

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS NÍVEL MESTRADO**

LUZIANE MACHADO BARBOSA

**OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES
SOBRE A EFICIÊNCIA DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE UMA EMPRESA
DO SEGMENTO QUÍMICO**

São Leopoldo

2023

B238e Barbosa, Luziane Machado.

Os efeitos da aplicação dos princípios da teoria das restrições sobre a eficiência de uma cadeia de suprimentos de uma empresa do segmento químico / Luziane Machado Barbosa. – 2023.

100 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2023.

“Orientador: Prof. Dr. Fabio Sartori Piran

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Cassel”.

1. Teoria das restrições. 2. Cadeia de suprimentos. 3. Eficiência da cadeia de suprimentos. 4. Análise envoltória de dados. I. Título.

CDU 658.5

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

LUZIANE MACHADO BARBOSA

**OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES
SOBRE A EFICIÊNCIA DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE UMA EMPRESA
DO SEGMENTO QUÍMICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Fabio Sartori Piran

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Cassel

São Leopoldo

2023

LUZIANE MACHADO BARBOSA

**OS EFEITOS DA APLICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES
SOBRE A EFICIÊNCIA DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS DE UMA EMPRESA
DO SEGMENTO QUÍMICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2023, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Pacheco Lacerda

Prof. Dr. Leandro Gauss

Prof.^a Dr.^a Maria Isabel Wolf Motta Morandi

Prof. Dr. Milton Vieira Junior

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

AGRADECIMENTOS

Procuro não confundir persistência com teimosia, pois entendo que persistir é ter a força de continuar tentando até alcançar o objetivo desejado. No entanto, reconheço que há momentos em que é necessário optar e priorizar algumas coisas, sabendo que isso não significa desistir, mas sim tomar decisões que possam impactar positivamente o caminho que trilho. Sou grata a Deus pelo seu suporte constante, Ele é minha fortaleza e refúgio, sempre me mantendo firme e encorajada a não desistir.

Agradeço de coração à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, acreditando em mim e me incentivando a estudar e perseguir meus sonhos. Obrigada por todo o apoio e paciência durante a elaboração da minha dissertação, que me permitiu ter mais tempo e tranquilidade para realizar este trabalho.

Agradeço ao professor Daniel Lacerda por ser um exemplo de profissionalismo e competência ao longo da minha jornada acadêmica. Sou grata por ser convidada por ele a fazer o mestrado e por sempre me apresentar desafios que, à primeira vista, pareciam insuperáveis. Seu apoio e orientação foram fundamentais para o meu crescimento e evolução como estudante e pesquisadora.

Sou grata ao professor Fabio Piran, meu orientador, por sua dedicação exemplar e comprometimento ao longo de todo o processo de orientação. Sua orientação segura e suas palavras de encorajamento foram fundamentais para que eu superasse minhas limitações e acreditasse em meu potencial. Além disso, é evidente que Fabio ama o que faz, revelando sua verdadeira vocação por meio da dedicação tanto à pesquisa quanto à docência.

Agradeço ao professor Ricardo Cassel, meu coorientador, pela sua extrema habilidade e competência em contribuir generosamente para o progresso desta pesquisa. Sua vasta experiência e profundo conhecimento foram fundamentais para a concretização deste trabalho, e sou grata por ter a oportunidade de contar com sua valiosa orientação.

Sou grata ao Gustavo Stefano pela generosidade em compartilhar comigo os dados de sua pesquisa. Sua disposição em participar de reuniões e explicar detalhadamente seu trabalho foi fundamental para que eu pudesse compreender melhor o que havia feito e validar meus próprios resultados. Além disso, sua contribuição como especialista foi valiosa e enriqueceu significativamente minha pesquisa.

Quero expressar minha gratidão as minhas colegas, Bárbara Bender, Gisele Steffen, Jaqueline Lilge Abreu, Kátia Maete Rodrigues da Silva e Letícia Stefano. Vocês foram mais do que colegas, se tornaram verdadeiras amigas, e sou grata por todo o apoio, amizade e contribuições que recebi de cada uma de vocês. Sem dúvida, nossa parceria e camaradagem foram essenciais para o sucesso desta pesquisa.

Acredito que mais importante que o conhecimento técnico aprendido, foram as experiências vivenciadas e as relações estabelecidas. Este é, sem dúvidas, o maior legado do meu mestrado. Foi um período de intenso aprendizado e crescimento pessoal, no qual pude ampliar meus horizontes e desenvolver habilidades que serão úteis para toda a minha vida profissional. Sinto-me extremamente grata por todas as oportunidades que tive nesse período e só posso expressar minha profunda gratidão a todos que estiveram ao meu lado. O conhecimento adquirido certamente será valioso, mas são as lembranças e as pessoas que levo comigo que tornam essa jornada inesquecível. Muito obrigada a todos!

RESUMO

Solucionar os problemas enfrentados pelas Cadeias de Suprimentos (CSs) é um desafio tanto para a academia quanto para as organizações. Uma alternativa promissora para a solução desses problemas e para melhorar o desempenho operacional das CSs, é a utilização da Teoria das Restrições (TOC). Há escassez de estudos que buscam medir a eficiência das CSs. A partir da identificação dessa lacuna, este estudo objetiva propor uma abordagem que permita a mensuração agregada desses indicadores, proporcionando uma visão completa e integrada dos benefícios decorrentes da adoção da TOC na CS em uma empresa química. Para isso, foi utilizada a Modelagem como método de pesquisa. A eficiência foi avaliada por meio da Análise Envoltória de Dados (DEA). Os resultados revelaram que a implementação simultânea dos cinco princípios da TOC, e a utilização da previsão de demanda, resultou em um aumento significativo na eficiência da Cadeia de Suprimentos. Antes da aplicação dos princípios da TOC, a mediana das eficiências era de 64%, após a implementação, essa mediana aumentou para 82%. As descobertas deste estudo oferecem evidências de que a implementação parcial ou isolada dos princípios da Teoria das Restrições (TOC) na Cadeia de Suprimentos, juntamente com a omissão da consideração da previsão de demanda, pode promover uma redução significativa da eficiência.

Palavras-chave: Teoria das Restrições; Cadeia de Suprimentos; Eficiência da Cadeia de Suprimentos; Análise Envoltória de Dados.

ABSTRACT

Solving the problems faced by Supply Chains (SCs) is a challenge for both academia and organizations. A promising alternative for solving these problems and improving the operational performance of SCs is the use of the Theory of Constraints (TOC). There is a lack of studies that seek to measure the efficiency of SCs. Based on the identification of this gap, this study aims to propose an approach that allows the aggregate measurement of these indicators, providing a complete and integrated view of the benefits arising from the adoption of TOC in CS in a chemical company. For this, Modeling was used as a research method. Efficiency was evaluated using Data Envelopment Analysis (DEA). The results revealed that the simultaneous implementation of the five TOC principles, and the use of demand forecasting, resulted in a significant increase in Supply Chain efficiency. Before applying TOC principles, the median efficiencies were 64%; after implementation, this median increased to 82%. The findings of this study provide evidence that the partial or isolated implementation of Theory of Constraints (TOC) principles in the Supply Chain, together with the omission of consideration of demand forecasting, can promote a significant reduction in efficiency.

Key-words: Theory of Constraints; Supply Chain; Supply Chain Efficiency; Data Envelopment Analysis.

LISTA DE SIGLAS

- CRS Constant Returns to Scale (Retorno Constante de Escala)
DEA Data Envelopment Analysis (Análise Envoltória de Dados)
DMU Decision Making Unit (Unidades de Tomada de Decisão)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia de Suprimentos analisada	20
Figura 2 - Desenho de pesquisa apresentando os cenários	25
Figura 3 - Fluxograma dos resultados da Revisão Sistemática da Literatura 1.....	28
Figura 4 - Fluxograma dos resultados da Revisão Sistemática da Literatura 2.....	30
Figura 5 - Etapas para a condução de uma pesquisa científica.....	58
Figura 6 - Descrição do método de trabalho	62
Figura 7 - Procedimentos para a elaboração de modelos de simulação DEA	63
Figura 8 - Modelo DEA utilizado na pesquisa.....	66
Figura 9 - Procedimento de análise dos dados	70
Figura 10 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C1	78
Figura 11 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C2	78
Figura 12 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C3	79
Figura 13 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C4	79
Figura 14 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C5	80
Figura 15 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C6	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de melhorias de performance a partir da utilização dos princípios da TOC nas CSs	17
Quadro 2 - Cenários de análise e variáveis.....	22
Quadro 3 - Elementos do ASElementos do ASR	36
Quadro 4 - Níveis de consumo e cores dos pulmões.....	37
Quadro 5 - Corpus de análise da RSL	41
Quadro 6 - Síntese dos estudos.....	52
Quadro 7 - Resumo do delineamento da pesquisa	59
Quadro 8 - Variáveis e fontes coletadas	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Strings da Revisão Sistemática da Literatura 1.....	27
Tabela 2 - Strings da Revisão Sistemática da Literatura 2.....	29
Tabela 3 - DMUs do modelo em semanas	66
Tabela 4 - Comparativo dos escores das eficiências entre os cenários em análise..	74
Tabela 5 - Síntese do resultado das hipóteses	82
Tabela 6 - Resumo dos resultados.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Série temporal de consumo.....	21
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objeto e problema de pesquisa	17
1.2	Objetivos	26
1.2.1	Objetivo geral.....	26
1.2.2	Objetivos específicos	26
1.3	Justificativa	27
1.4	Estrutura do trabalho	32
2	REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1	Teoria das Restrições	34
2.2	TOC na Cadeia de Suprimentos	35
2.2.1	Estudos empíricos sobre a aplicação da TOC na Cadeia de Suprimentos.	39
2.2.2	Estudos empíricos que avaliam a eficiência da utilização da TOC na Cadeia de Suprimentos	50
3	METODOLOGIA	58
3.1	Delineamento da Pesquisa	59
3.2	Método de Trabalho	61
3.2.1	Projeto e modelo DEA.....	62
3.2.2	Definição das unidades de análise, DMUs, variáveis e modelo conceitual.	64
3.2.3	Definição do modelo (CRS) e orientação (<i>input</i>), coleta e tratamento de dados	66
3.3	Análise dos dados	69
4	RESULTADOS	73
5	DISCUSSÃO	84
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – PROTOCOLO DE BUSCA RSL 1	97
	APÊNDICE B – PROTOCOLO DE BUSCA RSL 2	98
	APÊNDICE C - MEDIANA DOS ESCORES DE EFICIÊNCIA	99

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficaz da Cadeia de Suprimentos (CS) desempenha um papel fundamental na competitividade das empresas, tornando-se uma vantagem competitiva para a permanência no mercado (COSTAS et al., 2015; HILMOLA, 2020a; MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; OPOKU; ABBOAH; OWUSU, 2021). Uma CS pode ser definida como uma rede de varejistas, distribuidores, fabricantes e fornecedores que colaboram entre si para atender às demandas dos clientes (AINAPUR; SINGH; VITTAL, 2011a; LENG; CHEN, 2012). A principal função da gestão da CS é garantir a disponibilidade dos produtos no local e momento adequados, buscando minimizar os custos operacionais (MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017). Dentre os modos de avaliar o desempenho de uma CS, destaca-se a disponibilidade de produtos para venda e a rotação de estoque (MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; PARSAEI; NAHAVANDI; ELMEKKAWY, 2012).

Apesar dos esforços de pesquisadores e empresas para melhorar o desempenho das Cadeias de Suprimentos (CSs), essas ainda enfrentam desafios recorrentes. Entre esses estão: (i) baixa rotatividade de estoque; (ii) alto investimento em estoque; (iii) perdas de vendas devido à falta de estoque em alguns locais e excesso de estoque do mesmo produto em outros locais; (iv) alta taxa de obsolescência do estoque; e (v) falta de agilidade no atendimento às necessidades dos clientes (KOH; GUNASEKARAN, 2006; MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; SCHRAGENHEIM, 2007). Uma alternativa promissora para a solução desses problemas é a utilização da Teoria das Restrições (do inglês, *Theory of Constraints* – TOC) na CS (MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017). A TOC, concebida pelo israelense Eliyahu M. Goldratt no início da década de 80, foi inicialmente desenvolvida para auxiliar no planejamento da produção em sistemas de manufatura. A fim de apoiar o processo de identificação e administração das restrições, bem como de sincronizar o sistema produtivo para maximizar a eficiência das empresas. Para apoiar nessa sincronização, Eliyahu M. Goldratt desenvolveu o *software Optimized Production Technology (OPT)* (CHANG; CHANG; HUANG, 2014; LENG; WANG, 2012a; NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013). Assim, a Teoria das Restrições passou a ser aplicada em diversas áreas e setores (COSTAS et al., 2015; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; WU; LEE; TSAI, 2014).

A partir da solução ganha-ganha proposta por Goldratt em 1994 no *best-seller* "Não é Sorte" para diluir os conflitos no gerenciamento dos estoques da cadeia principal, a utilização da TOC na CS foi impulsionada. Essa abordagem reconhece a importância de analisar a CS de maneira abrangente e otimizá-la por uma perspectiva colaborativa, ao invés de tratar os elementos isoladamente (PUCHE et al., 2019; TABRIZI et al., 2012; WU et al., 2013). Goldratt (2009) aprimorou suas ideias e conceitos sobre a aplicação da TOC para a CS e divulgou no livro "Não é óbvio". Nessa obra, conceitos-chave são apresentados, como: (i) a recomendação de manter apenas o estoque necessário para atender à demanda nos pontos de venda, mantendo o restante nos depósitos; (ii) a importância de basear as ordens de reposição nas vendas diárias efetivas; (iii) a necessidade de centralizar a gestão de estoque em armazéns centrais; e (iv) a sugestão de realizar compras em lotes menores, para aumentar a rotatividade de estoque e minimizar os investimentos. (GOLDRATT, 2009; SMITH; PTAK, 2010).

Schragenheim (2007) defende a aplicação da TOC como uma solução para os principais problemas enfrentados pela CS. Visto que a reposição frequente dos estoques consumidos em pulmões estrategicamente posicionados, conforme proposto pela TOC, é capaz de apoiar as decisões de o que, onde e quanto estocar. Com essa abordagem, Schragenheim (2007) sugere a adoção de algumas práticas, tais como: (i) agregar o estoque da CS no armazém da fábrica ou armazém central; (ii) determinar o tamanho dos pulmões de estoque em todos os elos da cadeia baseados na demanda, oferta e tempo de reabastecimento; (iii) reabastecer com maior frequência; (iv) gerenciar o fluxo dos estoques por meio dos pulmões e dos níveis de pulmões; (v) utilizar a lógica do Gerenciamento de Pulmão Dinâmico (GPD); e (vi) definir quais serão as prioridades de fabricação a partir das urgências dos pulmões de estoque do armazém da fábrica.

Embora os benefícios da aplicação da TOC para a melhoria do desempenho das organizações tenham sido apresentados em estudos da área, sua adoção ainda se depara com desafios significativos para obter reconhecimento no âmbito acadêmico (CHOI; WACKER, 2011; NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013; PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021). Conforme Gupta e Snyder (2009), essa perspectiva acadêmica é corroborada pela falta de exemplos práticos, profundidade nas características consideradas, rigor na aplicação dos métodos e análises estatísticas aprofundadas nos estudos sobre a TOC.

Há escassez de estudos que buscam medir a eficiência das CSs. A partir da identificação dessa lacuna, este estudo objetiva propor uma abordagem que permita a mensuração agregada desses indicadores, proporcionando uma visão completa e integrada dos benefícios decorrentes da adoção da TOC na CS (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021). Além disso, a maioria das pesquisas realizadas sobre o tema conduzem Revisões Sistemáticas da Literatura, *Surveys* e modelagens/simulações (algumas vezes de dados fictícios), o que afeta a generalização dos resultados (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021).

Nesse sentido, esta pesquisa tem como tema central a análise dos efeitos da implementação dos princípios da TOC sobre a eficiência da Cadeia de Suprimentos. Na próxima seção, será apresentado o objeto de estudo e serão discutidos os problemas relacionados à aplicação dos princípios da TOC na CS, gerando assim a questão de pesquisa.

1.1 Objeto e problema de pesquisa

A literatura científica apresenta estudos que evidenciam os benefícios que a aplicação dos princípios da TOC na CS proporciona, resultando em melhorias de desempenho para as empresas que os implementam ou simulam a implementação. No Quadro 1, é possível observar alguns exemplos concretos dessas melhorias de *performance*, bem como os estudos que as respaldam.

Quadro 1 - Exemplos de melhorias de performance a partir da utilização dos princípios da TOC nas CSs

Exemplo de melhorias de <i>performance</i>	Estudos que apresentam as melhorias
Incremento de desempenho, previsão de demanda e satisfação dos clientes	Chang, Chuang e Li (2007), Chiou et al. (2014), Filho et al. (2016), Horng Huei et al. (2011), Hung et al. (2010), Kortabarria et al. (2018) e Pawlewski et al. (2009)
Aumento de lucratividade, capacidade e frequência de reabastecimento	Fagundes et al. (2010), Gupta e Andersen (2018), Jasinavičius e Jasinavičius (2011), Kortabarria et al. (2018), Modi, Lowalekar e (Bhatta (2019), Ponte et al. (2016) e Wen, Wee e Wu (2014)
Redução de estoque, faltas de estoque, prazos de entrega e efeito chicote	Chang, Chuang e Li (2007), Chang, Chang e Huang (2014), Chang, Chang e Sun (2015), Fagundes et al. (2010), Gupta e Andersen (2018), Hung et al. (2010), Jasinavičius; Jasinavičius (2011), Kortabarria et al. (2018), Modi, Lowalekar e Bhatta (2019), Pawlewski et al. (2009), Ponte et al. (2016), Puche et al. (2019) e Tsou (2013)
Fomento da melhoria contínua	Filho et al. (2016)

Fonte: Elaborado pela autora.

A maioria dos estudos apresentados no Quadro 1 foca nas restrições locais das CSs, sem considerar as restrições globais da Cadeia de Suprimentos. Além disso, as CSs apresentam problemas críticos que precisam ser considerados, como a imprecisão das previsões de demanda, a qual tende a aumentar quando se visa antecipar o futuro em prazos longos e de maneira detalhada (SMITH; PTAK, 2010). Esse fator, combinado com a utilização de sistemas empurrados e tempos de espera elevados, potencializa o efeito chicote (SCHRAGENHEIM, 2007). Deve-se considerar o conflito entre manter baixos níveis de estoque nos canais de distribuição, perdendo vendas, ou manter altos níveis de estoque, aumentando custos (CHANG; CHUANG; LI, 2007a; YUAN; CHANG; LI, 2003).

Encontrar a melhor maneira de medir o desempenho é uma prioridade para os gerentes, visto que permite o monitoramento adequado e orienta as ações da organização em direção aos seus objetivos (GUPTA; ANDERSEN, 2012; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004). Por exemplo, a falta de uma análise abrangente da produtividade e eficiência pode conduzir a decisões equivocadas, como investimentos desnecessários em recursos não prioritários, a ausência de investimentos em recursos críticos e o aumento da capacidade produtiva sem explorar a capacidade máxima dos recursos existentes (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018). A eficiência é uma medida comparativa e representa o aproveitamento dos recursos, ou seja, o que foi produzido com a utilização de determinados recursos em relação ao que poderia ter sido produzido com os mesmos recursos (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018). Assim, a gestão eficiente da CS torna-se essencial para que as empresas desenvolvam uma vantagem competitiva sustentável (KORTABARRIA et al., 2018). A vantagem competitiva na Cadeia de Suprimentos pode ser definida como a capacidade de uma empresa se destacar em relação à concorrência por meio da otimização e eficiência de suas operações logísticas, redução de custos, melhoria da qualidade dos produtos, tempos de entrega mais rápidos, melhor serviço ao cliente, flexibilidade e agilidade na resposta às demandas do mercado (BARNEY; CLARK, 2007).

Esta pesquisa foi baseada em dados reais de uma CS, que foram simulados em diferentes cenários de aplicação dos princípios da TOC em uma pesquisa prévia conduzida por Stefano (2020). Esses dados foram coletados em uma indústria química de grande porte. Trata-se de uma empresa multinacional sediada na Europa,

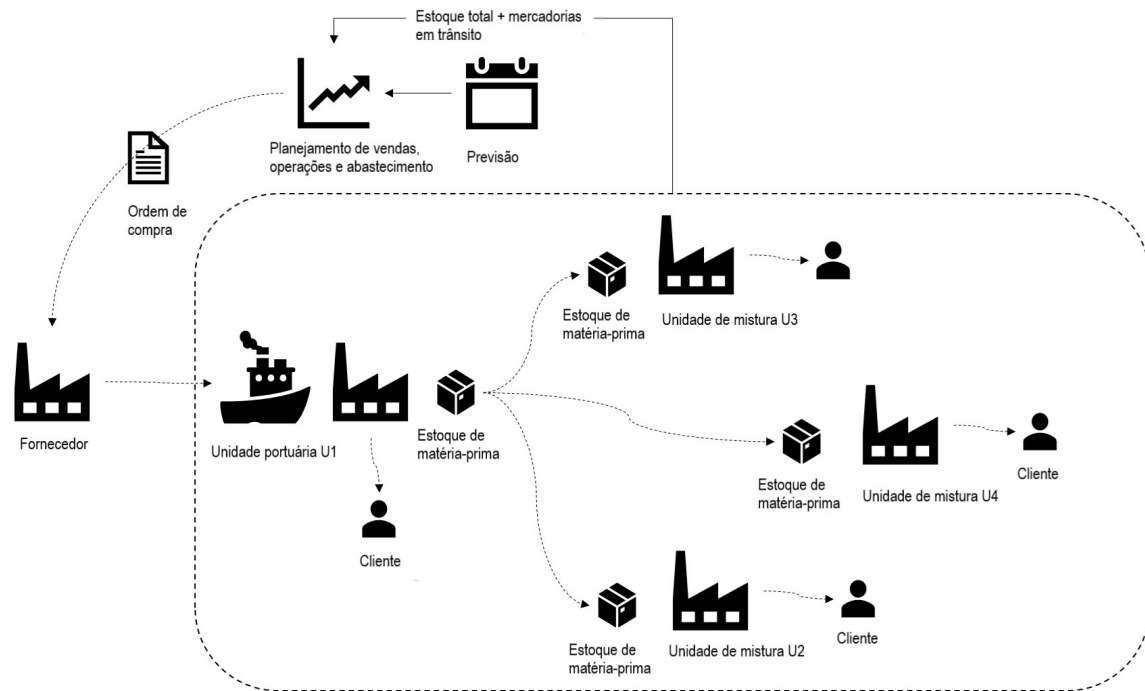
com uma forte presença no Brasil, onde cerca de um terço de sua receita global é gerada.

A empresa em análise é caracterizada por possuir unidades de produção em onze estados brasileiros, responsáveis por fornecer produtos manufaturados para as 24 unidades de mistura localizadas no Brasil. Aproximadamente 80% das matérias-primas utilizadas são provenientes de unidades de produção europeias e fornecedores internacionais, transportadas por modal marítimo. Devido aos longos prazos de entrega dessas matérias-primas, a empresa é pressionada a planejar sua produção, níveis de estoque e vendas com base em previsões de demanda, que apresentam uma precisão de cerca de 60%. Ademais, o plano de reabastecimento também apresenta uma efetividade de aproximadamente 56%. Essa situação resulta em estoques elevados, baixo giro de estoque, perdas por obsolescência, atrasos na entrega e, até mesmo, perda de vendas.

Nesse contexto, este estudo tem como foco analisar as unidades de produção situadas no estado do Rio Grande do Sul, considerando sua importância no volume de vendas em relação ao total de vendas da empresa. No cenário brasileiro, as unidades do Rio Grande do Sul representam a maior parcela de vendas no país, cerca de 28% do volume total de vendas. Em segundo lugar, encontra-se o estado que corresponde a 17% das vendas, seguido pelo terceiro lugar, o estado com 15%. Os outros oito estados, em conjunto, representam 40% das vendas totais. Essa análise é relevante para compreender a contribuição estratégica das unidades do Rio Grande do Sul no desempenho global da empresa.

No estado do Rio Grande do Sul, estão localizadas quatro unidades da empresa, em cidades distintas. A primeira unidade, denominada U1, é uma unidade de produção que conta com porto próprio, enquanto as demais unidades - U2, U3 e U4 - são unidades de mistura. Em geral, a unidade portuária é responsável por transferir as matérias-primas para as unidades de mistura. No entanto, em algumas situações, dependendo do tipo de material, algumas unidades de mistura podem receber as matérias-primas diretamente do fornecedor e transferi-las para qualquer uma das unidades solicitantes. Anualmente, são transferidas cerca de 780 mil toneladas de material entre essas quatro unidades. Para uma melhor compreensão da CS em estudo, a Figura 1 apresenta uma visão geral do sistema descrito. Ressalta-se que a empresa opera no sistema *make-to-order* (MTO), ou seja, a produção é realizada conforme a demanda dos clientes.

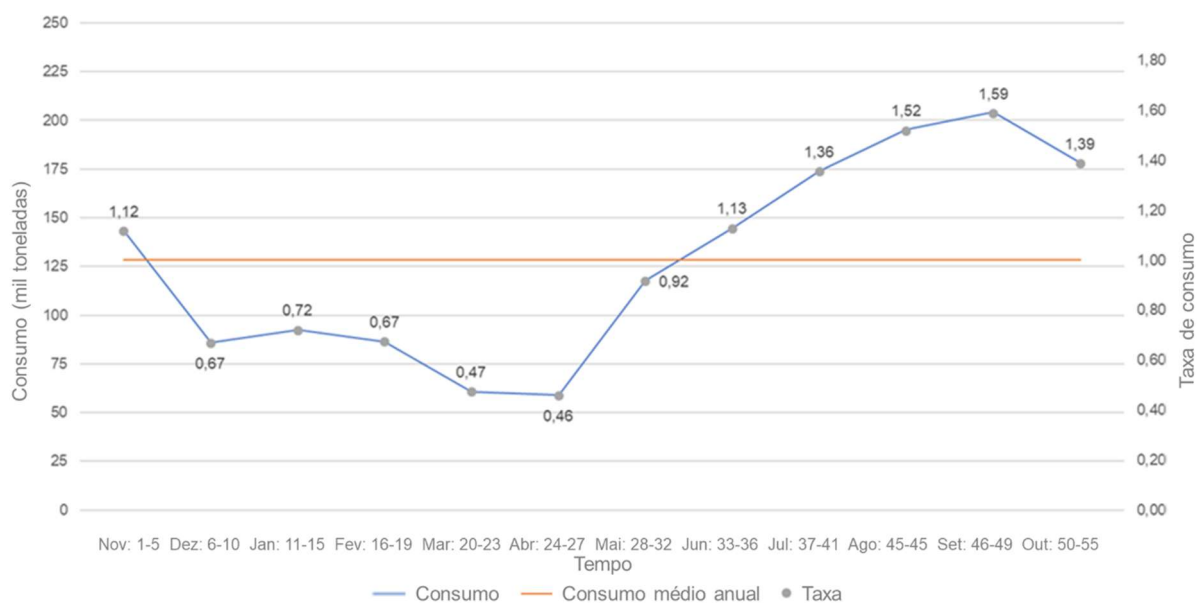
Figura 1 - Cadeia de Suprimentos analisada



Fonte: Traduzida de Stefano (2020).

O mercado de atuação da empresa é sazonal, com alta temporada nos meses de julho a setembro. Essa sazonalidade pode ser observada no Gráfico 1, que apresenta o consumo de matéria-prima, o consumo médio anual e a relação de consumo (consumo do mês dividido pelo médio) ao longo do tempo, com o tempo analisado em meses. É notável que em setembro ocorre o auge, atingindo 1,59 na relação de consumo, o que representa um aumento de quase 60% em relação ao consumo médio.

Gráfico 1 - Série temporal de consumo



Fonte: Traduzida de Stefano (2020).

A partir de um cenário base que representa a situação real da CS em análise, Stefano (2020) elaborou seis cenários para simulação com Dinâmica de Sistemas (DS). Nessa simulação, diferentes combinações dos princípios da TOC na CS na empresa, previamente descritos, foram incorporadas em cada cenário, como pode ser observado no Quadro 2. Além disso, nesse quadro, são apresentadas as variáveis consideradas em cada cenário e se o pulmão é baseado na previsão de demanda (PD) ou não (não PD). Ressalta-se que a determinação do pulmão e o tempo de reposição são considerados variáveis individuais, sendo tratados separadamente no contexto da análise.

Quadro 2 - Cenários de análise e variáveis

Princípios da TOC para CS	Base	C1 Agregação de estoque no nível mais alto da CS	C2 Determinação do tamanho do pulmão e <i>lead time</i> de reposição	C3 Penetração do pulmão	C4 Pulmão dinâmico	C5 Pulmão baseado em previsão	C6 Modelo híbrido para lidar com a sazonalidade
Agregação de estoque	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Pulmão TOC	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Lead time</i> reabastecimento	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Penetração de pulmão	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Pulmão Dinâmico	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim
Tipo de pulmão	PD	PD	Não PD	Não PD	Não PD	PD	PD

Fonte: Traduzida de Stefano (2020)

O primeiro cenário (C1) considera agregação de estoque no nível mais alto da CS e o pulmão é baseado em previsão de demanda. O segundo cenário (C2) inclui agregação de estoque no nível mais alto da CS, pulmão TOC, *lead time* de reabastecimento e o pulmão não é baseado em previsão de demanda. O terceiro cenário (C3) compõe-se de agregação de estoque no nível mais alto da CS, pulmão TOC, *lead time* de reabastecimento, penetração de pulmão e o pulmão não é baseado em previsão de demanda. Enquanto, o quarto cenário (C4) considera a agregação de estoque no nível mais alto da CS, pulmão TOC, *lead time* de reabastecimento, penetração de pulmão, pulmão dinâmico e o pulmão não é baseado em previsão de demanda. O quinto cenário (C5) engloba a agregação de estoque no nível mais alto da CS, pulmão TOC, *lead time* de reabastecimento e o pulmão é baseado em previsão de demanda. Por fim, o sexto cenário (C6) abarca a agregação de estoque no nível mais alto da CS, pulmão TOC, *lead time* de reabastecimento, penetração de pulmão, pulmão dinâmico e o pulmão é baseado em previsão de demanda.

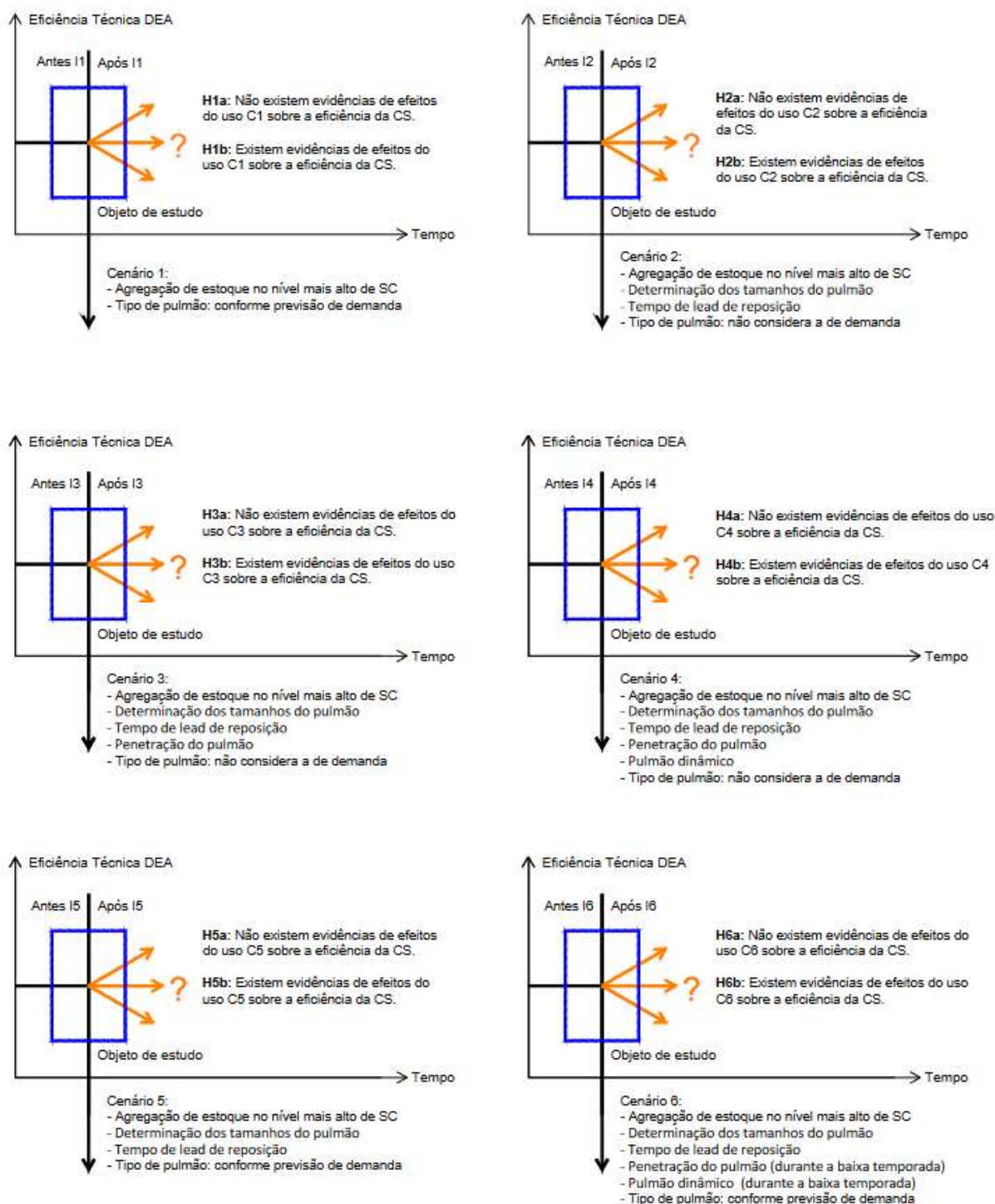
Conforme apresentado, Stefano (2020) investigou os impactos da aplicação de práticas da TOC no desempenho da Cadeia de Suprimentos. Para tanto, Stefano (2020) modelou e simulou a Cadeia de Suprimentos interna da empresa, bem como avaliou os impactos da aplicação dos princípios da TOC sobre os indicadores níveis de inventário, ganho-dólar-dia (GDD), inventário-dólar-dia (IDD) e frequência de reabastecimento. Os resultados obtidos apresentaram melhorias no rendimento do sistema de até 92% e redução de até 62% nos estoques, dependendo do cenário. Houve também uma diminuição de até 67% nos estoques no armazém, simultaneamente com melhorias nos resultados de produção. Além disso, o estudo apresentou uma pesquisa detalhada, descrevendo cada etapa da Teoria das Restrições relacionada a determinada solução proposta, bem como os resultados e efeitos da implementação dessa abordagem. No entanto, Stefano (2020) não realizou uma medição dos efeitos proporcionados pela utilização dos princípios da TOC sobre a eficiência da CS. A medição da eficiência da CS é importante porque permite identificar pontos de melhoria, otimizar processos e reduzir custos. Além disso, ajuda a comparar diferentes estratégias e tomar decisões embasadas (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018).

Considerando a solução proposta pela TOC para a CS, as dificuldades enfrentadas pela empresa em estudo e a necessidade constante dessa organização de monitorar seu desempenho a fim de orientar suas ações em direção aos objetivos

estabelecidos, a pergunta central desta pesquisa é: quais são os efeitos proporcionados pela utilização dos princípios da TOC na eficiência da Cadeia de Suprimentos?

Após a formulação da questão de pesquisa e a compreensão dos cenários propostos, torna-se essencial elaborar as hipóteses e compreender a estrutura de análise de cada cenário. Nesse contexto, o desenho de pesquisa, ilustrado na Figura 2, apresenta a avaliação dos efeitos do cenário. Para a avaliação das eficiências, será empregada a técnica da Análise Envoltória de Dados (do inglês, *Data Envelopment Analysis* - DEA).

Figura 2 - Desenho de pesquisa apresentando os cenários



Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, as hipóteses selecionadas e formuladas nesta pesquisa são:

H1a: Não existem evidências de efeitos do uso C1 sobre a eficiência da CS.

H1b: Existem evidências de efeitos do uso C1 sobre a eficiência da CS.

H2a: Não existem evidências de efeitos do uso C2 sobre a eficiência da CS.

H2b: Existem evidências de efeitos do uso C2 sobre a eficiência da CS.

H3a: Não existem evidências de efeitos do uso C3 sobre a eficiência da CS.

H3b: Existem evidências de efeitos do uso C3 sobre a eficiência da CS.

H4a: Não existem evidências de efeitos do uso C4 sobre a eficiência da CS.

H4b: Existem evidências de efeitos do uso C4 sobre a eficiência da CS.

H5a: Não existem evidências de efeitos do uso C5 sobre a eficiência da CS.

H5b: Existem evidências de efeitos do uso C5 sobre a eficiência da CS.

H6a: Não existem evidências de efeitos do uso C6 sobre a eficiência da CS.

H6b: Existem evidências de efeitos do uso C6 sobre a eficiência da CS.

A partir da apresentação do objeto de estudo e do problema de pesquisa, realizadas nesta seção, na próxima seção serão descritos os objetivos deste trabalho.

1.2 Objetivos

Nesta seção, são descritos os objetivos gerais e específicos que compõem a pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar os efeitos proporcionados pela utilização dos princípios da TOC indicados para a CS, na eficiência de uma CS de uma empresa química.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Realizar uma análise comparativa das médias de eficiência entre o cenário de base da CS e os cenários simulados, visando identificar possíveis melhorias e suas implicações.
- b) Identificar a quantidade de DMUs que apresentam eficiência superior (no terceiro quartil) em cada cenário.
- c) Formular e selecionar hipóteses formuladas para serem testadas em estudos empíricos posteriores.
- d) Caracterizar como os princípios da TOC impactaram na eficiência da CS.

1.3 Justificativa

Para elaborar a justificativa acadêmica deste estudo, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) em dois estágios distintos. No primeiro estágio, buscou-se investigar o interesse acadêmico sobre a aplicação da TOC na CS. No segundo estágio, foram identificadas e analisadas pesquisas publicadas que mediram a eficiência das CSs, a fim de identificar as técnicas utilizadas para mensurar essa eficiência.

A partir das indicações de Morandi e Camargo (2015) definiu-se a estratégia de busca, na qual se determinam os termos de busca (palavras/termos-chave), as bases de dados para consulta e os critérios de inclusão e exclusão para definir os artigos que irão compor o *corpus* de análise. Assim, determinou-se as palavras-chave da primeira RSL como “*Theory of Constraints*” AND “*Supply Chain*”. Em relação às bases de dados, foram consultadas EBSCOHost, Scopus e ProQuest. A quantidade de documentos encontrados nessas bases a partir da *string* de busca determinada pode ser observada na Tabela 1.

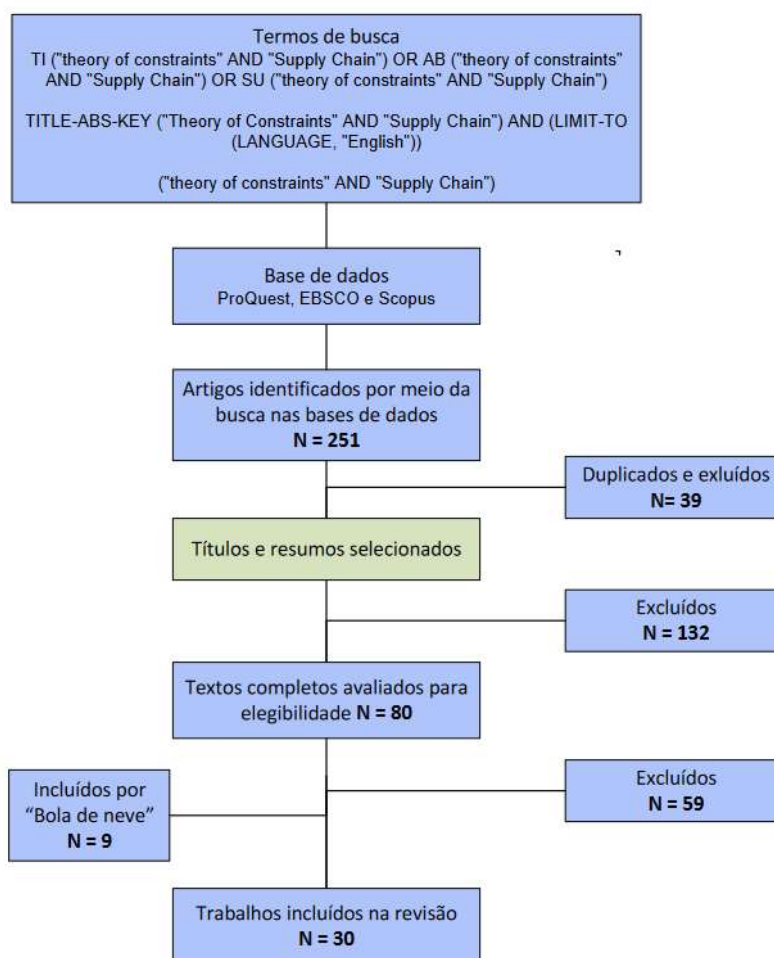
Tabela 1 - Strings da Revisão Sistemática da Literatura 1

Base de Dados	Termos de Busca	Documentos Encontrados	Sem Duplicados
EBSCOHost	TI ("theory of constraints" AND "Supply Chain") OR AB ("theory of constraints" AND "Supply Chain") OR SU ("theory of constraints" AND "Supply Chain")	162	151
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("Theory of Constraints" AND "Supply Chain") AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))	52	45
ProQuest	("theory of constraints" AND "Supply Chain")	57	55

Fonte: Elaborado pela autora.

Após a busca nas bases de dados, elaborou-se o protocolo desta pesquisa que estabeleceu a estrutura utilizada para efetivação da RSL, seguindo o modelo sugerido por Morandi e Camargo (2015), esse protocolo está disponível no Apêndice A. O fluxograma dos resultados da pesquisa nas bases de dados estabelecidas no protocolo de pesquisa, contendo a quantidade de documentos encontrados, a quantidade de documentos excluídos e o total de documentos incluídos na revisão estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma dos resultados da Revisão Sistemática da Literatura 1



Fonte: Elaborado pela autora.

A busca nas bases de dados resultou em 251 artigos, publicados no período de 1996 a 2022. Foram excluídos documentos duplicados, não relevantes, que não apresentassem resultados da aplicação da TOC nas CSs, bem como revisões da literatura, modelos, métodos e *frameworks*. Foram incluídos artigos revisados por especialistas, escritos em inglês e que utilizaram modelagens e estudos de caso como métodos de pesquisa.

Na sequência, foi conduzida a segunda Revisão Sistemática da Literatura, com o intuito de identificar quais os métodos utilizados para medir a eficiência da CS. As palavras-chave utilizadas na segunda busca foram: (i) *Theory of Constraints* AND *Supply Chain* AND *Efficiency*; (ii) *Theory of Constraints* AND *Supply Chain* AND *Data Envelopment Analysis*; (iii) *Theory of Constraints* AND *Supply Chain* AND *DEA*. As bases consultadas foram Web of Science, Scopus e EBSCOHost, conforme apresentado na Tabela 2.

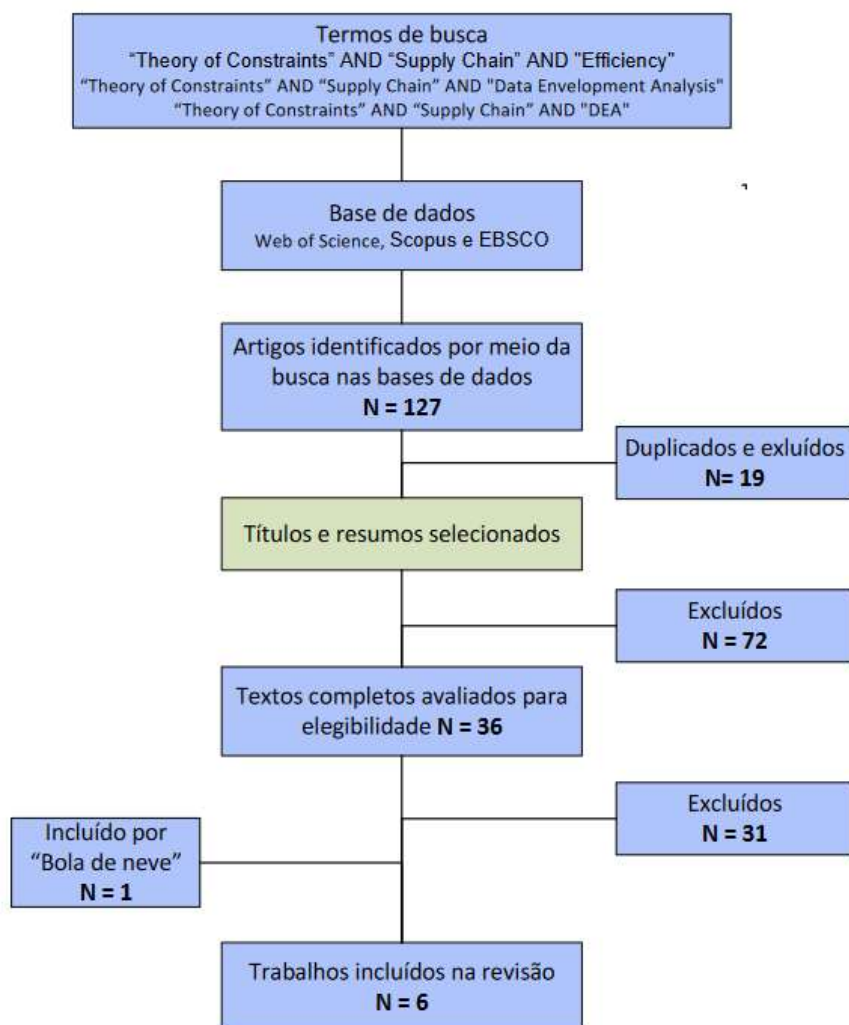
Tabela 2 - Strings da Revisão Sistemática da Literatura 2

Base de Dados	Termos de Busca	Documento Encontrados	Sem Duplicados
Scopus	<i>"Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Efficiency"</i>	45	39
	<i>"Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Data Envelopment Analysis"</i>		
Web of Science	<i>"Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "DEA"</i>	66	57
	<i>Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Efficiency"</i>		
	<i>"Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Data Envelopment Analysis"</i>		
ProQuest	<i>"Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "DEA"</i>	37	31
	<i>"Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Data Envelopment Analysis"</i>		

Fonte: Elaborado pela autora

Após a busca das *strings* acima, elaborou-se o protocolo desta segunda pesquisa que estabeleceu a estrutura utilizada para efetivação da segunda RSL, conforme o modelo sugerido por Morandi e Camardo (2015). Esse protocolo está disponível no Apêndice B. O fluxograma dos resultados da pesquisa nas bases de dados estabelecidas no protocolo de pesquisa, contendo a quantidade de documentos encontrados, documentos excluídos e o total de documentos incluídos na revisão são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma dos resultados da Revisão Sistemática da Literatura 2



Fonte: Elaborado pela autora.

A condução da Revisão Sistemática da Literatura proporcionou uma visão evolutiva do tema, contribuindo para o panorama científico dos estudos existentes e explorando a trajetória do domínio ao longo das últimas décadas. No entanto, apesar do crescente interesse acadêmico e das organizações em encontrar soluções para os desafios enfrentados nas CSs, é evidente a escassez de estudos empíricos que avaliem e descrevam os resultados da aplicação da TOC nessas CSs. Essa lacuna ressalta a necessidade de pesquisas adicionais que contribuam para preencher esse *gap* de conhecimento e proporcionem uma compreensão aprofundada dos benefícios e limitações da aplicação da TOC nas CSs.

Dos 30 estudos analisados na Revisão Sistemática da Literatura em doze foram desenvolvidos proposição de modelo de simulação, sendo: Chang, Chuang e Li

(2007), Chang, Chang e Huang (2014), Costas et al. (2015), Gupta e Andersen (2018, 2012), Jiang et al. (2013), Lee et al. (2006), Leng e Chen (2012), Parsaei, Nahavandi e Elmekawy (2012), Pawlewski et al. (2009), Tabrizi et al. (2012) e Wu, Huang e Jenc (2012). Em cinco trabalhos, foram desenvolvidos conjuntamente estudos de caso e proposição de modelo de simulação, sendo esses: (FAGUNDES et al., 2010; HUNG et al., 2010; MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; WATSON; POLITO, 2003; WU et al., 2013). Em cinco trabalhos foram conduzidos estudos de caso: (CHANG; CHANG; SUN, 2015; JASINAVIČIUS; JASINAVIČIUS, 2011; KORTABARRIA et al., 2018; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; WU; LEE; TSAI, 2014). Por fim, apenas dois trabalhos conduziram um método de implantação: Filho et al. (2016) e Tsou (2013b). Todos os autores considerados concordam que a aplicação dos princípios da TOC indicados para a CS, mesmo que não tenham sido aplicados os cinco conjuntamente, traz benefícios.

Embora as pesquisas comprovem os resultados positivos da aplicação da Teoria das Restrições para a melhoria do desempenho das organizações, ainda existem obstáculos para sua aceitação pela comunidade de gestão de operações como teoria científica (NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013; PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021). Embora haja interesse tanto da academia como das organizações em encontrar metodologias capazes de solucionar os problemas enfrentados pela CS, e a literatura assegure os benefícios que a aplicação dos conceitos da TOC traz para a melhoria de desempenho dessa área, as mesmas dificuldades são enfrentadas na aplicação da TOC na Cadeia de Suprimentos (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021). A maioria dos estudos sobre a aplicação da TOC na CS são baseados em modelagem e simulação de casos hipotéticos, conforme a RSL realizada neste estudo e isto não lastreia os seus resultados na realidade. Sendo assim, existe uma escassez de estudos empíricos que avaliem e descrevam os resultados desta aplicação, comprometendo a generalização (PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021).

Este estudo objetiva fornecer contribuições para os formuladores de estratégias ao analisar o comportamento da eficiência da CS após a implementação dos princípios da TOC em cenários simulados. Baseando-se em um estudo anterior conduzido por Stefano (2020), no qual a Dinâmica de Sistemas foi utilizada para simular diferentes cenários de implementação da TOC nas CS. Destaca-se que essas simulações foram fundamentadas em dados reais de uma CS em suas condições

reais, o que diferencia esta pesquisa da maioria dos estudos existentes na literatura. A utilização de modelos de simulação na CS oferece vantagens significativas, como a representação precisa de atividades complexas, facilitando a tomada de decisões relacionadas aos níveis de estoque, remessa e fornecimento (VIEIRA et al., 2020). Além disso, a simulação de cenários permite testar economicamente o impacto de estratégias específicas na CS, proporcionando *insights* valiosos para aprimorar as operações e otimizar os resultados. Assim, este estudo apresenta uma abordagem promissora para avaliar o desempenho e a eficácia das estratégias baseadas nos princípios da TOC nas CSs e contribuir para o avanço do conhecimento nessa área.

Desse modo, espera-se auxiliar a empresa na tomada de decisões estratégicas embasadas, considerando os desafios específicos que enfrenta, como longos prazos de entrega, atrasos no reabastecimento, perda de vendas e uma forte concorrência. Por meio desta pesquisa, a empresa poderá obter uma compreensão aprofundada de como a aplicação dos princípios da TOC pode otimizar a CS, além de analisar a viabilidade dessa implementação para superação dos obstáculos existentes.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos que abordam a aplicação dos princípios da TOC na CS. No primeiro capítulo, o estudo é introduzido, contextualizando o tema da pesquisa e discutindo aspectos relacionados à aplicação desses princípios, com o objetivo de embasar a questão de pesquisa. Além disso, são apresentados o objeto de estudo, o problema de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos. Por fim, são apresentados os argumentos que justificam a relevância deste estudo para a comunidade acadêmica e empresarial.

No segundo capítulo, é apresentado o referencial teórico em duas fases distintas. A primeira fase aborda a aplicação dos princípios da TOC na CS, detalhando como esses princípios são utilizados nesse contexto específico. Na segunda fase, são discutidos os efeitos da aplicação desses princípios na eficiência da CS, explorando as melhorias e benefícios que podem ser alcançados.

No terceiro capítulo, é explanada a metodologia adotada para a realização da pesquisa. Essa metodologia é descrita em detalhes e compreende diversas etapas, incluindo o delineamento da pesquisa, o método de trabalho empregado e a elaboração do modelo DEA. Além disso, são explicados os procedimentos de coleta

e refinamento dos dados, a verificação da significância estatística e a análise dos dados.

No capítulo quatro, são realizadas análises detalhadas das eficiências obtidas. Primeiramente, são apresentados os resultados das eficiências em cada cenário, incluindo o cenário base e os outros seis cenários simulados com a intervenção dos princípios da TOC na CS. Além disso, são apresentados as médias e os desvios padrão das eficiências em cada cenário, a fim de identificar possíveis padrões ou variações significativas. Em seguida, é realizada uma avaliação estatística da significância das eficiências encontradas em cada cenário simulado, utilizando o teste de *Wilcoxon*. Esse teste permite testar as hipóteses formuladas nesta pesquisa, comparando a média das eficiências do cenário base (antes da intervenção) com a média das eficiências nos cenários simulados (após a intervenção).

No capítulo cinco, é realizada uma discussão dos resultados obtidos, evidenciando as contribuições teóricas e práticas desta pesquisa. São explorados aspectos relevantes relacionados à aplicação dos princípios da TOC na CS e os impactos observados na eficiência do sistema. Além disso, é realizada uma análise da amplitude e do alcance dos resultados obtidos, considerando possíveis limitações e oportunidades para futuras melhorias.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo, utilizando como base os resultados e as discussões realizadas ao longo da pesquisa. São sintetizadas as principais descobertas, destacando-se a relevância e as contribuições significativas fornecidas pela presente pesquisa. Adicionalmente, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, com o objetivo de expandir o conhecimento científico na área e aprimorar a aplicação dos princípios da TOC na CS.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Teoria das Restrições

Criada pelo israelense Eliyahu M. Goldratt no início da década de 80, a TOC promove a identificação de possíveis restrições do sistema, minimiza riscos e melhora o desempenho geral das organizações (BLACKSTONE, 2001; BOYD; GUPTA, 2004; GUPTA, 2003; ORUE et al., 2021; PUCHE et al., 2019). A TOC postula que o objetivo das organizações (com fins lucrativos): é ganhar dinheiro agora e no futuro (GOLDRATT; COX, 2002; BLACKSTONE, 2001; GUPTA; ANDERSEN, 2012; PUCHE et al., 2019; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004). Esse objetivo é alcançado com o aumento do ganho, reduzindo o estoque e as despesas operacionais (GUPTA; BOYD, 2008). Para tanto, utiliza quatro premissas básicas: (i) toda empresa tem uma meta que deve ser atingida; (ii) uma organização é mais do que a soma das suas partes; (iii) o desempenho de uma empresa é restringido por poucas variáveis; e (iv) as organizações de base humana podem ser complexas e estão sujeitas a relações de efeito-causa-efeito (PTAK; SCHRAGENHEIM, 2004).

O conceito mais importante da TOC é que a maioria das limitações que dificultam o alcance dos objetivos de uma organização são de natureza interna. Essas limitações podem ser de natureza física, mental ou organizacional. Uma organização deve identificar suas restrições e, em seguida, trabalhar para aumentar a capacidade dessas áreas (BLACKSTONE, 2001). A Teoria das Restrições também enfatiza a importância de uma abordagem sistêmica para a gestão. Isso significa que as organizações devem considerar todos os elementos de seus negócios (por exemplo, *marketing*, finanças e operações) ao identificar e tratar as restrições (BLACKSTONE, 2001).

A TOC engloba três dimensões interrelacionadas: pensamento lógico, logística e medição de desempenho (CUI; LENG; WENDY, 2008; MEHRA; INMAN; TUIITE, 2005). O raciocínio lógico é obtido com a utilização de cinco passos encíclicos: (i) identificar as restrições do sistema; (ii) decidir como explorar as restrições do sistema; (iii) subordinar todo o restante à decisão anterior; (iv) elevar a restrição do sistema e se a restrição deixar de existir em algum dos passos anteriores; (v) voltar ao primeiro passo (COSTAS et al., 2015; GUPTA, 2003; PONTE et al., 2016). As questões logísticas podem ser resolvidas com a aplicação do Tambor, Pulmão e Corda (TPC),

uma metodologia de planejamento. Além disso, a Gestão do Pulmão (GP) pode ser utilizada como uma metodologia de controle de execução (GUPTA, 2003; WATSON; POLITO, 2003). A medição de desempenho verifica o alcance do objetivo da TOC e destaca os fenômenos de ótimo local *versus* ótimo global (MEHRA; INMAN; TUIITE, 2005).

2.2 TOC na Cadeia de Suprimentos

Mesmo que o propósito do gerenciamento da CS seja atingir uma solução de lucro otimizado para todos os participantes, em geral, há uma significativa disparidade entre os benefícios potenciais e a prática (SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004). Um dos principais problemas observados é que, na maioria das vezes, os parceiros avaliam apenas as suas restrições locais (problemas próprios), enquanto deveriam considerar as restrições globais da Cadeia de Suprimentos (FAGUNDES et al., 2010; PONTE et al., 2016). É preciso considerar ainda o conflito que se estabelece em relação a manter baixos níveis de estoques nos canais de distribuição e perder vendas ou manter altos níveis de estoques e aumentar os custos (CHANG; CHUANG; LI, 2007b). Para resolver esse dilema e maximizar o lucro, é recomendado manter os estoques certos nos locais certos (CHANG; CHUANG; LI, 2007b; MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017).

Nessa lógica, faz-se necessário um método eficaz para projetar a CS, a fim de melhorar sua capacidade de resposta e manter o menor nível de estoque possível ao mesmo tempo que mantém a disponibilidade adequada de produtos nos pontos de venda (CHANG; CHANG; HUANG, 2014; DAVIM, 2015; WU; HUANG; JENC, 2012). Alicerçado na TOC, o reabastecimento sincronizado ativamente (do inglês, - *Actively Synchronized Replenishment* - ASR) é um método concebido para associar diretamente a disponibilidade de produtos acabados e o suprimento de materiais adequado ao sistema produtivo. Diferencia-se das técnicas de previsão tradicionais por reduzir e até mesmo eliminar a variabilidade e instabilidade (SMITH; PTAK, 2010). O ASR é composto pelos cinco elementos apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Elementos do AS

Elementos do ASR		Descrição
1.	Posicionamento estratégico de estoque	Posicionar de maneira estratégica o estoque assegura a possibilidade da empresa absorver a variabilidade prevista sem abalar todas as partes da fábrica e da CS.
2.	Definição de perfil e manutenção de Pulmão Dinâmico	Após a definição das posições estratégicas de estoque, é necessário definir os níveis reais desses pulmões. Os perfis de pulmão consideram fatores relevantes, como tempo de atravessamento, variabilidade de demanda, oferta e se o produto é manufaturado ou comprado.
3.	Pulmões Dinâmicos	Com o tempo, as características do grupo e individuais podem ser alteradas devido a mudança de fornecedores e do mercado. Os níveis dos Pulmões Dinâmicos permitem que a empresa adapte os pulmões às mudanças. Os pulmões de adaptam ao ambiente conforme a variabilidade que encontram.
4.	Geração de demanda baseada no sistema puxado	Quando o ambiente é moldado apropriadamente o processo de gerar, coordenar e priorizar todas as indicações de material é facilitado. A situação do estoque é avaliada com relação a possíveis impactos negativos e programados para emitir alertas contra pedidos de suprimento pendentes e alocações de demanda, o que inclui futuras ordens de venda que planejadores conseguem identificar a procedência real dos sinais e reagir antes que ocorram atribuições.
5.	Execução Altamente Visível e Colaborativa	A prioridade conforme a data de entrega não apresenta as prioridades diárias reais de estoque e materiais. Estas prioridades não são estáticas, elas mudam de acordo com a variabilidade e instabilidade que ocorrem durante o tempo de vida ativo das Ordens de Compra (OCs) e dos Pedidos de Fabricação (PFs) - o intervalo de tempo entre sua abertura e fechamento. Os clientes alteram seus pedidos, desafios de qualidade surgem, obstáculos relacionados ao clima e aos hábitos podem se apresentar, e a capacidade e confiabilidade dos fornecedores podem variar. Quanto maior o horizonte de execução, mais instáveis serão as mudanças na priorização e maior a suscetibilidade das empresas a problemas adversos de sincronização de materiais.






Fonte: Elaborado pela autora com base em Smith e Ptak (2010).

Disponer o estoque em qualquer lugar implica em desperdício de recursos da empresa, no entanto, eliminar totalmente os estoques coloca a empresa e a CS em uma situação de vulnerabilidade (AWASTHI; GRZYBOWSKA, 2014; CHANG; CHUANG; LI, 2007b). Conforme Smith e Ptak (2010) posicionar estrategicamente o estoque garante a empresa absorver a variabilidade prevista sem abalar globalmente a fábrica e a CS. Smith e Ptak (2010) ressaltam que para determinar o local em que os pulmões de estoque devem ser alocados, os seguintes fatores precisam ser

considerados: (i) tempo de tolerância do cliente; (ii) taxa de variabilidade da demanda; (iii) taxa de variabilidade da oferta; (iv) flexibilidade do estoque e estrutura do produto; e (v) proteção das principais áreas operacionais.

Após a especificação dos locais em que devem ser posicionados os estoques, os perfis e modos de manutenção dos Pulmões Dinâmicos devem ser definidos. O ASR agrupa peças e materiais que compõem os pulmões estrategicamente posicionados conforme suas características, tais como tempo de atravessamento, variabilidade e se o produto é manufaturado ou comprado. O ASR decompõe o pulmão em cinco partes iguais, estabelecendo níveis de consumo. Cada nível de consumo recebe uma cor, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Níveis de consumo e cores dos pulmões

Cor	Definição
 Azul Claro ou branca	Indica o excesso de estoque
 Verde	Representa que o estoque não requer nenhuma providência
 Amarelo	Indica a necessidade de reabastecimento
 Vermelho	Sinaliza o risco de falta de estoque
 Vermelho escuro ou preto	Aponta a falta de estoque

Fonte: Elaborado pela autora com base em Smith e Ptak (2010).

Outro fator valoroso desta categorização é possibilidade de identificação rápida e fácil da correção do tamanho do pulmão, evidenciado pela permanência do estoque disponível na metade inferior amarela (SMITH;PTAK, 2010; HUNG et al., 2010). Associado aos dois primeiros componentes, o ASR recomenda o ajuste dinâmico dos pulmões, que juntos eliminam as consequências da variação decorrente do efeito chicote e da instabilidade do sistema. A Gestão do Pulmão Dinâmico se caracteriza por adequar o tamanho dos pulmões às mudanças ocorridas em um horizonte de tempo, como entrada de novos fornecedores, abertura de novos mercados, dentre outras (BASHIRI; TABRIZI, 2010). Esses ajustes se configuram como elementos essenciais para solucionar o conflito entre previsibilidade e agilidade, e podem ser feitos de modo programado, com base em fatores como capacidade, histórico e inteligência empresarial (SMITH; PTAK, 2010).

Se o ambiente estiver modelado adequadamente, os processos de gerar, coordenar e priorizar as indicações de materiais são facilitados. Para avaliar os níveis de estoque em relação a futuros impactos negativos e geração de demanda baseada no sistema puxado, o ASR utiliza os seguintes componentes: (i) demanda dirigida; (ii) expansão dissociada; (iii) sincronização de materiais; (iv) tempo de atravessamento do ASR; (v) prioridade altamente visível; (vi) proteção contra aumentos repentinos de pedidos qualificados; e (vii) proteção contra aumentos repentinos de pedidos qualificados (SMITH; PTAK, 2010; MICLO et al., 2016).

Apesar da sustentação entregue pela TOC para solucionar os principais problemas enfrentados na gestão da cadeia de abastecimento, ainda existe uma lacuna significativa sobre como os elementos da TOC impactam sobre as dimensões competitivas da estratégia de operações, tais como velocidade, entrega no prazo, alta flexibilidade, baixo custo e alta qualidade (COSTAS et al., 2015). É uma prioridade para os gerentes encontrar meios de medir e monitorar o desempenho, a fim de direcionar as ações aos objetivos da organização (GUPTA; ANDERSEN, 2012; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004). O IDD é definido como todo o investimento que a empresa faz que poderá resultar em ganho (RICKETTS, 2010). É calculado com base no preço da matéria-prima de um item e pela quantidade de tempo que um pedido está no estoque, sendo um indicador que promove a redução do inventário (GUPTA; ANDERSEN, 2018). O GDD é conceituado como o índice de geração de dinheiro do sistema, é uma métrica utilizada para avaliar os ganhos adicionais que a empresa consegue obter a cada dia através de suas atividades (GOLDRATT, 1991). É calculado com base no preço de venda final de um item e o número de dias que um pedido não atendido está em atraso, esse indicador reprime os atrasos nas entregas ou trocas na sequência do plano (GUPTA; ANDERSEN, 2018).

Com isso, conclui-se que o GDD é utilizado para medir a eficácia de um elo da CS no cumprimento dos requisitos do cliente, por exemplo, a confiabilidade da entrega do produto, por calcular a penalidade por atraso nas entregas. Enquanto o IDD mede a eficiência de um membro do CS em termos utilização de recursos, por exemplo, a penalidade por possuir estoques demasiados (GUPTA; ANDERSEN, 2018).

2.2.1 Estudos empíricos sobre a aplicação da TOC na Cadeia de Suprimentos

Considerando que a CS lida com problemas estratégicos e operacionais, englobando as interações entre fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes, a integração e sincronização dos fluxos de informações e materiais, é necessário conduzir estudos que avaliem o contexto da CS (LENG; WANG, 2012b). Simatupang, Wright e Sridharan (2004) apresentaram que a colaboração entre empresas independentes gera benefícios maiores aos participantes do que a promoção de ações que atendam os interesses particulares de cada empresa, conforme preconiza a TOC. Leng e Wang (2012) após investigarem o mecanismo de coordenação em uma cadeia de abastecimento com o propósito de minimizar os efeitos da variação de informação no sistema que provoca o efeito chicote, propuseram um modelo de alocação de estoque baseado na TOC para a CS de um fornecedor e vários varejistas.

Nos últimos anos, as técnicas de simulação são frequentemente utilizada para solucionar os problemas da TOC-SCRS (do inglês, *The Theory of Constraints-supply chain replenishment system*), autores como Davim (2015), Jiang et al. (2013), Margaretha, Budiastuti e Sahroni (2017), Wu et al. (2013), Wu, Huang e Jenc (2012), Wu, Lee e Tsai (2014) são representantes do grupo que pesquisou sobre o assunto e propôs modelos de simulação. Davim (2015) apresentou um modelo para controlar o efeito chicote, avaliando o gerenciamento dinâmico dos pulmões proposto pela TOC e as tendências de pedidos e estoque em diferentes períodos. Jiang et al. (2013) apresentaram uma nova abordagem para solucionar o problema entre quantidade de produção e frequência de reposição. Margaretha, Budiastuti e Sahroni (2017) conduziram um estudo de caso na CS de uma empresa de bens de consumo rápido e identificaram que o problema estava baseado na previsão de demanda e na disponibilidade de matéria-prima dos fornecedores. Wu et al. (2010) desenvolveram um modelo para o reabastecimento. Wu et al. (2013) propuseram outro modelo aplicado no caso de uma CS virtual, considerando três fatores: flutuação de demanda, tempo de reabastecimento e frequência de reposição. Wu, Lee e Tsai (2014) propuseram um modelo de frequência de reposição para uma cadeia de dois níveis de produtos com grande variação no volume de vendas.

Nessa conjuntura, a literatura destaca a necessidade de avançar no entendimento dos efeitos da aplicação das ações da TOC na CS. Considerando que não foram localizados na literatura estudos que aplicam todos os elementos do ASR

juntos, mas que nos estudos analisados foi possível identificar resultados positivos dos elementos que a TOC sugere para aplicação na CS. O Quadro 5 apresenta os estudos avaliados sobre a aplicação da TOC na CS.

Quadro 5 - Corpus de análise da RSL

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
D1	<i>Integrate market demand forecast and demand-pull replenishment to improve the inventory management effectiveness of wafer fabrication</i>	Chang, Chang e Huang (2014)	Gestão da CS componentes eletrônicos	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade na gestão do reabastecimento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Redução da falta de estoque.
D2	<i>On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic inventory target level management: A theory of constraint perspective</i>	Tsou (2013)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques excessivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos; • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de método para melhor ajuste de estoque.
D3	<i>Revisiting local TOC measures in an internal supply chain: a note</i>	Gupta e Andersen (2012)	CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do desempenho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tambor-Pulmão-Corda (do inglês, <i>Drum-Buffer-Rope - DBR</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do lucro A TOC promove melhoria contínua.
D4	<i>Revolutionizing supply chain management the theory of constraints way: a case study</i>	Modi, Lowalekar e Bhatta (2019)	CS	Estudo de caso	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques excessivos; • Dificuldade na gestão do reabastecimento; • Efeito chicote. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do lucro; • Redução de vendas; • Redução da falta de estoque; • Redução de estoques; • Aumento de capacidade;

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
						DBR Tambor-Pulmão-Corda	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos prazos de entrega.
D5	<i>Strengthening enterprise competitiveness by synchronizing supply chain</i>	Jasnavičius e Jasnavičius (2011)	CS Textil	Estudo de caso	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade na gestão do reabastecimento; • Necessidade de melhorar a satisfação dos clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do lucro; • Redução da falta de estoque; • Aumento de capacidade; • Redução dos prazos de entrega.
D6	<i>Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration</i>	Gupta e Andersen (2018)	CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques excessivos; • Geração de gargalos devido alteração no mix de produtos; • Necessidade de melhorar a interação entre os elos da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Execução altamente visível e colaborativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do lucro; • Redução de estoques; • Redução dos prazos de entrega.
D7	<i>A genetic algorithm approach for TOC-based supply chain coordination</i>	Leng e Chen (2012)	CS tradicional de um único produto	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito chicote. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Aumento de capacidade.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
D8	<i>Application of Theory of Constraint supply chain replenishment system in fast moving consumer goods company</i>	Margaretha, Budiastuti e Sahroni (2017)	CS de bens de consumo rápido	Estudo de caso e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de venda por falta de produto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D9	<i>A simulation study on bullwhip effect in supply chain based on Theory of Constraint</i>	Azadnia, Ghorbani e Arabzad (2015)	CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Política de pedidos; • Efeito chicote. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D10	<i>Applying Goldratt's Theory of Constraints to reduce the bullwhip effect through agent-based modeling</i>	Costas et al. (2015)	CS tradicional de um único produto	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito chicote; • Necessidade de melhorar a satisfação do cliente; • Necessidade de melhorar a eficiência da CS Restrição de capacidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos; • Geração de demanda baseada no sistema puxado DBR Tambor-Pulmão-Corda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D11	<i>Buffer size determination for drum-buffer-robe controlled supply chain networks</i>	Parsaei, Nahavandi e Elmekkawy (2012)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a eficiência; • Determinar o tamanho do pulmão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D12	<i>Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution environment</i>	Watson e Polito (2003)	CS de distribuição multiproduto em múltiplos escalões	Estudo de caso e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques Excessivos; • Necessidade de melhorar a satisfação do cliente; 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
					<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar a eficiência. 		
D13	<i>Coordinating manufacturer and retailer using a novel robust discount scheme</i>	Tabrizi et al. (2012)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a eficiência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D14	<i>Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis</i>	Ponte et al. (2016)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a eficiência da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • DBR Tambor-Pulmão-Corda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do lucro; • Redução da falta de estoque.
D15	<i>A real application of the Theory of Constraints to supply chain management in Brazil</i>	Fagundes et al. (2010)	Gestão da CS	Estudo de caso e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a eficiência da CS; • Efeito chicote. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento do lucro; • Redução de estoques; • Redução efeito chicote.
D16	<i>Diverse replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems with capacity constraints</i>	Jiang et al. (2013)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques Excessivos; • Necessidade de melhorar a eficiência da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
D17	<i>A study of Theory of Constraints supply chain replenishment system</i>	Wu et al. (2013)	Gestão da CS	Estudo de caso e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques Excessivos; • Necessidade de melhorar a satisfação do cliente; • Necessidade de melhorar a eficiência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos; • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D18	<i>A study of the elongated replenishment frequency of TOC supply chain replenishment systems in plants</i>	Wu, Huang e Jenc (2012)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de venda por falta de produto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos; • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D19	<i>Applying TOC replenishment method to improve production performance for TFT-LCD Industry</i>	Chang, Chuang e Li (2007)	Gestão da CS componentes eletrônicos	Estudo de caso	<ul style="list-style-type: none"> • Restrição de capacidade no armazém central; • Variabilidade da demanda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de estoques; • Maior satisfação dos clientes.
D20	<i>Multiagent approach for supply chain integration by distributed production planning, scheduling, and control system</i>	Pawlewski et al. (2009)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a eficiência; • Necessidade de melhorar a interação entre os elos da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Definição de método para melhor ajuste de estoque; • Maior satisfação dos clientes.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
D21	<i>A study of supply chain replenishment system of theory of constraints for thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) plants</i>	Hornng Huei et al. (2011)	Gestão da CS componentes eletrônicos	Estudo de caso	<ul style="list-style-type: none"> • Variabilidade da demanda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Melhora a previsão de demanda.
D22	<i>A two-level replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint</i>	Wu, Lee e Tsai (2014)	Gestão da CS	Estudo de caso	<ul style="list-style-type: none"> • Frequência de reabastecimento; • Restrição de capacidade; • Variabilidade da demanda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Aumento de capacidade; • Aumento do lucro.
D23	<i>Decision support system for inventory management by TOC demand-pull approach</i>	Hung et al. (2010)	Gestão da CS	Estudo de caso e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade na gestão de reabastecimento; • Definição do tamanho do pulmão; • Definição da frequência de reposição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico; • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos; • Geração de demanda baseada no sistema puxado 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Redução de estoques; • Maior satisfação dos clientes.
D24	<i>Optimization of setup frequency for TOC supply chain replenishment system with capacity constraints</i>	Jiang e Wu (2013)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques excessivos; • Necessidade de melhorar a eficiência da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gerenciamento dos Pulmões Dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.
D25	<i>Supply chain model for the semiconductor industry in consideration of</i>	Lee et al. (2006)	Gestão da CS	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques excessivos; • Necessidade de melhorar a eficiência da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
	<i>manufacturing characteristics</i>						
D26	<i>Demand-pull replenishment model for hospital inventory management: a dynamic buffer-adjustment approach</i>	Wang et al. (2015)	Gestão da CS hospitalar	Modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques excessivos; • Falta de estoque; • Necessidade de melhorar a eficiência da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico; • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Redução da falta de estoque; • Redução de estoques.
D27	<i>Material management without forecasting: from MRP to demand driven MRP</i>	Kortabarria et al. (2018)	Gestão da CS metalúrgica a nível mundial	Estudo de caso, entrevista e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a eficiência e integração entre os elos da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento estratégico de estoque; • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico; • Geração de demanda baseada no sistema puxado; • Execução altamente visível e colaborativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto; • Redução da falta de estoque; • Redução de estoques; • Maior satisfação dos clientes; • Aumento da frequência de reabastecimento.
D28	<i>Enhancement of inventory management for the wafer manufacturing industry by combining market demand forecast and demand-pull replenishment</i>	Chang, Chang e Sun (2015)	Gestão da CS componentes eletrônicos	Estudo de caso e modelagem	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a previsão de demanda; • Frequência de reabastecimento; • Necessidade de melhorar a eficiência da CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico; • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de estoques; • Maior satisfação dos clientes.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Método de pesquisa	Antecedentes	Princípios da TOC utilizados	Resultados
D29	<i>A new approach for decision making in distribution supply chains: a theory of constraints perspective</i>	Filho et al.(2016)	Gestão da CS indústria automotiva	Estudo de caso e <i>Design Science Research</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de melhorar a gestão da CS utilizando um método para a implantação dos princípios da TOC na CS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de demanda baseada no sistema puxado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proposição de método com etapas lógicas para implantação prática em empresas recomenda os princípios da TOC para CS para melhorar o desempenho das empresas.
D30	<i>An enhanced model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint</i>	Wu e Tsai (2008)	Gestão da CS	<i>Design Science Research</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Restrição de capacidade no armazém central; • Tempo de reposição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição de perfil e manutenção do Pulmão Dinâmico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulação proposto.

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme o protocolo elaborado para Revisão Sistemática da Literatura desta pesquisa, as principais dificuldades enfrentadas pelas CS que os estudos buscaram solucionar tratavam-se de: (i) melhorar a eficiência da CS, a interação entre os elos da CS, a política de pedidos, a previsão de demanda, a gestão do reabastecimento e a satisfação dos clientes (CHANG; CHANG; HUANG, 2014; GUPTA; ANDERSEN, 2018b, 2012b; JASINAVIČIUS; JASINAVIČIUS, 2011); (ii) minimizar os estoques excessivos, o efeito chicote, a ocorrência da falta de estoque e a perda de venda por falta de produto (MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; TSOU, 2013a; WANG et al., 2015); (iii) determinar o tamanho do pulmão e o tempo de reposição (JIANG et al., 2013; KORTABARRIA et al., 2018; TABRIZI et al., 2012; WATSON; POLITO, 2003; WU; HUANG; JENC, 2012; WU; TSAI, 2008b); (iv) lidar com a restrição de capacidade no armazém central e a variabilidade da demanda (MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; WU et al., 2013). Os princípios da TOC indicados para a CS foram aplicados nos estudos examinados, entretanto, apenas o estudo de Kortabarria et al. (2018) aplicou conjuntamente os cinco princípios.

Como resultado das pesquisas analisadas a maioria propôs um modelo de simulação, uma dessas definiu um método para melhor ajuste de estoque e outra propôs um método com etapas lógicas para implantação prática em empresas (FILHO et al., 2016). Mas, todos os autores considerados nesta Revisão Sistemática da Literatura concordaram que a aplicação dos princípios da TOC indicados para a CS, mesmo aplicados separadamente, trazem benefícios. Os principais benefícios identificados foram: (i) melhora o desempenho, previsão de demanda e satisfação dos clientes (CHANG; CHUANG; LI, 2007b; HUNG et al., 2010; KORTABARRIA et al., 2018; PAWLEWSKI et al., 2009); (ii) aumenta o lucro, capacidade e a frequência de reabastecimento (FAGUNDES et al., 2010; GUPTA; ANDERSEN, 2012b; LENG; WANG, 2012a; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; WU; LEE; TSAI, 2014); (iii) reduz o estoque, a falta de estoque, os prazos de entrega e o efeito chicote (CHANG; CHANG; HUANG, 2014; FAGUNDES et al., 2010; HUNG et al., 2010; KORTABARRIA et al., 2018; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; PONTE et al., 2016); (iv) promove melhoria contínua (GUPTA; ANDERSEN, 2012b).

Com base na análise da literatura, é evidente que o contexto que frequentemente demanda a aplicação dos princípios da TOC na Cadeia de

Suprimentos é a própria CS como um todo. No entanto, alguns estudos concentram-se exclusivamente na gestão da CS ou apenas no elo de fornecedores da CS. O método mais utilizado nos estudos examinados para desenvolver as técnicas da TOC na CS é a modelagem utilizando a técnica de simulação, isso ocorre devido aos altos valores que envolvem realizar testes de técnicas e metodologias em uma CS real. Desse modo, a simulação torna-se atrativa para entender os possíveis benefícios que estas ações podem acarretar sem envolver elevados riscos (AZADNIA; GHORBANI; ARABZAD, 2015; KORTABARRIA et al., 2018; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; PARSAEI; NAHAVANDI; ELMEKKAWY, 2012). A escassez de estudos práticos reais sobre a adesão da TOC na CS evidencia o quanto esse assunto ainda pode ser explorado no meio acadêmico (MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013).

Em relação aos indicadores, os mais frequentes para avaliação da eficiência da adesão da TOC na CS são o IDD e o GDD. Neste sentido, ambos são utilizados conjuntamente visto que o GDD é utilizado para medir a eficácia de um elo da CS, enquanto o IDD mede a eficiência de um membro da CS em termos de utilização de recursos, como, por exemplo, possuir estoques demasiados (GUPTA; ANDERSEN, 2012b). Sendo assim, GDD é o indicador que avalia se os requisitos do cliente estão sendo atendidos (eficácia), e o IDD é uma medida de o quão eficiente a organização está em termos de equilíbrio de estoques (GUPTA; ANDERSEN, 2012).

2.2.2 Estudos empíricos que avaliam a eficiência da utilização da TOC na Cadeia de Suprimentos

A utilização de medidas de desempenho é necessária para garantir a gestão adequada das CSs. Apesar de tal necessidade ser reconhecida na literatura, há escassez de estudos que avaliem a eficiência na CS (AINAPUR; SINGH; VITTAL, 2011b; AZADEH; ALEM, 2010; STEFANO et al., 2021; GUPTA; ANDERSEN, 2018; GUPTA; BOYD, 2008; HILMOLA, 2020; LIN; LI, 2010; PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021). Nesse sentido, estudos empíricos que avaliem a gestão da eficiência na CS são fundamentais para embasar as decisões dos gestores ao monitorarem o desempenho da CS, visto

que a gestão adequada da CS é um fator determinante na construção da vantagem competitiva sustentável das empresas (GUPTA; ANDERSEN, 2012; SIMATUPANG; WRIGHT; SRIDHARAN, 2004).

Sendo assim, desenvolver pesquisas que busquem medir a eficiência das CSs é necessário, considerando os problemas inerentes a gestão da CS (AINAPUR; SINGH; VITTAL, 2011b; AZADEH; ALEM, 2010; STEFANO et al., 2021; GUPTA; ANDERSEN, 2018; GUPTA; BOYD, 2008; HILMOLA, 2020; LIN; LI, 2010; PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021). As principais adversidades que as CSs enfrentam atualmente são: melhorar a eficiência aumentando simultaneamente o lucro líquido, o retorno sobre o investimento e o fluxo de caixa. Assim, a taxa de transferência deve ser explorada adequadamente ao longo do sistema (PUCHE et al., 2016).

No Quadro 6, é apresentado um resumo desses estudos, incluindo o título, autores, ano de publicação, objetivo do estudo, metodologia utilizada, técnicas e ferramentas de simulação, bem como os resultados obtidos. Esse levantamento proporciona uma visão abrangente e atualizada das abordagens adotadas no campo da avaliação de eficiência das CSs.

Quadro 6 - Síntese dos estudos

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Objetivo	Método de pesquisa	Ferramenta de simulação	Resultados
D1	<i>A flexible deterministic, stochastic, and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: Simulation analysis</i>	Azadeh e Alem (2010)	Medição de eficiência de fornecedores	Apresentar uma abordagem flexível para o problema de seleção de fornecedores	O estudo de caso envolve um conjunto de 10 fornecedores e modelagem	Análise de Envoltória de Dados (DEA), Análise de Envoltória de Dados Fuzzy (FDEA) e <i>Chancem</i> Análise de envelope de dados de restrição (CCDEA)	Proposição de um método de análise que permite que os tomadores de decisão realizem análises entre os fatores de entrada que são custos esperados, qualidade dos níveis de aceitação e entrega no prazo.
D2	<i>Strategic Study on Enhancement of Supply Chain Performance</i>	Ainapur, Singh e Vittal (2011)	Medição de desempenho da CS na indústria da fundição na Índia	Desenvolver uma metodologia que ajude na melhoria do desempenho da CS em fundições de ferro e aço indianas	Estudo de caso em 56 fundições indianas e modelagem	O modelo SCC <i>Supply Chain Operations Reference (SCOR)</i> é usado para seleção de <i>KPI</i> , <i>AHP</i> é utilizado para <i>decomposição da meta</i> , equações GP são formuladas para encontrar os níveis ótimos de desempenho e a	A primeira descoberta da pesquisa é que o desempenho da CS será efetivamente aprimorado pela identificação e eliminação do <i>KPI</i> de restrição do sistema de medição. Concluiu-se que as fundições estão operando com 68% das capacidades instaladas, perdendo os outros 32% na coordenação entre os

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Objetivo	Método de pesquisa	Ferramenta de simulação	Resultados
						ferramenta TOC é usada para identificação de restrições.	parceiros da CS externos ou internos à organização.
D3	<i>Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration</i>	Gupta e Andersen (2018)	CS da indústria de semicondutores	Apresentar como os indicadores IDD e GDD podem ser calculados e, quando compartilhados, como estes indicadores garantem coordenação e cooperação entre os membros da CS	Estudo de caso ilustrativo e modelagem	Modelo de simulação de rede ADF SC usando uma combinação de <i>Visual Basic</i> para aplicativos (VBA) e Excel.	Introdução de métricas baseadas em TOC para a medição do desempenho da CS IDD e GDD, sem a necessidade de compartilhar informações financeiras confidenciais. Além disso, foi proposto um modelo de simulação que permite o registro de eventos durante a execução e define parâmetros de entrada utilizando distribuições estatísticas.
D4	<i>Role of inventory and assets in shareholder value creation</i>	Hilmola (2020)	CS de produtos para tecnologia da informação	Examinar o papel dos estoques e ativos na criação de valor financeiro e para o acionista de uma empresa.	Estudo de caso 72 empresas e modelagem	A pesquisa constrói vários modelos de Análise Envoltória de Dados (DEA) e testa suas conexões entre si.	Concluiu que medidas relacionadas a estoques e ativos têm impacto positivo na receita, lucros e fluxo de caixa, resultando em maior valor para o acionista. No entanto, a pesquisa também apontou fraquezas, como o limitado poder de explicação

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Objetivo	Método de pesquisa	Ferramenta de simulação	Resultados
				Expandir a perspectiva e os modelos de estoque complexo e multi estágio.			dos resultados e a presença de ruídos.
D5	<i>A new fuzzy DEA network based on possibility and necessity measures for agile supply chain performance evaluation: A case study</i>	Pourbaba gol et al. (2023)	CS ágil das vinte maiores empresas de laticínios iranianas.	Propor restrições de igualdade (Nec) e possibilidade (Pos).	Estudo de caso 20 empresas e modelagem	Análise Envoltória de Dados Rede Fuzzi (FNDEA).	Ao analisar as eficiências de 20 empresas de laticínios iranianas, é proposto o modelo FNDEA - SBM.

Cód.	Título do Estudo Primário	Autores (ano)	Contexto	Objetivo	Método de pesquisa	Ferramenta de simulação	Resultados
D6	<i>Sustainability evaluation of transportation supply chains by common set of weights-network DEA and Shannon's entropy in the presence of zero inputs</i>	Fathi e Saen (2023)	CSs para a distribuição de produtos farmacêuticos	Propor um modelo DEA de rede de dois estágios integrado baseado em <i>slack</i> com entradas zero e análise CSW usando a técnica de entropia de Shannon.	Estudo de caso em 50 CSs para a distribuição de produtos farmacêuticos e modelagem.	Análise Envoltória de Dados (DEA) de rede de dois estágios integrado baseado em <i>slack</i> com entradas zero e análise CSW usando a técnica de entropia de Shannon	Resultou na proposição de um modelo CSW-NDEA para avaliar a sustentabilidade das CSs de transporte. O estudo de caso foi realizado na empresa Abadan Transport and Marine Services Company (ATMSC) em Teerã, Irã. Essa empresa, que transporta cerca de 12 milhões de toneladas de <i>commodities</i> por ano, possui 50 CSs para distribuição de produtos farmacêuticos.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir das análises dos estudos apresentados no Quadro 6, pode-se observar que dos seis estudos, quatro deles utilizaram DEA para medir a eficiência das CSs. Azadeh e Alem (2010) investigaram um conjunto de 10 fornecedores e desenvolveram um método de análise para medir a eficiência desses fornecedores, utilizando Análise de Envoltória de Dados (DEA), Análise de Envoltória de Dados Fuzzy (FDEA) e Análise Envoltória de Dados com Restrição (CCDEA). O objetivo foi permitir que os tomadores de decisão realizassem análises entre os fatores de entrada - como custos esperados, qualidade dos níveis de aceitação e entrega no prazo. Com base nesses dados, os pesquisadores buscaram propor um método que auxiliasse na identificação dos fornecedores mais eficientes, facilitando, assim, a tomada de decisões estratégicas na seleção de fornecedores.

No estudo empreendido por Hilmola (2020), foram analisados dados de 72 empresas do setor de produtos para tecnologia da informação. A pesquisa utilizou a modelagem de Análise Envoltória de Dados (DEA) para construir vários modelos e testar suas conexões entre si. Como resultado, foi proposto um modelo que demonstrou que medidas relacionadas a estoques e ativos têm um impacto positivo na receita, lucros e fluxo de caixa, resultando em maior valor para o acionista.

Na pesquisa realizada por Pourbabagol et al. (2023), foi conduzida uma análise da eficiência em vinte das maiores empresas de laticínios do Irã, utilizando o modelo FNDEA - SBM. Os pesquisadores propuseram um modelo de simulação que empregou a técnica de Análise Envoltória de Dados por Rede Fuzzi para avaliar a eficiência dessas empresas no contexto do cenário comercial ágil. Os resultados obtidos fornecem *insights* sobre a eficiência das empresas de laticínios iranianas e podem auxiliar na identificação de estratégias para aprimorar suas operações.

Fathi e Saen (2023) conduziram uma pesquisa sobre sustentabilidade na cadeia produtiva do transporte. Para avaliar a eficiência, utilizaram a Análise Envoltória de Dados (DEA) aplicando um modelo de conjunto comum de pesos (CSW) desenvolvido com uma rede de dois estágios DEA e entropia de Shannon. O objetivo do estudo foi propor um modelo DEA de rede de dois estágios integrado que considerasse entradas zero e aplicar a análise CSW utilizando a técnica de entropia de Shannon. Para calcular os pesos ideais, utilizou-se a técnica de entropia de Shannon. Destaca-se que até o momento não existia um modelo que se baseasse na entropia de Shannon para avaliar a sustentabilidade das empresas de transporte na presença de entradas zero. O modelo proposto demonstrou ser capaz de classificar completamente as Unidades

de Decisão (DMUs) e sua aplicabilidade foi testada ao avaliar a sustentabilidade das Cadeias de Suprimentos no setor de transporte.

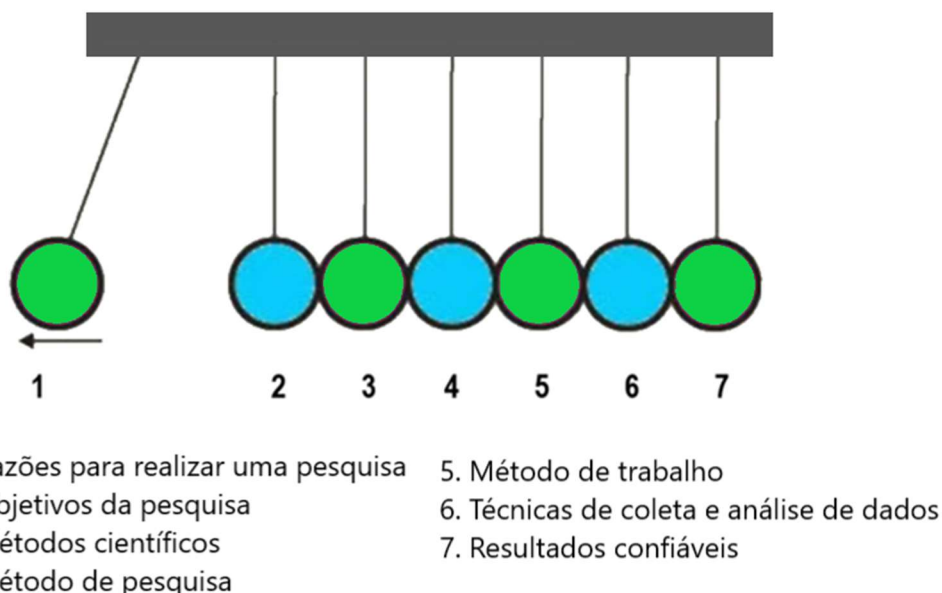
Desse modo, pode-se considerar a DEA como um método de análise eficiente para a condução deste estudo, visto que é relevante tanto para a academia como para as empresas. Por meio da DEA, foi possível identificar as melhores práticas dentro das CSs, buscando a eficiência e a otimização dos recursos. Além disso, a DEA permite a comparação entre diferentes unidades de análise, contribuindo para a identificação de problemas e a proposição de soluções para melhorar o desempenho das CSs (AZADEH; ALEM, 2010; FATHI; SAEN, 2023; HILMOLA, 2020a; POURBABAGOL et al., 2023).

A análise dos estudos indica que a DEA é frequentemente combinada com outras técnicas, como a Rede Fuzzy, para permitir uma abordagem mais abrangente e precisa na análise e avaliação da eficiência e desempenho das CSs. A utilização sinérgica dessas técnicas possibilita a consideração de múltiplos critérios e variáveis, resultando em uma visão completa e integrada do desempenho das CSs (AZADEH; ALEM, 2010; FATHI; SAEN, 2023; HILMOLA, 2020a; POURBABAGOL et al., 2023).

3 METODOLOGIA

Utilizar um método de pesquisa robusto é essencial para garantir a solidez e relevância de uma pesquisa, que deve expressar o rigor utilizado na sua condução e ser passível de debate e verificação (LACERDA et al., 2013). A finalidade da pesquisa acadêmica é aumentar o entendimento de um fenômeno e aperfeiçoar as teorias existentes, sendo a contribuição teórica o objetivo principal (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015). Desse modo, Dresch, Lacerda e Antunes Jr (2015) consideraram a necessidade de desenvolver pesquisas que unam rigor teórico e metodológico com utilidade prática para organizações e a sociedade. Para garantir a confiabilidade dos resultados nas pesquisas científicas, eles afirmaram que é necessário seguir uma série de etapas sistemáticas e encadeadas. Para isso, Dresch, Lacerda e Antunes Jr (2015) utilizam a representação do pêndulo de Newton, uma ferramenta que auxilia o pesquisador a seguir os procedimentos que garantem a confiabilidade dos resultados, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Etapas para a condução de uma pesquisa científica



Fonte: Dresch, Lacerda e Antunes Jr (2015)

A pesquisa começa com a definição das motivações para sua realização, que podem ser categorizadas como: (i) o desejo do pesquisador de compartilhar uma nova e interessante informação; (ii) a busca por respostas para questões relevantes; ou (iii) o aprofundamento da compreensão de um fenômeno específico. Conforme foi

apresentada na Seção 1.1, a motivação desta pesquisa é responder a seguinte pergunta: Quais são os efeitos proporcionados pela utilização dos princípios da TOC na eficiência da Cadeia de Suprimentos?

Os objetivos desta pesquisa estão descritos na Seção 1.2. O enquadramento metodológico determina e justifica o método de pesquisa, a fim de responder ao problema de pesquisa formulado (LACERDA et al., 2013). Isso garante a avaliação da comunidade científica e a comprovação da robustez dos resultados encontrados (LACERDA et al., 2013). Dada a importância do método para atingir os objetivos desta pesquisa, esta seção busca estabelecer o rigor necessário para a obtenção de resultados confiáveis. Assim, os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho são descritos na seguinte sequência: (i) delineamento da pesquisa; (ii) método de trabalho empregado; (iii) coleta e refinamento dos dados; (iv) verificação da significância estatística; e (v) análise de dados.

3.1 Delineamento da Pesquisa

As pesquisas científicas devem expressar coerência e alinhamento entre os elementos que a compõem, ou seja, o referencial teórico, os objetivos, o desenvolvimento e as conclusões precisam estar alinhados (CAUCHICK-MIGUEL, 2007). Para garantir esta coerência a pesquisa precisa ser adequadamente caracterizada, assim como escolher devidamente os métodos e técnicas, para explicarem efetivamente os fenômenos estudados (CAUCHICK-MIGUEL, 2007). O Quadro 7 sintetiza o delineamento da presente pesquisa conforme as classificações apresentadas anteriormente.

Quadro 7 - Resumo do delineamento da pesquisa

Dimensão	Enquadramento
Natureza	Aplicada
Objetivo	Exploratória
Método Científico	Dedutivo
Abordagem	Quantitativa
Método de investigação	Modelagem

Fonte: Elaborado pela autora com base em Lacerda, Rodrigues e Silva (2009).

A pesquisa científica pode ser dividida em duas categorias quanto a sua natureza: básica e aplicada. A pesquisa básica busca o progresso da ciência sem se considerar a aplicação prática do conhecimento adquirido. Enquanto a pesquisa

aplicada tem como objetivo solucionar problemas práticos. Embora sejam diferentes, esses dois tipos de pesquisa não são mutuamente excludentes (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015; GERHARD; SILVEIRA, 2009). Nesse contexto, o presente estudo é classificado como uma pesquisa aplicada.

As pesquisas podem ser classificadas quanto aos seus objetivos em: exploratórias, descritivas e explicativas. As pesquisas exploratórias têm como propósito construir hipóteses ou explicitar um problema por meio do entendimento. Enquanto as pesquisas descritivas buscam explanar fatos e fenômenos de um determinado grupo, estabelecendo as relações entre as variáveis com base em suas características. Por fim, as pesquisas explicativas visam identificar os fatores que geram determinados fenômenos (GIL, 2010). Esta pesquisa é considerada exploratória.

Existem quatro principais métodos científicos: indutivo, dedutivo, hipotético-dedutivo e abdução. O método indutivo envolve inferir verdades universais a partir de dados particulares observados. O método dedutivo utiliza teorias existentes para explicar ou prever comportamentos e fenômenos. O método hipotético-dedutivo consiste em formular hipóteses com base em premissas aceitas e deduzir conclusões a partir delas. Se as conclusões não estiverem em concordância com os fatos observados, a hipótese é rejeitada ou modificada. O método abdução utiliza dados para explorar um fenômeno, criar ou ajustar teorias, que são posteriormente testadas com base em novos dados (LAKATOS; MARKONI, 2010; SAUNDERS; LEWIS; THORNHILL, 2012). Neste estudo, será utilizado o método dedutivo.

As pesquisas podem ser classificadas em abordagens qualitativas e quantitativas. A pesquisa qualitativa busca descrever e compreender fenômenos, sem considerar a representação numérica, enquanto a pesquisa quantitativa busca a objetividade, utilizando a análise de dados brutos e linguagem matemática para descrever causas e relações entre variáveis. A combinação dessas abordagens fornece informações mais abrangentes do que quando utilizadas separadamente (FONSECA, 2002; GERHARD; SILVEIRA, 2009). Esta pesquisa possui uma abordagem quantitativa.

A escolha da abordagem metodológica é necessária para alcançar os objetivos da pesquisa em questão. Considerando tanto o objetivo do estudo quanto a complexidade do cenário a ser investigado, a modelagem se apresenta como o método adequado para compreender o problema em análise neste trabalho. A

modelagem utiliza técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou de uma parte específica dele. Por meio da simulação computacional, é possível explorar e abordar problemas complexos e dinâmicos, analisando o comportamento do sistema, levantando questões hipotéticas acerca do sistema real e contribuindo no processo de design de soluções. Essa abordagem possibilita uma análise aprofundada e a compreensão precisa do fenômeno em estudo (CAUCHICK-MIGUEL, 2007; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015; EUGENIA; BARRAZA; JUUSO, 1998; MELÃO; PIDD, 2003; NAKANO, 2010). O método de pesquisa de modelagem pode ser utilizado considerando a seguinte sequência de passos: (i) definição do problema; (ii) construção do modelo; (iii) solução do modelo; (iv) validação do modelo; e (v) implantação do modelo (MORABITO; PUREZA, 2012).

3.2 Método de Trabalho

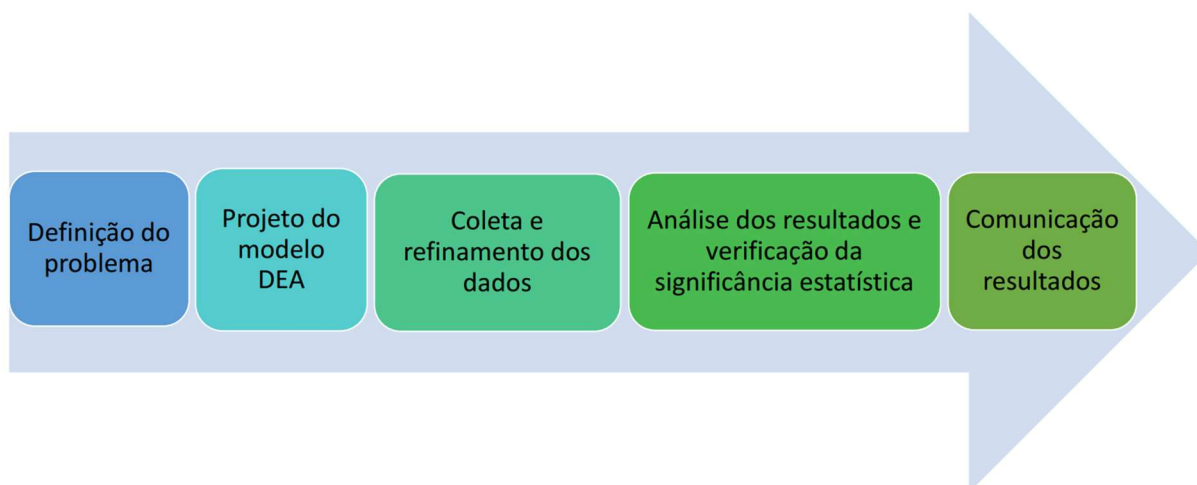
A escolha adequada do método de trabalho é importante na condução de uma pesquisa, pois influencia diretamente na validade e no reconhecimento da comunidade acadêmica (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015). Cada método de pesquisa possui suas premissas e restrições, que devem ser cuidadosamente consideradas ao decidir qual método de trabalho utilizar (CAUCHICK-MIGUEL, 2007). A replicabilidade do estudo é um aspecto fundamental para a validação e confiabilidade dos resultados obtidos. Nesse sentido, a estruturação e apresentação lógica do método de trabalho desempenham um papel crucial, pois devem ser compostos por uma sequência de etapas lógicas que permitam alcançar os objetivos da pesquisa (MENTZER; FLINT, 1997). Além disso, a clareza e transparência do processo também são fundamentais para garantir a replicabilidade.

A utilização de modelos possibilita a compreensão do ambiente empresarial, a identificação de problemas, a formulação de estratégias e o apoio à tomada de decisões (MORABITO; PUZEZA, 2012). Modelos quantitativos envolvem um conjunto de variáveis de controle e desempenho que inferem na qualidade das decisões obtidas por meio das relações causais e quantitativas estabelecidas entre as variáveis. Nesse contexto, esta pesquisa utiliza a modelagem quantitativa como método de pesquisa.

A Figura 6 apresenta as etapas empregadas no desenvolvimento deste trabalho. Essas etapas foram adaptadas do modelo proposto por Morabito e Pureza

(2012) para a construção de um modelo, definição do problema, projeto do modelo DEA, coleta e refinamento dos dados, análise dos resultados e verificação da significância estatística e, por fim, comunicação dos resultados.

Figura 6 - Descrição do método de trabalho



Fonte: Elaborado com base em Morabito e Pureza (2012)

A definição do problema, na qual a Revisão Sistemática da Literatura está inserida, foi dividida em dois estágios distintos. Primeiramente, realizou-se um levantamento do interesse acadêmico acerca da aplicação da TOC na CS. Em seguida, foram identificadas e analisadas pesquisas que visavam medir a eficiência das CSs e as técnicas utilizadas para essa mensuração. Os detalhes desta revisão sistemática da literatura podem ser encontrados na Seção 1.3 deste estudo. O objetivo dessa fase é estabelecer uma base teórica sólida para o estudo. Além disso, a definição do problema envolveu a determinação dos princípios da TOC específicos para a CS que seriam simulados, bem como a descrição detalhada dos cenários de análise e das hipóteses a serem testadas, presentes na Seção 1.1 desta dissertação.

Na sequência, são apresentados os procedimentos para a realização do projeto do modelo DEA, os meios de validação do modelo e a comunicação dos resultados.

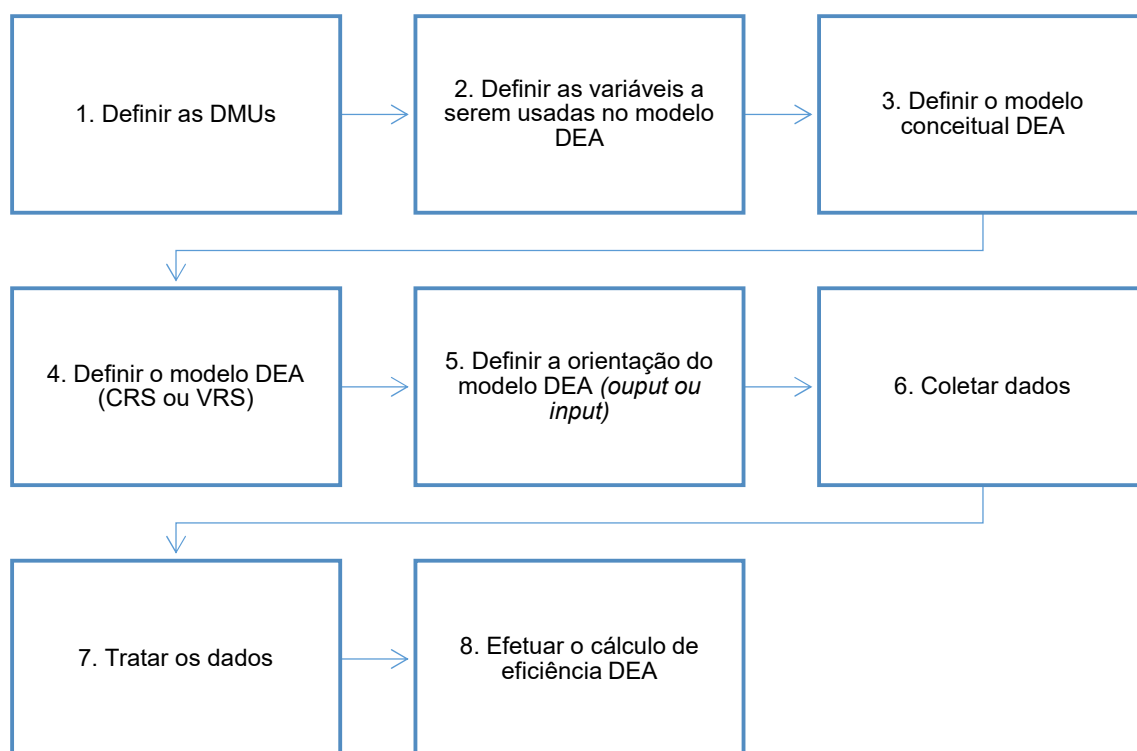
3.2.1 Projeto e modelo DEA

A Análise Envoltória de Dados (DEA) permite medir a eficiência de uma organização sem exigir suposições sobre a relação entre as entradas e saídas. Isso significa que as entradas e saídas podem ser medidas em diferentes unidades e não

é necessária uma função específica para relacioná-las. Isso faz da DEA um método flexível e fácil de aplicar em diferentes contextos. Além disso, a DEA não faz suposições sobre a distribuição do termo de ineficiência, o que a torna um método determinístico. Isso significa que todos os desvios da fronteira de eficiência são considerados sob o controle da empresa e atribuídos como ineficiência. Isso permite que as empresas identifiquem áreas de melhoria e tomem medidas para aumentar sua eficiência (ÇELEN, 2013; PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018).

No contexto acadêmico, a DEA é amplamente aceita e está constantemente sendo desenvolvida por pesquisadores. Isso demonstra a confiabilidade e o potencial da DEA como uma metodologia de apoio à tomada de decisões para o monitoramento do desempenho em organizações orientadas pela eficiência (LIU et al., 2013; SMRITI; KHAN, 2021). Para a condução correta da modelagem da DEA e o alcance de resultados fidedignos é imprescindível seguir um procedimento, neste caso a pesquisa seguiu a sequência de passos detalhados por Piran, Lacerda e Camargo (2018). Os procedimentos para elaboração do modelo DEA estão apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Procedimentos para a elaboração de modelos de simulação DEA



Fonte: Elaborado pela autora com base em Piran, Lacerda e Camargo (2018).

O processo de elaboração do modelo DEA é apresentado nas próximas subseções.

3.2.2 Definição das unidades de análise, DMUs, variáveis e modelo conceitual

Devido a esta pesquisa ser baseada em dados secundários extraídos da pesquisa realizada por Stefano (2020) a coleta de dados partiu de uma leitura minuciosa do texto, análise dos dados coletados no estudo e compreensão do modelo de Dinâmica de Sistema realizado, assim como dos resultados encontrados. A partir disso, os meios de operacionalizar a definição das variáveis para a criação dos modelos DEA foram definidos.

Stefano (2020) coletou dados de fontes variadas, sendo dados do Sistema Integrado de Gestão Empresarial (do inglês, *Enterprise Resource Planning – ERP*), logística, Planejamento de Vendas e Operações (do inglês, *Sales and Operations Planning - S&OP*) e departamento de suprimentos da empresa, bem como suas próprias observações. O Quadro 8 apresenta as variáveis selecionadas para a análise das eficiências em DEA coletadas nas simulações de Dinâmica de Sistemas construídas por Stefano (2020).

Quadro 8 - Variáveis e fontes coletadas

Variável	Descrição	Fonte	Referências
Lead time de reabastecimento	Agregação dos tempos de compra, trânsito, descarga e abastecimento	Banco de dados de planilhas de suprimentos	Schrageheim (2007)
Consumo de matérias-primas	O consumo de matérias-primas	Sistema ERP	Schrageheim (2007)
Inventário de matérias-primas	Quantidade total de inventário de matéria-prima	Sistema ERP	Schrageheim (2007)
IDD	Inventário-Dólar-Dia	Banco de dados de conhecimento S&OP	Gupta e Andersen (2012); Gupta e Andersen (2018)
GDD	Ganho-Dólar-Dia	Banco de dados de conhecimento S&OP	Gupta e Andersen (2012); Gupta e Andersen (2018)

Fonte: Elaborado pela autora com base Stefano (2020).

Schrageheim (2007) define que o *lead time* de reabastecimento da TOC é composto por três componentes principais: (i) *lead time* do pedido; (ii) *lead time* de produção; e (iii) *lead time* de transporte. O *lead time* do pedido é o intervalo entre o consumo de uma unidade e a emissão de um pedido de reposição. Essa etapa é importante para garantir que a reposição seja efetuada no momento adequado, evitando assim a ocorrência de falta de estoque. O *lead time* de produção, por sua vez, refere-se ao período compreendido entre a emissão do pedido de reposição pelo

fabricante ou fornecedor e a conclusão da produção, incluindo todos os processos envolvidos, como a fabricação em si, a inspeção de qualidade e a preparação para envio ou armazenamento. O *lead time* de transporte é o intervalo necessário para enviar o produto acabado do ponto de suprimento até o local de estoque. Essa etapa é importante para assegurar a entrega rápida e eficiente do produto ao local adequado. A combinação desses três componentes é essencial para que a reposição de itens ocorra precisamente no momento necessário, garantindo um fluxo contínuo e eficaz de produção e distribuição, além de prevenir a falta de estoque. Portanto, para fins de análise DEA, as variáveis foram combinadas para constituir a medida de *lead time* de reabastecimento.

O consumo de matérias-primas refere-se à quantidade utilizada do estoque durante um determinado período, normalmente medido mensalmente. O inventário de matérias-primas representa o saldo remanescente no estoque após a realização do consumo. Essas duas variáveis são importantes para monitorar e controlar o fluxo de entrada e saída de matérias-primas em uma empresa, permitindo uma gestão eficiente dos recursos disponíveis.

O inventário-dólar-dia (IDD) é definido como todo o investimento que a empresa faz que poderá resultar em ganho (RICKETTS, 2010). É calculado com base no preço da matéria-prima de um item e pela quantidade de tempo que um pedido está no estoque, sendo um indicador que suporta a redução do inventário (GUPTA; ANDERSEN, 2018a). O ganho-dólar-dia (GDD) é conceituado como o índice de geração de dinheiro do sistema, podendo ser entendido também, do ponto de vista financeiro, como a subtração dos custos totalmente variáveis da receita líquida (GOLDRATT, 1991). É calculado com base no preço de venda final de um item e o número de dias que um pedido não atendido está em atraso, esse indicador reprime os atrasos nas entregas ou trocas na sequência do plano (GUPTA; ANDERSEN, 2018a).

Os dados de base utilizados na simulação foram coletados de 01 de novembro de 2018 a 31 de outubro de 2019, o que permite uma análise longitudinal. Conforme mencionado na seção de introdução, esta pesquisa busca simular as quatro plantas especificadas como U1, U2, U3 e U4. A Tabela 3 apresenta as DMUs utilizadas no modelo DEA.

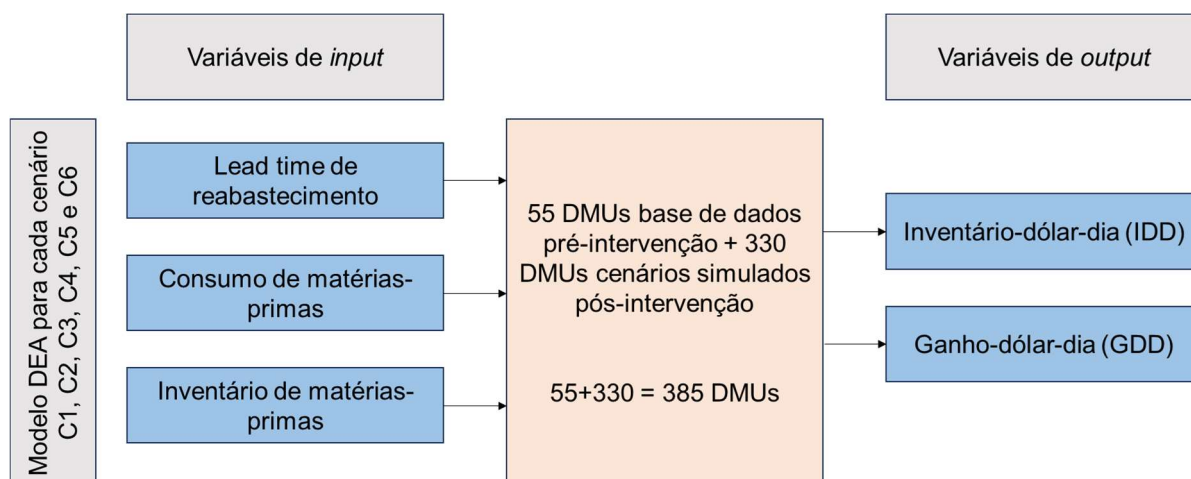
Tabela 3 - DMUs do modelo em semanas

Cenário	Semanas
Base	1 a 55
C1	56 a 110
C2	111 a 165
C3	166 a 220
C4	221 a 275
C5	276 a 330
C6	331 a 385

Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, as DMUs são as semanas (por exemplo mês 1 – semanas 1, 2, 3 e 4) dos 12 meses da base de dados, que somam 55 semanas para cada cenário. A Figura 8 apresenta o modelo conceitual DEA empregado nesta pesquisa para avaliar o desempenho do sistema analisado. A fim de mensurar a eficiência do sistema, foram consideradas as variáveis descritas na Figura 7, sendo os *inputs*: o *lead time* de reabastecimento, o consumo de matérias-primas e o inventário de matérias-primas. Os *outputs* considerados foram o IDD e o GDD.

Figura 8 - Modelo DEA utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3 Definição do modelo (CRS) e orientação (*input*), coleta e tratamento de dados

Optou-se por utilizar o modelo de DEA com Retorno da Escala Constante (CRS) e orientação a *input*. A escolha do modelo CRS se deve à sua capacidade de comparar as DMUs ao longo do tempo com retornos constantes de escala, enquanto a orientação a *input* visa a minimização do uso dos recursos de entrada mantendo as

saídas constantes. Além disso, foi necessário realizar um tratamento adequado para o IDD antes de sua utilização nas análises, visto que se trata de um *output* indesejado. O modelo CRS orientado a *input* é representado pelas Equações 1, 2 e 3.

$$MAX_{eff0} = \frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{j0}}{\sum_{i=1}^n v_i x_{i0}} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{j=1}^m u_j y_{jk}}{\sum_{i=1}^n v_i x_{ik}} \leq 1, \forall K \quad (2)$$

$$u_j \geq 0, \forall j$$

$$v_i \geq 0, \forall i$$

(3)

Onde:

$eff0$ = eficiência da DMU 0 em análise

u_j = peso calculado para o *output* j, j=1, ...m

v_i = peso calculado para o *input* i, i=1, ...n

y_{j0} = quantidade do *output* j para DMU em análise

x_{i0} = quantidade do *input* i para DMU em análise

y_{jk} = quantidade do *output* j para DMU k, k=1, ...n

x_{ik} = quantidade do *input* i para DMU k, k=1, ...n

K = número DMU em análise

m = número de *outputs*

n = número de *inputs*

O modelo matemático apresentado é de programação fracionária e deve ser resolvido para cada DMU. Este modelo matemático pode ser transformado em um Problema de Programação Linear (PPL). Para isso, é necessário que o denominador da função objetivo seja igual a uma constante, normalmente, igual a unidade (MELLO et al., 2005). Tal formulação é apresentada nas Equações 4, 5 e 6, o qual as variáveis de decisão são os pesos u_j e v_i .

$$MAX_{eff_0} = \sum_{j=1}^m u_j y_{j0} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n v_i x_{i0} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ik} \leq 0, \forall K$$

$$u_j \geq 0, \forall j$$

$$v_i \geq 0, \forall i$$

(6)

A Equação 4 refere-se à Função Objetivo (F.O) do modelo de programação matemática que deve ser maximizada. A Equação 5 diz respeito ao conjunto de restrições (uma por DMU avaliada) que limita a produtividade das DMUs da primeira equação. Essa restrição é o que possibilita maximizar a Função Objetivo, visto que a produtividade teórica de uma DMU pode assumir qualquer valor (COELLI et al., 2005). Enquanto a Equação 6 determina que os insumos utilizados e as saídas geradas devem ser superiores a zero.

Os dados das variáveis iguais ou menores que zero foram ajustados conforme o procedimento sugerido por Bowlin (1998), que envolveu a transformação dos valores negativos ou iguais a zero para valores menores, em magnitude, do que os valores positivos no conjunto de dados. Essa etapa foi necessária devido aos requisitos de positividade presentes nos modelos básicos de DEA, que trabalham com conjuntos de dados contendo apenas números não negativos, de preferência, positivos. Essa técnica amplia a aplicabilidade dos modelos DEA a um conjunto mais amplo de dados, tornando-os mais flexíveis e abrangentes (SARKIS, 2002).

Para incorporar o *output* indesejável IDD no modelo, utilizou-se o princípio do inverso aditivo ($-y_{indesejável}$). Para tanto, identificou-se o maior valor de IDD encontrado nas DMUs e adicionou-se um valor para criar um número suficientemente maior, no qual se subtraiu os valores de IDD encontrados na simulação. Esse tratamento é amplamente utilizado na literatura e tem a vantagem de fornecer resultados de fácil interpretação (CAMANHO; ZANELLA; MOUTINHO, 2023).

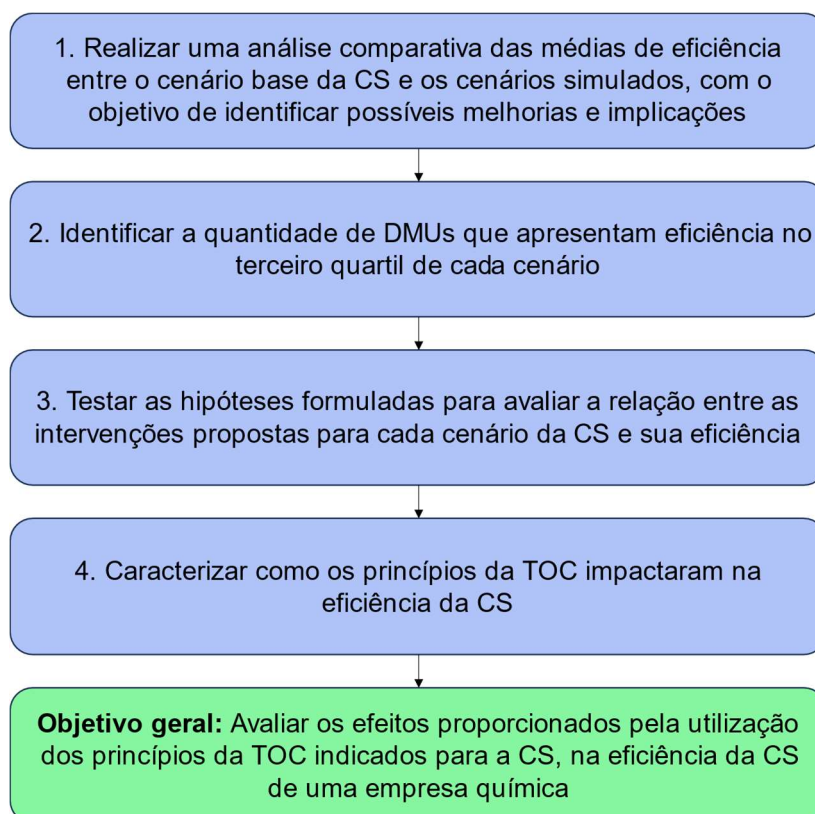
3.3 Análise dos dados

A análise de dados é o momento em que o pesquisador procura dar sentido a um conjunto de informações levantadas (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR, 2015). Dresch, Lacerda e Antunes Jr (2015) salientam que a escolha das técnicas de coleta e análise dos dados deve ser adequadamente justificada pelo pesquisador. É importante que a coleta e análise de dados ocorram simultaneamente, pois isto permite ao pesquisador capturar a realidade que os dados trazem (BARRATT; CHOI; LI, 2011). A análise compreende examinar, categorizar, tabular e recombina as evidências quantitativas ou qualitativas visando as proposições iniciais de um estudo (YIN, 2015). Desse modo, a primeira etapa da análise de dados constitui-se de uma Revisão Sistemática da Literatura em que construiu a base para este estudo.

Considerando que os dados utilizados nesta pesquisa procedem do trabalho realizado por Stefano (2020), o procedimento de análise de dados partiu do reconhecimento dos dados e da compreensão minuciosa das análises realizadas pelo autor. Os cenários definidos por Stefano (2020) para as análises foram expostos no Quadro 1. A partir da análise desses cenários, identificou-se quais etapas da TOC estão sendo aplicadas, quais variáveis de modelo são usadas ou não e se o *buffer* se baseia na previsão (FB) ou não (não FB). Além disso, a determinação do pulmão e o *lead time* de reposição são separados como variáveis individuais.

A Figura 9 apresenta os procedimentos adotados para a análise dos dados, que foram desenvolvidos considerando o objetivo geral da pesquisa. Essa Figura (9) oferece uma descrição visual dos passos seguidos no estudo, fornecendo uma visão do processo utilizado para atingir os objetivos estabelecidos.

Figura 9 - Procedimento de análise dos dados



Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente os escores de eficiência foram calculados no SAGEPE (www.sagepe.com.br). Em seguida, as médias das eficiências entre o cenário de referência da CS e os cenários simulados foram comparadas com o propósito de identificar os efeitos na eficiência após a intervenção proposta em cada cenário. Em seguida, foram quantificadas as DMUs com escores de eficiência no terceiro quartil de cada cenário.

A utilização dos quartis é uma maneira de resumir e entender a distribuição dos dados. Os quartis dividem os dados em quatro partes iguais. O primeiro quartil (Q1) é o valor que delimita o ponto em que se encontram os 25% dos dados inferiores de uma análise. O segundo quartil (Q2), conhecido como mediana, divide os dados em duas partes iguais, em que exatamente metade dos valores estão localizados de maneira superior ou inferior a ele. Enquanto o terceiro quartil (Q3) representa o valor que separa os 25% dados superiores (MOORE, 2017). A análise dos quartis é útil para compreender a dispersão dos dados, pois permite identificar a variabilidade dos valores e entender a tendência central do conjunto de dados. Além disso, os quartis

também são utilizados para detecção de *outliers*, valores extremos que podem influenciar negativamente as análises estatísticas (MOORE, 2017).

Para a análise estatística de dados, existem basicamente dois tipos de testes: os paramétricos e os não paramétricos. Os testes paramétricos são utilizados quando os dados atendem a certos pressupostos, como normalidade e homogeneidade de variâncias. No entanto, quando esses pressupostos não são atendidos, torna-se necessário utilizar os testes não paramétricos.

No presente estudo, o conjunto de dados analisados não atendeu aos pressupostos necessários para a utilização de um teste paramétrico. Portanto, optou-se por utilizar o teste de Wilcoxon, um teste não paramétrico que compara as medianas dos grupos em estudo. Dessa forma, é possível verificar se existe diferença estatisticamente significativa entre os grupos, mesmo quando os dados não seguem uma distribuição normal ou apresentam variâncias diferentes..

Os resultados da eficiência calculados por meio da DEA, foram agrupados por cenário e comparados com o cenário base. Para realizar essa comparação se verificou a significância estatística das diferenças das medianas das eficiências por meio do teste *Wilcoxon*. Assim, foram testadas as hipóteses apresentadas na introdução deste estudo. Ou seja, a média das eficiências do cenário base (antes) comparada com a média das eficiências dos cenários simulados (depois).

O teste estatístico não paramétrico *Wilcoxon* é utilizado para comparar dois grupos de dados, em que os dados de cada grupo são tratados como amostras independentes (HAIR et al., 2005). Esse teste é utilizado para testar se a diferença entre as medianas de dois grupos é significativa (PIRAN et al., 2021). A princípio são calculados os valores numéricos da diferença entre cada par, sendo possível três condições: aumento (+), diminuição (-) ou igualdade (=). Depois de calculadas as diferenças entre os valores obtidos para cada par de dados, essas diferenças são ordenadas pelo seu valor absoluto (sem considerar o sinal), substituindo-se então os valores originais pelo posto que ocupam na escala ordenada. A ideia é que se existirem apenas diferenças aleatórias, tal como é postulado pela hipótese nula, então haverá aproximadamente a mesma quantidade de ordens elevadas e de ordens inferiores tanto para as diferenças positivas como as negativas. Se verificar uma preponderância de baixos resultados para um dos lados, isso significa a existência de resultados elevados para o outro lado, indicando uma diferença em favor de uma das

situações, superior aquilo que seria esperado se os resultados se devessem ao acaso (HAIR et al., 2005).

As exigências para se realizar o teste de *Wilcoxon* são: (i) os pares (X_i, Y_i) são mutuamente independentes; (ii) as diferenças das variáveis contínuas com distribuição simétrica; e (iii) nível de mensuração em escala intervalar (intervalo de confiança e *p-value* de 0,05) (HAIR et al., 2005).

Por fim, foram identificados os princípios da TOC e as características dos cenários que impactaram de modo negativo ou positivo sobre a eficiência da CS.

4 RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os escores de eficiência dos cenários. As DMUs de 1 a 55 representam o cenário de referência, enquanto as DMUs de 56 a 110 são atribuídas ao cenário 1. As DMUs de 111 a 165 estão relacionadas ao cenário 2. As DMUs de 166 a 220 correspondem ao cenário 3 e as DMUs de 221 a 275 referem-se ao cenário 4. As DMUs de 276 a 330 pertencem ao cenário 5 e as DMUs de 331 a 385 estão relacionadas ao cenário 6. Note que as células azuis tem os escores de eficiência acima de 0,75.

Tabela 4 - Comparativo dos escores das eficiências entre os cenários em análise

Cenário base		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6	
DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão
DMU01	0,93	DMU56	0,98	DMU111	0,97	DMU166	0,97	DMU221	0,97	DMU276	0,97	DMU331	0,97
DMU02	0,68	DMU57	0,68	DMU112	0,65	DMU167	0,65	DMU222	0,65	DMU277	0,65	DMU332	0,65
DMU03	0,77	DMU58	0,56	DMU113	0,53	DMU168	0,51	DMU223	0,53	DMU278	0,53	DMU333	0,54
DMU04	0,75	DMU59	0,52	DMU114	0,48	DMU169	0,45	DMU224	0,48	DMU279	0,48	DMU334	0,49
DMU05	0,78	DMU60	0,55	DMU115	0,51	DMU170	0,39	DMU225	0,54	DMU280	0,51	DMU335	0,62
DMU06	0,73	DMU61	0,52	DMU116	0,60	DMU171	0,52	DMU226	0,49	DMU281	0,52	DMU336	0,74
DMU07	0,73	DMU62	0,54	DMU117	0,60	DMU172	0,64	DMU227	0,55	DMU282	0,53	DMU337	0,80
DMU08	0,69	DMU63	0,54	DMU118	0,85	DMU173	0,69	DMU228	0,56	DMU283	0,52	DMU338	0,87
DMU09	0,82	DMU64	0,57	DMU119	0,91	DMU174	0,80	DMU229	0,62	DMU284	0,50	DMU339	0,93
DMU10	1,00	DMU65	0,62	DMU120	1,00	DMU175	0,91	DMU230	0,72	DMU285	0,54	DMU340	1,00
DMU11	0,73	DMU66	0,56	DMU121	0,96	DMU176	0,89	DMU231	0,62	DMU286	0,54	DMU341	0,96
DMU12	0,44	DMU67	0,35	DMU122	0,88	DMU177	0,74	DMU232	0,50	DMU287	0,38	DMU342	0,88
DMU13	0,49	DMU68	0,37	DMU123	0,94	DMU178	0,72	DMU233	0,53	DMU288	0,35	DMU343	0,95
DMU14	0,59	DMU69	0,33	DMU124	0,93	DMU179	0,75	DMU234	0,53	DMU289	0,33	DMU344	0,94
DMU15	0,60	DMU70	0,34	DMU125	0,98	DMU180	0,78	DMU235	0,59	DMU290	0,34	DMU345	1,00
DMU16	0,72	DMU71	0,32	DMU126	0,97	DMU181	0,79	DMU236	0,58	DMU291	0,33	DMU346	0,97
DMU17	0,64	DMU72	0,35	DMU127	1,00	DMU182	0,81	DMU237	0,63	DMU292	0,35	DMU347	1,00
DMU18	0,59	DMU73	0,29	DMU128	0,96	DMU183	0,77	DMU238	0,60	DMU293	0,29	DMU348	0,96
DMU19	0,52	DMU74	0,26	DMU129	0,93	DMU184	0,76	DMU239	0,55	DMU294	0,25	DMU349	0,93
DMU20	0,53	DMU75	0,27	DMU130	0,92	DMU185	0,73	DMU240	0,53	DMU295	0,26	DMU350	0,91
DMU21	0,47	DMU76	0,23	DMU131	0,89	DMU186	0,65	DMU241	0,48	DMU296	0,21	DMU351	0,87
DMU22	0,44	DMU77	0,26	DMU132	0,87	DMU187	0,65	DMU242	0,46	DMU297	0,20	DMU352	0,87
DMU23	0,50	DMU78	0,25	DMU133	0,82	DMU188	0,62	DMU243	0,43	DMU298	0,19	DMU353	0,82

Cenário base		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6	
DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão
DMU24	0,45	DMU79	0,27	DMU134	0,87	DMU189	0,64	DMU244	0,46	DMU299	0,18	DMU354	0,85
DMU25	0,39	DMU80	0,24	DMU135	0,89	DMU190	0,65	DMU245	0,47	DMU300	0,22	DMU355	0,88
DMU26	0,39	DMU81	0,25	DMU136	0,92	DMU191	0,68	DMU246	0,48	DMU301	0,24	DMU356	0,92
DMU27	0,61	DMU82	0,28	DMU137	0,90	DMU192	0,69	DMU247	0,48	DMU302	0,29	DMU357	0,90
DMU28	0,46	DMU83	0,28	DMU138	0,79	DMU193	0,61	DMU248	0,42	DMU303	0,26	DMU358	0,80
DMU29	0,42	DMU84	0,27	DMU139	0,83	DMU194	0,65	DMU249	0,45	DMU304	0,31	DMU359	0,82
DMU30	0,42	DMU85	0,27	DMU140	0,80	DMU195	0,62	DMU250	0,44	DMU305	0,58	DMU360	0,80
DMU31	0,41	DMU86	0,38	DMU141	0,73	DMU196	0,58	DMU251	0,39	DMU306	0,54	DMU361	0,74
DMU32	0,48	DMU87	0,45	DMU142	0,71	DMU197	0,55	DMU252	0,35	DMU307	0,54	DMU362	0,73
DMU33	0,50	DMU88	0,47	DMU143	0,66	DMU198	0,50	DMU253	0,32	DMU308	0,54	DMU363	0,69
DMU34	0,47	DMU89	0,41	DMU144	0,57	DMU199	0,45	DMU254	0,28	DMU309	0,63	DMU364	0,69
DMU35	0,42	DMU90	0,35	DMU145	0,50	DMU200	0,37	DMU255	0,32	DMU310	0,65	DMU365	0,66
DMU36	0,52	DMU91	0,31	DMU146	0,46	DMU201	0,36	DMU256	0,37	DMU311	0,58	DMU366	0,59
DMU37	0,52	DMU92	0,25	DMU147	0,41	DMU202	0,39	DMU257	0,39	DMU312	0,49	DMU367	0,50
DMU38	0,48	DMU93	0,21	DMU148	0,39	DMU203	0,42	DMU258	0,47	DMU313	0,51	DMU368	0,56
DMU39	0,50	DMU94	0,28	DMU149	0,34	DMU204	0,41	DMU259	0,52	DMU314	0,83	DMU369	0,73
DMU40	0,69	DMU95	0,44	DMU150	0,30	DMU205	0,47	DMU260	0,58	DMU315	0,84	DMU370	0,81
DMU41	0,80	DMU96	0,63	DMU151	0,31	DMU206	0,48	DMU261	0,65	DMU316	0,72	DMU371	0,74
DMU42	0,85	DMU97	0,60	DMU152	0,32	DMU207	0,47	DMU262	0,67	DMU317	0,66	DMU372	0,68
DMU43	0,84	DMU98	0,51	DMU153	0,31	DMU208	0,45	DMU263	0,69	DMU318	0,96	DMU373	0,86
DMU44	0,77	DMU99	0,43	DMU154	0,31	DMU209	0,46	DMU264	0,59	DMU319	0,98	DMU374	1,00
DMU45	0,73	DMU100	0,34	DMU155	0,27	DMU210	0,45	DMU265	0,57	DMU320	0,93	DMU375	0,95
DMU46	0,64	DMU101	0,27	DMU156	0,29	DMU211	0,46	DMU266	0,65	DMU321	0,85	DMU376	0,86
DMU47	0,63	DMU102	0,20	DMU157	0,26	DMU212	0,40	DMU267	0,59	DMU322	0,83	DMU377	0,79
DMU48	0,77	DMU103	0,34	DMU158	0,28	DMU213	0,42	DMU268	0,58	DMU323	1,00	DMU378	0,99
DMU49	0,90	DMU104	0,50	DMU159	0,31	DMU214	0,46	DMU269	0,60	DMU324	1,00	DMU379	1,00

Cenário base		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6	
DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão	DMUs	E. Padrão
DMU50	1,00	DMU105	0,52	DMU160	0,27	DMU215	0,65	DMU270	1,00	DMU325	0,89	DMU380	0,91
DMU51	0,95	DMU106	0,50	DMU161	0,26	DMU216	0,64	DMU271	0,95	DMU326	0,76	DMU381	0,75
DMU52	0,88	DMU107	0,44	DMU162	0,25	DMU217	0,58	DMU272	1,00	DMU327	0,64	DMU382	0,64
DMU53	0,95	DMU108	0,38	DMU163	0,25	DMU218	0,52	DMU273	0,83	DMU328	0,51	DMU383	0,52
DMU54	1,00	DMU109	0,35	DMU164	0,28	DMU219	0,43	DMU274	0,82	DMU329	0,46	DMU384	0,49
DMU55	1,00	DMU110	0,42	DMU165	0,36	DMU220	0,57	DMU275	0,86	DMU330	0,52	DMU385	0,59
Desvio padrão	0,19	Desvio padrão	0,15	Desvio padrão	0,28	Desvio padrão	0,15	Desvio padrão	0,17	Desvio padrão	0,24	Desvio padrão	0,15
Mediana	0,64	Mediana	0,35	Mediana	0,65	Mediana	0,61	Mediana	0,55	Mediana	0,52	Mediana	0,82
Quartis	18 > 0,75	Quartis	1 > 0,75	Quartis	24 > 0,75	Quartis	10 > 0,75	Quartis	7 > 0,75	Quartis	12 > 0,75	Quartis	35 > 0,75

Fonte: Elaborado pela autora.

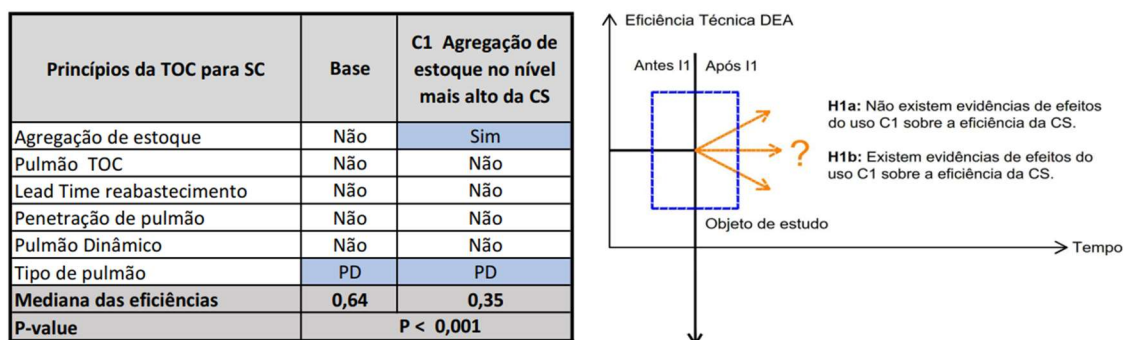
Na Tabela 4 apresentada, é possível notar que no cenário de referência, há 18 DMUs localizadas no terceiro quartil. No cenário 1, esse número diminui para apenas 1 DMU no terceiro quartil. Enquanto no cenário 2, há 24 DMUs no terceiro quartil e 3 esse valor é reduzido para 10 DMUs. No cenário 4, encontram-se 7 DMUs no terceiro quartil e, no caso do cenário 5, esse número aumenta para 12. Por fim, no cenário 6, um total de 35 DMUs estão localizadas no terceiro quartil.

Os resultados da análise dos quartis demonstram que os cenários 1, 3, 4 e 5 apresentaram uma redução na eficiência em relação ao cenário base, enquanto o cenário 6 mostrou um aumento na eficiência. Essa tendência é corroborada pelo teste de hipótese. No entanto, no cenário 2 foi observado um possível aumento na eficiência conforme a análise dos quartis, porém esse aumento não foi confirmado pelo teste de hipótese. Além disso, ao analisar os dados, nota-se que os escores de eficiência das outras DMUs nesse cenário estão concentrados no segundo quartil, o que indica um desempenho inferior.

Na Tabela 4, também são apresentadas as medianas das eficiências resultantes da DEA para diferentes cenários. O cenário base obteve a mediana da eficiência média de 64%, enquanto o cenário C1 apresentou a mediana da eficiência de 35%. Os cenários C2, C3, C4 e C5 registraram medianas de eficiência de 65%, 61%, 55% e 52% respectivamente. Por fim, o cenário C6 alcançou uma mediana de eficiência média de 82%. Esses escores de eficiências resultantes da DEA são apresentados no Apêndice C.

Na Figura 10, é possível observar que o cenário base do modelo é baseado na previsão de demanda. No entanto, o cenário 1, além de considerar a previsão de demanda, também incorporou a agregação do estoque no nível mais alto da cadeia. A hipótese de que existem evidências de efeitos do uso C1 sobre a eficiência da CS (H1b) foi confirmada, pois os resultados obtidos por meio do teste de *Wilcoxon* ($P < 0,001$) apresentaram uma significativa redução na mediana da eficiência da Cadeia de Suprimentos após a simulação do cenário 1, a qual reduziu de 64% para 35%. Ou seja, foram observados efeitos negativos, diferentemente dos efeitos esperados (positivos).

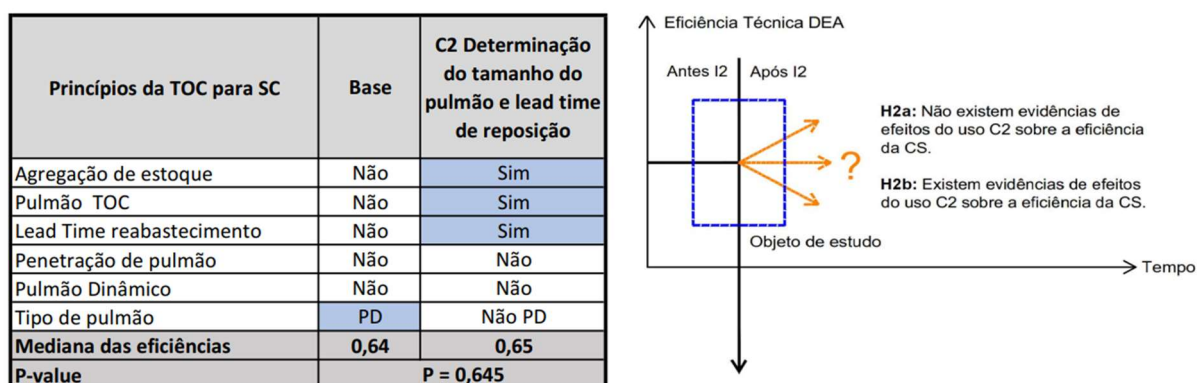
Figura 10 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C1



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 11 apresenta a comparação entre o cenário base e o cenário 2, no qual são aplicados os princípios de agregação de estoque no nível mais elevado da cadeia, o pulmão de TOC e o *lead time* de reabastecimento, sem a utilização de previsão de demanda para o pulmão. No entanto, a diferença entre o cenário base e o cenário 2 não mostra significância estatística, conforme o teste de *Wilcoxon* ($P > 0,05$). Isso indica que não é possível afirmar que houve uma redução ou aumento nas medianas das eficiências, uma vez que o valor de P encontrado foi maior que 0,05. Desse modo, a hipótese confirmada foi de que não existem evidências de efeitos do uso C2 sobre a eficiência da CS (H2a).

Figura 11 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C2

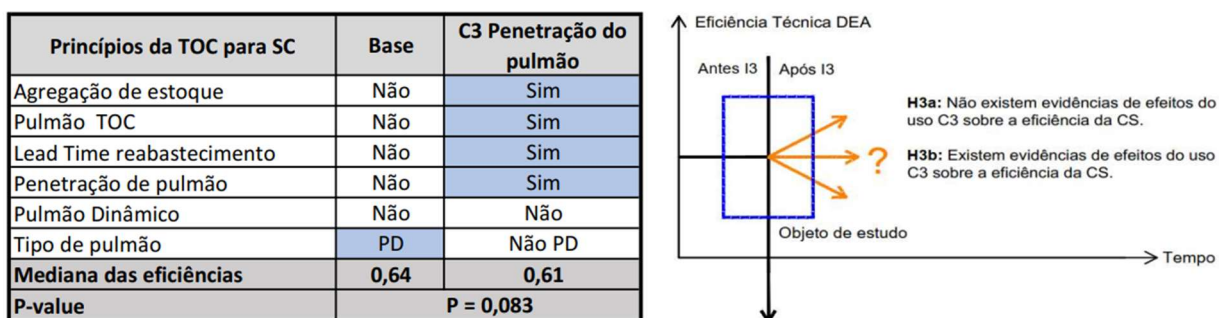


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 12 pode ser analisada a comparação entre o cenário de base e o cenário 3, em que foram utilizados os princípios da TOC como agregação de estoque, pulmão de TOC, *lead time* de abastecimento e penetração de pulmão. No entanto, o pulmão não foi baseado em previsão de demanda. A análise estatística foi realizada

por meio do teste de *Wilcoxon*, e a diferença entre o cenário base e o cenário 3 não mostra significância estatística os resultados não apresentaram significância estatística. Com um valor de P maior que 0,05, não é possível afirmar que houve uma redução das eficiências. Sendo assim, a hipótese confirmada foi de que não existem evidências de efeitos do uso C3 sobre a eficiência da CS (H3a).

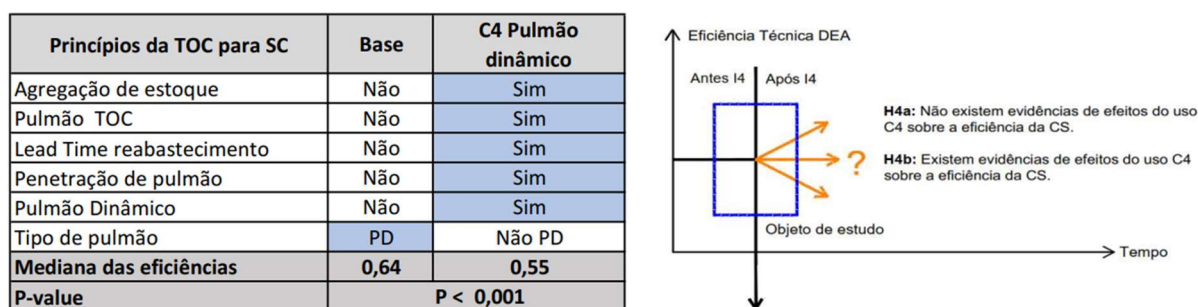
Figura 12 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C3



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 13 apresenta a comparação entre o cenário de base e o cenário 4, que utiliza os princípios da TOC que incluem agregação de estoque, pulmão de TOC, *lead time* de reabastecimento, penetração de pulmão e pulmão dinâmico, exceto a previsão de demanda. Por meio do teste de *Wilcoxon*, foi constatada uma redução significativa na mediana da eficiência da Cadeia de Suprimentos após a simulação da intervenção do cenário 4, que reduziu de 64% para 55%. O valor de P foi menor que 0,05 o que confirma a hipótese de que existem evidências de efeitos do uso C4 sobre a eficiência da CS (H4b). Ou seja, foram observados efeitos negativos, diferentemente dos efeitos esperados (positivos).

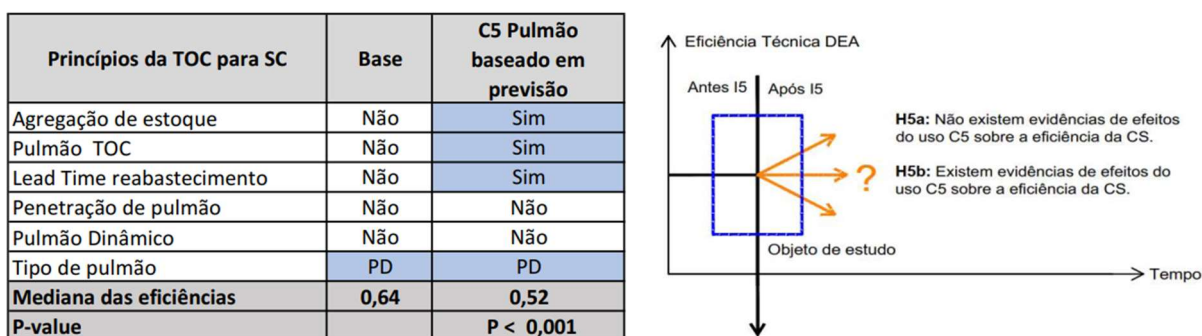
Figura 13 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C4



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 14 apresenta uma análise comparativa entre o cenário de referência e o cenário 5. O cenário 5 é caracterizado pela utilização de estratégias como a agregação de estoque, o pulmão de TOC, o *lead time* de reabastecimento e é baseado em previsões de demanda. Para avaliar os impactos dessa intervenção, foi realizado um teste de *Wilcoxon*, cujos resultados apontaram uma redução significativa na mediana da eficiência da Cadeia de Suprimentos após a implementação do cenário 5. Especificamente, a mediana das eficiências reduziu de 64% para 52%. Então, como o valor de P foi menor do que 0,001, a hipótese de que existem evidências de efeitos do uso C5 sobre a eficiência da CS foi confirmada (H5b). Ou seja, foram observados efeitos negativos, diferentemente dos efeitos esperados (positivos).

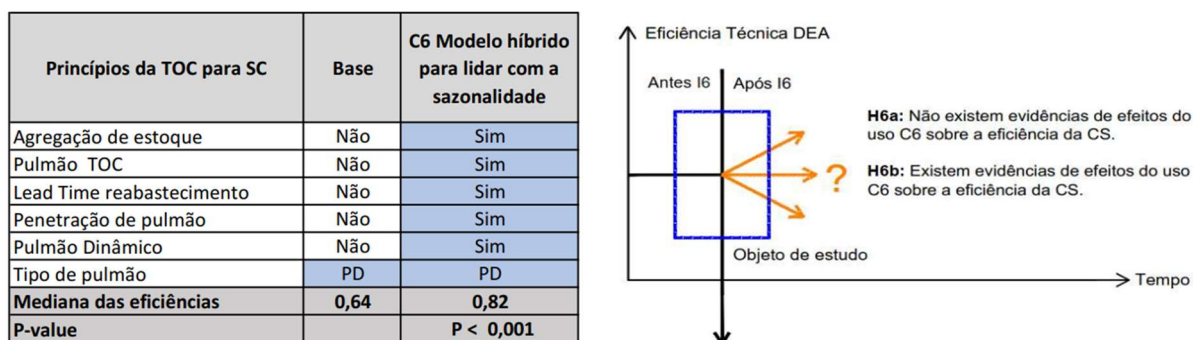
Figura 14 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C5



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 15 apresenta a comparação entre o cenário base e o cenário 6. O cenário 6 é caracterizado pelo uso abrangente dos princípios da Teoria das Restrições (TOC), como a agregação de estoque, o pulmão de TOC, o *lead time* de reabastecimento, a penetração de pulmão e o pulmão dinâmico, e baseia-se em previsões de demanda. Ao realizar o teste de *Wilcoxon*, observou-se um significativo aumento na mediana da eficiência da Cadeia de Suprimentos após a implementação do cenário 6. Mais precisamente, a eficiência aumentou de 64% para 82%. O valor de P menor que 0,001 confirma a hipótese de que existem evidências de efeitos do uso C6 sobre a eficiência da CS (H6b). Estes resultados destacam a eficácia dessas estratégias no aprimoramento do desempenho da Cadeia de Suprimentos.

Figura 15 - Comparação entre as eficiências do cenários base e C6



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados das hipóteses, nota-se que dos seis cenários comparados, quatro deles C1, C4, C5 e C6 apresentaram valores de p inferiores a 0,05, e, portanto, obtiveram significância estatística para não rejeitar a hipótese de que os cenários interferiram na eficiência da CS. Os cenários C2 e C3 obtiveram valores de p superiores a 0,05, e desse modo, não obtiveram significância estatística para rejeitar a hipótese de que as intervenções provocadas em seus cenários interferiram na eficiência da CS.

Tabela 5 - Síntese do resultado das hipóteses

Cenário	Comparação das medianas das eficiências padrão	Hipóteses formuladas	Significância <i>p-value</i>	Resultados das hipóteses
C1	Base = 0,64	H1a: Não existem evidências de efeitos do uso C1 sobre a eficiência da CS.	$p < 0,001$	Rejeitar
	C1 = 0,35	H1b: Existem evidências de efeitos do uso C1 sobre a eficiência da CS.		Não rejeitar
C2	Base = 0,64	H2a: Não existem evidências de efeitos do uso C2 sobre a eficiência da CS.	$p < 0,645$	Não rejeitar
	C2 = 0,65	H2b: Existem evidências de efeitos do uso C2 sobre a eficiência da CS.		Rejeitar
C3	Base = 0,64	H3a: Não existem evidências de efeitos do uso C3 sobre a eficiência da CS.	$p < 0,083$	Não rejeitar
	C3 = 0,61	H3b: Existem evidências de efeitos do uso C3 sobre a eficiência da CS.		Rejeitar
C4	Base = 0,64	H4a: Não existem evidências de efeitos do uso C4 sobre a eficiência da CS.	$p < 0,001$	Rejeitar
	C4 = 0,55	H4b: Existem evidências de efeitos do uso C4 sobre a eficiência da CS.		Não rejeitar
C5	Base = 0,64	H5a: Não existem evidências de efeitos do uso C5 sobre a eficiência da CS.	$p < 0,001$	Rejeitar
	C5 = 0,52	H5b: Existem evidências de efeitos do uso C5 sobre a eficiência da CS.		Não rejeitar
C6	Base = 0,64	H6a: Não existem evidências de efeitos do uso C6 sobre a eficiência da CS.	$p < 0,001$	Rejeitar
	C6 = 0,82	H6b: Existem evidências de efeitos do uso C6 sobre a eficiência da CS.		Não rejeitar

P - value < 0,05

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 6 apresenta uma comparação entre o cenário base e seis diferentes cenários, denominados 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Tabela 6 - Resumo dos resultados

Princípios da TOC para CS	Base	C1 Agregação de estoque no nível mais alto da CS	C2 Determinação do tamanho do pulmão e <i>lead time</i> de reposição	C3 Penetração do pulmão	C4 Pulmão dinâmico	C5 Pulmão baseado em previsão	C6 Modelo híbrido para lidar com a sazonalidade
Agregação de estoque	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Pulmão TOC	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Lead time</i> reabastecimento	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Penetração de pulmão	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Pulmão Dinâmico	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim
Tipo de pulmão	PD	PD	Não PD	Não PD	Não PD	PD	PD
Mediana das eficiências	0,64	0,35	0,65	0,61	0,55	0,52	0,82
P-value	-	P < 0,001	P = 0,645	P = 0,083	P < 0,001	P < 0,001	P < 0,001

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados observados sugerem que a utilização parcial dos princípios da TOC para a CS e a desconsideração da previsão de demanda podem contribuir para redução da eficiência da CS. Essa redução de eficiência foi evidenciada nos cenários 1, 2, 3, 4 e 5. No entanto, no cenário 6, observou-se um aumento da eficiência à medida que todos os princípios indicados pela TOC para as CSs foram utilizados e o pulmão foi baseado em previsão de demanda.

5 DISCUSSÃO

A principal contribuição deste estudo é destacar a importância da aplicação integrada dos princípios da TOC, considerando a previsão de demanda, para obter impactos positivos na eficiência das CSs. Foi observado que a aplicação parcial de princípios da TOC pode não gerar resultados significativos e, em alguns casos, pode até reduzir a eficiência das CSs. Além disso, evidenciou-se que a aplicação exclusiva dos princípios da TOC, sem considerar a previsão de demanda, não resulta em aumento da eficiência das CSs.

Conforme apontado na Revisão da Sistemática da Literatura, diversas pesquisas buscaram simular a utilização dos princípios da TOC nas CSs (AZADNIA; GHORBANI; ARABZAD, 2015; COSTAS et al., 2015; LENG; CHEN, 2012; MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; WU; TSAI, 2008a). No entanto, são escassos os estudos que consideram a aplicação conjunta dos cinco princípios da TOC (JIANG et al., 2013; LENG; CHEN, 2012; MARGARETHA; BUDIASTUTI; SAHRONI, 2017; WU; TSAI, 2008a; WU et al., 2010). Além disso, nenhum dos estudos foi específico ao afirmar que os princípios da TOC devem ser utilizados de maneira concomitante e integrada, considerando a previsão de demanda. Adicionalmente, nenhum dos estudos avaliou a eficiência das CSs após a realização da simulação.

Além disso, diversas pesquisas evidenciaram as vantagens da aplicação da TOC na CS como uma estratégia para obter vantagem competitiva, mas também desconsideraram a avaliação de eficiência resultante dessa abordagem. Por exemplo, Modi, Lowalekar e Bhatta (2019) aplicaram a TOC na maior empresa de fabricação de fechaduras da Índia ao longo de sete anos, identificando e eliminando as principais restrições na CS. Wu et al. (2013) apresentaram que a TOC-SCRS é uma abordagem viável e eficaz para melhorar o desempenho da CS, permitindo reduzir os estoques, os custos de lead-time e de transporte, além de aumentar a precisão das previsões e o atendimento ao cliente. Além disso, Kortabarria et al. (2018) comprovaram que, ao aplicar a TOC, uma empresa conseguiu aumentar a visibilidade na CS e reduzir seu nível de estoque em 52,53%, ao mesmo tempo, em que aumentou o consumo de materiais em 8,7% sem comprometer o alto nível de serviço oferecido aos clientes.

Essas pesquisas destacam os benefícios da TOC na CS, tanto em termos de redução de custos quanto de melhoria no atendimento ao cliente.

Os estudos que investigaram a eficiência das CSs em diferentes setores da indústria por meio de análise de casos e modelagem desenvolveram métodos e modelos para medir o desempenho das CSs e identificar áreas de melhoria. As descobertas evidenciam a relevância da cooperação entre os parceiros da CS, a identificação e eliminação de indicadores de desempenho restritivos, a utilização de métricas baseadas em TOC para avaliar o desempenho financeiro das CSs e a avaliação do impacto das medidas relacionadas a estoques e ativos nas receitas e lucros das empresas. Dentre os estudos, que medem a eficiência da CS, encontrados na revisão da literatura, distingue-se: Azadeh e Alem (2010) que conduziram um estudo em 10 fornecedores e desenvolveram um método de análise para medir a eficiência desses fornecedores. Ainapur, Singh e Vittal (2011) que avaliaram o desempenho de 56 fundições indianas. Hilmola (2020) que analisou os dados de 72 empresas do setor de produtos para tecnologia da informação. Pourbabagol et al. (2023), foi realizada uma análise da eficiência de vinte das maiores empresas de laticínios do Irã, utilizando o modelo FNDEA — SBM.

Este estudo contribui para avançar o conhecimento ao abordar os obstáculos enfrentados pela TOC no que diz respeito à sua aceitação e adoção como estratégia para aumentar a eficiência das CSs. Os resultados obtidos destacam que, quando os princípios da TOC são considerados juntamente com a previsão de demanda, é possível aumentar a eficiência da CS. No entanto, a implementação da TOC tem enfrentado desafios devido à falta de compreensão dos seus fundamentos e à resistência das organizações em adotar novas abordagens (NAOR; BERNARDES; COMAN, 2013; PACHECO; ANTUNES JUNIOR; DE MATOS, 2021).

Implantar apenas alguns passos da Teoria TOC em uma CS pode piorar sua eficiência por diversas razões. Primeiramente, a TOC é baseada no princípio de melhorar a eficiência global do sistema, identificando e eliminando gargalos. Ao implantar apenas alguns passos da TOC, pode-se acabar desbalanceando o sistema e criando novos gargalos, já que as interações complexas entre os diferentes componentes da cadeia podem ser afetadas. Além disso, a TOC também enfatiza a importância da sincronização das atividades ao longo da cadeia, o que é difícil de ser alcançado quando apenas alguns passos são implementados. Portanto, é essencial

implementar a TOC como um sistema completo, a fim de maximizar a eficiência da cadeia de suprimentos como um todo.

Implementar todos os passos da TOC sem considerar a previsão de demanda pode piorar a eficiência da cadeia de suprimentos, pois a previsão de demanda é um fator crucial para o planejamento e controle adequados das operações. A falta de uma previsão precisa pode resultar em problemas como excesso ou falta de estoque, o que pode levar a atrasos na entrega, custos elevados e insatisfação dos clientes. Além disso, a previsão de demanda é essencial para identificar gargalos e tomar decisões estratégicas relacionadas à capacidade, investimentos e alocação de recursos. Portanto, ignorar a previsão de demanda reduz a capacidade de resposta da cadeia de suprimentos e compromete sua eficiência global.

A pesquisa realizada apresenta diversas contribuições para as empresas. Primeiramente, como uma ferramenta útil para auxiliar na tomada de decisões estratégicas, principalmente, no que diz respeito à gestão adequada das CSs. Por meio da utilização de medidas de desempenho, é possível ter uma visão clara e precisa dos processos internos da CS, permitindo uma melhor alocação de recursos e a identificação de oportunidades de melhoria. Outra contribuição importante é a utilização de modelos de simulação na CS. Esses modelos oferecem vantagens significativas, como a representação precisa de atividades complexas e a facilitação da tomada de decisões relacionadas aos níveis de estoque, remessa e fornecimento. Isso possibilita que as empresas avaliem diferentes cenários e estratégias antes de executá-las, o que reduz os riscos e aumenta as chances de sucesso. Por fim, a pesquisa contribui para uma melhor compreensão sobre a aplicação dos princípios da TOC em CS. Além de apresentar uma abordagem para avaliar o desempenho e a eficácia das estratégias nessa área, o que é essencial para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de melhores práticas na gestão de CSs

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho consistiu em avaliar os efeitos proporcionados pela utilização dos princípios da TOC indicados para a CS, na eficiência de uma CS de uma empresa química. A avaliação das medianas das eficiências dos seis cenários em comparação ao cenário base revelou um aumento significativo na eficiência da Cadeia de Suprimentos quando os cinco princípios da TOC para a Cadeia de Suprimentos foram implementados simultaneamente, considerando também a previsão de demanda. Anteriormente, a mediana de eficiência no cenário base era de 64%, no entanto, após a simulação da aplicação dos cinco princípios da TOC, a mediana aumentou para 82%.

Este trabalho teve como objetivos específicos identificar a quantidade de DMUs que apresentam uma eficiência superior, ou seja, pertencentes ao terceiro quartil, em cada cenário analisado, bem como testar as hipóteses formuladas para avaliar a relação entre as intervenções propostas em cada cenário e a eficiência da Cadeia de Suprimentos. Os resultados obtidos por meio da análise dos quartis mostraram que os cenários 1, 3, 4 e 5 apresentaram uma redução na eficiência em relação ao cenário base, enquanto o cenário 6 demonstrou um aumento na eficiência. Esses resultados também foram comprovados pelo teste de hipótese realizado. No entanto, apenas no cenário 2 foi observado um possível aumento na eficiência conforme a análise dos quartis, porém esse aumento não apresentou significância estatística no teste de hipótese. Além disso, ao analisar os dados, constatou-se que os escores de eficiência das outras DMUs neste cenário estão concentrados no segundo quartil, indicando um desempenho inferior em relação aos demais. No que diz respeito ao teste de hipótese, foi confirmada a redução da eficiência da CS nos cenários 1, 4 e 5. Os cenários 2 e 3 não apresentaram significância estatística, enquanto no cenário 6, foi confirmado o aumento de eficiência. Por fim, procurou-se caracterizar como os princípios da TOC impactaram na eficiência da CS. Os resultados sugerem que a utilização parcial dos princípios da TOC para a CS, bem como a falta de consideração da previsão de demanda, pode gerar uma redução na eficiência.

Esta pesquisa apresenta contribuições tanto para a academia quanto para as empresas, fornecendo um embasamento teórico para a aplicação dos princípios da TOC na Cadeia de Suprimentos. A relevância desta pesquisa para a academia está na contribuição para preencher a lacuna de estudos que avaliam e descrevem os

resultados da aplicação dos princípios da TOC na Cadeia de Suprimentos. A utilização de modelos de simulação fundamentados em dados reais permite uma representação precisa das atividades complexas da CS, fornecendo *insights* para os formuladores de estratégias. Além disso, essa abordagem contribui para o avanço do conhecimento na área, buscando superar as dificuldades de aceitação da TOC como estratégia para o aumento da eficiência. Enquanto para as empresas, essa pesquisa oferece uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisões relacionadas aos estoques, permitindo aprimorar as operações e otimizar os resultados.

Ressalta-se que este estudo apresenta algumas limitações significativas. A primeira, está relacionada à restrição das comparações de eficiência apenas aos cenários simulados na pesquisa conduzida por Stefano (2020). Além disso, a quantidade limitada de dados disponíveis para serem utilizados como variáveis do modelo também é uma limitação importante. Para obter uma análise abrangente e robusta, seria desejável investigar e testar outros cenários, a fim de avaliar o comportamento da eficiência em diferentes contextos. Dessa forma, seria possível obter uma visão precisa e abrangente sobre a eficiência do sistema em estudo.

Considerando a importância da gestão adequada das CSs para a construção da vantagem competitiva sustentável das empresas, é essencial desenvolver pesquisas futuras que avaliem a eficiência das CSs com base em dados reais. Ao embasar as decisões dos gestores em evidências concretas, tais pesquisas podem contribuir para a promoção de uma gestão mais eficiente das CSs, garantindo assim a utilização adequada de medidas de desempenho. A falta de estudos que avaliem a eficiência na CS pode levar a decisões equivocadas por parte das organizações, tornando-se um obstáculo para o alcance de uma vantagem competitiva duradoura. Portanto, é necessário realizar pesquisas que considerem os problemas e adversidades enfrentados pelas Cadeias de Suprimentos atualmente, buscando medir sua eficiência e oferecendo subsídios para aprimorar sua gestão.

REFERÊNCIAS

AINAPUR, B.; SINGH, D. R.; VITTAL, D. P. R. TOC Approach for Supply Chain Performance Enhancement. **International Journal of Business Research and Management**, v. 2, n. 4, p. 163–178, 2011a.

AINAPUR, B.; SINGH, R. K.; VITTAL, P. R. Strategic Study on Enhancement of Supply Chain Performance. **International Journal of Business Insights & Transformation**, v. 5, n. 1, p. 98–106, 2011b.

AWASTHI, A.; GRZYBOWSKA, K. Logistics Operations, Supply Chain Management and Sustainability. **Logistics Operations, Supply Chain Management and Sustainability**, p. 15–30, 2014.

AZADEH, A.; ALEM, S. M. A flexible deterministic, stochastic and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: Simulation analysis. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 7438–7448, 2010.

AZADNIA, A.; GHORBANI, M.; ARABZAD, S. Research advances in industrial engineering. **Research Advances in Industrial Engineering**, p. 1–118, 2015.

BARNEY, J. B.; CLARK, D. N. Resource-Based Theory Creating and Sustaining Competitive Advantages. **Oxford University Press**, p. 327, 2007.

BARRATT, M.; CHOI, T. Y.; LI, M. Qualitative case studies in operations management: Trends, research outcomes, and future research implications. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 4, p. 329–342, 2011.

BASHIRI, M.; TABRIZI, M. M. Supply chain design: A holistic approach. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 688–693, 2010.

BLACKSTONE, J. H. Theory of constraints - A status report. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 6, p. 1053–1080, 2001.

BOYD, L.; GUPTA, M. Constraints management: What is the theory? **International Journal of Operations and Production Management**, v. 24, n. 3–4, p. 350–371, 2004.

BOWLIN, William F.. Measuring Performance: an introduction to data envelopment analysis (dea). **The Journal Of Cost Analysis**, v. 15, n. 2, p. 3–27, nov. 1998. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08823871.1998.10462318>.

CAMANHO, A.S.; ZANELLA, A.; MOUTINHO, V. Benefit-of-the-Doubt Composite Indicators and Use of Weight Restrictions. In: **Advanced Mathematical Methods for Economic Efficiency Analysis. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**, vol 692. Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29583-6_6

CAUCHICK-MIGUEL, P. A. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

ÇELEN, A. The effect of merger and consolidation activities on the efficiency of electricity distribution regions in Turkey. **Energy Policy**, v. 59, p. 674–682, 2013.

CHANG, S.-H.; CHUANG, C.; LI, R.-K. Applying TOC Replenishment method to Improve Production Performance for TFT-LCD Industry. **Taylor & Francis**, 2007a.

CHANG, S.-H.; CHUANG, C.; LI, R.-K. Applying TOC Replenishment method to Improve Production Performance for TFT-LCD Industry. **Taylor & Francis**, 2007b.

CHANG, Y. C.; CHANG, K. H.; HUANG, C. W. Integrate market demand forecast and demand-pull replenishment to improve the inventory management effectiveness of wafer fabrication. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, n. 4, p. 617–636, 2014.

CHANG, Y. C.; CHANG, K. H.; SUN, W. C. Enhancement of inventory management for the wafer manufacturing industry by combining market demand forecast and demand-pull replenishment. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 4, p. 948–963, 2015.

CHIOU, C. C. et al. **Applying lean and TOC to improvement delivery performance for machine tool manufacturers**. 2014 IEEE ICHIOU, C. C. et al. Applying lean and TOC to improvement delivery performance for machine tool manufacturers 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2014. Anais...Department of Industrial Eng. **Anais**...Department of Industrial Engineering and Management, Dayeh University, Chang-hua, Taiwan: IEEE Computer Society, 2014 Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84988306077&doi=10.1109%2FIEEM.2014.7058779&partnerID=40&md5=c93b2c9f799e1ef69631c20330f964b5>>

CHOI, T. Y.; WACKER, J. G. Theory building in the om/scm field: Pointing to the future by looking at the past. **Journal of Supply Chain Management**, v. 47, n. 2, p. 8–11, 2011.

COELLI, T. J. et al. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2a. ed. New York: Springer, 2005.

COSTAS, J. et al. Applying Goldratt's theory of constraints to reduce the bullwhip effect through agent-based modeling. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 4, p. 2049–2060, 2015.

CUI, N.; LENG, K.; WENDY, T. Rapid response with TOC methodology. **5th International Conference Service Systems and Service Management - Exploring Service Dynamics with Science and Innovative Technology, ICSSSM'08**, 2008.

DAVIM, J. P. Research advances in industrial engineering. **Research Advances in Industrial Engineering**, p. 1–118, 2015.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR, J. A. V. **Design Science Research: A Method for Scientific and Technology Advancement**. Springer, 2015.

EUGENIA, K.; BARRAZA, M.; JUUSO, E. HANDBOOK OF SIMULATION Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice Related papers Reconfigurable Hardware-Based Simulation Modeling of Flexible Manufacturing Systems Subhash Sarin Production Optimization on PCB Assembly Lines Using. 1998.

FAGUNDES, R. et al. A Real Application of the Theory of Constraints to Supply Chain Management in Brazil. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 7, n. 2, p. 81–100, 2010.

FATHI, A.; SAEN, R. F. Sustainability evaluation of transportation supply chains by common set of weights-network DEA and Shannon's entropy in the presence of zero inputs. **Environment, Development and Sustainability**, n. 0123456789, 2023.

FILHO, T. A. R. et al. A new approach for decision making in distribution supply chains: A theory of constraints perspective. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 25, n. 2, p. 266–282, 2016.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica** FortalezaUEC, , 2002.

GERHARD, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa. Série Educação a Distância**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta**. São Paulo: Nobel, 2002.

GOLDRATT, E. M. **A síndrome do palheiro: garimpando informação num oceano de dados**. São Paulo: Educator, 1991.

GOLDRATT, E. M. **Isn't It Obvious?** 1. ed. Great Barrington: The North River Press Publishing Corporation, 2009.

GUPTA, M. Constraints management - Recent advances and practices. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 647–659, 2003.

GUPTA, M.; ANDERSEN, S. Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 13, p. 4659–4675, 2018a.

GUPTA, M.; ANDERSEN, S. Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 13, p. 4659–4675, 2018b.

GUPTA, M. C.; ANDERSEN, S. S. Revisiting local TOC measures in an internal supply chain : A note Revisiting local TOC measures in an internal supply chain : a note. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5363–5371, 2012a.

GUPTA, M. C.; ANDERSEN, S. S. Revisiting local TOC measures in an internal supply chain: A note. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5363–5371, 2012b.

GUPTA, M. C.; BOYD, L. H. Theory of constraints: A theory for operations management. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 28, n. 10, p. 991–1012, 2008.

GUPTA, M.; SNYDER, D. Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 13, p. 3705–3739, jul. 2009.

HILMOLA, O.-P. Role of inventory and assets in shareholder value creation. **Expert Systems with Applications: X**, v. 5, 2020a.

HILMOLA, O. P. Role of inventory and assets in shareholder value creation. **Expert Systems with Applications: X**, v. 5, p. 100027, 2020b.

HORNG HUEI, W. et al. A study of supply chain replenishment system of theory of constraints for thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) plants. **African Journal of Business Management**, v. 5, n. 21, p. 8617–8633, 2011.

HUNG, K. T. et al. Decision support system for inventory management by TOC demand-pull approach. **ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference) Proceedings**, p. 23–26, 2010.

JASINAVIČIUS, R.; JASINAVIČIUS, N. Strengthening enterprise competitiveness by synchronizing supply chain. **Business: Theory and Practice**, v. 12, n. 4, p. 341–347, 2011.

JIANG, X.-Y.; WU, H.-H. Optimization of setup frequency for TOC supply chain replenishment system with capacity constraints. **Neural Computing and Applications**, v. 23, n. 6, p. 1831–1838, 2013.

JIANG, X. et al. Diverse replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems with capacity constraints. **International Journal of Modelling, Identification and Control**, v. 19, n. 3, p. 248–256, 2013.

KOH, S. C. L.; GUNASEKARAN, A. Performance prediction using supply chain uncertainty modelling. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 2, n. 3, p. 279–293, 2006.

KORTABARRIA, A. et al. Material management without forecasting: From MRP to demand driven MRP. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 11, n. 4, p. 632–650, 2018.

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: A research method to production engineering. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LACERDA, D. P.; RODRIGUES, L. H.; SILVA, A. C. DA. Uma abordagem de avaliação de processos baseados no mundo dos custos para processos no mundo dos ganhos em instituições de ensino superior. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 4, p.

584–597, 2009.

LAKATOS, E. M.; MARKONI, M. DE A. **Methodology of scientific work: basic procedures, bibliographic research, project and report, publications and scientific works**. São Paulo: Atlas/GEN Group, 2010.

LEE, Y. H. et al. Supply chain model for the semiconductor industry in consideration of manufacturing characteristics. **Production Planning and Control**, v. 17, n. 5, p. 518–533, 2006.

LENG, K.; CHEN, X. A genetic algorithm approach for TOC-based supply chain coordination. **Applied Mathematics and Information Sciences**, v. 6, n. 3, p. 767–774, 2012.

LENG, K.; WANG, Y. **Research on Capacity Allocation in a Supply Chain System Based on TOC**. Berlin: 2012. v. 140 LNEE

LENG, K.; WANG, Y. **Research on Capacity Allocation in a Supply Chain System Based on TOC** **2011 International Conference on Electronic Engineering, Communication and Management, EECM 2011** School of Logistics and Engineering Management, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China, 2012b. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84863030742&doi=10.1007%2F978-3-642-27296-7_79&partnerID=40&md5=8928c299fbc53504b1a6d9625b33072b>

LIN, L. C.; LI, T. S. An integrated framework for supply chain performance measurement using six-sigma metrics. **Software Quality Journal**, v. 18, n. 3, p. 387–406, 2010.

LIU, J. S. et al. Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey. **Omega (United Kingdom)**, v. 41, n. 1, p. 3–15, 2013.

MARGARETHA; BUDIASTUTI, D.; SAHRONI, T. R. Application of theory of constraint supply chain replenishment system in fast moving consumer goods company. **International Journal of Supply Chain Management**, v. 6, n. 4, p. 167–175, 2017.

MEHRA, S.; INMAN, R. A.; TUIITE, G. A simulation-based comparison of TOC and traditional accounting performance measures in a process industry. **Satish. Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 26, n. 3, p. 328–342, 2005.

MELÃO, N.; PIDD, M. Use of business process simulation: A survey of practitioners. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 1, p. 2–10, jan. 2003.

MELLO, J. et al. **CURSO DE ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS**. Pesquisa Operacional. **Anais...Gramado: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2005

MICLO, R. et al. MRP vs. Demand-driven MRP: Towards an objective comparison. **Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IEEE IESM 2015**, n. October, p. 1072–

1080, 2016.

MODI, K.; LOWALEKAR, H.; BHATTA, N. M. K. Revolutionizing supply chain management the theory of constraints way: a case study. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 11, p. 3335–3361, 2019.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Systematic Literature Review. In: **Desing Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. New York: Springer International Publishing, 2015.

NAKANO, D. N. Métodos de pesquisa adotados na engenharia de produção e gestão de operações. In: **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Elsevier, 2010.

NAOR, M.; BERNARDES, E. S.; COMAN, A. Theory of constraints: is it a theory and a good one? **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 2, p. 542–554, 15 jan. 2013.

OPOKU, R. K.; ABBOAH, C. K. B.; OWUSU, R. T. Inventory management strategies of food manufacturing industries in a developing economy. **Logforum**, v. 17, n. 1, p. 37–48, 2021.

ORUE, A. et al. Theory of constraints case study in the make to order environment. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 14, n. 1, p. 72–85, 2021.

PACHECO, D. A. DE J.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V.; DE MATOS, C. A. The constraints of theory: What is the impact of the Theory of Constraints on Operations Strategy? **International Journal of Production Economics**, v. 235, p. 107955, 2021.

PARSAEI, Z.; NAHAVANDI, N.; ELMEKKAWY, T. Buffer size determination for drum-buffer-rope controlled supply chain networks. **International Journal of Agile Systems and Management**, v. 5, n. 2, p. 151–163, 2012.

PAWLEWSKI, P. et al. Multiagent approach for supply chain integration by distributed production planning, scheduling and control system. **Advances in Soft Computing**, v. 50, p. 29–37, 2009.

PIRAN; LACERDA; CAMARGO. **Análise e Gestão da Eficiência**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

PIRAN, F. S. et al. Internal benchmarking to assess the cost efficiency of a broiler production system combining data envelopment analysis and throughput accounting. **International Journal of Production Economics**, v. 238, n. November 2020, p. 108173, 2021.

PONTE, B. et al. Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis. **Decision Support Systems**, v. 86, p. 83–94, 2016.

POURBABAGOL, H. et al. A new fuzzy DEA network based on possibility and necessity measures for agile supply chain performance evaluation: A case study. **Expert Systems with Applications**, v. 220, n. May 2021, p. 119552, 2023.

PTAK, C. A.; SCHRAGENHEIM, E. **ERP: Tools, Techniques, and Applications for Integrating the Supply Chain, Second Edition**. 1. ed. Flórida: CRC Press, 2004.

PUCHE, J. et al. Systemic approach to supply chain management through the viable system model and the theory of constraints. **Production Planning and Control**, v. 27, n. 5, p. 421–430, 2016.

PUCHE, J. et al. The effect of supply chain noise on the financial performance of Kanban and Drum-Buffer-Rope: An agent-based perspective. **Expert Systems with Applications**, v. 120, p. 87–102, 2019.

RICKETTS, J. A. Teoria das Restrições em serviços profissionais, científicos e técnicos. In: **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 859–878.

SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; THORNHILL, A. **Research methods for business students**. 6. ed. Harlow: Pearson, 2012.

SARKIS, J.. Preparing Your Data for DEA. In: Zhu, J., Cook, W.D. **Modeling Data Irregularities and Structural Complexities in Data Envelopment Analysis**. Springer, Boston, 2007. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71607-7_17

SCHRAGENHEIM, A. Managing Distribution According to TOC Principles. p. 1–15, 2007.

SIMATUPANG, T. M.; WRIGHT, A. C.; SRIDHARAN, R. Applying the theory of constraints to supply chain collaboration. **Supply Chain Management**, v. 9, n. 1, p. 57–70, 2004.

SMITH, C.; PTAK, C. Integrated Supply Chain: Beyond MRP — How Actively Synchronized Replenishment (ASR) Will Meet the Current Materials Synchronization Challenge. In: **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 303–332.

SMRITI, T. N.; KHAN, M. H. R. Efficiency Analysis of Manufacturing Firms Using Data Envelopment Analysis Technique. **Journal of Data Science**, v. 16, n. June, p. 69–78, 2021.

STEFANO, G. **DOESTHE THEORY OF CONSTRAINTS IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT REALLY MATTER? An Assessment of the Impactsof the TOC in the Redesignof a Supply Chain**. São Leopoldo: 2020.

STEFANO, G. et al. The impacts of inventory in transfer pricing and net income: Differences between traditional accounting and throughput accounting. **British Accounting Review**, 2021.

TABRIZI, M. M. et al. Coordinating manufacturer and retailer using a novel robust discount scheme. **International Journal of Applied Decision Sciences**, v. 5, n. 3, p. 253, 2012.

TSOU, C.-M. On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic

inventory target level management: A theory of constraint perspective. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 7, p. 5204–5214, 2013a.

TSOU, C. M. On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic inventory target level management: A theory of constraint perspective. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 7, p. 5204–5214, 2013b.

VIEIRA, A. A. C. et al. Supply chain data integration: A literature review. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 19, n. July, p. 100161, 2020.

WANG, L. C. et al. Demand-pull replenishment model for hospital inventory management: A dynamic buffer-adjustment approach. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 24, p. 7533–7546, 2015.

WATSON, K.; POLITO, T. Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution environment. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 741–765, 2003.

WEN, C. L.; WEE, H. M.; WU, S. **Revisiting lean manufacturing process with vendor managed inventory system**. Proceedings of the 5th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, IEMI 2014. **Anais...2014** Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84928032462&doi=10.2991%2F978-94-6239-100-0_26&partnerID=40&md5=be406af0d6037b03d9650a6a2e403513>

WU, H.-H. et al. A Study of Theory of Constraints Supply Chain Replenishment System. **International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences**, v. 3, n. 3, p. 78–88, 2013.

WU, H.-H.; TSAI, T.-P. **An enhanced model for TOC Supply Chain Replenishment Systems under capacity constraint**. 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. **Anais...2008a**

WU, H. H. et al. A study of an enhanced simulation model for TOC supply chain replenishment system under capacity constraint. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 9, p. 6435–6440, 2010.

WU, H. H.; HUANG, H. H.; JENC, W. T. A study of the elongated replenishment frequency of TOC supply chain replenishment systems in plants. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5567–5581, 2012.

WU, H. H.; LEE, A. H. I.; TSAI, T. P. A two-level replenishment frequency model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint. **Computers and Industrial Engineering**, v. 72, p. 152–159, 2014.

WU, H. H.; TSAI, T. P. An enhanced model for TOC supply chain replenishment systems under capacity constraint. **Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, IEEE/SOLI 2008**, v. 2, p. 2683–2688, 2008b.

YIN, R. K. **Estudo de caso : planejamento e métodos**. Porto Alegre: 2015. v. 5 ed.

APÊNDICE A – PROTOCOLO DE BUSCA RSL 1

Protocolo para Revisão Sistemática da Literatura 1	
Framework Conceitual	Esta RSL é orientada pelos conceitos que a conduziram. Pode incluir um resumo da situação-problema que motiva a pesquisa, bem como os conceitos e resultados previamente conhecidos.
Contexto	Empresarial e acadêmico
Horizonte	
Correntes Teóricas	-
Idiomas	Inglês
Questão de Revisão	Quais os efeitos da aplicação dos princípios da TOC sobre a Cadeia de Suprimentos em termos de eficiência?
Critérios de Busca	
Critérios de Inclusão:	Trabalhos que conduzam estudos de caso e simulações.
Critérios de Exclusão:	Estudos: (i) Duplicados; (ii) Irrelevantes ao tema de pesquisa; (iii) Que não apresentam os resultados da aplicação da TOC na CS; (iv) Que conduzam revisões literárias, modelos, métodos e frameworks.
Termos de Busca:	“Theory of Constraints” AND “Supply Chain”
Fontes de Busca:	
Base de Dados:	EBSCOHost Scopus ProQuest

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE B – PROTOCOLO DE BUSCA RSL 2

Protocolo para Revisão Sistemática da Literatura 2	
Framework Conceitual	Esta RSL é orientada pelos conceitos que a conduziram. Pode incluir um resumo da situação-problema que motiva a pesquisa, bem como os conceitos e resultados previamente conhecidos.
Contexto	Empresarial e acadêmico
Horizonte	
Correntes Teóricas	-
Idiomas	Inglês
Questão de Revisão	Quais os métodos são utilizados para medir a eficiência das Cadeias de Suprimentos?
Critérios de Busca	
Critérios de Inclusão:	Trabalhos que conduzam estudos de caso e simulações.
Critérios de Exclusão:	Estudos: (i) Duplicados; (ii) Irrelevantes ao tema de pesquisa; (iii) Que não apresentam os resultados da aplicação da TOC na CS; (iv) Que conduzam revisões literárias, modelos, métodos e frameworks.
Termos de Busca:	(i) "Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Efficiency"; (ii) "Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "Data Envelopment Analysis" (iii) "Theory of Constraints" AND "Supply Chain" AND "DEA".
Fontes de Busca:	
Base de Dados:	EBSCOHost Scopus Web of Science

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE C - MEDIANA DOS ESCORES DE EFICIÊNCIA

Cenário	Percentil 50° (Mediana)
Base	0,6405875840
C1	0,3542862060
C2	0,6517387250
C3	0,6057787890
C4	0,5535273730
C5	0,5245908770
C6	0,8233022710
