovações digitais tornou-se essencial, fornecendo as ferramentas necessárias para aprimorar o desempenho e a eficiência das cadeias de suprimentos modernas (Ivanov e Dolgui, 2019; Modgil et al., 2022).

#### **2.1.4 Resistência da Cadeia de Suprimentos (SCRESIS)**

Na literatura sobre Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM), diversos autores exploram o conceito de SCRESIS, que é definido como a capacidade de uma cadeia de suprimentos de suportar e absorver interrupções minimizando seu impacto nas operações e no desempenho (Kramarz e Kramarz, 2015). Esse conceito difere diretamente de robustez, que visa alcançar um desempenho consistentemente bom sob condições operacionais variáveis (Sawik et al., 2016)

Ivanov e Dolgui (2020) introduzem uma nova perspectiva na pesquisa sobre resiliência de cadeia de suprimentos (SCRESIS), enfatizando a necessidade de considerar interrupções extraordinárias em uma escala de viabilidade. Nesse cenário, a estrutura da rede desempenha um papel importante, aumentando a flexibilidade por meio da redundância de recursos de produção e logística. Contudo, essa maior flexibilidade também intensifica a resistência a interrupções. Jiang e Liu (2019) destacam que empresas da cadeia de suprimentos enfrentam intensidades de risco variadas, dependendo da magnitude dos riscos e de sua capacidade de gerenciá-los e mitigá-los.

Nesse contexto, Semenov e Jacyna (2022) defendem o desenvolvimento de redes que integrem transportadores cooperantes, centros logísticos, armazéns e pontos de carga. Da mesma forma, Effah e Aboagye (2024) enfatizam que fatores chave, como comunicação robusta, inteligência estratégica, capacidades operacionais, liderança dedicada e a força da infraestrutura da rede, moldam uma SCRESIS eficaz.

As estratégias de recuperação incluem fornecedores alternativos, estoques de segurança, capacidade extra e previsão precisa de demanda (Scheibe e Blackhurst, 2018). Para enfrentar esses desafios, Semenov e Jacyna (2022) defendem a criação de redes que envolvam transportadoras cooperantes, centros logísticos, armazéns e pontos de carregamento.

Uma gestão eficaz da resiliência em cadeias de suprimentos (SCRESIS) é impulsionada por fatores como comunicação, inteligência, capacidade, comprometimento da liderança e capacidade de rede (Effah e Aboagye, 2024). A capacidade de rede abrange a conscientização sobre riscos e avanços tecnológicos,



como simulação e Gêmeos Digitais, que conectam os mundos digital e físico, aprimorando a tomada de decisões em tempo real e as capacidades preditivas. Tecnologias inteligentes, incluindo IA, big data, nuvem, blockchain e IoT, fortalecem a gestão da cadeia de suprimentos ao otimizar processos, promover automação e melhorar a eficiência operacional (Huang et al., 2023). Essas ferramentas integram SCRES e SCROB para alcançar uma SCRESIS.

### **2.1.5 Gêmeo Digital (DT)**

As cadeias de suprimentos estão adotando cada vez mais o gêmeo digital (DT) para aprimorar resiliência e robustez durante interrupções. Ivanov (2018) define o DT como um sistema virtual que apoia a tomada de decisões por meio da análise de dados e visualização digital. Um DT representa a cadeia física com dados reais de transporte, demanda, estoque e capacidade, permitindo planejamento, controle e visibilidade de ponta a ponta, além de melhorar a resiliência e possibilitar testes de contingência (Agostino et al., 2020; Ivanov; Dolgui, 2020).

Frazzon et al. (2020) destacam que os DTs utilizam simulações em tempo real baseadas em dados históricos e de sensores, enquanto Wright e Davidson (2020) apontam sua complexidade sociotécnica pela interação entre humanos e IA. Já Ivanov (2021) apresenta o DT como um modelo computacional que representa os estados da rede em tempo real, otimizando decisões operacionais e estratégicas.

Além disso, os DTs podem planejar cenários, identificar falhas e propor soluções (Alguirat et al., 2024; Lv et al., 2024). Wang et al. (2020) destacam sua capacidade de integrar os ambientes virtual e físico, promovendo colaboração entre unidades e engenheiros com agilidade na gestão de riscos e maior confiabilidade.

Kritzinger et al. (2018) classificam os DTs em três níveis: Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital, sendo este último caracterizado pela troca bidirecional de dados. Aplicações incluem manufatura, saúde, transporte e cidades inteligentes, utilizando tecnologias como aprendizado de máquina, IoT e IA (Menon et al., 2023; Ali et al., 2024). Exemplos práticos incluem o uso em motores aeronáuticos pela GE e na produção pela Siemens (Sekhar et al., 2023).

Embora os DTs ampliem a eficiência operacional e a resiliência, desafios como interoperabilidade de dados e falta de padronização dificultam sua

implementação global (Qi et al., 2024). Um DT eficaz deve considerar fatores como design de rede, perturbações e recuperação, atuando tanto em modos preventivos quanto reativos para avaliar e mitigar riscos (Ivanov, 2020).

Conclui-se que os DTs representam uma ferramenta estratégica para aumentar a resiliência e robustez das cadeias de suprimentos, promovendo decisões baseadas em dados e integração sistêmica. No entanto, avanços são necessários para superar limitações e ampliar sua aplicação.

### **2.1.6 Modelagem**

A modelagem envolve técnicas que permitem entender a estrutura e as operações de um sistema. Um modelo deve ser desenvolvido com um propósito específico (ou aplicação), e sua validade é determinada por esse propósito (Sargent, 2001). Um modelo, em um contexto técnico, é uma abstração da realidade (Benhida et al., 2016).

### **2.1.7 Simulação**

Para se manterem competitivas em custo e nível de serviço, as cadeias de suprimento (CS) devem ser resilientes, ágeis e adaptáveis, o que é viabilizado por métodos de simulação (Frazzon; Albrecht; Hurtado, 2016). A simulação permite criar modelos que representam características do sistema real, utilizados para prever o impacto de mudanças ou avaliar o desempenho em diferentes condições (Vieira et al., 2017).

Ivanov e Dolgui (2020) destacam que tecnologias digitais combinadas com simulação auxiliam na visualização de interrupções e na definição de estratégias de recuperação. Ingalls (2011) descreve a simulação como essencial para entender o comportamento de sistemas complexos, especialmente quando mudanças diretas são inviáveis. Métodos como simulação de eventos discretos (DES), modelagem baseada em agentes (ABM) e dinâmica de sistemas (SD) oferecem abordagens complementares: a DES foca em eventos discretos que alteram o estado do sistema (Escudero-Ornelas et al., 2024), a ABM captura interações dinâmicas em sistemas

complexos (Rizzati e Landoni, 2024), e a SD analisa ciclos de feedback em cadeias globais (Heidary, 2022).

A integração desses métodos com tecnologias da Indústria 4.0, como gêmeos digitais e IoT, fortalece o gerenciamento de riscos, otimizando decisões em tempo real e promovendo a resiliência (Aretoulaki et al., 2024; Mirzaaliyan et al., 2024). Estratégias proativas, como conectividade digital e regionalização de fornecimento, complementam estratégias reativas, como a alocação de estoques de segurança e o uso de simulações para identificar rotas alternativas (Belhadi et al., 2021).

No entanto, desafios persistem. A falta de padronização e interoperabilidade limita a aplicação sistêmica da simulação, enquanto a integração entre ambientes físicos e virtuais requer avanços em tecnologia e colaboração (Wang; Wang; Liu, 2020). Métodos de simulação são fundamentais para desenvolver cenários que avaliem a resiliência, com indicadores financeiros, operacionais e de clientes (Li et al., 2020; Pavlov et al., 2019).

Conclui-se que a simulação é uma ferramenta indispensável para a gestão moderna da cadeia de suprimentos, oferecendo suporte analítico e preditivo para mitigar interrupções. Embora haja avanços significativos, a superação de limitações técnicas e metodológicas é essencial para ampliar seu impacto na construção de cadeias mais robustas e resilientes.

### **2.1.8 Oportunidades de Melhoria Identificadas na Literatura**

A partir da revisão da literatura, destacam-se as seguintes oportunidades de melhoria para análise e gestão do desempenho de cadeias de suprimentos:

#### **1. Aprimoramento da Visibilidade e Integração**

- Utilização de tecnologias como gêmeos digitais, IoT e big data para aumentar a visibilidade de ponta a ponta na cadeia de suprimentos, permitindo maior integração entre os elos e compartilhamento de dados em tempo real (Ivanov e Dolgui, 2020; Wang et al., 2020).

#### **2. Otimização de Estoques e Capacidade de Resposta**

- Implementação de modelos de simulação e análise preditiva para otimizar níveis de estoque e melhorar a capacidade de resposta em

eventos disruptivos (Mirzaaliyan et al., 2024; Escudero-Ornelas et al., 2024).

### **3. Identificação de Gargalos e Redundâncias**

- Aplicação de ferramentas analíticas para mapear gargalos operacionais e eliminar redundâncias, visando aumentar a eficiência e reduzir custos (Frazzon et al., 2016; Belhadi et al., 2021).

### **4. Desenvolvimento de Estratégias de Mitigação de Riscos**

- Planejamento de estratégias proativas e reativas baseadas em simulação, permitindo maior resiliência frente a interrupções e flutuações de demanda (Ivanov e Dolgui, 2019; Kieu et al., 2024).

### **5. Melhoria na Colaboração e Alinhamento de Processos**

- Fomento à colaboração entre fornecedores, distribuidores e demais stakeholders para alinhar processos e fortalecer a cooperação na resolução de problemas (Olivares-Aguila & ElMaraghy, 2021).

### **6. Automação e Digitalização de Processos**

- Investimento em tecnologias da Indústria 4.0, como inteligência artificial e blockchain, para automatizar tarefas repetitivas, aumentar a confiabilidade dos dados e promover maior agilidade operacional (Aretoulaki et al., 2024; Singh et al., 2024).

### **7. Análise de Cenários e Tomada de Decisão Baseada em Dados**

- Uso de análises de cenários e modelos baseados em dados para apoiar decisões estratégicas e táticas, especialmente em situações de incerteza (Schiffmann et al., 2023; Abdel-Latif et al., 2023).

## **2.2 METODOLOGIA**

A presente seção descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos de uma empresa do setor de hardware, denominada ABC, como nome fantasia para manter o anonimato e a descrição dos dados fornecidos. Segundo Yin (2015), o estudo de caso é uma técnica de pesquisa que permite explorar um fenômeno dentro de seu contexto real, sendo ideal para análises aprofundadas em ambientes complexos, como cadeias de suprimentos.

A técnica de pesquisa utilizada será o estudo de caso, com a unidade de análise sendo a amostra da literatura como base, juntamente com a análise de conteúdo dos artigos selecionados. A revisão da literatura, conforme definido por Kitchenham (2004), é um processo sistemático de busca, análise e síntese de estudos relevantes sobre um tema, permitindo uma compreensão aprofundada das teorias, conceitos e modelos relacionados à análise de cadeias de suprimentos.

Os instrumentos de coleta de dados incluem a busca por artigos em bases de dados como Scopus e Web of Science, além da coleta documental de dados primários e secundários fornecidos diretamente pela empresa ABC. O critério de escolha das palavras-chave será baseado no tema e nos avanços da literatura, visando identificar possíveis lacunas relacionadas às cadeias de suprimentos.

O método utilizado neste estudo é a modelagem e simulação, considerada uma abordagem poderosa para avaliar sistemas complexos (Banks et al., 2010). Um modelo baseado em simulação será desenvolvido para representar o desempenho das cadeias de suprimentos da empresa ABC em diferentes cenários. A modelagem será fundamentada nas informações obtidas na revisão da literatura e nas especificidades do contexto estudado.

Quanto ao tipo de pesquisa, será adotada uma abordagem descritiva, que, segundo Gil (2008), busca explicar e definir fenômenos com base em características observadas. O foco será a distribuição física de produtos na cadeia de suprimentos da empresa ABC, considerando seu setor de hardware.

Os critérios de análise dos dados serão predominantemente qualitativos, visando uma compreensão mais aprofundada do fenômeno estudado. Esse enfoque permitirá não apenas interpretar os resultados, mas também explorar insights relevantes para futuras investigações no campo de cadeias de suprimentos.

Com base na correlação entre os objetivos específicos e os métodos, apresentada no Quadro 1, a seguir descrevem-se as fases detalhadas do estudo.

Quadro 1 – Objetivos e métodos

Objetivo Geral	Objetivo Específico	Método de Pesquisa
Avaliar o desempenho das cadeias de suprimentos da empresa ABC.	- Identificar oportunidades de melhoria nas análises de desempenho da cadeia de suprimentos.	Revisão da literatura
	- Propor um modelo de simulação para análise de desempenho da cadeia de suprimentos.	Modelagem e Simulação
	- Evidenciar o modelo em cenários de operação de distribuição física de produtos.	Modelagem e simulação

Fonte: elaborado pelo autor

## 2.2.1 Estrutura Proposta para a Elaboração da Metodologia

A elaboração da metodologia segue a seguinte estrutura:

### 2.2.1.1 Fase 1: Revisão da Literatura

Nesta fase, é realizada uma revisão da literatura com o objetivo de identificar estudos relevantes sobre a análise de cadeias de. São consultadas bases de dados como Scopus e Web of Science para buscar artigos científicos e trabalhos acadêmicos relacionados ao tema. A análise de conteúdo será utilizada para extrair informações relevantes dos artigos selecionados.

Assim, contempla a realização de uma investigação e análise da literatura envolvendo a revisão da literatura acerca do tema de pesquisa, além de estudos referentes a conceitos e ferramentas que possibilitam o emprego dos métodos adotados, com ênfase na análise de cadeias de suprimentos no contexto da empresa ABC.

A revisão de literatura permite o mapeamento dos estudos sobre cadeia de suprimentos, modelagem e simulação nos últimos anos, a fim de obter conhecimento das melhores práticas e identificar as lacunas na literatura e linhas de pesquisa a serem exploradas.

Assim, o objetivo específico a ser cumprido ao final dessa fase é identificar oportunidades de melhoria nas análises de desempenho da cadeia de suprimentos.

O critério de escolha das palavras é baseado no tema e nas palavras-chave encontradas nos artigos selecionados, visando compreender os avanços da literatura e as possíveis lacunas relacionadas à CS.

As palavras utilizadas na pesquisa incluem: “Supply Chain,” “Resilience,” “Digital Twin,” “Robustness,” “Performance,” “Simulation,” “Decision-Making,” “Flexibility,” “Adaptability,” “Technological Advancements,” “IoT,” “Risk Management,” “Disruptions,” “Agility,” e “Data Analytics.” Foram feitas combinações entre essas palavras para aprofundar a investigação nas áreas relacionadas à cadeia de suprimentos e tecnologias digitais. Durante o processo de revisão de literatura, outras combinações de palavras-chave poderão ser exploradas para criar uma estratégia de busca mais precisa. As buscas foram conduzidas nas bases de dados, utilizando as palavras-chave citadas com busca em Título, Palavra-chave e Resumo dos artigos no banco de dados.

A seleção dos documentos segue a metodologia descrita em *Preferred Reporting Items for Systematic review and Meta-Analysis* (MOHER et al., 2009). Para a análise de todo o material pesquisado, serão utilizados o *software* R, a ferramenta Bibliometrix e Microsoft Excel.

#### 2.2.1.2 Fase 2: Modelagem e Simulação

Nesta fase, com base nos conhecimentos adquiridos na revisão da literatura, foi desenvolvido um modelo de simulação para analisar o desempenho da cadeia de suprimentos. Os principais componentes da cadeia, como fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes, foram identificados, e as interações entre eles foram modeladas. Técnicas de modelagem e simulação foram aplicadas para analisar o funcionamento da cadeia em diferentes cenários de operação de distribuição física de produtos. A simulação foi realizada com o auxílio do *software* anyLogistix (ALX), PLE (Personal Learning Edition), uma versão gratuita para propósitos educacionais.

Foi criada uma estrutura para avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos com base em dados fornecidos pela empresa ABC. Esses dados

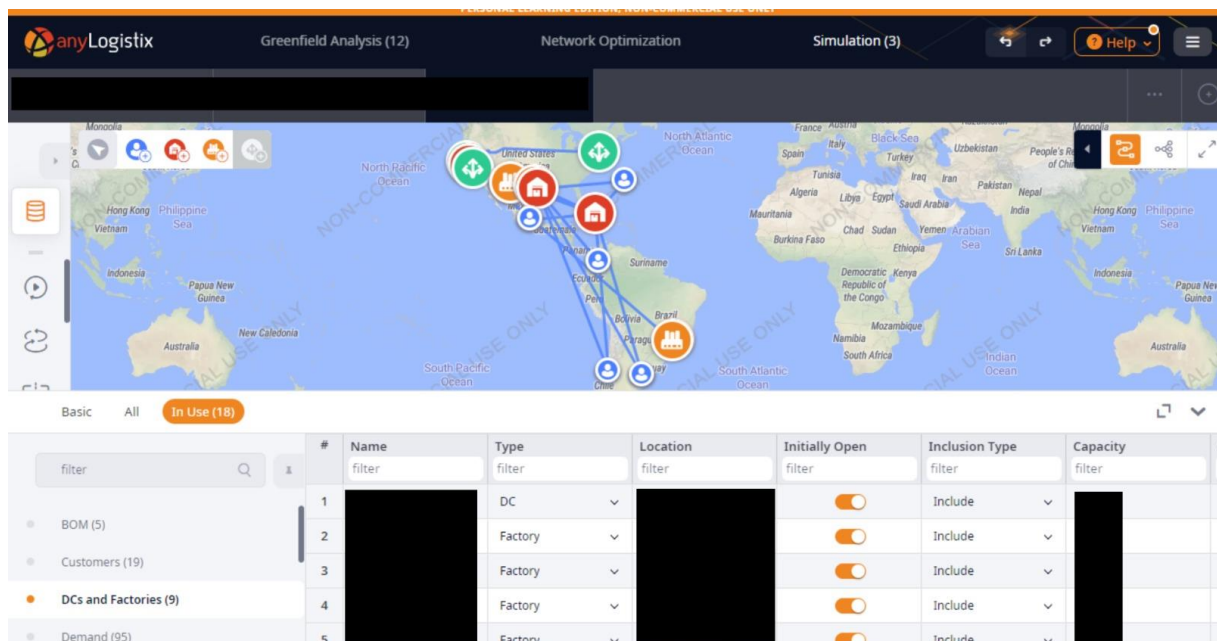
alimentaram os experimentos de simulação computacional, e a performance da cadeia foi avaliada por meio de indicadores previamente definidos.

O desenvolvimento computacional incluiu atividades relacionadas à investigação de modelos de resiliência e robustez existentes, aplicados à cadeia de suprimentos. Conceitos do método do trabalho foram propostos e testados, representando a operação de distribuição física no contexto estudado.

Embora o modelo desenvolvido tenha considerado aspectos do conceito de gêmeo digital, ele não é um gêmeo digital na sua concepção completa, uma vez que os dados utilizados foram estáticos e a simulação não ocorreu em tempo real. Trata-se, portanto, de um modelo de simulação baseado em dados estáticos para prever comportamentos futuros da cadeia de suprimentos.

Os experimentos realizados com o software anyLogistix permitiram testar diferentes cenários e estratégias de gerenciamento da cadeia de suprimentos. A ferramenta possibilitou a análise de resiliência e robustez, comparando os resultados com os indicadores estatísticos do sistema modelado. A Figura 1 apresenta um exemplo da configuração do software, com informações ofuscadas para preservar a sigiliosidade dos dados da empresa ABC.

Figura 1 – Software anyLogistix



Fonte: ALX versão PLE



As vantagens de utilizar o anyLogistix incluem a capacidade de testar múltiplos cenários, identificar oportunidades de redução de custos e riscos operacionais, além de viabilizar a adoção de medidas de contingência. Com ampla visibilidade do sistema de distribuição e dados detalhados, o modelo fundamentou a tomada de decisões, que proporciona informações para a gestão.

### 2.2.1.3 Fase 3: Análise de Resultados

Na fase de análise de resultados, os dados obtidos a partir da simulação foram avaliados com base em indicadores-chave de desempenho (KPIs) previamente definidos, alinhados aos objetivos do estudo. Esses indicadores foram selecionados para medir o desempenho da cadeia de suprimentos em diferentes cenários simulados e compreender os efeitos de disrupções induzidas na operação.

Os KPIs analisados incluem:

#### 1. Indicadores Financeiros:

- **Custo Total:** soma de todos os custos operacionais, incluindo transporte, armazenagem e outros custos relacionados.
- **Receita:** valor total obtido com as vendas durante o período simulado.
- **Lucro:** diferença entre receita e custos, indicando a rentabilidade da operação.

#### 2. Indicadores de Tempo:

- **Tempo Médio de Ciclo:** média do tempo necessário para processar e entregar pedidos.
- **Tempo Máximo de Ciclo:** maior tempo registrado, representando os piores cenários.

#### 3. Indicadores de Relação:

- **Nível de Serviço ELT por Pedidos:** proporção de pedidos atendidos dentro do tempo de ciclo esperado.
- **Nível de Serviço ELT por Produtos:** percentual de produtos entregues dentro do prazo planejado.
- **Demanda (Pedidos e Produtos em Atraso):** número de pedidos e unidades de produtos não atendidos no tempo previsto.

#### 4. Indicadores Operacionais:

- **Custo de Armazenagem:** custos associados ao estoque durante o período simulado.
- **Custo de Transporte:** despesas relacionadas à movimentação de mercadorias entre os pontos da cadeia.

A análise de resultados concentrou-se na avaliação do desempenho dos diferentes designs de cadeia de suprimentos simulados, tanto em condições normais quanto em cenários de disrupção. Foram considerados os impactos nos principais indicadores financeiros, operacionais e de tempo, bem como a eficácia das estratégias de recuperação aplicadas em cada cenário. Essa abordagem permitiu identificar os efeitos de interrupções na operação, comparando a resiliência e robustez dos modelos analisados e destacando oportunidades para otimização e melhoria no gerenciamento da cadeia de suprimentos.

#### 2.2.2 Metodologia de Pesquisa

A fundamentação teórica deste trabalho é essencial para contextualizar a pesquisa e orientar as decisões metodológicas. A análise da resistência da cadeia de suprimentos é baseada em conceitos-chave que possibilitam compreender os fenômenos investigados.

A revisão da literatura destaca variáveis como eficiência operacional, flexibilidade, visibilidade e gestão, fundamentais para o desempenho das cadeias de suprimentos. Esse estudo busca preencher uma lacuna ao integrar a teoria com uma abordagem prática, aplicando modelagem e simulação para avaliar configurações da cadeia de suprimentos da empresa ABC. Os conceitos de SCRES, SCROB e SCRESIS são particularmente relevantes, pois permitem avaliar a influência de diferentes variáveis na resiliência e robustez da cadeia.

Esta pesquisa é caracterizada como um estudo de caso com abordagem exploratória e explicativa. Utilizando técnicas de modelagem e simulação, o trabalho analisou o desempenho da cadeia de suprimentos da empresa ABC, focando na dinâmica do sistema de distribuição e transporte, além de propor melhorias com base em cenários simulados. O objetivo incluiu explorar soluções para aumentar a resiliência e a robustez, considerando variáveis operacionais e logísticas.

O processo metodológico seguiu etapas estruturadas para atingir os objetivos propostos:

- **Coleta, tratamento e organização de dados:** Foram coletados dados fornecidos pela empresa ABC, abrangendo demanda, logística, custos e fatores operacionais. Referências como Forecast (SAP) e Demand Planning integrado ao SAP, produção e distribuição foram utilizadas. Após a coleta, os dados foram tratados e organizados, garantindo consistência por meio de técnicas de limpeza e normalização.
- **Definição de variáveis quantitativas:** Variáveis como tempos de entrega, custos de transporte, níveis de inventário e demanda foram identificadas e desenvolvidas, sendo essenciais para a construção de cenários realistas e precisos.
- **Criação de modelos e cenários:** Modelos representativos da cadeia de suprimentos foram criados, considerando fatores internos (falhas no fornecedor, flutuações de demanda, incapacidade de produção). Três cenários principais foram gerados utilizando o software **AnyLogistix™ PLE**.
- **Análise e discussão de resultados:** Os cenários simulados foram avaliados com base em indicadores de desempenho (KPIs) como custos totais, tempos de recuperação, níveis de serviço e lucratividade. Os resultados permitiram identificar soluções mais eficazes e robustas para a cadeia de suprimentos em diferentes contextos operacionais.

Essa metodologia proporcionou uma análise detalhada e estruturada do desempenho da cadeia de suprimentos da empresa ABC, servindo de base para formulação de melhorias estratégicas e operacionais.

### 2.2.3 Declaração do Problema

Este estudo de caso foi realizado em uma empresa do setor de hardware, denominada ABC, conforme detalhado no Cenário I da Figura 2. A empresa enfrenta desafios significativos na entrega de produtos em toda a América do Norte e América Latina. Entre os principais problemas estão o acúmulo de pedidos e a resposta de inventário ineficaz, agravados por eventos disruptivos recentes. Esses

eventos incluem conflitos geopolíticos em andamento e a escassez de chips de Inteligência Artificial (IA).

Essas dificuldades têm impactado negativamente o desempenho operacional e a satisfação dos clientes. Para mitigar os problemas, a equipe de planejamento estratégico, em colaboração com o departamento de cadeia de suprimentos, está avaliando e redesenhando a rede existente. O objetivo é aumentar a resiliência contra interrupções e garantir maior eficiência operacional.

O estudo explorou três cenários iniciais. O primeiro reflete o design atual da cadeia de suprimentos, que conta com fornecedores estratégicos localizados nos Estados Unidos. Esse modelo contrasta com o período pré-pandemia, quando a empresa dependia amplamente de fornecedores asiáticos. A análise também abrangeu 19 clientes-chave na América do Norte e América Latina, com foco nos 10 produtos mais relevantes em termos de demanda e valor.

#### **2.2.4 Construção do Modelo**

Foram desenvolvidas três configurações distintas para avaliar o desempenho da rede em diferentes condições. Utilizou-se uma abordagem de simulação baseada em casos para examinar os resultados de três designs de redes de SC, com base em um conjunto de dados simulados. A construção do modelo considerou fatores internos, como falhas no fornecedor, flutuações de demanda e incapacidade de produção. Além disso, a distribuição física de componentes ou produtos entre fabricantes, centros de distribuição e clientes seguiu uma proporção igualitária entre os caminhos possíveis de distribuição em todos os cenários.

O anyLogistix™ PLE foi escolhido por sua capacidade de análise de cenários, visualização, integração e facilidade de aplicação. A análise concentrou-se em indicadores-chave de desempenho operacional, como pedidos recebidos diariamente versus remessas, inventário disponível, custos de inventário, tempo de entrega, nível de serviço e tempo de recuperação.

A investigação integrou SCRES e SCROB por meio de ferramentas de simulação computacional. Um painel abrangente foi desenvolvido para apresentar os principais indicadores de desempenho, incluindo Custo Total, Nível de Serviço,

Lucro, Receita e Tempo de Recuperação, que estão detalhados na seção de resultados dos experimentos.

### **2.2.5 Processos de Simulação**

Com base nos cenários propostos, os dados de simulação incorporaram parâmetros-chave da rede projetada da CS. Esses parâmetros incluíram informações sobre clientes, níveis de demanda, gestão de inventário, localização das instalações, tipos de produtos, rotas de envio, fontes e especificações de veículos. Durante a execução, foram realizados experimentos de simulação distintos utilizando o software anyLogistix™ PLE.

O histórico com dados reais foi utilizado para avaliar o desempenho dos cenários propostos da SC. Cada experimento partiu de dados de entrada idênticos, e a simulação computacional transformou esses dados, juntamente com métricas operacionais, em indicadores-chave de desempenho (KPIs). Esses KPIs forneceram uma análise estatística detalhada dos resultados da simulação.

### **2.2.6 Estatísticas da Simulação**

As métricas de desempenho selecionadas, alinhadas às estratégias empresariais, incluem indicadores financeiros (Custo Total, Receita e Lucro), indicadores de tempo (Tempo de Recuperação) e indicadores de relação (Nível de Serviço). Essas métricas fornecem informações detalhadas sobre a utilização de recursos da SC e a qualidade dos serviços prestados durante os experimentos de simulação.

Além disso, foram incluídas métricas complementares, como Nível de Serviço Estimado por Pedidos e Produtos, Demanda (Produtos e Pedidos em Atraso), Tempo de Entrega, Custo de Manutenção de Estoque e Custo de Transporte. Essas medidas permitiram uma análise abrangente dos diferentes cenários simulados, oferecendo insights relevantes para otimizar o desempenho da cadeia de suprimentos.

## 2.2.7 Experimentos de Simulação

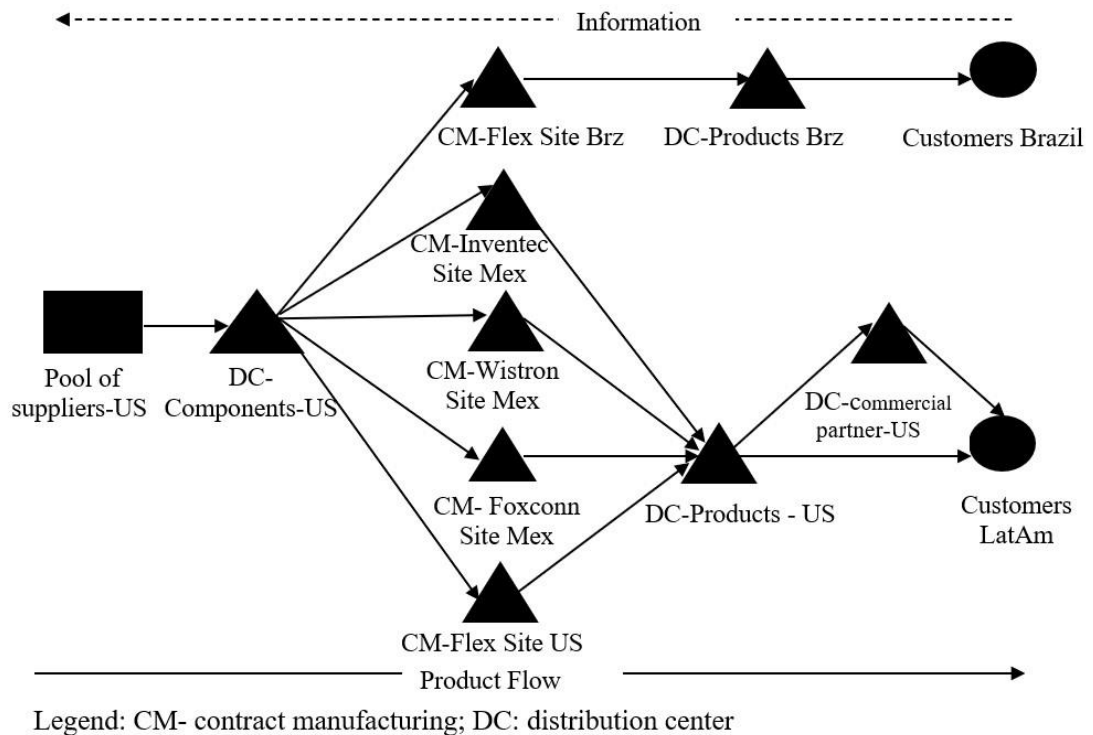
Os cenários utilizados nos experimentos são apresentados a seguir.

### 2.2.7.1 *Cenário 1: Rede Clássica da CS*

O primeiro cenário é baseado na cadeia de suprimentos existente da organização ABC, configurando uma rede clássica de CS. Essa estrutura segue um fluxo sequencial e centralizado, com funções bem definidas para cada elo da cadeia. O processo começa com fornecedores localizados nos Estados Unidos, responsáveis pelo envio de componentes para um centro de distribuição de componentes (DC-Components), também situado nos EUA. Este centro atua como o ponto inicial de abastecimento dos fabricantes contratados (CMs), localizados estrategicamente no México, Estados Unidos e Brasil.

Após a produção, os produtos finalizados são enviados para três diferentes centros de distribuição (DCs): o centro de distribuição da ABC no Brasil (DC-Brz), o centro de distribuição de produtos da ABC nos EUA (DC-Products-US) e o centro de distribuição de um parceiro comercial nos EUA (DC-Commercial Partner-US). Cada DC possui um papel específico, sendo que o DC-Products-US é responsável por gerenciar remessas diretas para clientes na América Latina. Essa configuração tradicional reflete uma estrutura hierárquica e linear, típica de uma rede de suprimentos clássica, com fluxos previsíveis e centralizados. A Figura 2 ilustra o design da CS clássica e os detalhes do fluxo.

Figura 2 – Cenário 1: Rede Clássica da CS



Fonte: elaborado pelo autor

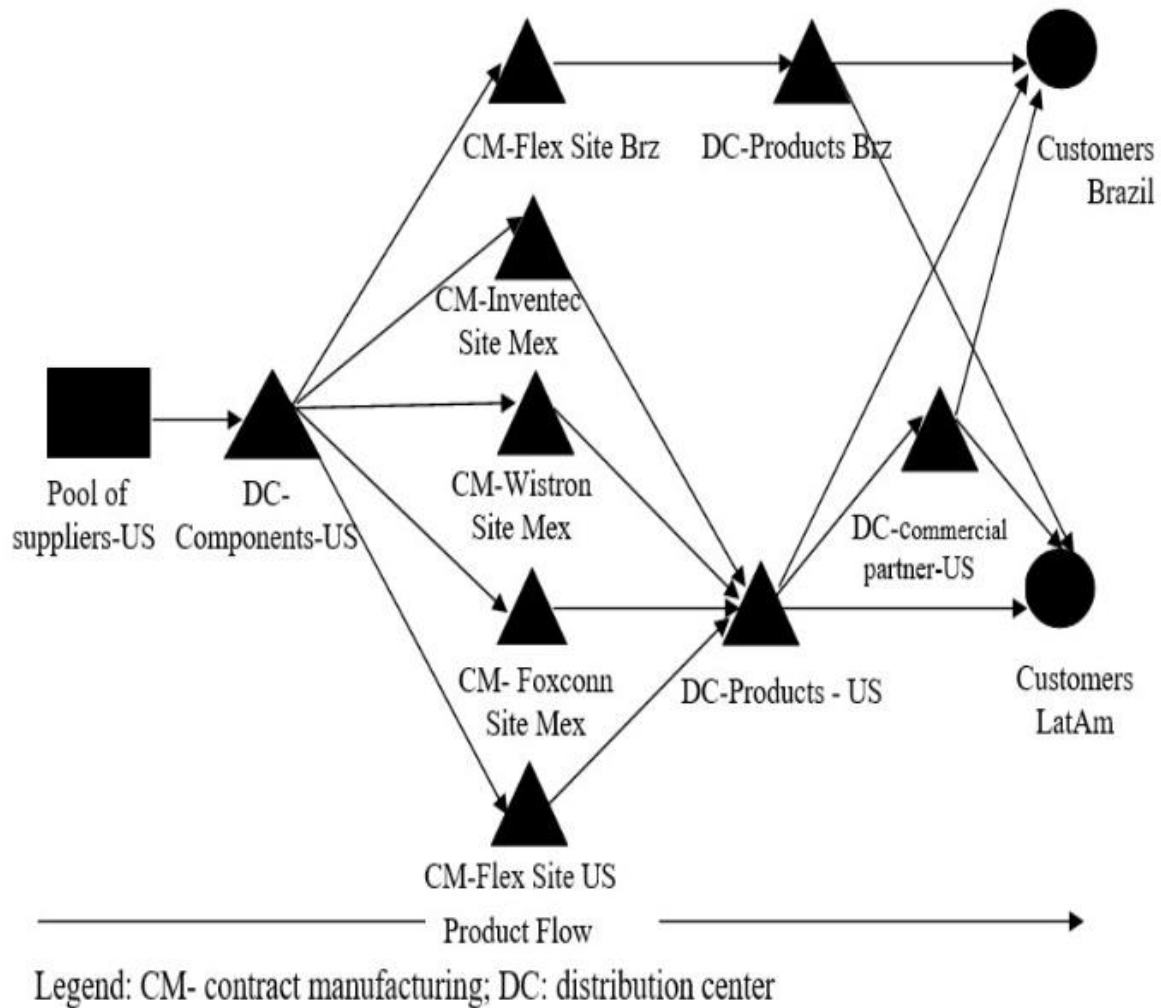
### 2.2.7.2 Cenário 2: Rede Cruzada da CS

O segundo cenário é uma adaptação do Cenário 1, com um grau de complexidade médio introduzido pela inclusão de fluxos cruzados entre centros de distribuição e regiões de clientes. O diferencial deste cenário é a incorporação do fluxo de produtos do centro de distribuição de produtos no Brasil (DC-Products-Brz) para clientes na América Latina e do DC-Products-US para clientes no Brasil.

Essa configuração mantém o abastecimento de componentes pelos fornecedores americanos para o DC-Components-US e o envio subsequente aos fabricantes contratados (CMs) no México, EUA e Brasil. Entretanto, devido à natureza cruzada dos fluxos, existe maior interdependência operacional entre os CMs e os DCs. A operação entre o DC-Components-US e os CMs torna-se um ponto de destaque, uma vez que o abastecimento desses fabricantes contratados demanda alinhamento logístico e previsibilidade em um ambiente onde as remessas são projetadas para suprir múltiplos DCs.

A Figura 3 ilustra a estrutura deste cenário, configurando uma cadeia de suprimentos cruzada. O grau de complexidade médio resulta da necessidade de planejar e sincronizar fluxos adicionais de abastecimento e distribuição, otimizando recursos enquanto amplia as possibilidades de atendimento a diferentes mercados.

Figura 3 – Cenário 2: Rede Cruzada da CS



Fonte: elaborado pelo autor

### 2.2.7.3 Cenário 3: Rede Sincronizada da CS

O terceiro cenário é uma evolução do segundo, incorporando um grau de complexidade elevado devido à introdução de fluxos mais dinâmicos e flexíveis. A principal característica deste cenário é a inclusão de fluxos diretos entre os fabricantes contratados (CMs) e os centros de distribuição (DCs) de produtos no

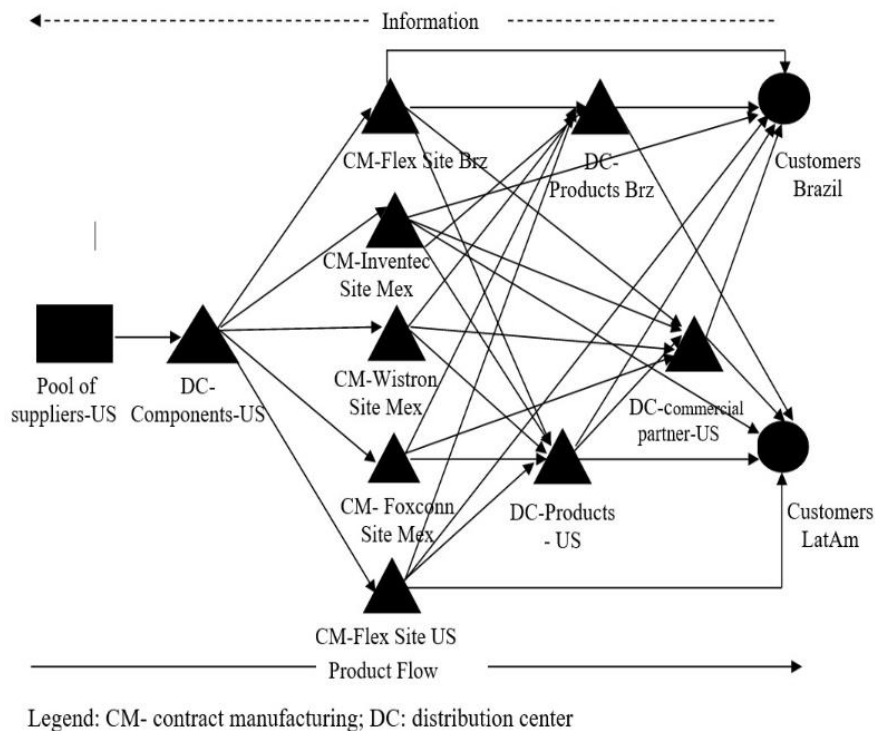


Brasil (DC-Products-Brz) e nos Estados Unidos (DC-Products-US). Essa abordagem elimina etapas intermediárias, permitindo que os CMs abasteçam diretamente os DCs mais próximos dos mercados de destino.

A operação de abastecimento nesse modelo é significativamente mais complexa, pois os CMs têm a capacidade de enviar produtos para qualquer um dos DCs, dependendo das demandas específicas de cada mercado. Além disso, os DCs são configurados para realizar distribuições diretas a qualquer cliente, seja na América Latina ou nos EUA. Esse fluxo integrado de todas as fontes e destinos gera uma rede de suprimentos sincronizada, na qual decisões e operações podem ser altamente coordenadas e baseadas em dados.

O conceito de sincronização aplicado aqui refere-se ao alinhamento simultâneo das atividades de abastecimento, produção e distribuição, reduzindo lead times e aumentando a agilidade operacional. A Figura 4 ilustra o design do Cenário 3, destacando a interligação e a flexibilidade proporcionadas por essa configuração, que busca equilibrar a complexidade operacional com a capacidade de resposta a demandas variáveis.

Figura 4 – Cenário 3: Rede Sincronizada da CS



Fonte: elaborado pelo autor

## 2.3 RESULTADOS

Esta seção demonstra os experimentos realizados por meio de uma simulação computacional no AnyLogistix. Foram restringidas as informações dos dados do processo de simulação como clientes, produtos específicos e entre outros para não divulgar os dados da empresa que prefere ficar anônima.

A simulação foi configurada para incluir dez clientes e quinze produtos vendidos na América Latina, com um período de execução de doze meses, durante o qual foram inseridos dados e diversas interrupções induzidas em cada cenário. A cadeia de suprimentos foi representada em um modelo computacional que mapeou os fluxos de materiais, informações e transporte entre fornecedores, distribuidores e clientes. Essa representação incluiu parâmetros como localização, capacidade, níveis de inventário e rotas de transporte. Para o transporte, foram considerados caminhões e aviões de carga, alocados de acordo com a distância e a velocidade.

Cada cenário foi gerado em quatro designs diferentes. O primeiro design simula uma situação normal, sem disrupções, representa as atividades regulares da organização da CS e serve como referência (baseline) para comparação com os demais. Neste caso, os resultados da simulação foram utilizados como referência para comparação com as estruturas alternativas de CS. Como primeiro passo, identificamos os resultados dos principais indicadores para usar como base de comparação com os designs alternativos de CS, que representam disrupções induzidas, incluindo falha no fornecedor, incapacidade de produção e variação na demanda. Com base nessa estrutura, analisamos os resultados, concentrando-nos no cenário que apresentou o melhor desempenho.

Cada disrupção induzida representa um tipo específico de desafio na cadeia de suprimentos e foi configurada para avaliar a resiliência dos designs alternativos. A falha no fornecedor refere-se à indisponibilidade temporária ou prolongada de um fornecedor-chave, o que pode interromper o fluxo de matérias-primas ou componentes essenciais para a produção. A incapacidade de produção representa uma limitação na capacidade fabril, seja por problemas técnicos, falta de mão de obra, ou restrições operacionais, afetando diretamente a capacidade da empresa de atender à demanda planejada. A variação na demanda simula flutuações nos

pedidos dos clientes, sejam eles aumentos repentinos ou quedas inesperadas, exigindo que a cadeia de suprimentos se adapte rapidamente para evitar tanto a falta de produtos quanto o excesso de estoque. Essas disrupções foram incluídas para analisar a capacidade da cadeia de suprimentos de suportar e responder a diferentes tipos de perturbações, identificando o design que melhor atenda a essas variações.

Sobre as estatísticas utilizadas no contexto de CS, o Nível de Serviço ELT por Pedidos mede a proporção de pedidos que são atendidos dentro do tempo de ciclo esperado, o que indica a eficiência da cadeia de suprimentos em entregar os produtos de acordo com os prazos estabelecidos. Esse indicador é fundamental para avaliar o desempenho em cumprir prazos e a satisfação do cliente. O Nível de Serviço ELT por Produtos reflete a capacidade da cadeia de suprimentos de atender à demanda específica de cada produto dentro do tempo esperado, demonstrando o desempenho em termos de variedade de produtos. A sigla ELT se refere a "Expected Lead Time" (Tempo de Ciclo Esperado), representando o tempo planejado para que um pedido seja processado e entregue em condições normais de operação.

A métrica de Demanda (Pedidos em Atraso) representa o número de pedidos que não foram atendidos no tempo previsto, ilustrando a acumulação de pedidos atrasados e servindo como um alerta para áreas onde o atendimento à demanda está insuficiente. Demanda (Produtos em Atraso), por sua vez, mede o número de unidades específicas de produtos que não foram entregues dentro do prazo, destacando falhas na disponibilidade de produtos e ajudando a identificar gargalos de produção ou logística.

Tempo Máximo de Ciclo indica o maior tempo de ciclo registrado durante a simulação, revelando os piores cenários de espera e ajudando a identificar onde ocorrem os maiores atrasos. Tempo Médio de Ciclo é a média do tempo de ciclo para todos os pedidos, oferecendo uma visão geral do tempo necessário para que os produtos cheguem aos clientes, e é um indicador chave para medir a velocidade e eficiência geral da cadeia.

Custo de Armazenagem representa os custos associados ao armazenamento de inventário ao longo do período de simulação, refletindo a eficiência na gestão de estoques e a capacidade de minimizar custos relacionados a

produtos em excesso. Outros Custos incluem despesas adicionais, como custos administrativos e operacionais, fornecendo uma visão ampla das despesas além das diretas de transporte e armazenamento. Custo de Transporte avalia os gastos com a movimentação de mercadorias entre pontos da cadeia, sendo crítico para entender a eficiência logística e as escolhas de modal.

A Receita reflete o valor total obtido com as vendas durante o período simulado, representando o sucesso financeiro da cadeia de suprimentos em atender à demanda. Lucro é o valor restante após a dedução de todos os custos e oferece uma visão direta da rentabilidade da operação da cadeia de suprimentos ao longo da simulação. Essas métricas em conjunto permitem uma análise abrangente dos fatores de desempenho da cadeia de suprimentos, orientando a otimização e a tomada de decisões estratégicas.

### 2.3.1 Cenário 1: Rede Clássica da CS

A Tabela 1 apresenta as estatísticas do modelo e resume os principais resultados obtidos na análise do cenário 1.

Tabela 1 – Resultados do Cenário 1

Unit	Estatísticas	Sem Disrupção	Falha no Fornecedor	Incapacidade de Produção	Varição na Demanda
Índice	Nível de Serviço ELT por Pedidos	1,00	0,93	0,96	0,94
Índice	Nível de Serviço ELT por Produtos	1,00	0,85	0,94	0,85
Pedidos	Demanda (Pedidos Pendentes)	15,00	39,00	43,00	87,00
Unidades	Demanda (Produtos Pendentes)	1.089,00	2.794,00	2.574,00	10.556,94
Dias	Tempo Máximo de Ciclo	41,05	121,99	107,99	140,05
Dias	Tempo Médio de Ciclo	4,54	10,83	7,67	9,85
USD	Custo de Manutenção de Estoque	22.351.395,85	20.926.780,64	22.505.843,84	21.950.245,78
USD	Outros Custos	16.470.000,00	16.470.000,00	16.470.000,00	16.470.000,00
USD	Custo de Transporte	9.463.670,11	9.902.154,63	10.056.648,73	12.090.661,88
USD	Receita	122.938.900,00	119.136.400,00	120.778.900,00	182.831.532,13
USD	Lucro	74.653.834,04	71.837.464,73	71.746.407,43	132.320.624,47

Fonte: elaborado pelo autor

No primeiro cenário, foi avaliado o desempenho da rede clássica da cadeia de suprimentos sob diferentes condições: sem disrupções, falha no fornecedor, incapacidade de produção e variação na demanda. Em condições normais, os níveis de serviço por pedidos e por produtos atingiram índices ideais de 1,00, demonstrando a capacidade do sistema de atender a todos os pedidos sem atrasos.

Disrupções específicas evidenciaram vulnerabilidades no design clássico. Com a falha no fornecedor, os níveis de serviço caíram para 0,93 por pedidos e 0,85 por produtos, com um tempo máximo de ciclo de 121,99 dias. A incapacidade de produção resultou em níveis de serviço de 0,96 (pedidos) e 0,94 (produtos), com um tempo médio de ciclo de 7,67 dias. Sob variação de demanda, o cenário apresentou aumento na demanda pendente, com 87 pedidos e 10.556 unidades em atraso, elevando o tempo médio de ciclo para 9,85 dias e os custos de transporte para 12.090.661,88 USD. Apesar disso, esse cenário registrou uma receita de 182.831.532,13 USD e lucro de 132.320.624,47 USD, destacando o impacto positivo de um aumento de demanda, mesmo com custos operacionais elevados.

De maneira geral, o design clássico demonstrou resiliência em condições normais, mas significativa vulnerabilidade frente a disrupções, especialmente falhas no fornecedor e variações de demanda. O aumento nos custos e atrasos reforça a necessidade de maior flexibilidade e adaptabilidade para lidar com condições adversas.

### 2.3.2 Cenário 2: Rede Cruzada da CS

A Tabela 2 apresenta as estatísticas do modelo e resume os principais resultados obtidos na análise do cenário 2.

Tabela 2 – Resultados do Cenário 2

Unit	Estatísticas	Sem disrupção	Falha no Fornecedor	Incapacidade de Produção	Varição na Demanda
Índice	Nível de Serviço ELT por Pedidos	1,00	0,75	0,92	0,80
Índice	Nível de Serviço ELT por Produtos	1,00	0,80	0,93	0,80
Pedidos	Demanda (Pedidos Pendentes)	41,00	82,00	85,00	177,00
Unidades	Demanda (Produtos Pendentes)	1.346,33	2.471,25	2.976,00	8.516,84
Dias	Tempo Máximo de Ciclo	51,03	131,92	112,92	123,03
Dias	Tempo Médio de Ciclo	7,66	20,46	11,77	12,16
USD	Custo de Manutenção de Estoque	15.725.766,19	14.588.274,25	15.794.181,58	15.640.893,55
USD	Outros Custos	16.470.000,00	16.470.000,00	16.470.000,00	16.470.000,00
USD	Custo de Transporte	16.265.929,25	17.922.879,49	16.969.216,80	18.103.938,29
USD	Receita	122.095.900,00	119.754.400,00	119.760.400,00	183.584.113,89
USD	Lucro	73.634.204,56	70.773.246,26	70.527.001,62	133.369.282,05

Fonte: elaborado pelo autor

No segundo cenário, a rede cruzada foi testada sob as mesmas condições. Em situações normais, os índices de serviço também foram ideais (1,00). No entanto, com a falha no fornecedor, os níveis de serviço caíram mais

drasticamente, para 0,75 por pedidos e 0,80 por produtos. A incapacidade de produção resultou em índices de 0,92 (pedidos) e 0,93 (produtos), com um tempo médio de ciclo de 11,77 dias.

A variação na demanda levou ao maior volume de atrasos, com 177 pedidos e 8.516 unidades pendentes, além de um tempo máximo de ciclo de 123,03 dias. Apesar dessas dificuldades, a rede cruzada obteve uma receita de 183.584.113,89 USD e lucro de 133.369.282,05 USD no cenário de variação de demanda, compensando parcialmente os impactos operacionais.

Os resultados indicaram uma boa performance inicial em condições normais, mas fragilidade significativa frente a disrupções. O aumento de backlog e custos logísticos reforça a necessidade de uma abordagem mais robusta para mitigar os impactos de eventos inesperados.

### 2.3.3 Cenário 3: Rede Sincronizada da CS

A Tabela 3 apresenta as estatísticas do modelo e resume os principais resultados obtidos na análise do cenário 3.

Tabela 3 – Resultados do Cenário 3

Unit	Estatísticas	Sem Disrupção	Falha no Fornecedor	Incapacidade de Produção	Varição na Demanda
Índice	Nível de Serviço ELT por Pedidos	1,00	0,69	0,82	0,76
Índice	Nível de Serviço ELT por Produtos	1,00	0,90	0,91	0,89
Pedidos	Demanda (Pedidos Pendentes)	13,00	13,00	71,00	385,00
Unidades	Demanda (Produtos Pendentes)	151,55	151,55	697,33	5.907,37
Dias	Tempo Máximo de Ciclo	52,92	123,03	114,05	81,99
Dias	Tempo Médio de Ciclo	8,20	17,34	14,14	9,03
USD	Custo de Manutenção de Estoque	13.946.022,17	12.528.073,78	14.034.410,28	13.783.793,29
USD	Outros Custos	16.470.000,00	16.470.000,00	16.470.000,00	16.470.000,00
USD	Custo de Transporte	58.200.254,44	62.657.734,82	51.045.311,31	63.568.198,78
USD	Receita	124.155.025,00	124.155.025,00	122.705.462,50	189.221.356,00
USD	Lucro	35.538.748,38	32.499.216,41	41.155.740,92	95.399.363,93

Fonte: elaborado pelo autor

No terceiro cenário, o design sincronizado foi implementado, apresentando diferentes respostas às disrupções. Em condições normais, os níveis de serviço atingiram índices ideais de 1,00. Entretanto, a falha no fornecedor resultou nos menores níveis de serviço entre os cenários, com 0,69 por pedidos e 0,90 por produtos. A incapacidade de produção manteve um desempenho razoável, com 0,82 (pedidos) e 0,91 (produtos).

Sob variação de demanda, o design sincronizado registrou o maior volume de atrasos, com 385 pedidos e 5.907 unidades pendentes. O custo de transporte atingiu 63.568.198,78 USD, o mais alto entre os cenários. Apesar disso, esse cenário apresentou a maior receita (189.221.356,00 USD, evidenciando o potencial de ganhos mesmo sob condições adversas.

O design sincronizado demonstrou desempenho consistente em condições normais, mas revelou alta sensibilidade a disrupções externas, como falhas no fornecedor. O aumento de atrasos e custos reforça a necessidade de maior flexibilidade e estratégias de mitigação para enfrentar eventos inesperados.

## 2.4 DISCUSSÃO

Abaixo, os principais achados são apresentados com uma análise clara das vantagens e desvantagens de cada configuração e por fim uma comparação geral dos cenários com seus principais pontos fortes e fracos.

### 2.4.1 Rede Clássica

A rede clássica demonstrou alta estabilidade e resiliência frente a disrupções moderadas. O nível de serviço por pedidos permaneceu em 93% durante falha de fornecedor e 96% durante incapacidade de produção, o mais alto entre os três cenários. O tempo médio de ciclo apresentou a menor variação (crescendo de 4,54 dias para 10,83 dias no pior caso, com falha de fornecedor). Custos de transporte foram os mais baixos, totalizando USD 29,7M em condições normais e USD 30,8M durante variação de demanda, devido à maior estabilidade nas operações e menor dependência de ajustes logísticos.

Frente à variação de demanda, apresentou a maior quantidade de pedidos em atraso (87 pedidos ou 25% acima do cenário base) e produtos pendentes (10.556 unidades, ou 869% acima do cenário base). Apesar da estabilidade em outras disrupções, sua menor flexibilidade frente a grandes flutuações impactou negativamente o atendimento. Sendo assim, é ideal para demandas estáveis ou previsíveis, com lucro de USD 74,7M no cenário base, mas limitada em flexibilidade para picos de demanda extremos.

### **2.4.2 Rede Cruzada**

A rede cruzada mostrou-se mais flexível em cenários de alta demanda, com uma redução de 20% nos produtos pendentes em relação à rede clássica (8.517 unidades). Também apresentou maior adaptabilidade para controlar atrasos em produtos e pedidos, evidenciando-se como uma boa alternativa para variações moderadas na demanda.

Sensível a falhas no fornecedor, com o nível de serviço caindo para 75% por pedidos e 80% por produtos, impactando diretamente a eficiência operacional. Os custos de transporte aumentaram significativamente, chegando a USD 18,1M na variação de demanda, uma alta de 11% em relação ao cenário base e foi 15% maior que o da clássica, devido aos fluxos cruzados adicionais. Sendo assim, oferece maior flexibilidade, com lucro de USD 73,6M no cenário base, mas apresenta vulnerabilidade em casos de falhas na cadeia de fornecimento.

### **2.4.3 Rede Sincronizada**

Destacou-se pela adaptabilidade em condições de alta demanda, com 5.907 produtos pendentes, uma redução de 44% em relação à rede cruzada. Essa capacidade de resposta se deve ao seu design integrado, que permite maior flexibilidade no direcionamento de fluxos entre os CMs e os DCs. Os tempos médios de ciclo foram mais estáveis (9,03 dias na variação de demanda, contra 12,16 dias na rede cruzada), mostrando uma capacidade de ajuste dinâmico.

A sincronização operacional levou a um aumento significativo nos custos de transporte, que alcançaram USD 63,6M na variação de demanda, o maior entre os três cenários e foi 25% maior que na rede clássica, representando o maior impacto no custo total. Apesar disso, a rede sincronizada obteve a maior receita entre os cenários, devido à sua capacidade de capturar ganhos em cenários de alta demanda. Porém, apesar de ser flexível, apresentou vulnerabilidade em cenários de interrupção, como falhas no fornecedor, com lucro reduzido para USD 32,5M. Sendo assim, uma solução interessante para cadeias dinâmicas, com maior potencial em flutuações, mas associada a custos elevados e menor resiliência.



#### 2.4.4 Comparação Geral e Implicações

Os resultados obtidos para os três cenários fornecem uma visão abrangente das respostas de diferentes designs de rede de cadeia de suprimentos a disrupções específicas. A rede clássica, usada como referência, demonstrou estabilidade e a capacidade de suportar falhas na produção e variações moderadas de demanda. No entanto, em condições de demanda extrema, essa configuração acumulou mais pedidos e produtos em atraso e apresentou uma queda em indicadores de eficiência logística, evidenciando uma menor flexibilidade para grandes flutuações. Em comparação, a rede cruzada, embora eficaz para cenários sem disrupção, mostrou-se mais sensível a falhas no fornecimento e à incapacidade de produção, com impactos acentuados nos tempos de ciclo e nos níveis de serviço. Esse design parece atender melhor a demandas estáveis ou previsíveis, destacando suas limitações para mudanças abruptas. A rede sincronizada, com sua capacidade de se ajustar dinamicamente, obteve um desempenho misto. Apesar de lidar bem com a variação de demanda, o aumento nos custos de transporte e o acúmulo de produtos pendentes indicam que a eficiência logística diminuiu em situações de alta demanda, sugerindo que essa estrutura é eficaz, mas requer melhorias em otimização de custos.

Em geral, os três designs de rede têm vantagens específicas, mas a análise sugere que a escolha de uma configuração deve levar em consideração o perfil de demanda e a natureza das disrupções esperadas. Para cadeias de suprimentos sujeitas a alta volatilidade, uma rede com maior flexibilidade, combinada com ajustes em custos logísticos, poderia oferecer uma abordagem equilibrada, maximizando o nível de serviço sem comprometer a eficiência financeira.

Ao analisar os três cenários, alguns padrões emergem nas respostas dos diferentes designs de rede de cadeia de suprimentos às disrupções. Em relação a sensibilidade às disrupções, em todos os cenários, a rede clássica demonstrou maior resiliência frente às disrupções, mantendo níveis de serviço mais próximos ao ideal, especialmente em situações de falha no fornecedor e incapacidade de produção. No entanto, a rede cruzada e a sincronizada apresentaram maior sensibilidade a essas disrupções, particularmente no nível de serviço, o que indica

que esses designs podem ser mais vulneráveis a falhas na cadeia de fornecimento ou limitações internas de produção.

Quanto ao impacto da variação de demanda, todos os designs experimentaram o maior número de pedidos e produtos em atraso durante a variação na demanda, sugerindo que a flutuação de demanda é uma das disrupções mais impactantes para os três designs. Esse padrão indica que a estrutura de cada rede apresenta dificuldades em absorver aumentos significativos na demanda sem comprometimentos em tempo de ciclo e custo logístico.

Sobre os atrasos gerados na cadeia, em condições normais, os tempos de ciclo em todos os designs mantiveram-se em níveis ideais. No entanto, as disrupções causaram aumentos nos tempos máximos e médios de ciclo, com a rede sincronizada apresentando um tempo de ciclo médio relativamente mais estável sob variações de demanda. Esse padrão reflete a necessidade de maior controle e ajuste nos tempos de entrega e produção para melhorar a resposta a cenários de demanda instável e disrupções.

Apesar de as disrupções aumentarem os custos operacionais (especialmente custos de transporte), todos os cenários geraram maior receita e lucro quando houve um aumento significativo na demanda. Esse padrão indica que as redes conseguem gerar ganhos financeiros, mas à custa de um aumento nos custos logísticos e de manutenção, o que sugere um potencial de lucro em cenários de alta demanda, mas também a necessidade de otimização para manter margens sustentáveis.

Esses padrões mostram que o desempenho dos designs de rede pode variar conforme a natureza e intensidade da disrupção. Redes que favorecem a estabilidade e a previsibilidade, como a clássica, tendem a responder melhor a disrupções moderadas. Já redes mais dinâmicas, como a sincronizada, oferecem potencial para capturar ganhos com variações na demanda, mas enfrentam desafios em custo e tempo de resposta.

A Tabela 4 apresenta dados selecionados para comparação de cenários específicas. As estatísticas Nível de Serviço por Produtos e Produtos Pendentes são referentes ao design que ocorre variação de demanda e a porcentagem demonstrada é baseada no design sem disrupção do respectivo cenário. Enquanto as estatísticas Custo Total, Receita e Lucro são referentes ao design sem disrupção

e a porcentagem demonstrada nos cenários 2 e 3 são comparadas com base no cenário 1.

Tabela 4 – Dados Comparativos

Estatísticas	Cenário 1 (Clássica)	Cenário 2 (Cruzada)	Cenário 3 (Sincronizada)	Design
Nível de Serviço ELT por Produtos	85%	80%	89%	Variação na Demanda
Demanda (Produtos Pendentes)	10.557 (+869%)	8.517 (+633%)	5.907 (+443%)	Variação na Demanda
Custo Total (USD)	48,3M	48,5M (+0,4%)	88,6M (+84%)	Sem interrupção
Receita (USD)	123M	122M (-0,7%)	124,2M (+1%)	Sem interrupção
Lucro (USD)	74,7M	73,6M (-1,5%)	35,5M (-52%)	Sem interrupção

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados sugerem que cada design de rede possui pontos fortes e fracos distintos:

- **Estabilidade x Flexibilidade x Agilidade:** A rede clássica demonstrou maior resiliência frente a interrupções moderadas, enquanto a rede cruzada e sincronizada apresentaram maior flexibilidade para variações de demanda, mas com custos mais altos. A rede sincronizada mostrou-se a mais eficaz para demandas voláteis, embora com custos operacionais significativamente maiores. Redes clássicas são melhores para previsibilidade, enquanto redes cruzadas e sincronizadas são mais adequadas para flutuações, desde que haja estratégias para mitigar custos logísticos.
- **Impacto dos Custos:** A rede sincronizada, apesar de eficiente para atender grandes variações, tem o maior custo total, limitando seu uso em cenários com restrição orçamentária.
- **Desempenho por Cenário:** O lucro caiu 1,5% no cenário cruzado e em 52% no sincronizado durante no design base sem interrupções. Já a rede clássica manteve margens mais consistentes, mas apresentou dificuldades em absorver picos de demanda.

Os dados revelam que redes estáveis, como a clássica, respondem melhor a interrupções moderadas, enquanto redes dinâmicas, como a sincronizada, capturam os benefícios de cenários voláteis, ainda que com custos operacionais mais elevados. Cada design de cadeia de suprimentos apresenta trade-offs específicos: redes clássicas são mais estáveis e econômicas; redes cruzadas oferecem

flexibilidade diante de variações na demanda; e redes sincronizadas combinam agilidade e integração, mas com maior custo.

A escolha do design ideal depende das prioridades estratégicas da organização, considerando resiliência, custo e capacidade de adaptação. Os resultados destacam a necessidade de personalizar estratégias da cadeia de suprimentos para alinhar-se às demandas do mercado, ao perfil de risco e aos objetivos financeiros da empresa.

Por fim, as análises quantitativas demonstram que a integração de tecnologias, como gêmeos digitais e inteligência artificial, pode não apenas otimizar custos e ampliar a capacidade preditiva, mas também aprimorar a tomada de decisão em cenários disruptivos. Assim, conclui-se que o alinhamento entre o design da cadeia de suprimentos, as demandas estratégicas da organização e o contexto operacional é essencial para alcançar um equilíbrio sustentável entre custos, flexibilidade e resiliência. Esses resultados encerram a discussão desta seção, reforçando a importância de estratégias personalizadas para atender às necessidades específicas do mercado e aos objetivos organizacionais.

### 3 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos de uma empresa de hardware, considerando tanto condições de operação regular quanto situações de interrupção. Para atingir esse propósito, foram identificadas oportunidades de melhoria nas análises de desempenho da cadeia, propondo um modelo de simulação como ferramenta para avaliação. Além disso, o modelo desenvolvido foi aplicado em cenários de operação de distribuição física de produtos, evidenciando padrões de eficiência, custo, flexibilidade e adaptabilidade de diferentes estruturas de cadeia de suprimentos. Esses resultados oferecem subsídios para decisões estratégicas voltadas à resiliência e ao aprimoramento das operações.

Este estudo investigou a resiliência e eficiência de diferentes designs de redes de cadeia de suprimentos por meio de uma simulação computacional conduzida no software AnyLogistix. A pesquisa teve como foco a análise de três designs de rede — clássica, cruzada e sincronizada — em um ambiente com dez clientes e quinze produtos, com vendas simuladas na América Latina ao longo de doze meses. Cada rede foi submetida a um cenário de operação normal e a três disrupções induzidas (falha no fornecedor, incapacidade de produção e variação na demanda).

Os resultados demonstraram que cada estrutura de rede possui características e padrões distintos, tanto em contextos normais quanto em situações de disrupção. O design clássico (Cenário 1) se destacou pela estabilidade e controle de custos, sendo ideal para operações previsíveis com baixa necessidade de resposta rápida a variações na demanda. A rede cruzada (Cenário 2), por sua vez, apresentou maior flexibilidade para ajustar-se a oscilações na demanda, mas revelou sensibilidade a disrupções no fornecimento e na produção. Já a rede sincronizada (Cenário 3) ofereceu uma combinação de flexibilidade e resiliência, com a melhor resposta para cenários de demanda variável, mas a um custo operacional significativamente mais elevado, sobretudo no transporte.

Esses resultados evidenciam que, embora todos os designs de rede possam alcançar eficiência em operações normais, as condições específicas e os riscos associados à demanda e ao fornecimento devem guiar a escolha do design ideal

para cada organização. Os objetivos específicos de avaliar a eficiência, os custos operacionais e o impacto das disrupções foram atendidos, proporcionando uma compreensão prática sobre como diferentes estruturas de CS podem ser otimizadas para alinhar-se às necessidades de resiliência e ao perfil financeiro da empresa. As conclusões sugerem que uma abordagem personalizada, fundamentada no perfil de risco e nos objetivos de custo e serviço, é essencial para definir a rede de CS mais adequada.

Dessa forma, esta pesquisa oferece uma contribuição valiosa para a gestão de cadeias de suprimentos, especialmente para empresas que buscam fortalecer a resiliência e a flexibilidade de suas operações. As conclusões aqui obtidas poderão servir de base para decisões estratégicas sobre o design e a gestão de redes de CS, com aplicabilidade em diversos setores que enfrentam riscos de disrupção e pressões para equilibrar custo e desempenho operacional.

Diante das limitações e sugestões propostas, o presente estudo ressalta a importância de uma abordagem contínua e multidimensional para a resiliência da cadeia de suprimentos, especialmente em um cenário global cada vez mais suscetível a disrupções. A análise das três configurações de rede e dos cenários de disrupção induzidos demonstrou que cada design apresenta pontos fortes e vulnerabilidades específicos, enfatizando a necessidade de adaptações personalizadas. O avanço em tecnologias emergentes e o uso de dados reais oferecem um potencial significativo para aprofundar o entendimento dos fatores que melhoram a adaptabilidade e a robustez das redes de suprimentos. Assim, este trabalho contribui para a base de conhecimento sobre resiliência da cadeia de suprimentos, abrindo caminhos para futuras investigações que possam fortalecer as estratégias operacionais e tecnológicas, visando redes mais ágeis, integradas e sustentáveis.

Como próximos passos, prevê-se a integração de gêmeos digitais com redes neurais artificiais, utilizando inteligência artificial para validação cruzada (*cross-validation*) dos resultados obtidos nas simulações. Essa abordagem permitirá o refinamento das estatísticas e a aplicação de medidas preditivas mais precisas, ampliando a capacidade de identificar e mitigar disfunções antes que causem impactos significativos. A combinação dessas ferramentas tem o potencial de

transformar a resiliência das cadeias de suprimentos, promovendo maior eficácia, previsibilidade e robustez frente aos desafios dinâmicos do mercado global.

## REFERÊNCIAS

AARLAND, M., RADIANTI, J., & GJØSÆTER, T. (2023). Using System Dynamics to Simulate Trust in Digital Supply Chains. *Proceedings of the International ISCRAM Conference, 2023-text*, 516–529.

ABDEL-LATIF, A., SAAD-ELDIEN, A., & MARZOUK, M. (2023). System dynamics applications in crisis management: A literature review. *Journal of Simulation*, 17(6), 800–817.

AGOSTINO, Í. R. S. et al. Using a digital twin for production planning and control in industry 4.0. *International Series in Operations Research and Management Science*, v. 289, p. 39–60, 2020.

AL-BANNA, A., FRANZOI, R. E., MENEZES, B. C., AL-ENAZI, A., ROGERS, S., & KELLY, J. D. (2022). Roadmap to digital supply chain resilience. *Computer Aided Chemical Engineering*, 49, 571 – 576.

ALDRIGHETTI, R., BATTINI, D., & IVANOV, D. (2023). Efficient resilience portfolio design in the supply chain with consideration of preparedness and recovery investments. *Omega (United Kingdom)*, 117.

ALSHURIDEH, M. T., ALQUQA, E. K., ALZOUBI, H. M., AL KURDI, B., & ALHAMAD, A. (2023). The impact of cyber resilience and robustness on supply chain performance: Evidence from the UAE chemical industry. *Uncertain Supply Chain Management*, 11(1), 187–194.

ALVARENGA, M. Z., OLIVEIRA, M. P. V. DE, & OLIVEIRA, T. A. G. F. de. (2023). The impact of using digital technologies on supply chain resilience and robustness: the role of memory under the covid-19 outbreak. *Supply Chain Management*, 28(5), 825–842.

ALVIM, S. L. S., DE FARIAS, I. V., FRAZZON, E. M., & DE SIMAS, D. (2022). Supply chain resilience in turbulent times: conceptual model and real-world use case. *IFAC PapersOnLine*, 55(10), 85–90.

ARETOULAKI, E., PONIS, S. T., PLAKAS, G., & TZANETOU, D. (2024). (DT4Smart) discrete event simulation and Digital Twins in warehouse logistics: a bibliometric and content analysis-based systematic literature review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.



ARTSIOMCHYK, Y., & ZHIVITSKAYA, H. (2013). Designing supply chain with robustness analysis. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 46(9), 1614–1619.

ASH, C., DIALLO, C., VENKATADRI, U., & VANBERKEL, P. (2022). Distributionally robust optimization of a Canadian healthcare supply chain to enhance resilience during the COVID-19 pandemic. *Computers and Industrial Engineering*, 168.

BADAKHSHAN, Ehsan; BALL, Peter. Applying digital twins for inventory and cash management in supply chains under physical and financial disruptions. *International Journal of Production Research*, p. 1-23, 2022.

BANKS, J., CARSON, J. S., NELSON, B. L., & NICOL, D. M. (2010). *Discrete-Event System Simulation*. Pearson Education.

BARATA, João. The fourth industrial revolution of supply chains: A tertiary study. *Journal of Engineering and Technology Management*, v. 60, p. 101624, 2021.

BELHADI, A. et al. Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 163, n. May 2020, p. 120447, 2021.

BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.

BÉCUE, A. et al. A new concept of digital twin supporting optimization and resilience of factories of the future. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 10, n. 13, 2020.

BOGERS, Marcel; HADAR, Ronen; BILBERG, Arne. Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological forecasting and social change*, v. 102, p. 225-239, 2016.

CAVALCANTE, I. M. et al. A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing. *International Journal of Information Management*, v. 49, n. March, p. 86–97, 2019.

CHAMEKH, M. et al. Secured distributed IoT based supply chain architecture. *Proceedings - 2018 IEEE 27th International Conference on Enabling*

Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, WETICE 2018, p. 203–208, 2018.

DIEHL BARBOSA, L. (2020). O USO DE VENTILADORES NA PANDEMIA DO COVID-19. *InterAmerican Journal of Medicine and Health*, 3.

DUONG, L. N. K.; CHONG, J. Supply chain collaboration in the presence of disruptions: a literature review. *International Journal of Production Research*, v. 58, n. 11, p. 3488–3507, 2020.

DURACH, C. F., WIELAND, A., & MACHUCA, J. A. D. (2015). Antecedents and dimensions of supply chain robustness: a systematic literature review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PHYSICAL DISTRIBUTION & LOGISTICS MANAGEMENT*, 45(1–2, SI), 118–137.

EFFAH, N. A. A., & ABOAGYE, E. M. (2024). Mapping the knowledge domains of COVID-19 and firm performance: main research trends and future direction. *SN Business & Economics*, 4(4).

ESCUDEIRO-ORNELAS, I. O., TIWARI, D., FARNSWORTH, M., & TIWARI, A. (2024). Modelling interdependencies in an electric motor manufacturing process using discrete event simulation. *Journal of Simulation*, 18(4), 604–625.

FAGGIONI, F., ROSSI, M. V., & SESTINO, A. (2024). Conceptualizing Supply Chain Resilience in Exogenous Crisis Times: Toward a Holistic Definition. *Journal of the Knowledge Economy*.

FRAZZON, E. M.; ALBRECHT, A.; HURTADO, P. A. Simulation-based optimization for the integrated scheduling of production and logistic systems. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 12, p. 1050–1055, 2016.

FRIESKE, B., & STIELER, S. (2022). The “Semiconductor Crisis” as a Result of the COVID-19 Pandemic and Impacts on the Automotive Industry and Its Supply Chains. *World Electric Vehicle Journal*, 13(10).

GIL, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. São Paulo: Atlas.

HEIDARY, M. H. (2022). The Effect of COVID-19 Pandemic on the Global Supply Chain Operations: A System Dynamics Approach. *Foreign Trade Review*, 57(2), 198–220

HEMDAN, E. E.-D., EL-SHAFI, W., & SAYED, A. (2023). Integrating Digital Twins with IoT-Based Blockchain: Concept, Architecture, Challenges, and Future Scope. *PubMed Springer Nature Complete Journal*, 131(3), 2193–2216.

HENRY, D. *Supply Chain Management: A Comprehensive Guide*. Editora XYZ, 2019.

HUANG, Samuel H. et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International journal of advanced manufacturing technology*, v. 67, p. 1191-1203, 2013.

HOSSEINI, S.; IVANOV, D.; DOLGUI, A. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 125, n. February, p. 285–307, 2019.

INGALLS, R. G. (2011). *INTRODUCTION TO SIMULATION*.

IVANOV, D., DOLGUI, A. (2019). Low-Certainty-Need (LCN) supply chains: a new perspective in managing disruption risks and resilience. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 5119–5136

IVANOV, D.; DOLGUI, A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning and Control*, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2020.

IVANOV, D. et al. Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility. In: [s.l.] Springer International Publishing, 2019. v. 276p. 309–332.

JIANG, D., & LIU, C. (2019). Modelling of supply chain risk contagion based on system dynamics. *Journal Europeen Des Systemes Automatises*, 52(2), 157–162.

JOHNSON, Z., & SAIKIA, M. J. (2024). Digital Twins for Healthcare Using Wearables. In *Bioengineering* (Vol. 11, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

KAUPPI, K. et al. Managing country disruption risks and improving operational performance: risk management along integrated supply chains. *International Journal of Production Economics*, v. 182, n. July 2015, p. 484–495, 2016.

KAZANCOGLU, Y., LAFICI, C., BERBEROGLU, Y., UPADHYAY, A., ROCHA-LONA, L., & KUMAR, V. (2023). The effects of globalization on supply chain resilience: outsourcing techniques as interventionism, protectionism, and regionalization strategies. *Operations Management Research*.

KIEU, M., NGUYEN, H., WARD, J. A., & MALLESON, N. (2024). Towards real-time predictions using emulators of agent-based models. *Journal of Simulation*, 18(1), 29–46.

KIM, S., CHOI, Y., & KIM, S. (2023). Simulation Modeling in Supply Chain Management Research of Ethanol: A Review. In *Energies* (Vol. 16, Issue 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

KITCHENHAM, B. (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews*. Keele University Technical Report TR/SE-0401, Keele University.

KORDER, B., MAHEUT, J., & KONLE, M. (2024). Simulation Methods and Digital Strategies for Supply Chains Facing Disruptions: Insights from a Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(14), 5957.

KOVAČIĆ, M., MUTAVDŽIJA, M., & BUNTAK, K. (2023). Conceptual Model of Managing Resilience in Supply Chain. *Tehnicki Glasnik*, 17(1), 26–31.

KRAMARZ, M., & KRAMARZ, W. (2015). Strategy of Improving Resistance of Supply Chain in Conditions of Disruptions. *Research in Logistics & Production*, 5(1), 53–63.

KRITZINGER, W., KARNER, M., TRAAR, G., HENJES, J., & SIHN, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.

KUSIAK, A. Smart manufacturing. vol. 56, issue 1-2. *International Journal of Production Research*, p. 508-517, 2018.

LI, Yuhong et al. Network characteristics and supply chain resilience under conditions of risk propagation. *International Journal of Production Economics*, v. 223, p. 107529, 2020.

LONG, Q. Distributed supply chain network modelling and simulation: Integration of agent-based distributed simulation and improved SCOR model. *International Journal of Production Research*, v. 52, n. 23, p. 6899–6917, 2014.

LV, Z., QIAO, L., MARDANI, A., & LV, H. (2024). Digital Twins on the Resilience of Supply Chain Under COVID-19 Pandemic. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 10522–10533.

MAHESHWARI, Pratik et al. Digital twin implementation for performance improvement in process industries-A case study of food processing company. *International Journal of Production Research*, p. 1-23, 2022.

MANUJ, I., HERBURGER, M., & ADANA, S. (2024). Supply chain resilience capabilities in automotive and other industries: a mixed method approach. *JOURNAL OF BUSINESS & INDUSTRIAL MARKETING*.

MENON, D., ANAND, B., & CHOWDHARY, C. L. (2023). Digital Twin: Exploring the Intersection of Virtual and Physical Worlds. *IEEE Access*, 11, 75152–75172.

MIRZAALIYAN, M., HAJIAN HEIDARY, M., & AMIRI, M. (2024). Evaluating the supply chain resilience strategies using discrete event simulation and hybrid multi-criteria decision-making (case study: natural stone industry). *Journal of Simulation*.

MODGIL, S., SINGH, R. K., & HANNIBAL, C. (2022). Artificial intelligence for supply chain resilience: learning from Covid-19. *International Journal of Logistics Management*, 33(4), 1246–1268.

MOHER, David et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *International journal of surgery*, v. 8, n. 5, p. 336-341, 2010.

MOOSAVI, J.; HOSSEINI, S. Simulation-based assessment of supply chain resilience with consideration of recovery strategies in the COVID-19 pandemic context. *Computers and Industrial Engineering*, v. 160, n. July, p. 107593, 2021.

MYLREA, Michael et al. BioSecure digital twin: manufacturing innovation and cybersecurity resilience. *Engineering Artificially Intelligent Systems: A Systems Engineering Approach to Realizing Synergistic Capabilities*, p. 53-72, 2021.

NOORWALI, Albraa; BABAI, M. Zied; DUCQ, Yves. Impacts of additive manufacturing on supply chains: an empirical investigation. In: *Supply Chain Forum: An International Journal*. Taylor & Francis, 2022. p. 1-12.

OH, S.; MOON, H. C.; ZHONG, Y. Contingency management and supply chain performance in Korea: A covid-19 pandemic approach. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 23, p. 1–15, 2020.

OLIVARES-AGUILA, J., & ELMARAGHY, W. (2021). System dynamics modelling for supply chain disruptions. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1757–1775.

PAVLOV, Alexander et al. Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management

under conditions of structural dynamics. *Annals of Operations Research*, p. 1-30, 2019.

PHADNIS, S. (2024). A review of research on supply chain adaptability: Opening the black box. *Journal of Business Logistics*, 45(1).

QI, R., MA, G., LIU, C., ZHANG, Q., & WANG, Q. (2024). Enterprise digital transformation and supply chain resilience. *Finance Research Letters*, 66, 105564.

RAHMAN, T., PAUL, S. K., SHUKLA, N., AGARWAL, R., & TAGHIKHAH, F. (2022). Supply chain resilience initiatives and strategies: A systematic review. *Computers and Industrial Engineering*, 170.

RIBEIRO, J. P., & BARBOSA-POVOA, A. (2018). Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches - A literature review. *COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING*, 115, 109–122.

RIZZATI, M., & LANDONI, M. (2024). A systematic review of agent-based modelling in the circular economy: Insights towards a general model. *Structural Change and Economic Dynamics*, 69, 617–631

RYMARCZYK, J. Technologies, opportunities and challenges of the industrial revolution 4.0: Theoretical considerations. *Entrepreneurial Business and Economics Review*, v. 8, n. 1, p. 185–198, 2020.

SABOUHI, F.; PISHVAEE, M. S.; JABALAMELI, M. S. Resilient supply chain design under operational and disruption risks considering quantity discount: A case study of pharmaceutical supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, v. 126, n. June, p. 657–672, 2018.

SAISRIDHAR, P., THÜRER, M., & AVITTATHUR, B. (2024). Assessing supply chain responsiveness, resilience and robustness (Triple-R) by computer simulation: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 62(4), 1458–1488.

SAWIK, T. (1947-)., Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica (Kraków)., & International Centre for Innovation and Industrial Logistics. (2016). *ICIL 2016 : conference proceedings : 13th International Conference on Industrial Logistics, 28 September - 1 October Zakopane, Poland*. AGH University of Science and Technology.

SCHEIBE, K. P., & BLACKHURST, J. (2018). Supply chain disruption propagation: a systemic risk and normal accident theory perspective. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 56(1–2, SI), 43–59.

SCHIFFMANN, O., HICKS, B., NASSEHI, A., GOPSILL, J., & VALERO, M. (2023). A Cost–Benefit Analysis Simulation for the Digitalisation of Cold Supply Chains. *Sensors*, 23(8).

SEKHAR, J. C., PRATAP, V. K., VEERANJANEYULU, R., MACHERLA, S., MANINDHAR, B., & RAHMAN, S. Z. (2023). *Data Analytics Techniques for Smart Grids Applications Using Machine Learning* (pp. 421–440).

SEMENOV, I., & JACYNA, M. (2022). The synthesis model as a planning tool for effective supply chains resistant to adverse events. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 24(1), 140–152.

SINGH, P. D., TRIPATHI, V. (2024). *Digital Twins: A Comprehensive Study on Models, Platforms, Applications and Challenges*. 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom) (pp. 1072-1077). IEEE.

VIEIRA, G. E. et al. Evaluating the Robustness of Production Schedules using Discrete-Event Simulation. *IFAC-PapersOnLine*, v. 50, n. 1, p. 7953–7958, 2017.

VIEIRA, G. E., & LEMOS, R. (2009). Understanding supply chain robustness. *PROCEEDINGS OF 2009 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE OPERATION, LOGISTICS AND INFORMATICS*, 157.

WANG, Y.; WANG, X.; LIU, A. Digital twin-driven supply chain planning. *Procedia CIRP*, v. 93, p. 198–203, 2020.

WANG, Y., YAN, F., JIA, F., & CHEN, L. (2023). Building supply chain resilience through ambidexterity: an information processing perspective. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 26(2), 172–189.

WEI, X.; PRYBUTOK, V.; SAUSER, B. Review of supply chain management within project management. *Project Leadership and Society*, v. 2, p. 100013, 2021.

YANG, M., LIM, M. K., QU, Y., NI, D., & XIAO, Z. (2023). Supply chain risk management with machine learning technology: A literature review and future research directions. *Computers and Industrial Engineering*, 175.

YIN, R. K. (2015). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. Porto Alegre: Bookman.