

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PAULO HENRIQUE AMORIM SANTOS

**MODELO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE
DESEMPENHO AUXILIADO POR TECNOLOGIAS DA
INDÚSTRIA 4.0 PARA A GESTÃO DE CADEIAS DE
SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS**

SÃO CARLOS - SP
2024

PAULO HENRIQUE AMORIM SANTOS

**MODELO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO AUXILIADO POR
TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA A GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS
SUSTENTÁVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dra. Fabiane Letícia Lizarelli

São Carlos - SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Amorim Santos, Paulo Henrique

Modelo de um sistema de medição de desempenho
auxiliado por tecnologias da Indústria 4.0 para a gestão
de cadeias de suprimentos sustentáveis / Paulo Henrique
Amorim Santos -- 2024.
102f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Fabiane Letícia Lizarelli

Banca Examinadora: Fabiane Letícia Lizarelli, Gilberto
Miller Devós Ganga, Glauco Henrique de Sousa Mendes,
Guilherme Francisco Frederico, Roberto Antonio
Martins, Sergio Eduardo Gouvêa da Costa

Bibliografia

1. Sistemas de medição de desempenho . 2. Indústria
4.0. 3. Gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis. I.
Amorim Santos, Paulo Henrique. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Paulo Henrique Amorim Santos, realizada em 26/06/2024.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Fabiane Letícia Lizarelli (UFSCar)

Prof. Dr. Gilberto Miller Devos Ganga (UFSCar)

Prof. Dr. Glauco Henrique de Sousa Mendes (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Antonio Martins (UFSCar)

Prof. Dr. Guilherme Francisco Frederico (UFPR)

Prof. Dr. Sergio Eduardo Gouvêa da Costa (UTFPR)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa, às nossas filhas, e aos meus pais.
Obrigado por sempre possibilitarem e motivarem meus estudos.
Não existem palavras que expressem suficientemente a minha gratidão a cada um de vocês.

AGRADECIMENTO

Grato à Universidade Federal de São Carlos, como entidade e aos seus colaboradores, por me proporcionarem a infraestrutura de suporte necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção pela oferta de disciplinas essenciais ao desenvolvimento deste trabalho, como “Elementos de Prática de Pesquisa”, “Planejamento e Gestão da Qualidade”, e “Gestão de Cadeias de Suprimentos”. Também reconheço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.

Minha imensa gratidão à minha orientadora, Prof.^a Dra. Fabiane L. Lizarelli, que acompanha o desenvolvimento desta tese desde seu início. Alguns de seus ensinamentos mais valiosos incluem a rigorosidade na escolha de constructos, o aprofundamento das discussões perante a fundamentação teórica, e o comprometimento com o alinhamento metodológico. O mais valioso, no entanto, foi a dedicação ao ensino, uma vez que me concedeu de seu tempo mesmo nos primeiros momentos de sua maternidade.

Sou agradecido pela mentoria do Prof. Dr. Roberto A. Martins em métodos de pesquisa científica, escrita acadêmica e docência no ensino superior. Em especial, por compartilhar de seus conhecimentos em sistemas de medição de desempenho, revisão sistemática da literatura e mapeamento científico.

Agradeço também aos outros professores que colaboraram com o desenvolvimento da tese, Prof.^a Dra. Rosane L. C. Alcantara e Prof. Dr. Guilherme F. Frederico. Com suas construtivas sugestões acredito que o trabalho ficou mais bem fundamentado, claro e objetivo. Ao Prof. Dr. Glauco H. de S. Mendes, agradeço por acompanhar o desenvolvimento do trabalho e me conceder suporte em todos os momentos que precisei.

Ao fim deste marco em minha jornada acadêmica, também gratifico a Prof.^a Dra. Mônica B. Kolichski por sua generosidade em me iniciar na pesquisa científica e a Prof.^a Dra. Izabel C. Zattar por me encaminhar à pesquisa na área de Engenharia de Produção. Aos Engenheiros Fabiana M. Dias, Gustavo B. Tenius, Michele C. Santos, e Rafael K. Ferreira, pela colaboração e eterna amizade.

Um obrigado especial à minha amada mãe, Elisabet de A. Santos, pelo suporte, dedicação e amor. Ao meu pai, José O. dos Santos, sou agradecido pela motivação e recursos, e sinto muito que não lhe foi permitido ver a conclusão desse curso.

Finalmente, cabe à minha esposa, Tassiane C. B. Santos, o meu maior agradecimento. Obrigado por interromper sua carreira, viajar comigo, dar à luz a Erica e a Veronica, e cuidar tão bem delas. Foram anos difíceis, que fortaleceram nosso casamento e engrandeceram nosso amor. Você sempre me suporta e me motiva. Sem seu afeto e companheirismo, a elaboração desta tese, em todo seu significado, não seria possível.

RESUMO

A gestão da cadeia de suprimentos sustentável (GCSS) busca minimizar o impacto ambiental e maximizar o lucro e o bem-estar social por meio de práticas sustentáveis. Dado a sua complexidade e a necessidade de mensurar resultados, a GCSS requer o apoio de um sistema de medição de desempenho (SMD) contemporâneo e multidimensional, alinhado a objetivos estratégicos comuns aos elos da cadeia de suprimentos. Paralelamente, a Quarta Revolução Industrial oferece um acervo de tecnologias digitais que promete auxiliar no ciclo de vida dos SMD, tornando-os mais colaborativos, ágeis e flexíveis. Assim, o objetivo deste estudo é propor um modelo de SMD auxiliado pelas tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) para a GCSS. Nesse intuito, os SMD são compreendidos de acordo com seus recursos, papéis e processos. A GCSS é abordada considerando as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômica e social) e suas diversas práticas. Já as tecnologias da I4.0 são investigadas quanto à aplicabilidade no suporte aos SMD. Para atingir o objetivo proposto, o método de pesquisa utilizado combina métodos bibliográficos (mapeamento científico, revisão sistemática da literatura e análise de conteúdo), pesquisas de levantamento (realizada com especialistas nas áreas) e os métodos de tomada de decisão multicritério (TDMC) *Fuzzy-VIKOR* e *Fuzzy-PROMETHEE*. A tese estrutura-se como um compêndio de artigos, que objetivam a divulgação dos resultados bibliográficos e empíricos dos métodos utilizados. As análises e discussões desenvolvidas nesta tese esclarecem sobre como as tecnologias da I4.0 podem ser utilizadas em SMD para alcançar melhoria contínua em práticas da GCSS. O modelo desenvolvido é direcionado a gestores que buscam uma ferramenta para atingir superior desempenho na GCSS, e que estejam dispostos a se adequarem a um novo contexto de digitalização. Ainda, o trabalho traz avanço para o campo e uma agenda de pesquisa para futuras referências.

Palavras-chave: Sistemas de medição de desempenho. Indústria 4.0. Gestão da cadeia de suprimentos sustentável. Pesquisa de levantamento. Métodos de tomada de decisão multicritério.

ABSTRACT

Sustainable Supply Chain Management (SSCM) aims to minimize environmental impact and maximize profit and social well-being through sustainable practices. Given its complexity and the need to measure results, SSCM requires the support of a contemporary and multidimensional performance measurement system (PMS), aligned with strategic objectives common to the links in the supply chain. In parallel, the Fourth Industrial Revolution offers a range of digital technologies that promise to assist in the lifecycle of PMSs, making them more collaborative, agile, and flexible. Thus, the objective of this study is to propose a PMS model assisted by I4.0 technologies for SSCM. In this regard, PMSs are understood according to their resources, roles, and processes. SSCM is addressed considering the three dimensions of sustainability (environmental, economic, and social) and its various practices. Meanwhile, I4.0 technologies are investigated regarding their applicability in supporting PMS. To achieve the proposed objective, the research method used combines bibliographic methods (scientific mapping, systematic literature review, and content analysis), survey (conducted with experts in the areas), and the multicriteria decision-making methods (MCDM) Fuzzy-VIKOR and Fuzzy-PROMETHEE. The thesis is structured as a compendium of articles, which aim to disseminate the bibliographic and empirical results of the methods used. The analyses and discussions developed in this thesis clarify how I4.0 technologies can be used in PMSs to achieve continuous improvement in SSCM practices. The developed model is directed at managers who seek a tool to achieve superior performance in SSCM, and who are willing to adapt to a new context of digitalization. Moreover, the work brings advances to the field and a research agenda for future references.

Keywords: Performance measurement systems. Industry 4.0. Sustainable supply chain management. Survey. Multicriteria Decision-Making Methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protocolo para estudo terciário de revisões de literatura.....	35
Figura 2 - Construção da amostra final de revisões sistemáticas para aplicação dos métodos bibliográficos.....	39
Figura 3 - SMD na GCS e seus recursos, papéis e processos.....	50
Figura 4 - Protocolo do método de pesquisa.....	56
Figura 5 - Produção científica do campo.....	57
Figura 6 - Métodos de pesquisa e de análise utilizados nos artigos da amostra.....	58
Figura 7 - Classificação das tecnologias da I4.0 por frequência de citação (número de artigos).....	61
Figura 8 – Elos e fluxos da cadeia de suprimentos	65
Figura 9 - Relação entre a sustentabilidade, a sustentabilidade parcial, e as três dimensões.....	66
Figura 10 – Protocolo para estudo terciário de revisões de literatura.....	69
Figura 11 – Produção Científica e Impacto das Revisões	71
Figura 12 – Etapas do protocolo utilizado nos métodos bibliográficos.....	91
Figura 13 – Resultado das etapas de coleta e seleção de artigos.....	93
Figura 14 - Produção científica anual e impacto, em média de citações por ano.....	95
Figura 15 – Palavras-chave mais frequentemente usadas no campo.....	97
Figura 16 – Co-ocorrência de palavras-chave dos autores	98
Figura 17 – Mapa de temas	99
Figura 18 - Mapa de densidade de termos em títulos e resumos	100
Figura 19 – Modelo Teórico	111
Figura 20 – Modelo Teórico	126
Figura 21 – Utilização das tecnologias da I4.0 nas empresas (Grupo 1).....	134
Figura 22 – Adoção das práticas da GCSS nas empresas (Grupo 2).....	136
Figura 23 – Modelo empírico preliminar (pré-validação).....	142
Figura 24 – Modelo de SMD auxiliado por Tecnologias da I4.0 para a GCSS.....	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Alinhamento da pesquisa	20
Quadro 2 – Resumo dos métodos de coleta e análise de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo.....	25
Quadro 3 - Recursos dos SMD para unidades empresariais	29
Quadro 4 - Papéis dos SMD para unidades empresariais	30
Quadro 5 - Processos dos SMD para unidades empresariais	32
Quadro 6 - Avaliação da qualidade das revisões da amostra.....	38
Quadro 7 - Recursos, papéis e processos identificados pela revisão terciária	40
Quadro 8 - Recursos dos SMD na GCS.....	42
Quadro 9 - Papéis dos SMD na GCS.....	43
Quadro 10 - Processos dos SMD na GCS	44
Quadro 11 - Compilação de tecnologias da I4.0 como identificadas pelos autores do campo.	59
Quadro 12 - Síntese e definição das tecnologias da I4.0 associadas aos SMD.	60
Quadro 13 – Análise das práticas da GCSS segundo dados das revisões da amostra	73
Quadro 14 – Síntese das práticas da GCSS e suas respectivas definições	74
Quadro 15 – Práticas da GCSS	79
Quadro 16 – Características dos SMD na GCS	82
Quadro 17 – Processos dos SMD na GCS	83
Quadro 18 – Tecnologias da I4.0 frequentemente associadas aos SMD	88
Quadro 19 – Protocolo do método bibliográfico.....	93
Quadro 20 – Relações entre os Processos dos SMD e as Práticas da GCSS	105
Quadro 21 – Relações entre os Processos dos SMD e as Tecnologias da I4.0	109
Quadro 22 – Práticas da GCSS	121
Quadro 23 – Processos dos SMD na GCS	123
Quadro 24 – Tecnologias da I4.0 frequentemente associadas aos SMD	124
Quadro 25 – Relação entre os construtos analisados	141
Quadro 26 – Características dos especialistas entrevistados.....	143
Quadro 27 – Opinião dos especialistas sobre as relações conflitantes (Tecnologias da I4.0 e Processos dos SMD)	146
Quadro 28 – Opinião dos especialistas sobre as relações conflitantes (Processos dos SMD e Práticas da GCSS).....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisões da amostra.....	71
Tabela 2 - Artigos da amostra, ordenados por total de citações (TC).....	96
Tabela 3 – Principais periódicos do campo	97
Tabela 4 - Variáveis linguísticas utilizadas nos questionários e escala <i>Fuzzy</i>	129
Tabela 5 – Dados descritivos de respondentes (Grupo 1).....	133
Tabela 6 – Dados descritivos das empresas (Grupo 1).....	133
Tabela 7 – Dados descritivos de respondentes (Grupo 2).....	135
Tabela 8 – Dados descritivos das empresas (Grupo 2).....	135
Tabela 9 – Tecnologias da I4.0 mais úteis no auxílio de SMD (II)	137
Tabela 10 – Processos dos SMD mais importantes para a GCSS	139
Tabela 11 – Práticas da GCSS mais condicionadas aos SMD.....	140

LISTA DE SIGLAS

AI - *Artificial Intelligence* (Inteligência Artificial)
BDA- *Big Data Analytics* (Análise de *Big Data*)
CC - *Cloud Computing* (Computação em Nuvem)
CFCS - *Converting Fuzzy Data into Crisp Scores*
CPS - *Cyber-Physical Systems* (Sistemas Ciberfísicos)
GCS - Gestão da Cadeia de Suprimentos
GCSS - Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável
GCSV - Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde
I4.0 - *Industry 4.0* (Indústria 4.0)
IoT - *Internet of Things* (Internet das Coisas)
PDCA - *Plan-Do-Check-Act* (Planejar-Fazer-Checkar-Agir)
PROMETHEE - *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*
RSL - Revisão Sistemática da Literatura
SCOR - Supply Chain Operations Reference
SMD – Sistema(s) de Medição de Desempenho
TBL - *Triple Bottom Line*
TC - Total de Citações
TDMC - Tomada de Decisão Multicritério
VIKOR - *ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*
WoS - *Web of Science*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 LACUNA DE PESQUISA.....	18
1.2 ALINHAMENTO DA PESQUISA E OBJETIVOS.....	20
1.3 ESTRUTURA DA TESE	21
2 MÉTODO DE PESQUISA DA TESE	22
3 RECURSOS, PAPÉIS E PROCESSOS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO NA GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS.....	26
3.1 INTRODUÇÃO	26
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
3.2.1 Sistemas de medição de desempenho.....	27
3.2.2 Sistemas de medição de desempenho na gestão da cadeia de suprimentos.....	32
3.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	34
3.3.1 Revisão terciária da literatura.....	34
3.3.2 Protocolo do método de pesquisa bibliográfica	34
3.4 RESULTADOS	36
3.4.1 Coleta de dados e triagem para inclusão	36
3.4.2 Avaliação da qualidade	36
3.4.3 Revisão terciária da literatura.....	39
3.5 CONCLUSÕES	51
4 USO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	52
4.1 INTRODUÇÃO	52
4.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	53
4.2.1 Sistemas de Medição de Desempenho	53
4.2.2 Indústria 4.0	54
4.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	55
4.4 RESULTADOS	57
4.5 DISCUSSÃO	61
4.6 CONCLUSÕES	62
5 PRÁTICAS DA GESTÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEL: REVISÃO TERCIÁRIA DA LITERATURA.....	64
5.1 INTRODUÇÃO	64
5.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	65
5.2.1 Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável	65

5.2.2 Práticas da Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável	67
5.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	68
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.5 CONCLUSÕES	74
6 USO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO PARA GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS: ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA.....	75
6.1 INTRODUÇÃO	75
6.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	77
6.2.1. Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis.....	77
6.2.2 Sistemas de Medição de Desempenho na Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis	80
6.2.3 Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho	86
6.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	90
6.4 RESULTADOS	94
6.4.1 Mapeamento Científico	94
6.4.2 Análise de Conteúdo	101
6.5 DISCUSSÃO	112
6.6 CONCLUSÕES	115
7 USO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO PARA GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS: PROPOSTA DE MODELO.....	117
7.1 INTRODUÇÃO	117
7.2 REVISÃO DA LITERATURA.....	120
7.2.1 Práticas da GCSS.....	120
7.2.2 Processos dos SMD para GCSS.....	122
7.2.3 Tecnologias para SMD.....	124
7.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	127
7.3.1 Coleta de Dados	128
7.3.2 Análise de Dados	130
7.3.3. Desenvolvimento do Modelo e Validação.....	131
7.4 RESULTADOS	132
7.4.1 Coleta de Dados	132
7.4.2 Análise de Dados	136
7.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO E VALIDAÇÃO EXTERNA	140
7.5.1 Validação do Modelo.....	143

7.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	149
7.6.1 Guia Prático para Gestores.....	152
7.7 CONCLUSÕES	153
8 CONCLUSÕES DA TESE.....	155
8.1 AGENDA DE PESQUISA	157
APOIO	158
REFERÊNCIAS	159
APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO 1 (Q1): AVALIAÇÃO DO USO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0 NOS PROCESSOS DOS SMD NA GCS.....	174
APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO 2 (Q2): AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DOS SMD PARA A GCSS	181
APÊNDICE C - FICHA DE AVALIAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS	194
APÊNDICE D - COMPROVANTE DE DOAÇÃO	196
APÊNDICE E - MÉTODO VIKOR.....	197
APÊNDICE F - MÉTODO PROMETHEE	199
APÊNDICE G - MÉTODO DE DEFUZZIFICAÇÃO CFCS	201
APÊNDICE H - QUESTIONÁRIO DAS ENTREVISTAS SEMI-ESTRUTURADAS	202
APÊNDICE I - QUESTIONÁRIO DAS ENTREVISTAS SEMI-ESTRUTURADAS	203
APÊNDICE J - LISTA DE ARTIGOS DO COMPÊNDIO	204

1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade na gestão da cadeia de suprimentos (GCS) ganhou relevância nos meios empresarial e acadêmico nas últimas décadas (AHMED et al., 2024; PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019). Isso é uma consequência de fatores tanto internos quanto externos às cadeias de suprimentos, relacionados com o contínuo crescimento da concorrência ao nível global, que exige mudanças nas estratégias organizacionais (AZEVEDO et al., 2021). Esses fatores direcionam a GCS a mudar sua perspectiva puramente econômica/financeira e a adotar práticas sustentáveis, culminando em resultados nas três dimensões da sustentabilidade: a social, a econômica e a ambiental (AHMED et al., 2024; DROHOMERETSKI et al., 2015; ELKINGTON, 1997). À aplicação dos conceitos de sustentabilidade na GCS dá-se o nome de gestão da cadeia de suprimentos sustentável (GCSS), que cada vez mais se mostra fundamental para o sucesso das organizações (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019).

A GCSS pode ser definida como a “gestão das operações, recursos, informações e fundos da cadeia de suprimentos com o intuito de maximizar a lucratividade enquanto minimiza o impacto ambiental e maximiza o bem-estar social” (TATICCHI et al., 2015, p. 6474, tradução do autor). Suas práticas ajudam as organizações, sob um escopo ampliado, a atingirem seus objetivos para melhoria econômica, social e ambiental (ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021; GIUNIPERO et al., 2012). Para isso, a GCCS requer a cooperação dos elos da cadeia de suprimentos, incluindo fornecedores, manufatureiros, distribuidores/atacado e varejo (AHMED et al., 2024; LAMBERT; POHLEN, 2001). A literatura do campo é exponencialmente crescente, com vários modelos já disponíveis como referências para melhorar a taxa de sucesso de implantação das práticas sustentáveis (AZEVEDO et al., 2021).

Para quantificar a eficácia e a eficiência dessas práticas, a GCSS requer o apoio de um sistema de medição de desempenho (SMD) alinhado aos seus objetivos. Um SMD pode ser entendido como um conjunto de processos para gerenciar dados de desempenho, desenvolver as medidas de desempenho, e estabelecer objetivos estratégicos (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). Os SMD possuem como características seus recursos, papéis e processos, e operam em um ciclo de vida de quatro etapas: design, implantação, uso e revisão (BOURNE et al., 2000; MATOS et al., 2019; FRANCO-SANTOS et al., 2007). Quanto aos recursos de um SMD entende-se as propriedades essenciais que o compõem, e podem ser considerados fundamentalmente como as “medidas de desempenho” e a “infraestrutura de suporte” (FRANCO-SANTOS et al., 2007, p. 796). Já quanto aos papéis dos SMD, pode-se entendê-los

como propósitos ou funções desempenhadas pelo SMD (FRANCO-SANTOS et al., 2007). Por último, quanto aos processos de um SMD, eles são as séries de ações necessárias para que o SMD complete seu ciclo de vida (BOURNE et al., 2000; HELDEN et al., 2012; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019).

Uma vez operantes, existem indícios de que os SMD que incorporam as três dimensões da sustentabilidade de forma equilibrada auxiliam na GCSS e criam vantagens competitivas, atendendo às pressões internas e externas da cadeia de suprimentos (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005; MAESTRINI et al., 2017; NUDURUPATI; TEBBOUNE; HARDMAN, 2016). Esse apoio que os SMD oferecem à GCSS só é possível pela evolução da visão unidimensional econômica que caracterizava a medição de desempenho no século XX (MISHRA et al., 2017; NEELY, 1999). Essa evolução dos SMD acompanha outro campo de pesquisa, que inclui estudos teóricos e empíricos sobre as fases de seu desenvolvimento, incluindo modelos de referência, revisões sistemáticas da literatura e diversas colaborações em levantamentos de medidas de desempenho (ROMPHO et al., 2024; BITITCI et al., 2011; MISHRA et al., 2017; NEELY, 2002). A interseção entre os dois campos de estudo também oferece pesquisas específicas para auxiliar no desenvolvimento de SMD para a GCSS na forma de revisões, modelos e compilações de medidas de desempenho (AMAN; SEURING, 2021; BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; MALESIOS; DEY; ABDELAZIZ, 2020; PHAM et al., 2020; VEGTER; HILLEGERSBERG; OLTHAAR, 2021).

A evolução no desenvolvimento de SMD é potencializada pela digitalização consequente da Quarta Revolução Industrial. Isso ocorre porque o uso de tecnologias é um importante facilitador da medição de desempenho na cadeia de suprimentos, ao permitir uma melhor integração de seus elos (AZEVEDO et al., 2021; BAI; SARKIS, 2020; DALENOGARE et al., 2018; IVASCU, 2020). Estudos recentes mostram que a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) pode auxiliar no desenvolvimento de SMD mais colaborativos, ágeis e flexíveis (CARVALHO et al., 2018; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; NUDURUPATI et al., 2021). Assim, as tecnologias da I4.0 ajudam a atender as preocupações de uma variedade de *stakeholders*, auxiliando as empresas a melhorar sua competitividade (SOORI et al., 2024; BAI; ORZES; SARKIS, 2022). Esse novo patamar de digitalização dos SMD promete permitir que seus processos envolvam pessoas de diferentes funções e setores, aumentando a possibilidade de customização e operacionalização de suas atividades, e fornecendo *feedback* em tempo real (SOORI et al., 2024; YIN; QIN, 2019).

As tecnologias da I4.0 também podem auxiliar no desenvolvimento de SMD específicos para a GCSS (JABBOUR et al., 2018). Nesse cenário torna-se importante que os meios empresarial e acadêmico conheçam mais profundamente a aplicabilidade das tecnologias da I4.0 nos SMD para a GCSS (SOORI et al., 2024; AZEVEDO et al., 2021; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). Essa interseção entre os três temas forma um campo de estudo incipiente e promissor, uma vez que os processos dos SMD são diretamente impactados pela operacionalização das tecnologias (AZEVEDO et al., 2021).

1.1 LACUNA DE PESQUISA

A problemática central desta pesquisa reside na ausência de um modelo claro e aplicável que integre as tecnologias da I4.0 aos SMD voltados para a GCSS. A motivação para esta pesquisa surge de um contexto de conscientização sobre a necessidade de busca por sustentabilidade pelas organizações e uso das tecnologias da I4.0 para evolução dos SMD. Na última década, reconhece-se na literatura a necessidade de novas contribuições sobre o desenvolvimento de SMD para a GCSS que incorporem as três dimensões de sustentabilidade (BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; CAZERI et al., 2017; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018; VEGTER; HILLEGERSBERG; OLTHAAR, 2021). Ainda revisões deste período mostram que a medição de desempenho para a GCSS requer uma visão holística e ampla, e não limitada apenas para o elo manufatureiro (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018; TUNI; RENTIZELAS; DUFFY, 2018).

Os novos SMD também devem ser compatíveis com as tendências dos negócios, que incluem transparência; descentralização da tomada de decisão; inovação; e responsividade (ROMPHO et al., 2024; BOURNE et al., 2018; NUDURUPATI; TEBBOUNE; HARDMAN, 2016). Mais recentemente, os avanços da I4.0 oferecem alinhamento com as demandas contemporâneas dos negócios, coleta de dados em tempo real, transparência e responsividade (CARVALHO et al., 2018; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; NUDURUPATI et al., 2021). Além disso, a descentralização da tomada de decisão é facilitada por meio de sistemas inteligentes de suporte à decisão, que distribuem informações relevantes de forma ágil e acessível em toda a organização (SOORI et al., 2024; BOURNE et al., 2018). A inovação é estimulada pela capacidade de explorar dados complexos para identificar padrões e oportunidades anteriormente não reconhecidas (NUDURUPATI; TEBBOUNE; HARDMAN, 2016; BOURNE et al., 2018). Embora a literatura reconheça a importância da digitalização e

da sustentabilidade, ainda não existem diretrizes concretas que orientem as organizações na implementação dessas tecnologias de forma eficaz e alinhada aos objetivos de sustentabilidade.

Essas tendências impactam os SMD e seus objetivos estratégicos, exigindo novas medidas; métodos de implantação e de compartilhamento de informações; e na forma de seu uso (NUDURUPATI; GARENGO; BITITCI, 2021). Portanto, a convergência entre SMD e tecnologias da I4.0 não apenas atende às tendências atuais dos negócios, mas também impulsiona a eficiência, a competitividade e a capacidade de adaptação das organizações em um cenário dinâmico e cada vez mais digitalizado (FREDERICO et al., 2019; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021).

Ainda, apesar da evolução da área de estudo sobre SMD, a base teórica ainda é predominantemente fundamentada na pesquisa de controle de sistemas, e negligencia outros possíveis papéis dos SMD em um cenário de ubiquidade digital e de descentralização na tomada de decisão (BOURNE et al., 2018; NUDURUPATI et al., 2021). Assim, identifica-se a necessidade de pesquisas interdisciplinares no desenvolvimento de SMD flexíveis para corresponder à era digital, que considerem o uso das tecnologias da I4.0 em seus processos (BITITCI et al. 2018; FREDERICO et al., 2019; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; AZEVEDO et al., 2021).

A necessidade de pesquisa sobre a digitalização de SMD na GCSS é reconhecida pela comunidade acadêmica, que deseja ampliar a perspectiva do campo e aprofundar a discussão ao incluir a dimensão social, menos explorada pelas organizações e pela academia (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019; JABBOUR et al., 2018). Salienta-se que não é claro como as tecnologias da I4.0 podem apoiar os processos de SMD para GCSS, e surge, portanto, uma específica lacuna na literatura, sobre o uso das tecnologias da I4.0 para esta finalidade (FREDERICO et al., 2021; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021).

Essa lacuna é crítica, pois impede que as empresas aproveitem plenamente as oportunidades oferecidas pela I4.0 para otimizar seus processos de SMD, resultando em ineficiências e na dificuldade de adaptação às exigências do mercado contemporâneo. Portanto, a relevância prática deste estudo se manifesta na necessidade urgente de desenvolver um modelo que não apenas preencha essa lacuna teórica, mas que também forneça um guia prático para gestores e acadêmicos, facilitando a integração das tecnologias digitais nos SMD e promovendo uma gestão mais sustentável e eficiente nas cadeias de suprimentos.

1.2 ALINHAMENTO DA PESQUISA E OBJETIVOS

A motivação deste trabalho, portanto, surge a partir da seguinte questão pesquisa: “*Como as tecnologias da I4.0 podem auxiliar um SMD na GCSS?*”. Evidenciado pela lacuna de pesquisa, identifica-se um problema relacionado à falta de um modelo que possa ser utilizado como referência por acadêmicos e gestores na aplicação das novas tecnologias digitais em SMD para a GCSS. Para responder à questão de pesquisa, esta tese é estruturada sob um objetivo geral e sob objetivos específicos. O Quadro 1 apresenta o objetivo geral deste trabalho e o alinhamento da pesquisa.

Quadro 1 - Alinhamento da pesquisa

Elementos Contextualizadores	Conceitos-Chave	Problema	Questão de Pesquisa	Objetivo Geral
-Evolução dos SMD -Conscientização sobre sustentabilidade -Quarta Revolução Industrial	SMD - Recursos - Papéis - Processos - Ciclo de vida GCSS - Escopo - Dimensões - Práticas I4.0 - Tecnologias	Não existe na literatura um modelo de SMD para GCSS auxiliado pelas tecnologias da I4.0	Como as tecnologias da I4.0 podem auxiliar um SMD na GCSS?	Propor um modelo de SMD para a GCSS auxiliado pelas tecnologias da I4.0

Fonte: adaptado de Toledo (2020)

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar os recursos, papéis e processos dos SMD na GCS;
- Identificar quais tecnologias da I4.0 podem auxiliar os SMD;
- Identificar as práticas da GCSS;
- Mapear o campo de pesquisa que relaciona SMD, GCSS, e as tecnologias da I4.0;
- Identificar como as tecnologias da I4.0 podem ser úteis aos processos dos SMD para a GCSS;
- Classificar o uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD;
- Classificar as relações entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS;
- Desenvolver e validar o modelo.

A originalidade da pesquisa desenvolvida nesta tese fundamenta-se no aprofundamento teórico sobre as características e o ciclo de vida dos SMD; nas dimensões, práticas e elos da GCSS investigados; e nas tecnologias da I4.0 consideradas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Os outros capítulos deste documento são organizados da seguinte maneira: o Capítulo 2 descreve e justifica o alinhamento metodológico utilizado para atingir os objetivos geral e específicos. Os Capítulos 3, 4 e 5 apresentam os resultados de métodos bibliográficos, respondendo, respectivamente, aos objetivos específicos (a), (b) e (c). O Capítulo 6 aprofunda-se no campo de pesquisa para atingir os objetivos (d) e (e). Já o Capítulo 7 compila esses resultados em um modelo teórico para triangulação com resultados empíricos de pesquisas de levantamento e análises de dados por métodos de Tomada de Decisão Multi-Critério (TDMC), atingindo os objetivos específicos (f), (g) e (h). Ainda se apresentam no Capítulo 8 conclusões sobre as contribuições da tese e oportunidades para pesquisas futuras.

Após a compilação das referências citadas na tese são apresentados nos Apêndices A, B, C e D os instrumentos de pesquisa utilizados na coleta de dados empíricos. Já os Apêndices E, F, e G apresentam os algoritmos matemáticos utilizados nos métodos de TDMC *Fuzzy ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (Fuzzy-VIKOR) e *Fuzzy Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation* (Fuzzy-PROMETHEE). Os Apêndices H e I apresentam os questionários utilizados para validação do modelo proposto em entrevistas semiestruturadas. Um último Apêndice J mostra o compêndio de artigos que derivam desta tese, e a contribuição de cada autor.

2 MÉTODO DE PESQUISA DA TESE

Para atingir os objetivos geral e específicos deste trabalho é utilizada uma combinação de métodos bibliográficos, pesquisas de levantamento com especialistas, e análises de dados por métodos de TDMC. Essa abordagem de pesquisa bibliográfica-empírica é apoiada por autores da área de SMD, que incentivam a pesquisa que pondera a produção científica acadêmica do campo junto à opinião de gestores (MISHRA et al. 2017). A área de gestão de operações também apoia a triangulação de métodos na pesquisa (CHOI; CHENG; ZHAO, 2016). Ao integrar métodos quantitativos e qualitativos, fortalece-se a robustez e a confiabilidade do modelo, e contribui-se para uma compreensão mais holística e fundamentada dos fenômenos estudados.

Os objetivos específicos (a), (b), (c), (d) e (e) são alcançados pela realização de diferentes métodos bibliográficos, incluindo revisão sistemática da literatura, revisão terciária da literatura, mapeamento científico, e análise de conteúdo. A pesquisa bibliográfica é essencial para identificar os construtos, além de mapear o campo de pesquisa atual. Objetivos específicos exigem revisões profundas das literaturas relevantes para fornecer uma base sólida para o desenvolvimento e validação do modelo proposto.

A revisão sistemática da literatura é uma síntese de evidências, de método rigoroso e auditável, que fornece uma visão geral do corpo de informações disponíveis para um determinado tópico, comparando e contrastando os resultados de diferentes pesquisas, e coletando e avaliando de forma sistemática informações de várias fontes (KITCHENHAM et al., 2007). Já a revisão terciária da literatura é um tipo particular de revisão sistemática da literatura, e fornece uma análise mais ampla do campo, proporcionando uma atualização ao estado da arte investigar os resultados de outras revisões ou meta-análises já publicadas, que, por sua vez, observaram resultados de estudos primários (KITCHENHAM et al., 2007). A análise de conteúdo é um método de pesquisa sistêmico e rigoroso para extração de dados qualitativos em todas as formas de comunicação, e é amplamente utilizada como método de pesquisa na área de gestão de operações (SEURING; GOLD, 2012; TANGPONG, 2011; WHITE; MARSH, 2006). Sua utilização foi na compilação, classificação e síntese de informações da literatura, em sequência a outros métodos bibliográficos. Ainda, foi utilizada para identificar a relação entre os conceitos-chave da tese.

O mapeamento científico é um método de pesquisa científica que fornece uma representação de como as áreas de conhecimento, seus documentos, e seus autores estão inter-

relacionados (SMALL, 1999; ZUPIC; CATER, 2015). Técnicas de bibliometria descritiva ajudam a caracterizar o campo, validar sua centralidade, e medir o impacto e a qualidade dos estudos de pesquisa (CHAUHAN, SINGH, 2019; SHARMA; JABBOUR; SOUSA JABBOUR, 2020). Aliado às técnicas de análise de redes sociais, o método de mapeamento científico ajuda a identificar relações e agrupamentos do desenvolvimento científico e tendências do campo de estudo (SHARMA; JABBOUR; SOUSA JABBOUR, 2020). Softwares específicos foram utilizados para analisar o campo de estudo (R Bibliometrix, versão 3.1.3, no ambiente RStudio, versão 1.4.1106; e VOSViewer, versão 1.6.16), objetivando identificar padrões na literatura por interpretações e descrições gráficas (ECK; WALTMAN, 2014; ARIA; CUCCURULLO, 2017; COBO et al., 2011). O mapeamento científico é um método adequado para identificar o progresso e o crescimento da informação em um campo de conhecimento específico e foi essencial no desenvolvimento da agenda de pesquisas futuras (ZUPIC; CATER, 2015).

Os objetivos específicos (f), (g) e (h) são atingidos a partir da combinação de coleta de dados por pesquisas de levantamento e análises de dados por métodos de TDMC (REN; LUO, 2018). A pesquisa de levantamento é “um método de coleta de dados dos entrevistados através do uso de questionários padronizados ou entrevistas” (BHATTACHERJEE, 2012, p. 73, tradução do autor). Vantagens desse método incluem a possibilidade de medir grande variedade de dados não observáveis; a coleta de dados remota; a possibilidade de análises subamostrais; e a velocidade na obtenção de resultados (BHATTACHERJEE, 2012). A amostragem por conveniência se mostra a mais apropriada para esse estudo, e é utilizada devido ao baixo número de especialistas com a expertise exigida pelos questionários, sendo priorizada a qualidade do processo de avaliação sobre a quantidade de respostas (SUEN et al. 2014).

As coletas de dados pelas pesquisas de levantamento foram realizadas com auxílio de questionários elaborados no Google Forms®, validados por acadêmicos do campo, e enviados a profissionais das áreas de SMD e GCS. Os instrumentos de pesquisa estão disponibilizados nos Apêndices A, B, C e D deste trabalho. A partir da coleta de dados das pesquisas de levantamento foram utilizados dois métodos de TDMC para análise de dados: o *Fuzzy-VIKOR* e o *Fuzzy-PROMETHEE* (REN; LUO, 2018). Os Apêndices E e F apresentam os algoritmos dos métodos de TDMC utilizados. O método *Converting Fuzzy Data into Crisp Scores* (CFCS) é apresentado no Apêndice G.

Para atingir o objetivo (f) *Classificar o uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD* foi utilizado o método *Fuzzy-VIKOR*. O *Fuzzy-VIKOR* é um método propício para selecionar alternativas em forma de conjuntos, e sua difusão o torna um dos

métodos de TDMC mais utilizados na literatura (KAHRAMAN et al., 2007; KUO et al., 2012; OPRICOVIC; TZENG, 2004). Sua escolha se justifica pela necessidade de classificar os processos dos SMD e as tecnologias das I4.0, dando maior valor à média ponderada ideal que à distância euclidiana das soluções ideal e anti-ideal (ELTARABISHI et al., 2020). O VIKOR se mostra um método mais sensível e constante, principalmente para cenários de pesos iguais e menores números de alternativas (SALABUN et al., 2020).

O método *Fuzzy-PROMETHEE* foi utilizado para cumprir com o objetivo (g) *Classificar as relações entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS*. Destaca-se que o PROMETHEE é um nome comum para um grupo de métodos de TDMC, existente em seis versões consecutivas (PROMETEE I — PROMETEE VI) (RAMIK, 2020). Quando comparado a outros métodos de TDMC, o *Fuzzy-PROMETHEE* se mostra uma das opções preferidas, principalmente por considerar indiferença ou incomparabilidade (GUO et al., 2021). Ainda, o método se destaca entre outros similares quando o número de alternativas é maior (SALABUN et al., 2020). O método PROMETHEE II foi utilizado para análise de superação entre as alternativas (relação entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS). O resultado do método é uma estrutura racional que considera conflitos na comparação dos constructos.

Para atingir o objetivo (h) *Desenvolver e validar o modelo* e responder à questão de pesquisa foram considerados os resultados obtidos em cada etapa do desenvolvimento da tese, tanto bibliográficos quanto empíricos. Essa abordagem de pesquisa multimétodo é apoiada por pesquisadores da área para o desenvolvimento de novas pesquisas que ponderam a produção científica acadêmica do campo junto a novas evidências empíricas (CHOI; CHENG; ZHAO, 2016; MISHRA et al. 2017). Após a elaboração do modelo proposto, sua validação foi conduzida pela comparação com as informações existentes no campo e por entrevistas com um subgrupo dos especialistas respondentes. As entrevistas semiestruturadas proporcionaram um ambiente propício para aprofundar a compreensão das percepções dos especialistas em relação ao modelo proposto, e suas percepções são levadas em consideração. Os questionários utilizados para validação do modelo são apresentados nos Apêndice H e I.

O Quadro 2 apresenta o alinhamento teórico-metodológico, em uma representação gráfica dos objetivos, métodos de coleta e análise de dados utilizados e artigos resultantes do desenvolvimento do modelo proposto. Especificações sobre cada método são apresentadas nos próximos capítulos. A partir dos resultados deste estudo, propõe-se ainda uma agenda de pesquisa. Baseada em lacunas identificadas na literatura e em divergências nas análises empíricas, destacam-se questões não exploradas, apontando direções para futuras pesquisas.

Quadro 2 – Resumo dos métodos de coleta e análise de dados utilizados para o desenvolvimento do modelo

Título do Artigo	Capítulo da Tese	Objetivos Específicos da Tese	Métodos de Coleta e Análise de Dados	Autores
Recursos, papéis e processos dos sistemas de medição de desempenho na gestão de cadeias de suprimentos	3	(a) Identificar os recursos, papéis e processos dos SMD na GCS	Revisão Terciária da Literatura; Análise de Conteúdo	Santos, P. H. A.; Lizarelli, F. L.; Martins, R
Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho: Revisão Sistemática da Literatura	4	(b) Identificar quais tecnologias da I4.0 podem auxiliar os SMD	Revisão Sistemática da Literatura; Análise de Conteúdo	Santos, P. H. A.; Lizarelli, F. L.
Práticas da Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável: Revisão Terciária da Literatura	5	(c) Identificar as práticas da GCSS	Revisão Terciária da Literatura	Santos, P. H. A.; Lizarelli, F. L.
Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis: Análise Bibliográfica	6	d) Mapear o campo de pesquisa que relaciona SMD, GCSS, e as tecnologias da I4.0; e) Identificar como as tecnologias da I4.0 podem ser úteis aos processos dos SMD;	Mapeamento Científico da Literatura; Análise de Conteúdo	Santos, P. H. A.; Lizarelli, F. L.; Martins, R
Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis: Proposta de Modelo	7	(f) Classificar o uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD; (g) Classificar as relações entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS; (h) Desenvolver e validar o modelo.	Pesquisa de Levantamento; <i>Fuzzy VIKOR</i> ; <i>Fuzzy PROMETHEE II</i>	Santos, P. H. A.; Lizarelli, F. L.; Martins, R

Fonte: o Autor (2024)

3 RECURSOS, PAPEIS E PROCESSOS DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO NA GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS

3.1 INTRODUÇÃO

Desde o início dos anos 1990 o estudo sobre medição de desempenho se tornou um tópico popular para gerentes industriais e acadêmicos (BOURNE et al., 2003). O conjunto de processos para gerenciar dados de desempenho, desenvolver as medidas de desempenho, e estabelecer objetivos estratégicos é denominado SMD (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). Os SMD são caracterizados por seus recursos, papéis, e processos, que são definidos, respectivamente, como suas propriedades essenciais, seus propósitos ou funções; e as suas ações necessárias (BOURNE et al., 2000; FRANCO-SANTOS et al., 2007). São essas características que possibilitam e moldam a melhoria contínua da qualidade pelo monitoramento, diagnóstico e mudança do desempenho (BITITCI et al., 2006; FRANCO-SANTOS et al., 2007; GUNASEKARAN; KOBU, 2007; KENNERLEY; NEELY, 2002).

Os processos dos SMD ocorrem em um ciclo de vida definido pelas etapas de design, implantação, uso e revisão (BOURNE et al., 2000; HELDEN et al., 2012; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019). Por sua vez, os SMD têm um impacto positivo em processos organizacionais como implementação de estratégia, comunicação, motivação dos funcionários, tomada de ação, tomada de decisão e aprendizado (FRANCO-SANTOS; BOURNE, 2004; FRANCO-SANTOS et al., 2012).

A maioria das pesquisas relacionadas à SMD foi desenvolvida a partir do pressuposto de que as organizações operam em um ambiente estável, sem considerar o dinamismo e a turbulência de influências internas e externas (BITITCI et al., 2018). Porém, além da aplicação em unidades empresariais, os SMD podem ser úteis para melhorar a cooperação e a coordenação em cadeias de suprimentos (FRANCO-SANTOS et al., 2012). Na Gestão da Cadeia de Suprimentos (GCS), os SMD ajudam a garantir que as informações de desempenho sejam distribuídas de forma justa entre seus elos (fornecimento, manufatura, distribuição/atacado e varejo), o que possibilita o aprendizado e a resolução de problemas (LAMBERT; POHLEN, 2001; MAHAMA, 2006). Assim, o desenvolvimento de SMD na GCS implica na gestão de desempenho entre diferentes empresas e, portanto, grandes desafios em termos da necessidade de integrar e compartilhar dados, coordenação de processos, infraestrutura, e gestão de relacionamento (FOLAN; BROWNE, 2005; MAESTRINI et al., 2017). Nos últimos 20 anos a pesquisa que associa SMD na GCS vem ganhando robustez a fim

de auxiliar gestores a superar esses desafios (BITITCI et al. 2018; MISHRA et al., 2018).

Dada a evolução do campo sobre SMD na GCS, os levantamentos de recursos, papéis e processos hoje disponíveis se beneficiam de atualização, uma vez que foram considerados para unidades empresariais, e não correspondem à complexidade da GCS (CHOONG, 2013; FOLAN; BROWNE, 2005; FRANCO-SANTOS et al., 2007; HANSEN, 2021; PINHEIRO DE LIMA et al., 2013; ROCHA et al., 2020). Neste contexto, este capítulo tem por objetivo identificar os recursos, papéis e processos dos SMD na GCS. Dada a já existência de várias revisões sistemáticas da literatura sobre SMD na GCS, percebe-se uma oportunidade de utilizar dados terciários para melhor compreender o campo. Assim, para atingir o objetivo proposto, foi realizada uma revisão terciária da literatura pertinente. A revisão terciária é uma revisão sistemática de estudos secundários, relacionados à mesma questão de pesquisa (KITCHENHAM et al., 2007).

O artigo é estruturado da seguinte forma: na seção 2 apresenta-se a fundamentação teórica sobre SMD e sua relação com a GCS. Na seção 3 expõe-se o método utilizado para identificação, coleta e análise de revisões. Na seção 4, exibem-se os resultados e discussões sobre o método bibliográfico utilizado. Por fim, as conclusões deste trabalho na seção 5.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.2.1 Sistemas de medição de desempenho

Um SMD pode ser definido como o conjunto de processos para desenvolver medidas de desempenho, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). A medição de desempenho é, no que lhe concerne, o processo de avaliação qualitativa ou quantitativa da eficiência e da eficácia das ações (BITITCI et al., 2018; NEELY, 1995). Assim, as medidas de desempenho provêm um meio para transformar dados coletados em informações para suportar a tomada de decisão (NEELY et al., 1997).

Originalmente, os SMD eram conceituados como uma série de medidas de desempenho organizadas em um sistema para gerenciar o desempenho financeiro de uma organização (NEELY et al., 1995). No entanto, a medição de desempenho deve envolver os níveis estratégico, tático e operacional no controle dos processos, e avaliar de forma contínua o planejamento e as ações implantadas sob outros pontos de vista além do financeiro (FREDERICO et al., 2020). Assim, houve uma mudança gradual da visão tradicionalmente

unidimensional, que levou ao desenvolvimento de SMD mais inovativos e flexíveis, que também consideram medidas de desempenho não-financeiras, externas e de longo-prazo como tempo, flexibilidade e qualidade (BOURNE et al., 2002; MISHRA et al., 2018; NEELY, 1999).

A partir do final do século XX o campo despertou cada vez mais o interesse de gestores e acadêmicos para definição, caracterização, e modelagem dos SMD (BOURNE et al., 2005; FRANCO-SANTOS et al., 2007). Os SMD nesse período demonstravam diversidade sobre a compreensão de suas características, e consequentemente, falta de consenso sobre definições. De modo geral, cada definição sobre os SMD fornecia uma perspectiva diferente sobre o conceito, sem existência de duas definições concordantes. Porém, cada autor definia SMD a partir de uma combinação diferente de seus recursos, papéis e processos (FRANCO-SANTOS et al., 2007).

Quanto aos recursos de um SMD entende-se as propriedades essenciais que o compõem, e podem ser considerados fundamentalmente como as “medidas de desempenho” e a “infraestrutura de suporte” (FRANCO-SANTOS et al., 2007, p. 796). Em outras palavras, os recursos podem ser descritos como os principais elementos que são necessários para a existência de um SMD (CHOONG, 2013). Sem esses recursos, um SMD é incapaz de se sustentar como sistema de medição (CHOONG, 2013; FRANCO-SANTOS et al., 2007). Ainda que exista uma discussão sobre a necessidade de o SMD ter “objetivos estratégicos”, existem modelos que não estão ligados a objetivos específicos, e ainda se caracterizam como SMD sem esse recurso específico (BOURNE et al., 2000; FRANCO-SANTOS et al., 2007). Destaca-se que nem sempre os dados utilizados na medição de desempenho podem ser considerados como medidas (FRANCO-SANTOS et al., 2007). Em relação às medidas de desempenho, é possível dividi-las em “medidas” (número), “métricas” (unidade) e “indicadores” (informação), que podem ser compreendidos como “atributos” distintos na medição de desempenho (CHOONG, 2013; TROCHIM, 2006). A infraestrutura de suporte pode variar de um simples método a sistemas de gestão de informação mais complexos (FRANCO-SANTOS et al., 2007). O Quadro 3 resume a relação entre os recursos dos SMD para unidades empresariais pela compreensão disponível por diferentes autores da área

Quadro 3 - Recursos dos SMD para unidades empresariais

Franco-Santos et al. (2007)	Choong (2013)	
Medidas de desempenho	Dados (variáveis)	
	Medidas	Atributos de medida
	Métricas	
	Indicadores	
Infraestrutura de suporte	Métodos de medição	
Objetivos estratégicos ¹	-	

Fonte: adaptado de Choong (2013, p.110-116) e Franco-Santos et al. (2007, p. 796). ¹Discutível sobre sua necessidade, segundo os autores

Já quanto aos papéis dos SMD, pode-se entendê-los como propósitos ou funções desempenhadas pelo SMD. Medir desempenho engloba o propósito de monitorar o progresso e medir/avaliar o desempenho, sendo considerado o único papel fundamentalmente necessário de um SMD (FRANCO-SANTOS et al., 2007). Dessa forma, os outros papéis são suplementares ao papel de medição, e compilações particulares são propostas por diferentes autores do campo. Esses papéis suplementares são cada vez mais explorados pelo campo de estudo, uma vez que são responsáveis pelo impacto na estratégia da empresa e no comportamento humano (HANSEN, 2021). Existe um consenso sobre o papel de auxiliar à gestão estratégica; o papel de comunicação; de promover a melhoria contínua de sistemas, processos e cultura; e o papel de influenciar o comportamento humano (FRANCO-SANTOS et al., 2007; HANSEN, 2021; PINHEIRO DE LIMA et al., 2013; ROCHA et al., 2020). Ainda, o papel de adequar o SMD pela orientação do consumidor e partes interessadas é cada vez mais reconhecido no campo (HANSEN, 2021; PINHEIRO DE LIMA et al., 2013; ROCHA et al., 2020). O Quadro 4 traz a relação entre papéis identificados pelas três diferentes compilações para unidades empresariais disponíveis sobre o tema.

Quadro 4 - Papéis dos SMD para unidades empresariais

Franco-Santos et al. (2007)	Hansen (2021)	Pinheiro de Lima et al. (2013)	Rocha et al. (2020)	
Medição de desempenho	Orquestrar	Ser responsável por articular estratégia e monitorar resultados do negócio	Estar em alinhamento com a gestão estratégica de operações e melhorar a eficiência e efetividade geral das operações do negócio	
Comunicação				
Gestão estratégica				
Aprendizado e melhoria		Implementar a funcionalidade da gestão estratégica no sistema de gestão estratégica de operações, provendo ao sistema conjuntamente a melhoria da eficiência operacional e a efetividade geral do negócio		
		Desenvolver uma capacidade de melhoria contínua pela implementação e gestão de um sistema integrado de gestão estratégica		
Influenciar comportamento	Facilitar	Produzir mudanças positivas nos sistemas e processos organizacionais	Produzir mudanças positivas nos sistemas, processos e cultura organizacionais, desenvolvendo a capacidade de gerenciar projetos de melhoria contínua pelo sistema de gestão estratégica integrado	
		Incentivar		Produzir mudanças positivas na cultura organizacional
	Documentar		Mostrar como os requisitos de design do sistema levam a resultados desejados	Estar orientado às demandas das partes interessadas
			Atender às exigências externas, não diretamente gerenciadas pela organização	
		Fornecer uma compreensão mais próxima das necessidades do mercado para criar um valor percebido para clientes	Ter uma abordagem de design orientada ao consumidor	

Fonte: adaptado de Franco-Santos et al. (2007, p. 797); Hansen (2021, p. 10); Pinheiro de Lima et al. (2013, p. 529) e Rocha et al. (2020, p. 14-15)

Por último, quanto aos processos de um SMD, eles são as séries de ações necessárias para que o SMD complete seu ciclo de vida (BOURNE et al., 2000; HELDEN et al., 2012; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019). O ciclo de vida de um SMD é baseado na melhoria contínua e no ciclo PDCA (*plan-do-check-act*) e é amplamente difundido no campo, utilizado em estudos teóricos e empíricos, e auxilia na construção de uma compreensão sólida das etapas de seu desenvolvimento: design, implantação, uso e revisão (BITITCI; NUDURUPATI, 2002; BOURNE et al., 2000; NUDURUPATI et al. 2011; MATOS et al., 2019):

Design: análises de medidas individuais, análise dos conjuntos de medidas e suas interações, e análise do ambiente do SMD (FERREIRA; OTLEY, 2009; NEELY et al., 1995; NEELY et al., 1997). Na etapa de design, a escolha das medidas e o projeto do SMD compreendem a identificação das necessidades e desejos das partes interessadas, o

planejamento e especificação dos objetivos estratégicos, e o estabelecimento de metas (BOURNE et al., 2000; FRANCO-SANTOS et al., 2007);

Implantação: etapa em que o sistema e seus procedimentos são instituídos para gerenciamento de dados e posterior medição (BOURNE et al., 2000). Fatores importantes na implantação de um novo SMD incluem o desenvolvimento de uma arquitetura de informação de suporte, visibilidade dos dados, alinhamento de incentivos, e a liderança da diretoria (BOURNE et al., 2003; GARENGO; BITITCI, 2007; NEELY et al., 1995; NUDURUPATI et al., 2011). Nesta etapa, esses processos devem alinhar a medição aos objetivos estratégicos, caracterizando a implementação do SMD (BOURNE et al., 2000; BOURNE et al., 2005);

Uso: consiste em analisar a implantação das estratégias e desafiar suposições (BOURNE et al., 2000). Uma vez desenvolvidos, os SMD levam à MELHORIA contínua da qualidade através do monitoramento, diagnóstico e mudança do desempenho (BITITCI et al., 2006; GUNASEKARAN; KOBU, 2007). Inclui a coleta e manipulação de dados, a avaliação de desempenho e a gestão da informação, que objetivam levar à melhoria e pelo fornecimento de informações, interpretação e tomada de decisão (BOURNE et al., 2000; BOURNE et al., 2005; FRANCO-SANTOS et al., 2007).

Revisão: pode ser dividida em dois passos: análise do atual SMD e proposta de melhoria (BRAZ et al., 2011). Modelos de maturidade também podem promover o aprendizado organizacional e permitir uma melhor avaliação de um SMD (BITITCI et al., 2015). Etapa essencial para garantir que as medidas de desempenho de um SMD permanecem relevantes conforme as circunstâncias internas e externas mudam (KENNERLEY; NEELY, 2003). A revisão do sistema leva a um ciclo de melhoria do SMD e à tomada de ações sobre os dados de desempenho (BITITCI et al., 2015; BOURNE et al., 2000; BOURNE et al., 2005; MELNYK et al., 2014).

O Quadro 5 resume os processos essenciais para a existência de um SMD nas etapas de seu desenvolvimento, e foram listados considerando unidades empresariais, segundo artigos amplamente reconhecidos no campo (BOURNE et al., 2005; FRANCO-SANTOS et al., 2007).

Quadro 5 - Processos dos SMD para unidades empresariais

Bourne et al. (2005)	Franco-Santos et al. (2007)
Tomada de ação	Revisão do sistema
Alinhamento com os objetivos estratégicos	Seleção e design de medidas
Coleta de dados	Coleta e manipulação de dados
Análise de dados	Avaliação de desempenho e recompensas
Interpretação e avaliação	Gestão da informação
Comunicação e provisão da informação	
Tomada de decisão	

Fonte: adaptado de Bourne et al. (2005, p. 6) e Franco-Santos et al. (2007, p. 798)

3.2.2 Sistemas de medição de desempenho na gestão da cadeia de suprimentos

O sucesso da GCS não resulta apenas da agregação das operações individuais e da medição de desempenho de cada empresa, mas também é consequência da integração das atividades e da qualidade das relações entre as empresas (BOURNE et al., 2018). Assim, o monitoramento e o controle na GCS, associados ao desempenho operacional, são essenciais para uma gestão eficaz e produtiva e vários modelos foram desenvolvidos para atender a essa necessidade (BALFAQIH et al., 2016; HWANG et al., 2017).

Já um SMD na GCS pode ser definido como “um conjunto de métricas usadas para quantificar a eficiência e eficácia dos processos e relações da cadeia de suprimentos, abrangendo múltiplas funções organizacionais e múltiplas empresas e permitindo a orquestração da cadeia de suprimentos” (MAESTRINI et al., 2017, p. 301). Em conjunto à definição original para unidades empresariais, podemos entender que SMD na GCS é então o conjunto de processos para desenvolver medidas de desempenho, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho dos processos e relações da cadeia de suprimentos (BITITCI et al., 2018; MAESTRINI et al., 2017; NEELY et al., 1995).

Os objetivos dos SMD na GCS incluem alcançar alta eficiência no uso de recursos; altos níveis de serviço aos clientes; e desenvolvimento da habilidade de responder ao ambiente dinâmico (BEAMON, 1999). Além disso, um SMD na GCS pode permitir a identificação de pontos de melhoria sob um aspecto mais amplo; entender os processos de negócios; melhorar os processos de tomada de decisão; e identificar desperdícios problemas e oportunidades (BALFAQIH et al., 2016; GUNASEKARAN; KOBU, 2007). Se desenvolvido com sucesso, um SMD na GCS traz benefícios em melhoria da qualidade, entrega, inovação e sustentabilidade (MAESTRINI et al., 2017). Ainda, avaliar o desempenho na GCS também

revela lacunas entre o planejamento da GCS e o desempenho real, e permite rastrear problemas potenciais (AHMAD; ZABRI, 2018). Salienta-se que esses impactos positivos dos SMD na GCS se dão de forma direta e indireta, aumentando a cooperação, socialização e coordenação entre empresas ao compartilhar informações, resolvendo problemas, motivando mudanças e restringindo o uso do poder (BITITCI et al., 2018; BOURNE et al., 2018; FRANCO-SANTOS et al., 2012).

O ciclo de vida do SMD na GCS é similar ao do SMD para unidades empresariais, constituído pelas etapas de design, implantação, uso e revisão (BOURNE et al., 2000; MAESTRINI e tal., 2017; MATOS et al., 2019). Porém, não é claro na literatura disponível se existe diferença em suas características (recursos, papéis e processos). Existem evidências de que a integração de dados na GCS é necessária dentro dessa estrutura de gestão da informação (SZYMCZAK et al., 2018). Como consequência, as organizações devem reorientar seus esforços de medição, para incorporar a avaliação de seu desempenho através de uma gestão da informação mais ampla e integrada (NUDURUPATI et al., 2016). Assim, os SMD na GCS compartilham dados entre seus elos, integram a estrutura, e coordenam processos durante a medição de desempenho (GOPAL; THAKKAR, 2012; GUNASEKARAN; KOBU, 2007). Ao fazer isso, os SMD também estão sujeitos à adoção de um número maior de métricas, pois incluem diferentes empresas e processos, unificam o fluxo de valor e deixam as decisões mais conscientes e oportunas (GUNASEKARAN et al., 2004).

Nota-se que aumentar o escopo do desenvolvimento de um SMD para a GCS requer esforços criativos e foco aos objetivos organizacionais, considerando os tipos de negócios envolvidos, a natureza do mercado e a capacidade tecnológica (GUNASEKARAN et al., 2004; GUNASEKARAN; KOBU, 2007). Para o sucesso do SMD na GCS, é necessário superar dificuldades em recursos, como nos sistemas de tecnologia da informação; desenvolvimento de medidas apropriadas; aplicação de processos; consequências negativas no comportamento do pessoal; e a adequação às atividades da cadeia de suprimentos (BOURNE et al., 2002). A taxa de sucesso no desenvolvimento de SMD na GCS está aumentando devido à globalização econômica e ao aumento da competitividade (REZAEI et al., 2017).

Dado a complexidade do SMD na GCS, muitas vezes ele pode ser compreendido por seu componente interno (empresa focal) e externo (interfirmas) (MAESTRINI e tal., 2017). Os modelos desenvolvidos para medir o desempenho na GCS costumam possuir uma série de problemas, como a falta de conexão à uma estratégia comum; desequilíbrio entre seus papéis; falta de foco nos clientes; falta de visão holística; e otimizações locais (SHEPHERD; GUNTHER, 2006). Para resolver esses problemas, os SMD devem ser mais dinâmicos,

integrados e estarem alinhados a uma estratégia comum, auxiliando na gestão da informação em todos os níveis da GCS (GUNASEKARAN; KOBU, 2007; SZYMCZAK et al. 2018). Além disso, a GCS deve estender a abrangência do SMD para englobar todas as partes interessadas da cadeia de suprimentos, que inclui fornecedores, produção, distribuição e a venda para usuários finais (LAMBERT; POHLEN, 2001; MAESTRINI et al., 2017; NUDURUPATI et al., 2016).

3.3 MÉTODO DE PESQUISA

Para identificar os recursos, papéis e processos dos SMD na GCS foi utilizada a revisão terciária da literatura. A descrição do método e o protocolo de pesquisa utilizado são descritos em sequência.

3.3.1 Revisão terciária da literatura

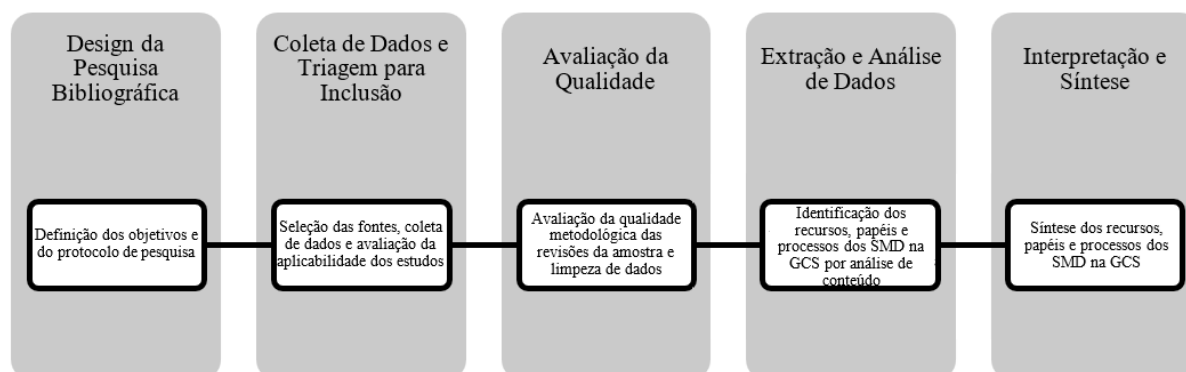
Para caracterizar a produção científica sobre SMD na GCS e identificar seus recursos, papéis e processos foi realizada uma revisão terciária da literatura disponível. A revisão terciária é uma revisão sistemática de estudos secundários, relacionados à mesma questão de pesquisa (KITCHENHAM et al., 2007).

A condução de uma revisão terciária desse método torna-se possível em um domínio onde já exista um número significativo de revisões sistemáticas, a fim de responder questões mais abrangentes (KITCHENHAM et al., 2007). Esse tipo de síntese de evidências fornece uma visão geral do corpo de informações disponíveis para um determinado tópico, comparando e contrastando os resultados das revisões sistemáticas e meta-análises publicadas, e coletando e avaliando de forma sistemática informações de várias fontes (KITCHENHAM et al., 2007). Nesse sentido, a revisão terciária também possui um método rigoroso e auditável, e pode ser dividida em três fases: planejamento, condução e relato.

3.3.2 Protocolo do método de pesquisa bibliográfica

A Figura 1 retrata as etapas do protocolo utilizado para realizar a revisão terciária da literatura (KITCHENHAM et al., 2007).

Figura 1 - Protocolo para estudo terciário de revisões de literatura



Fonte: adaptado de Kitchenham et al. (2007) e Templier e Paré (2015)

Design da Pesquisa Bibliográfica: de acordo com o objetivo geral da pesquisa, o propósito é identificar os recursos, papéis e processos dos SMD na GCS.

Coleta de Dados e Triagem para Inclusão: a base indexadora *Web of Science* foi escolhida para coleta de dados, dado a abrangência de periódicos indexados (MONGEON; PAUL-HUS, 2016; SANTANA; COBO, 2020). Ainda, a escolha da base se justifica pelo crescente envolvimento de pesquisadores de diferentes países e áreas do conhecimento (ZHU; LIU, 2020). Para garantir consistência na elegibilidade dos documentos, os seguintes princípios foram definidos: não foram considerados documentos cujo idioma não fosse inglês; foram considerados apenas revisões, publicadas em periódicos com processo de revisão por pares, para uma análise de produção científica mais qualificada e consolidada; não se usou filtro de ano para as publicações. A seguinte *string* de busca foi utilizada na base de dados *Web of Science* (AGRAWAL et al., 2022; LEITE et al., 2012; LUO et al., 2018; MISHRA et al., 2018):

TI = ("performance measur" OR "performance manag*" OR "performance metric*" OR "performance indicator*") AND TS = ("supply chain*" OR "value chain" OR "distribution network")*

Para serem consideradas para a próxima etapa, as revisões foram submetidas à minuciosa leitura completa a fim de reconhecer relação ao tema principal.

Avaliação da Qualidade: Os artigos que foram aprovados na etapa de triagem foram avaliados quanto à sistematicidade de seus métodos, sendo considerados aprovados aqueles que se caracterizarem como revisão sistemática, indicando a fonte dos documentos considerados para revisão e os termos de busca utilizados, e permitindo a replicabilidade da busca. Ainda, seguindo a proposta de Kitchenham et al. (2007) e pelo critério de avaliação do Centro de Revisões e Disseminação da *York University*, foi considerada a descrição e utilização dos critérios de inclusão e exclusão; a probabilidade da revisão de ter considerado todos os estudos

relevantes; a avaliação da qualidade/validade dos estudos primários; e a descrição adequada dos dados/estudos básicos.

Extração e Análise de Dados: A amostra final de revisões sistemáticas aprovadas na etapa de avaliação da qualidade foi submetida aos métodos bibliográficos. Para a revisão terciária, foram consideradas relevantes todas as informações levantadas quanto às características dos SMD na GCS, sejam elas explícitas (identificadas como recursos, papéis e processos) ou implícitas (compatíveis com as respectivas definições). Nesta análise foi adotada uma técnica de análise de conteúdo, uma vez que permite sistematicidade rigorosa na extração de dados dos documentos (WHITE; MARSH, 2006). Foi elaborada uma planilha no MS Excel para a organização das características extraídas.

Interpretação e Síntese: Toda revisão sistemática foi analisada criticamente sobre a caracterização dos SMD na GCS. Os resultados são exibidos em quadros-resumo, com o levantamento dos recursos, papéis e processos dos SMD na GCS segundo cada autor, bem como a síntese das características conforme nossa interpretação.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Coleta de dados e triagem para inclusão

A coleta de dados na base indexadora *Web of Science* ocorreu em janeiro de 2023. A busca resultou em uma amostra inicial de 41 documentos. De acordo com o protocolo de pesquisa, os documentos da amostra inicial foram submetidos à minuciosa leitura completa a fim de reconhecer relação ao tema principal. Apenas 3 documentos foram excluídos nesta etapa, sendo 2 por motivo de serem erroneamente classificados como revisão pela base, e 1 por não ser associado ao tema. As 38 revisões foram submetidas à avaliação da qualidade.

3.4.2 Avaliação da qualidade

As 38 revisões aprovadas na etapa de triagem foram avaliadas quanto à sistematicidade de seus métodos. Apesar deste ser o único critério para exclusão da revisão nesta etapa, as revisões foram examinadas quanto ao método de inclusão e exclusão de estudos primários; sua abrangência; sua preocupação com a qualidade dos estudos primários; e a adequação na extração de dados. O Quadro 6 resume os resultados da etapa de avaliação da qualidade.

Percebe-se que dos 38 artigos, apenas 30 podem ser classificados como revisões sistemáticas da literatura, permitindo reprodução, e sendo considerados aprovados para a etapa de extração e análise de dados. A Figura 2 apresenta como foi obtida a amostra final de 30 revisões sistemáticas submetidas à aplicação dos métodos bibliográficos.

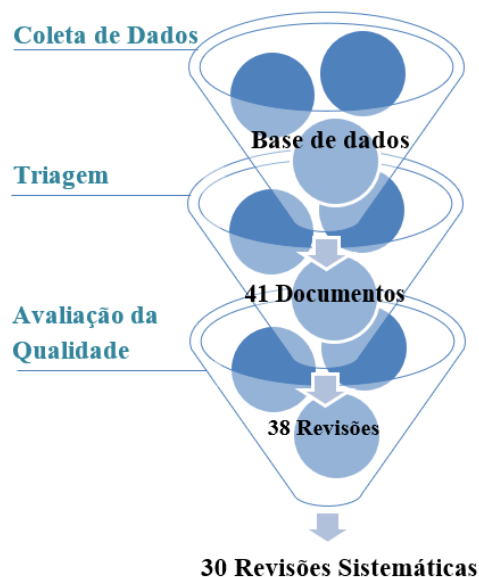
Quadro 6 - Avaliação da qualidade das revisões da amostra

Revisão da Literatura	Revisão Informal?	Critérios de inclusão ¹	Abrangência da busca ²	Avaliação da qualidade ³	Descrição dos estudos ⁴
Abidi et al. (2014)	Não	S	S	N	S
Ahmad & Zabri (2018)	Sim				
Anjomshoe et al. (2022)	Não	S	N	N	S
Balfaqih et al. (2016)	Não	S	N	N	S
Chenhall (2005)	Sim				
Contini & Peruzzini (2022)	Não	S	S	S	S
Demartini & Taticchi (2021)	Não	S	N	N	P
Drohomeretski et al. (2015)	Não	P	S	N	S
Elgazzar et al. (2019)	Não	S	P	N	S
Folan & Browne (2005)	Sim				
Galankashi (2019)	Não	P	S	N	S
Glas et al. (2018)	Não	P	P	N	P
Govindan et al. (2022)	Não	S	N	N	S
Graça & Camarinha-Matos (2017)	Sim				
Gunasekaran et al. (2015)	Não	S	S	N	S
Gunasekaran & Kobu (2007)	Sim				
Han et al. (2020)	Não	P	S	N	S
Kamble & Gunasekaran (2019)	Não	S	N	N	S
Kamble et al. (2020)	Não	S	N	N	S
Karamouz et al (2020)	Não	S	S	S	S
Kravchenko et al. (2019)	Não	S	N	N	P
Kühnen & Hahn (2018)	Não	S	N	N	P
Maestrini et al. (2017)	Não	S	N	N	S
Matos et al. (2019)	Não	S	S	N	S
Mishra et al. (2017)	Não	S	N	N	P
Mota et al. (2020)	Não	S	N	N	S
Naidoo & Gasparatos (2018)	Não	P	P	N	P
Nudurupati et al. (2011)	Sim				
Rasool (2021)	Não	S	N	N	S
Rojas-Lema et al. (2020)	Não	S	N	N	S
Santos & Martins (2021)	Não	S	N	N	S
Schmidberger et al. (2009)	Sim				
Sharma et al. (2017)	Sim				
Taticchi et al. (2015)	Não	S	N	N	P
Tuni et al. (2018)	Não	S	N	S	P
Wankhade & Kundu (2018)	Não	P	N	N	S
Wudhikarn et al. (2018)	Não	S	S	N	S
Yadav et al. (2021)	Não	S	N	N	S

Fonte: o Autor (2024)

Nota. ¹S (sim), critérios de inclusão explicitamente definidos; P (parcialmente), critérios de inclusão implícitos; N (não), critérios de inclusão não são definidos ou não podem ser inferidos de prontidão. ²S, 4 ou mais bibliotecas digitais e inclui estratégias de busca adicionais ou identificação e referência de todos os periódicos relacionados ao tópico de interesse; P, 3 ou 4 bibliotecas digitais sem estratégia de busca adicional ou definido, porém restrito conjunto de periódicos ou anais de congressos; N, até 2 bibliotecas digitais ou em um conjunto extremamente restrito de periódicos. ³S, autores definiram explicitamente os critérios de qualidade e extraíram eles de cada estudo primário; P, a pergunta de pesquisa envolve problemas de qualidade e são abordadas no estudo; N, não há esforços de explicitamente avaliar a qualidade dos artigos individualmente; ⁴S, informação é apresentada sobre cada artigo; P, a informação de cada artigo é apresentada apenas sumariamente; N, os resultados individuais dos estudos não são especificados.

Figura 2 - Construção da amostra final de revisões sistemáticas para aplicação dos métodos bibliográficos.



Fonte: o Autor (2024)

3.4.3 Revisão terciária da literatura

As revisões sistemáticas aprovadas para a etapa de extração e análise de dados foram lidas em plenitude. Foram consideradas relevantes todas as informações levantadas quanto aos recursos, papéis e processos dos SMD na GCS. O Quadro 7 apresenta uma primeira compilação dessas características, obtidas por análise de conteúdo, e ordenadas pela obra da qual foram extraídas. Ao todo, 9 das 30 revisões sistemáticas reconhecem e listam, de forma implícita ou explícita, os recursos, papéis e/ou processos dos SMD na GCS.

Quadro 7 - Recursos, papéis e processos identificados pela revisão terciária

Revisão Sistemática	Recursos	Papéis	Processos	Fonte
Balfaqqh et al. (2016)			Implícito (passos): Definir os objetivos e estratégias da cadeia de suprimentos da empresa focal; Desenvolver um SMD preliminar selecionando uma abordagem adequada, técnica, critérios, e métricas baseado nos objetivos definidos para a cadeia de suprimentos; Priorizar critérios da medição de desempenho e métricas para corresponder à estratégia da firma; Receber feedbacks e comentários no SMD preliminar das partes interessadas, e modificar ele de acordo; Atingir consenso no SMD; Demonstrar o SMD para todas as partes interessadas para propósito de avaliação.	p. 145
Demartini & Taticchi (2021)		Explícito (papéis): Medir o impacto dos projetos de digitalização; Gerenciar o desempenho de várias partes interessadas operando no ecossistema digital; Aumentar a transparência		p. 15
Elgazzar et al. (2019)	Implícito: Ferramentas; Medidas de desempenho	Explícito (papéis): Identificar, avaliar e conectar medidas aos objetivos, identificar processos que necessitam de melhoria; Identificar, avaliar e priorizar medidas; Avaliar, caracterizar e prever o desempenho, conectar medidas à estratégia; Identificar e conectar as medidas ao objetivo, prever desempenho, avaliar o impacto de facilitadores de desempenho	Implícito (funções): Avaliar o desempenho; Identificar processos que necessitam de melhoria; Identificar as medidas correspondentes que precisam de melhoria; Priorizar medidas em relação ao objetivo; Avaliar o impacto de facilitadores no desempenho; Prever o desempenho; Caracterizar medidas; Ligar medida à estratégia	Tabela 1, p. 5-8
Glas et al. (2018)			Explícito (processos): Alinhamento estratégico; Especificação de desempenho; Design de indicadores e metas de desempenho; Design do sistema de incentivo; Captura de dados; Avaliação do desempenho; Comunicar desempenho; Tomada de ação e atualização	Figura 1, p. 7
Kamble & Gunasekaran (2019)			Implícito: Planejamento do desempenho: definir objetivos de desempenho; selecionar as diferentes medidas e métricas de desempenho dos processos relevantes da cadeia de suprimentos; definir as prioridades de avaliação (custo/qualidade/tempo/flexibilidade/ inovação); seleção dos algoritmos analíticos; planejamento do nível de capacidade de análise de big data; Monitoramento de desempenho: Monitoramento de desempenho em tempo real das medidas e métricas de desempenho selecionadas dos processos da cadeia de suprimentos; Preparação dos relatórios de desvio do desempenho atual do desempenho planejado dos vários processos da cadeia de suprimentos em tempo real; Sugerir medidas de melhoria de desempenho para a cadeia de suprimentos; Plataforma de análise de big data: Coletar os dados das medidas e métricas de desempenho relevantes em tempo real; Realizar a análise de dados; Compartilhar os dados de medidas e métricas de desempenho para monitoramento do desempenho da cadeia de suprimentos; Compartilhar os relatórios do monitoramento de desempenho da cadeia de suprimentos com os parceiros; Gestão preditiva do desempenho: Ações proativas a serem tomadas pela melhoria do desempenho da cadeia de suprimentos	Figura 1, p. 9
Kamble et al. (2020)			Implícito: Objetivos estratégicos; Selecionar medidas de desempenho; Selecionar metas de desempenho; Desenvolver plano de ação do sistema de manufatura inteligente; Implementar plano de ação; Avaliar desempenho; Estabelecer o sistema; Avaliação	Figura 2, p. 10
Matos et al. (2019)	Implícito (características): Medidas de desempenho, financeiro ou não, derivadas e alinhadas à estratégia organizacional e integradas ao sistema; Critérios de desempenho representando a percepção de usuários; Sistema holístico, flexível, consistente às mudanças estratégicas, simples e de fácil utilização; Comprometimento e suporte dos gestores; Automatização da coleta de dados; Mecanismo de comunicação efetivo que encorage feedback, diálogo e participação; Feedback oportuno e atualizado aos usuários; Informação relatada periodicamente; mecanismo de revisão de objetivos, metas e padrões	Implícito (funções): Desenvolver medidas de desempenho que devem conectar os objetivos estratégicos aos objetivos operacionais; Dismembrar os objetivos estratégicos da organização em medidas de desempenho; Desenvolver um sistema de avaliação de desempenho contendo medidas e objetivos, alinhando e integrando objetivos; Prover um sistema balanceado e dinâmico que suporta os processos de tomada de decisão pela coleção, elaboração e análise da informação; Redistribuir acesso à informação para todos os empregados da organização; Alinhar a estratégia da organização para os empregados, permitindo possível a comunicação dos objetivos estratégicos e como eles podem ser alcançados pelos objetivos operacionais; Definir o método de captura, armazenamento e análise de dados; Buscar melhoria contínua na gestão da organização; Estimular o aprendizado organizacional nos usuários; Medir o desempenho; Apresentar informação atualizada sobre os eventos na organização; Influenciar o comportamento das pessoas; Atualizar as medidas de desempenho frequentemente para que elas possam adequadamente representar a mudança estratégica da organização; Manter o sistema atualizado para que ele continue estimulando melhoria contínua	Explícito (processos): Construir e selecionar medidas de desempenho; Estabelecer metas; Traduzir a estratégia organizacional em medidas de desempenho; Traduzir as visões das partes interessadas nos objetivos do negócio e medidas de desempenho apropriadas; Construir mapas cognitivos hierarquizando diretrizes com critérios e subcritérios, apontando a relação de influência entre eles; Definir um procedimento para coleta de dados; Definir os fluxos de comunicação dentro da organização; Capacitar, habilitar e encorajar as pessoas; Comunicar os objetivos estratégicos e metas de desempenho para todos os níveis da empresa; Quantificar a eficiência e eficácia das ações; Diagnosticar individualmente o desempenho da organização; Apresentar graficamente os resultados e o diagnóstico da situação atual; Fazer recomendações para melhoria em relação ao <i>status quo</i> ; Revisar as medidas de desempenho quando alcançar as metas; Alimentar a informação com feedback de usuários; Criar aferição periódica das medidas de desempenho para garantir que elas estão sempre alinhadas às estratégias organizacionais; Ajustar o sistema constantemente de acordo com as mudanças no sistema global de valores e mudar os requerimentos de aprendizado	Tabelas 1-3, p. 948-955
Rojas-Lema et al. (2020)		Implícito (propósitos): Benchmarking; Medição de Desempenho; Apoiar a gestão do negócio		Figura 2, p. 4
Santos & Martins (2021)	Implícito (aspectos): Medidas de desempenho; Infraestrutura necessária; Escopo; Abordagem sistêmica	Implícito (uso): Controle; Melhoria; Comunicação; Gestão estratégica; Influenciar comportamento	Explícito (processos): Seleção e design de medidas; Coleta e manipulação de dados; Gestão da informação; Avaliação de desempenho; e Revisão dos sistemas	p. 16

Fonte: o Autor (2024)

Os dados extraídos, apresentados no Quadro 7, foram reorganizados em três novos quadros separados. O Quadro 8 apresenta os recursos dos SMD segundo a fundamentação teórica (CHOONG 2013; FRANCO-SANTOS et al., 2007); os recursos dos SMD na GCS, segundo os dados coletados de 3 obras da revisão terciária; e a interpretação do autor sintetizando uma lista definitiva de 6 recursos no contexto da GCS. De forma similar, o Quadro 9 apresenta os papéis dos SMD para a GCS, em contraste com a fundamentação teórica (FRANCO-SANTOS et al., 2007; HANSEN, 2021; PINHEIRO DE LIMA et al., 2013; ROCHA et al., 2020); e a interpretação do autor sintetizando uma lista definitiva de 8 papéis no contexto da GCS. Por último, o Quadro 10 apresenta os processos dos SMD segundo a fundamentação teórica (BOURNE et al., 2005; FRANCO-SANTOS et al., 2007); os processos dos SMD na GCS, segundo os dados coletados de 7 obras da revisão terciária; e, finalmente, a interpretação do autor sintetizando uma lista definitiva de 11 processos no contexto da GCS.

Quadro 8 - Recursos dos SMD na GCS

Fundamentação Teórica		Revisão Terciária					Recursos dos SMD na GCS
Franco Santos et al. (2007)	Choong (2013)	Elgazzar et al. (2019)	Matos et al. (2019)		Santos & Martins (2021)		
Medidas de desempenho	Dados (variáveis)	Medidas de desempenho	Medidas de desempenho, financeiro ou não, derivadas e alinhadas à estratégia organizacional e integradas ao sistema		Medidas de desempenho		Medidas de desempenho alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD
	Medidas						
	Métricas		Fluxo de informações em tempo real orientado à GCS e às partes interessadas				
	Indicadores						
Infraestrutura de suporte	Métodos de medição	Ferramentas	Automatização da coleta de dados	Sistema holístico, flexível, consistente às mudanças estratégicas, simples e de fácil utilização	Infraestrutura necessária	Abordagem sistêmica	Infraestrutura integrada à GCS para suporte à coleta e análise de dados
			Mecanismo de comunicação efetivo que encoraje feedback, diálogo e participação				Infraestrutura integrada à GCS para suporte à comunicação
Objetivos Estratégicos ¹			Mecanismo de revisão de objetivos, metas e padrões	Critérios de desempenho representando a percepção de usuários			Objetivos estratégicos atualizados, alinhados à GCS e às partes interessadas
					Escopo		
			Comprometimento e suporte dos gestores				

Fonte: o Autor (2024)

Quadro 9 - Papéis dos SMD na GCS

Fundamentação Teórica				Revisão Terciária					Papéis dos SMD na GCS		
Franco-Santos et al. (2007)	Pinheiro de Lima et al. (2013)	Rocha et al. (2020)	Hansen (2021)	Demartini & Taticchi (2022)	Elgazzar et al. (2019)	Matos et al. (2019)	Rojas-Lema et al. (2020)	Santos & Martins (2021)			
Medição de desempenho	Ser responsável por articular estratégia e monitorar resultados do negócio	Estar em alinhamento com a gestão estratégica de operações e melhorar a eficiência e efetividade geral das operações do negócio	Orquestrar	Medir o impacto dos projetos de digitalização	Avaliar, caracterizar e prever o desempenho, conectar medidas à estratégia	Medir o desempenho	Medição de Desempenho	Controle	Gerenciar o desempenho de acordo com os objetivos estratégicos da GCS		
					Identificar, avaliar e priorizar medidas	Desenvolver um sistema de avaliação de desempenho contendo medidas e objetivos, alinhando e integrando objetivos					
						Definir o método de captura, armazenamento e análise de dados					
Comunicação					Aumentar a transparência		Redistribuir acesso à informação para todos os empregados da organização		Comunicação	Promover comunicação de dados e informações de forma transparente e em tempo real	
							Apresentar informação atualizada sobre os eventos na organização				
							Alinhar a estratégia da organização para os empregados, permitindo possível a comunicação dos objetivos estratégicos e como eles podem ser alcançados pelos objetivos operacionais	Apoiar a gestão do negócio			
Gestão estratégica				Implementar a funcionalidade da gestão estratégica no sistema de gestão estratégica de operações, provendo ao sistema conjuntamente a melhoria da eficiência operacional e a efetividade geral do negócio			Identificar e conectar as medidas ao objetivo, prever desempenho, avaliar o impacto de facilitadores de desempenho	Desenvolver medidas de desempenho que devem conectar os objetivos estratégicos aos objetivos operacionais		Gestão estratégica	Apoiar o desdobramento da estratégia da GCS, aumentando sua flexibilidade e facilitando a tomada de decisão de forma descentralizada
								Dismembrar os objetivos estratégicos da organização em medidas de desempenho			
								Prover um sistema balanceado e dinâmico que suporta os processos de tomada de decisão pela coleção, elaboração e análise da informação			
						Aprendizado e melhoria	Desenvolver uma capacidade de melhoria contínua pela implementação e gestão de um sistema integrado de gestão estratégica	Produzir mudanças positivas nos sistemas, processos e cultura organizacionais, desenvolvendo a capacidade de gerenciar projetos de melhoria contínua pelo sistema de gestão estratégica integrado			
		Manter o sistema atualizado para que ele continue estimulando melhoria contínua									
		Buscar melhoria contínua na gestão da organização									
Influenciar comportamento	Produzir mudanças positivas nos sistemas e processos organizacionais			Facilitar					Estimular o aprendizado organizacional nos usuários	Influenciar comportamento	
	Produzir mudanças positivas na cultura						Promover mudanças positivas na cultura organizacional				
	Mostrar como os requisitos de design do sistema levam a resultados desejados	Documentar		Gerenciar o desempenho de várias partes interessadas operando no ecossistema digital		Influenciar o comportamento das pessoas	Compreender as necessidades das partes interessadas				
	Atender à exigências externas, não diretamente gerenciadas pela organização						Estar orientado às demandas das partes interessadas	Atender as necessidades das partes interessadas, adotando uma abordagem orientada ao consumidor			
	Fornecer uma compreensão mais próxima das necessidades do mercado para criar um valor percebido para clientes						Ter uma abordagem de design orientada ao consumidor				

Fonte: o Autor (2024)

Quadro 10 - Processos dos SMD na GCS

Fundamentação Teórica		Revisão Terciária								Processos dos SMD na GCS
Franco Santos et al. (2007)	Bourne et al. (2005)	Balfaqih et al. (2016)	Elgazzar et al. (2019)	Glas et al. (2018)	Kamble & Gunasekaran (2019)	Kamble et al. (2020)	Matos et al. (2019)	Santos & Martins (2021)		
Revisão do sistema	Tomada de ação	Receber feedbacks e comentários no SMD preliminar das partes interessadas, e modificar ele de acordo		Tomada de ação e atualização	Ações proativas a serem tomadas pela melhoria do desempenho da cadeia de suprimentos	Implementar plano de ação	Ajustar o sistema constantemente de acordo com as mudanças no sistema global de valores e mudar os requerimentos de aprendizado	Revisão dos sistemas	Modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e os objetivos da GCS	
	Alinhamento com os objetivos estratégicos	Priorizar critérios da medição de desempenho e métricas para corresponder à estratégia da firma	Priorizar medidas em relação ao objetivo	Alinhamento estratégico	Sugerir medidas de melhoria de desempenho para a cadeia de suprimentos	Avaliação	Traduzir as visões das partes interessadas nos objetivos do negócio e medidas de desempenho apropriadas		Revisão das especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, orientada à GCS e às partes interessadas	
		Definir os objetivos e estratégias da cadeia de suprimentos da empresa focal		Especificação de desempenho	Definir objetivos de desempenho	Objetivos estratégicos	Criar aferição periódica das medidas de desempenho para garantir que elas estão sempre alinhadas às estratégias organizacionais			
Seleção e design de medidas			Caracterizar medidas		Selecionar as diferentes medidas e métricas de desempenho dos processos relevantes da cadeia de suprimentos	Selecionar metas de desempenho	Estabelecer metas	Seleção e design de medidas	Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	
			Ligar medida à estratégia	Design de indicadores e metas de		Selecionar medidas de desempenho	Construir e selecionar medidas de desempenho			
				Design do sistema de incentivo		Estabelecer o sistema	Definir um procedimento para coleta de dados		Implantação e integração da infraestrutura de suporte do SMD na GCS	
Coleta e manipulação de dados	Coleta de dados	Desenvolver um SMD preliminar selecionando uma abordagem adequada, técnica, critérios, e métricas baseado nos objetivos definidos para a cadeia de suprimentos		Captura de dados	Coletar os dados das medidas e métricas de desempenho relevantes em tempo real			Coleta e manipulação de dados	Coleta de dados em tempo real	
	Análise de dados				Seleção dos algoritmos analíticos				Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	
					Planejamento do nível de capacidade de análise de big data					
Avaliação de desempenho e recompensas	Interpretação e avaliação		Predizer o desempenho	Avaliação do desempenho		Realizar a análise de dados		Construir mapas cognitivos hierarquizando diretrizes com critérios e subcritérios, apontando a relação de influência entre eles	Avaliação de desempenho	Interpretação e avaliação do desempenho
			Avaliar o desempenho			Definir as prioridades de avaliação		Diagnosticar individualmente o desempenho da organização		
					Monitoramento de desempenho em tempo real das medidas e métricas de desempenho selecionadas dos processos da cadeia de suprimentos					
			Avaliar o impacto de facilitadores no desempenho				Quantificar a eficiência e eficácia das ações		Avaliação da eficiência e eficácia do SMD	
			Identificar processos que necessitam de melhoria							
			Identificar as medidas correspondentes que precisam de melhoria							
		Gestão da informação	Comunicação e provisão da informação	Demonstrar o SMD para todas as partes interessadas para propósito de avaliação	Comunicar desempenho	Preparação dos relatórios de desvio do desempenho atual do desempenho planejado dos vários processos da cadeia de suprimentos em tempo real		Definir os fluxos de comunicação dentro da organização	Gestão da informação	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e às partes interessadas
	Compartilhar os relatórios do monitoramento de desempenho da cadeia de suprimentos com os parceiros					Apresentar graficamente os resultados e o diagnóstico da situação atual				
	Compartilhar os dados de medidas e métricas de desempenho para monitoramento do desempenho da cadeia de suprimentos					Alimentar a informação com feedback de usuários				
						Comunicar os objetivos estratégicos e metas de desempenho para todos os níveis da empresa				
Tomada de decisão	Atingir consenso no SMD					Desenvolver plano de ação do sistema de manufatura inteligente	Fazer recomendações para melhoria em relação ao status quo	Tomada de decisão alinhada à GCS e às partes interessadas		
							Capacitar, habilitar e encorajar as pessoas		Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD	

Fonte: o Autor (2024)

Quanto aos recursos, percebe-se que os autores enfatizam a necessidade da medição de desempenho de estar alinhada à gestão estratégica da GCS (MATOS et al., 2019). Assim, percebe-se que enquanto os objetivos estratégicos outrora eram opcionais aos SMD empresariais, eles são fundamentais na GCS, bem como a abrangência de seu escopo (elos da cadeia que se relacionam com o SMD) (MATOS et al., 2019; SANTOS; MARTINS, 2021).

Além disso, a infraestrutura de suporte pode ser subdividida em dois recursos: a responsável pela coleta/análise de dados e a de comunicação, ambas integradas. Por último, as pessoas envolvidas nos processos do SMD também são recursos a serem valorizados, o que confirma afirmações já expressas por autores do campo (JÄÄSKELÄINEN et al., 2014; MATOS et al., 2019). Assim, de acordo com os resultados do Quadro 8, definem-se os recursos dos SMD na GCS:

1. *Medidas de Desempenho Alinhadas à Estratégia da GCS e Integradas ao SMD:* Medidas de desempenho estrategicamente alinhadas à GCS, criadas para refletir não apenas as necessidades da unidade empresarial, mas também considerando a perspectiva dos usuários, e integradas de maneira abrangente ao SMD;
2. *Objetivos Estratégicos Atualizados, Alinhados à GCS e às Partes Interessadas:* Objetivos estratégicos constantemente revisados, alinhados de forma precisa à GCS e às necessidades das partes interessadas;
3. *Fluxo de Informações em Tempo Real Orientado à GCS e às Partes Interessadas:* Fluxo contínuo de informações em tempo real direcionado à GCS e às partes interessadas, promovendo uma comunicação ágil e eficaz;
4. *Infraestrutura Integrada à GCS para Suporte à Coleta e Análise de Dados:* Infraestrutura plenamente integrada à GCS, proporcionando suporte robusto para a coleta e análise de dados;
5. *Infraestrutura Integrada à GCS para Suporte à Comunicação:* Infraestrutura totalmente alinhada à GCS, desenvolvida para apoiar efetivamente os processos de comunicação;
6. *Partes Interessadas que Desempenham Papel Significativo no Ciclo de Vida do SMD:* Partes interessadas desempenhando papéis cruciais em algum momento do ciclo de vida do SMD.

Os resultados da pesquisa reforçam a importância dos recursos para garantir que os SMD sejam dinâmicos, flexíveis, integrados e alinhados a uma estratégia comum (GUNASEKARAN; KOBU, 2007; SZYMCZAK et al. 2018). Para o sucesso do SMD na GCS, é necessário superar dificuldades relacionadas aos recursos levantados, como problemas nas

infraestruturas de comunicação, coleta e análise de dados; no desenvolvimento de medidas apropriadas; no comportamento das pessoas; no alinhamento às partes interessadas; e na adequação à uma estratégia comum (BOURNE et al., 2002; MATOS et al., 2019; NUDURUPATI et al., 2016; SANTOS; MARTINS, 2021; SHEPHERD; GUNTHER, 2006). Com base nesses argumentos e em estudo anterior sobre os fatores que levam à evolução dos SMD, propõe-se a seguinte classificação para os recursos (GUTIERREZ et al., 2015): estratégia (1 e 2); informação (3, 4 e 5); e pessoas (6).

Já quanto aos papéis, percebe-se uma atualização quanto aos antigos papéis de “medir desempenho”; “gestão estratégica”; “comunicação”; e “aprendizado e melhoria” (FRANCO-SANTOS et al., 2007). Em um ambiente de alta complexidade e relações dinâmicas com as partes interessadas, a disponibilidade de dados para tomada de decisão descentralizada é fundamentalmente importante (MATOS et al., 2019). Ainda, o desdobramento da estratégia da GCS em medidas de desempenho e nas ações de controle se mostra desafiante (ELGAZZAR et al., 2019; MATOS et al., 2019). Além disso, outra mudança na compreensão dos papéis dos SMD é no quesito “influenciar comportamento”, onde estudos mais recentes mostram que os SMD na GCS impactam nas relações de aprendizado e benchmarking; na cultura das empresas; e na relação com o consumidor final (DEMARTINI; TATICCHI, 2022; MATOS et al., 2019). O sucesso de um SMD depende da colaboração de todos os níveis de uma organização, e gradualmente transforma positivamente a cultura da empresa (BITITCI et al., 2006; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019; SANTOS; MARTINS, 2021). Assim, de acordo com o Quadro 9, definem-se os papéis dos SMD na GCS:

1. *Gerenciar o Desempenho de Acordo com os Objetivos Estratégicos da GCS:* Alinhar e monitorar o desempenho operacional com os objetivos estratégicos da GCS;
2. *Promover a Melhoria Contínua:* Estimular a busca constante por aprimoramentos e inovações em processos, visando a excelência operacional;
3. *Facilitar a Tomada de Decisão Descentralizada:* Capacitar as equipes para tomar decisões locais, promovendo agilidade e responsabilidade descentralizada;
4. *Compreender as Necessidades das Partes Interessadas:* Analisar e compreender profundamente as necessidades e expectativas das partes interessadas;
5. *Atender às Necessidades das Partes Interessadas, Adotando uma Abordagem Orientada ao Consumidor:* Garantir que as operações atendam efetivamente às necessidades das partes interessadas, priorizando uma abordagem centrada no consumidor;

6. *Promover Comunicação Transparente e em Tempo Real de Dados e Informações:* Estabelecer mecanismos para comunicar dados e informações de maneira transparente e em tempo real;
7. *Promover Aprendizado:* Incentivar o aprendizado contínuo e a troca de conhecimento dentro da organização;
8. *Promover Mudanças Positivas na Cultura Organizacional:* Iniciar e apoiar iniciativas que promovam uma cultura organizacional alinhada aos objetivos estratégicos e valores da cadeia de suprimentos.

Os resultados confirmam que o impacto positivo dos SMD no desempenho da GCS se dá de forma direta e indireta, aumentando a cooperação, socialização e coordenação entre empresas ao compartilhar informações, resolvendo problemas, motivando a disposição para mudanças e restringindo o uso do poder (BITITCI et al., 2018; BOURNE et al., 2018; FRANCO-SANTOS et al., 2012). Percebe-se que um SMD na GCS permite identificar a melhoria sob um aspecto mais amplo, entender os processos de negócios, melhorar o processo de decisão, identificar desperdícios, problemas e oportunidades (BALFIQH et al., 2016; GUNASEKARAN; KOBU, 2007). Sua importância também se dá ao avaliar o desempenho da cadeia de suprimentos, revelando lacunas entre o planejamento da GCS e o desempenho real, e permitindo rastrear problemas potenciais (AHMAD; ZABRI, 2018). Os resultados complementam o estudo de Hansen (2021), pois mostram a GCS como um nível organizacional superior à unidade empresarial. Em contrapartida, SMD desenvolvidos para a GCS ainda possuem o escopo limitado, focando na interação entre o primeiro fornecedor, e frequentemente focado na fase design apenas (MAESTRINI et al., 2017; SANTOS; MARTINS, 2021). Outros SMD limitam-se a alguns elos ou apenas à relação com os clientes, e é comum que o SMD esteja vinculado a modelos de gestão mais antigos (MAESTRINI al., 2017). A literatura ainda carece de SMD de que considerem as particularidades de todos os elos da GCS (DEMARTINI; TATICCHI, 2022; MAESTRINI et al., 2017; SANTOS; MARTINS, 2021). Propõe-se uma classificação para os papéis similar àquela feita para os recursos (GUTIERREZ et al., 2015): estratégia (1, 2, 3, 4 e 5); informação (6); e pessoas (7 e 8).

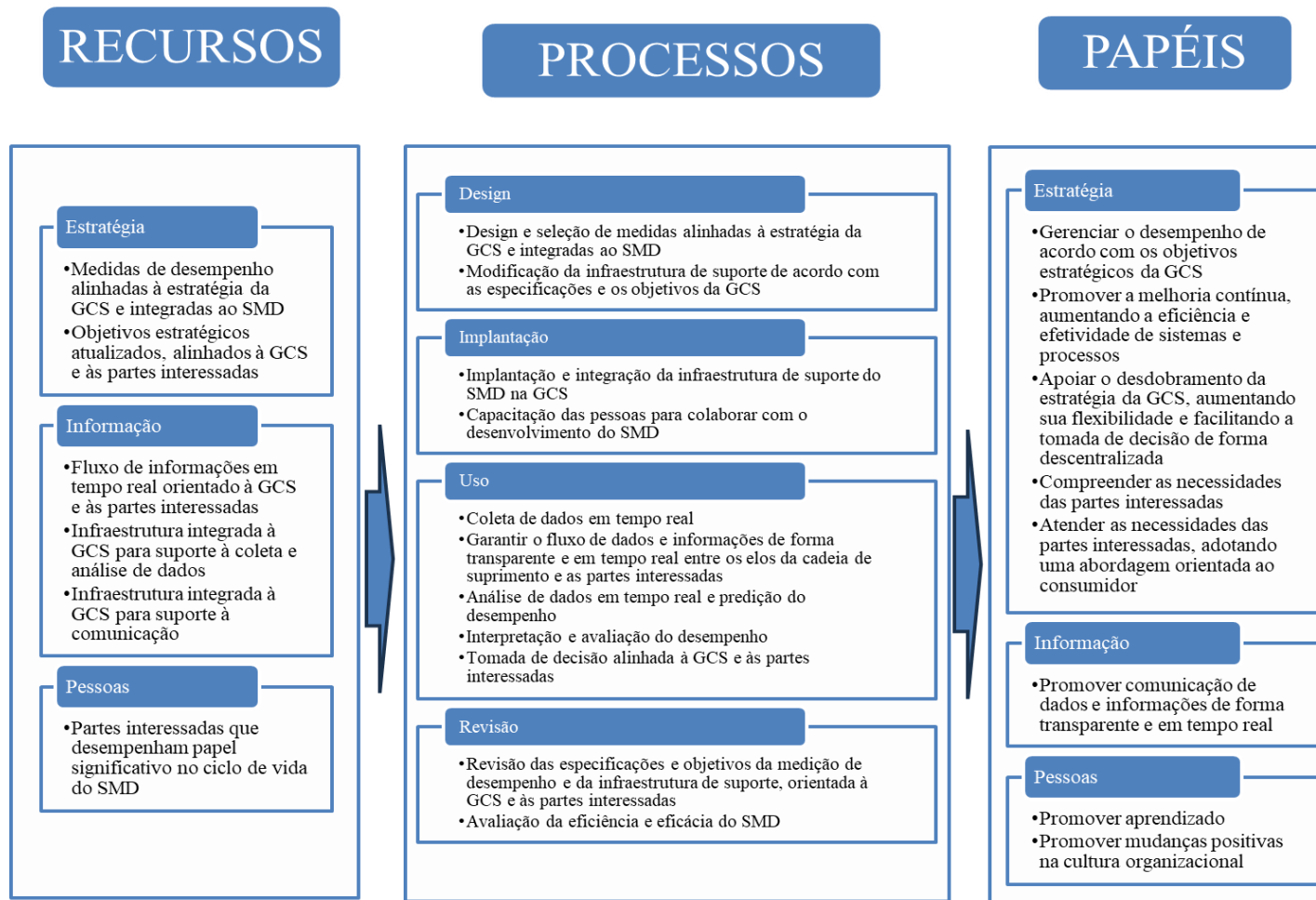
Finalmente, quanto aos processos, percebe-se que esse novo contexto de complexidade e novos papéis refletem em um maior número de atividades desempenhadas pelos SMD. Assim, de acordo com o Quadro 10, definem-se os processos dos SMD na GCS:

1. *Design e Seleção de Medidas Alinhadas à Estratégia da GCS e Integradas ao SMD*: Desenvolver e escolher medidas de desempenho que estejam alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD;
2. *Modificação da Infraestrutura de Suporte de Acordo com as Especificações e Objetivos da GCS*: Adaptar a infraestrutura de suporte conforme as especificações e metas da GCS;
3. *Implantação e Integração da Infraestrutura de Suporte do SMD na GCS*: Garantir uma infraestrutura de suporte que atenda ao SMD na GCS;
4. *Capacitação das Pessoas para Colaborar com o Desenvolvimento do SMD*: Treinar e capacitar as pessoas para colaborar efetivamente com o desenvolvimento contínuo do SMD;
5. *Coleta de Dados em Tempo Real*: Realizar a coleta de dados de forma contínua e em tempo real;
6. *Garantir o Fluxo de Dados e Informações Transparente e em Tempo Real entre os Elos da Cadeia de Suprimento e as Partes Interessadas*: Assegurar uma comunicação fluida e em tempo real de dados e informações entre os diversos elos da cadeia de suprimentos e as partes interessadas;
7. *Análise de Dados em Tempo Real e Predição do Desempenho*: Analisar os dados em tempo real e realizar previsões para antecipar o desempenho futuro;
8. *Interpretação e Avaliação do Desempenho*: Interpretar e avaliar o desempenho com base nas análises realizadas;
9. *Tomada de Decisão Alinhada à GCS e às Partes Interessadas*: Tomar decisões alinhadas à estratégia da GCS e às expectativas das partes interessadas;
10. *Revisão das Especificações e Objetivos da Medição de Desempenho e da Infraestrutura de Suporte, Orientada à GCS e às Partes Interessadas*: Revisar regularmente as especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, mantendo o alinhamento com a GCS e as necessidades das partes interessadas;
11. *Avaliação da Eficiência e Eficácia do SMD*: Avaliar a eficiência e eficácia do SMD para garantir que atenda aos objetivos estabelecidos.

A tomada de decisão e a tomada de ação se tornam processos mais complexos por necessitar alinhamento da GCS. Assim, integração, alinhamento estratégico e oportunidade (ou “tempo real”) são frequentemente associados aos processos dos SMD na GCS (BALFAQIH et al., 2016; KAMBLE; GUNASEKARAN, 2019; MATOS et al., 2019). Diferente dos SMD internos, que normalmente processam dados de uma única empresa, os SMD para a GCS compartilham dados entre os elos, integram a estrutura, e coordenam processos durante todo o processo de medição (GOPAL; THAKKAR, 2012; GUNASEKARAN; KOBU, 2007). Ainda, o uso interativo e colaborativo do SMD possibilita o desenvolvimento de capacidades estratégicas junto à GCS (BALFAQIH et al., 2016; KAMBLE; GUNASEKARAN, 2019). Os processos são classificados perante a correspondente etapa do ciclo de vida: design (1 e 2); implantação (3 e 4); uso (5, 6, 7, 8 e 9); e revisão (10 e 11).

De modo geral, os recursos, papéis e processos sintetizados podem ser alocados no ciclo de vida do SMD na GCS de forma simples, como mostra a Figura 3 (GUTIERREZ et al., 2015; MAESTRINI e tal., 2017; MATOS et al., 2019).

Figura 3 - SMD na GCS e seus recursos, papéis e processos



Fonte: o Autor (2024)

3.5 CONCLUSÕES

A motivação deste capítulo surge da evolução do campo sobre SMD na GCS. Uma vez que os recursos, papéis e processos dos SMD já são compreendidos para unidades empresariais, este capítulo tem por objetivo identificar tais características no contexto da GCS. Para isso, foi utilizada a revisão terciária da literatura, dada a já existência de várias revisões sistemáticas no campo, para se ter uma visão geral do campo, considerando a perspectiva de vários autores de forma sintetizada.

A coleta de dados realizada na base indexadora *Web of Science* resultou em uma amostra inicial de 41 documentos. Seguindo o protocolo de pesquisa, essa amostra inicial foi reduzida a uma seleção de 30 revisões sistemáticas submetidas à aplicação dos métodos bibliográficos. Assim, propõe-se uma atualizada lista de 6 recursos, 8 papéis e 11 processos dos SMD na GCS. Quanto aos recursos, percebe-se que os autores enfatizam a necessidade da medição de desempenho de estar alinhada à gestão estratégica da GCS, definida quanto ao seu escopo, e considerar as pessoas envolvidas nos processos do SMD. Quanto aos papéis, percebe-se que os SMD desempenham novas funções nas relações de aprendizado e benchmarking; na cultura das empresas; e na relação com o consumidor final. Nesse cenário, a disponibilidade de dados para tomada de decisão descentralizada é fundamentalmente importante, bem como o desdobramento da estratégia da GCS de forma cooperativa. Quanto aos processos, percebe-se que esse novo contexto os torna mais complexos, necessitando de integração, alinhamento estratégico e resposta em tempo real.

Espera-se que os resultados desta pesquisa bibliográfica tragam renovada discussão para o campo sobre a caracterização dos SMD, uma vez que existe emergência na mudança de escopo, mudança de dimensões consideradas, e possibilidade de uso de novas tecnologias digitais. Pelos resultados obtidos, espera-se o desenvolvimento de novos SMD para a GCS, cada vez mais inseridos na digitalização e no foco multidimensional da sustentabilidade.

4 USO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

4.1 INTRODUÇÃO

Um sistema de medição de desempenho (SMD) pode ser definido como o conjunto de processos para desenvolver medidas de desempenho, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). A medição de desempenho é, no que lhe concerne, o processo de avaliação qualitativa ou quantitativa da eficiência e da eficácia de uma ação (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995).

A evolução dos SMD caracteriza um campo de pesquisa em crescimento, que compreende estudos teóricos e empíricos, incluindo modelos de referência, revisões sistemáticas da literatura e diversas colaborações em levantamentos de medidas de desempenho (MISHRA et al., 2017; GORSKI; DUMISTRASCU, 2022). Estudos mais recentes mostram que a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) pode auxiliar no desenvolvimento de SMD mais colaborativos e flexíveis (CARVALHO et al., 2018; KAMBLE et al., 2020; LOPES & MARTINS, 2021).

Apesar de existirem muitas definições, uma das mais aceitas é a de que a I4.0 é uma nova forma de organizar os recursos e processos industriais, deixando-os mais responsivos a um ambiente dinâmico (KAMBLE et al., 2018; LEMSTRA; MESQUITA, 2023). A I4.0 é caracterizada pelo uso intensivo de automação e tecnologias digitais na criação de valor e pela integração de produtos, equipamentos e pessoas ao ambiente produtivo e às partes interessadas (MITTAL et al., 2018; GALATI; BIGLIARDI, 2019; LEMSTRA; MESQUITA, 2023).

A I4.0 visa superar desafios contemporâneos, como a intensificação da concorrência global, mercados e demandas voláteis, e a customização (MÜELLER et al., 2018). Desse modo, a I4.0 pode ser entendida como resultado da crescente digitalização de empresas e cadeias de suprimentos, principalmente no que diz respeito aos processos de fabricação e gestão da informação (KAGERMANN et al., 2013; SCHUMACHER et al., 2016).

Descobertas mais recentes indicam que as tecnologias emergentes da I4.0 possibilitam SMD mais colaborativos, criando oportunidades e valores enquanto fomentam a inovação nas empresas (NUDURUPATI et al., 2021). O campo de pesquisa gerado pela interseção do estudo dos SMD e das novas tecnologias da I4.0 é pequeno, porém crescente (FREDERICO et al., 2021; LOPES; MARTINS, 2021).

Resultados preliminares desse incipiente campo de estudo mostram que a integração das tecnologias da I4.0 nos SMD pode ajudar no desenvolvimento de sistemas mais inteligentes (LOPES; MARTINS, 2021). Novas tecnologias de informação e comunicação têm o potencial de auxiliar os SMD com análises mais robustas de dados, aumentando sua capacidade analítica e na gestão da informação (NUDURUPATI et al., 2011). Identifica-se também que as tecnologias da I4.0 possuem potencial de tornar os SMD mais autônomos e heterogêneos, e permitem que as medidas de desempenho capturem os contextos locais e externos (LOPES; MARTINS, 2021).

Apesar da evolução do campo, ainda não é claro como a medição de desempenho pode ser auxiliada pelas tecnologias da I4.0 para a criação de subsistemas autônomos sujeitos a ambientes dinâmicos (BOURNE et al., 2018; SAHLIN; ANGELIS, 2019). Pesquisadores destacam a necessidade de estudos sobre a medição de desempenho no contexto da I4.0 e em sistemas de manufatura inteligentes (KAMBLE et al., 2020). Assim, identifica-se a necessidade de pesquisas interdisciplinares no desenvolvimento de SMD flexíveis para corresponder à era digital (BITITCI et al. 2018; KAMBLE et al., 2020).

Neste contexto, este capítulo tem por objetivo identificar quais tecnologias da I4.0 podem auxiliar os SMD. Para atingir o objetivo proposto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura disponível, combinando técnicas de análise de conteúdo para identificação, compilação e síntese das tecnologias da I4.0. O capítulo é estruturado da seguinte forma: a Seção 2, apresenta a fundamentação teórica sobre SMD e I4.0; a Seção 3 exhibe o método de pesquisa utilizado para identificação, coleta e análise dos artigos; a Seção 4 exhibe os resultados dos métodos bibliográficos utilizados; a Seção 5 a discussão sobre os resultados; e por fim, apresentam-se as conclusões na Seção 6.

4.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.2.1 Sistemas de Medição de Desempenho

Originalmente, os SMD eram conceituados como uma série de medidas de desempenho organizadas em um sistema para gerenciar o desempenho de uma organização (NEELY et al., 1995). No entanto, houve uma mudança gradual da visão tradicional unidimensional, que levou ao desenvolvimento de SMD mais inovativos e flexíveis, que também consideravam medidas de desempenho não-financeiras, externas e de longo-prazo como tempo, flexibilidade e qualidade (BOURNE et al., 2002; MISHRA et al., 2017; NEELY, 1999). Desde então, a

relação entre os SMD e a gestão estratégica é extensivamente explorada, e ganhou consideráveis contribuições desde os anos 80 (NEELY et al., 1995; MISHRA et al., 2017).

Os novos SMD estratégicos e multidimensionais provaram ter impactos positivos em processos organizacionais, particularmente ao alinhar a estratégia em termos operacionais, planejar e implantar estratégias, monitoramento e controle, predição e otimização de recursos, na aprendizagem, e na modificação da cultura organizacional (BITITCI et al., 2012; BOURNE et al., 2018). Outros benefícios comprovados do desenvolvimento de SMD incluem melhorias em comunicação, motivação de funcionários, proatividade, tomada de decisão e aprendizado (FRANCO-SANTOS; BOURNE, 2004). Uma vez desenvolvidos, os SMD levam à melhoria contínua da qualidade através do monitoramento, diagnóstico e mudança do desempenho (BITITCI et al., 2006; GUNASEKARAN; KOBU, 2007).

A gestão da informação é um dos pilares dos SMD e está intimamente relacionada com a cultura organizacional e o estilo de gestão, usando diagnóstico para controle, inovação e melhoria (BITITCI et al., 2006; SIMONS, 1995). Logo, os SMD precisam estar preparados para coletar e analisar dados de forma dinâmica, e os processos de tomada de decisão devem ser descentralizados para garantir preventividade (STEFANOVIC, 2015). Assim, para garantir a competitividade, os novos SMD devem ser compatíveis com as tendências atuais dos negócios, que incluem tecnologias emergentes; *networking* e colaboração; servitização e cocriação de valor; inovação e trabalho de conhecimento; e ambiente e sustentabilidade (BOURNE et al., 2018; NUDURUPATI et al., 2021).

4.2.2 Indústria 4.0

A quarta revolução industrial é comumente conhecida pelo termo Indústria 4.0 (I4.0), utilizado pela primeira vez pelo Governo Federal Alemão em 2011, na apresentação em Hannover Messe (GRUSCHKA; LÜSSEM, 2018; KAGERMANN et al., 2013). Outras designações (*Industrie 4.0*, *smart manufacturing*, produção inteligente, internet industrial, e indústria integrada) são usadas por diferentes países como os Estados Unidos, Canadá e França, e comumente se referem ao mesmo conceito (KAMBLE et al., 2018; KANG et al., 2016).

Os objetivos primários da I4.0 são a sincronização das máquinas, otimização autônoma das linhas de produção, e a gestão da informação em tempo real (LU, 2017). Já seus princípios são: interoperabilidade, virtualização, capacidade em tempo real, descentralização, modularidade e orientação a serviços (CARVALHO et al., 2018; KAMBLE et al., 2018).

A emergência da I4.0 é devida ao aumento da competitividade global, e o tópico tornou-se importante para muitos campos de pesquisa (LIAO et al., 2017).

Muitas das novas tecnologias que compõem a I4.0 são baseadas na comunicação em rede, onde uma grande quantidade de informação é gerenciada para conduzir a gestão industrial de maneira inovadora. Em uma visão de longo prazo, essa conectividade muda os atuais sistemas de manufatura para serem mais abertos, digitais e automatizados (KAMBLE et al., 2019; LIAO et al., 2017).

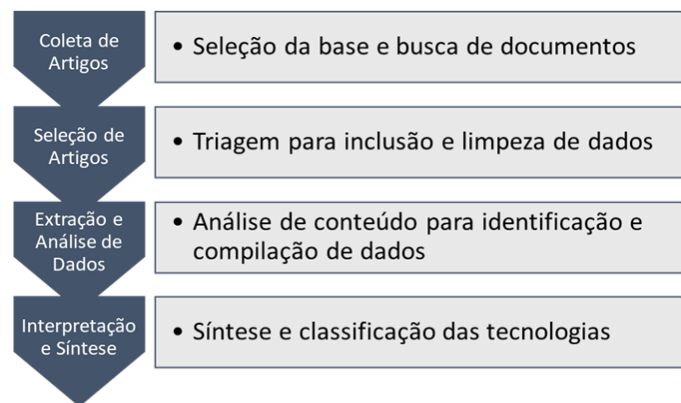
Porém, as mudanças e requisitos nos princípios de gestão da produção ainda não são claras (YIN; STECKE; LI, 2018). Pesquisas são necessárias para estudar os impactos das tecnologias em cada aspecto da produção para que empresas e cadeias de suprimentos ganhem vantagens competitivas (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Avanços em gestão de dados surgem como ferramentas importantes, e devem ser mais bem exploradas para ajudar os gestores a tomar decisões em cenários complexos (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019).

4.3 MÉTODO DE PESQUISA

Para atingir o objetivo proposto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura combinada a técnicas de análise de conteúdo para identificação, compilação e síntese das tecnologias da I4.0.

A revisão sistemática da literatura é uma síntese de evidências, de método rigoroso e auditável, que fornece uma visão geral do corpo de informações disponíveis para um determinado tópico, comparando e contrastando os resultados de diferentes pesquisas, e coletando e avaliando de forma sistemática informações de várias fontes (KITCHENHAM et al., 2007). Já a análise de conteúdo oferece um método sistêmico e rigoroso para extração de dados qualitativos em todas as formas de comunicação, e é amplamente utilizada como método de pesquisa na área de gestão de operações (SEURING; GOLD, 2012; TANGPONG, 2011; WHITE; MARSH, 2006). O protocolo utilizado é apresentado na Figura 4:

Figura 4 - Protocolo do método de pesquisa.



Fonte: Adaptado de Kitchenham et al. (2007) e Seuring e Gold (2012).

Coleta de artigos: A base indexadora *Web of Science* foi escolhida para coleta de dados, dado a abrangência de periódicos indexados e a organização de seus metadados (MONGEON; PAUL-HUS, 2016; SANTANA; COBO, 2020). Ainda, a base é caracterizada pelo crescente envolvimento de pesquisadores de diferentes países e áreas do conhecimento e pela quantidade de pesquisas multidisciplinares (ZHU; LIU, 2020). As referências utilizadas para construção da *string* de busca foram outras revisões bibliográficas ligadas ao tema (CORALLO et al., 2021; GUERSOLA et al., 2018). A seguinte *string* de busca foi utilizada nas bases de dados: TS = (("performance measurement system*" OR "performance management") AND ("Industr* 4.0" OR "smart manufacturing"))

Triagem para inclusão: Para garantir consistência na elegibilidade dos documentos, os seguintes princípios foram definidos: não foram considerados documentos cujo idioma não fosse inglês; foram considerados apenas artigos, publicados em periódicos com processo de peer-review, para uma análise de produção científica mais qualificada e consolidada; não se usou filtro de ano para as publicações. Para inclusão à amostra, foi realizada a leitura do título e resumo dos documentos para averiguar sua adequação ao tema.

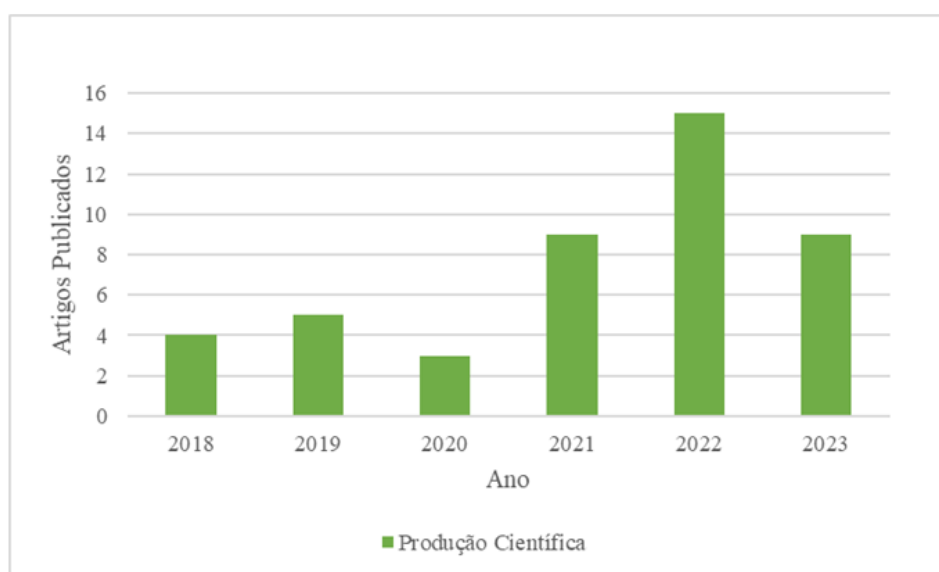
Extração e análise de dados: Os artigos aprovados na etapa de triagem para inclusão foram submetidos ao método de análise de conteúdo (SEURING; GOLD, 2012). Nesta etapa foram compilados todos os termos compreendidos pelos autores como tecnologias da I4.0 (WHITE; MARSH, 2006). Foi elaborada uma planilha no MS Excel para a compilação dos termos e referências aos locais de extração (KRIPPENDORFF, 2013).

Interpretação e síntese: Os resultados são exibidos em quadros-resumo e gráficos, e incluem a caracterização da produção científica do campo; agrupamento de termos para síntese das tecnologias da I4.0; e classificação das tecnologias por frequência de citação.

4.4 RESULTADOS

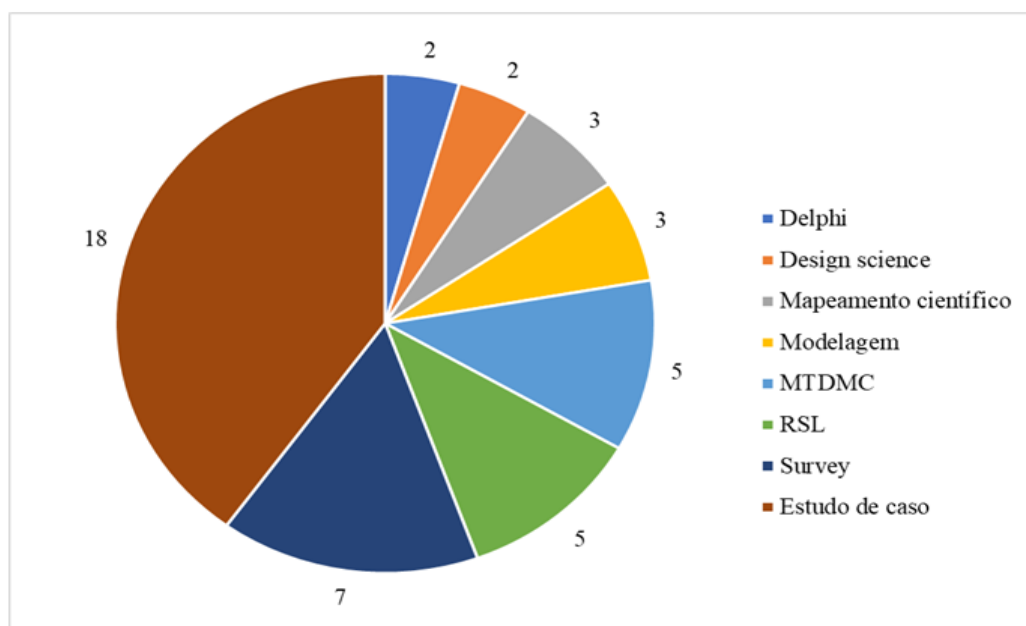
A coleta de dados na base indexadora ocorreu em junho de 2023. A busca resultou em um total de 45 artigos, publicados em 33 diferentes periódicos no período de 2018 a 2023. Após a leitura do título e resumo dos documentos, todos foram incluídos na amostra por se adequarem ao tema deste estudo. A Figura 5 ilustra como primeiro resultado descritivo a produção científica do campo. Observa-se que o número de artigos teve um crescimento mais expressivo a partir de 2020. Esse crescimento apresenta um pico de 15 artigos em 2022. Como segundo resultado descritivo, a Figura 6 apresenta a quantificação dos métodos de pesquisa e métodos de análise utilizados pelos artigos da amostra. Percebe-se uma maior ocorrência em estudos de caso, *surveys*, revisões sistemáticas da literatura (RSL) e métodos de tomada de decisão multicritério (TDMC).

Figura 5 - Produção científica do campo.



Fonte: o Autor (2024)

Figura 6 - Métodos de pesquisa e de análise utilizados nos artigos da amostra.



Fonte: O Autor (2024).

Dos 45 artigos coletados, 26 apresentam algum tipo de listagem das tecnologias da I4.0, na forma de texto, figuras ou tabelas. O Quadro 11 apresenta uma primeira compilação de dados extraídos pela análise de conteúdo após leitura integral das obras, incluindo as tecnologias identificadas em cada artigo, o método de pesquisa utilizado, e o local de extração dos dados dentro do corpo do texto (KRIPPENDORFF, 2013). Ao todo, foram identificados 75 diferentes termos, classificados como tecnologias da I4.0 segundo esses autores.

Em sequência, apresenta-se no Quadro 12 uma síntese de 17 tecnologias que compreendem os termos encontrados pela análise de conteúdo. O agrupamento foi realizado pela interpretação do autor sobre as definições de cada termo encontrado. Apresentam-se os termos agrupados e a respectiva frequência em número de artigos (entre parênteses); os artigos da amostra que as citam; a frequência total de ocorrência, pela soma dos termos individuais; e uma definição proveniente da literatura.

Como última análise sobre os dados coletados, apresenta-se na Figura 7 a classificação das tecnologias por frequência de citação, em número de artigos. Um primeiro grupo (verde) se destaca com tecnologias frequentemente associadas aos SMD, sendo identificadas em 16 – 33 artigos da amostra, com frequência acumulada superior a 50%. Um segundo grupo (amarelo), traz tecnologias ocasionalmente associadas, sendo citadas em 6 – 14 artigos e com frequência acumulada de 60% a 90%. Um terceiro grupo (vermelho) mostra tecnologias raramente associadas, citadas em 2 – 5 artigos e com frequência acumulada de 93% a 100%.

Quadro 11 - Compilação de tecnologias da I4.0 como identificadas pelos autores do campo.

Artigo	Método de pesquisa	Tecnologias segundo o artigo	Fonte
AJMERA; JAIN (2019)	Levantamento	Integração horizontal e vertical de sistemas; Internet das coisas; Segurança cibernética; A nuvem; Big data analytics; Simulação; Manufatura aditiva; Realidade aumentada; Robôs autônomos	Tabela 1, Pg. 3
ALMAKAYEEL (2023)	Levantamento	Internet das coisas; Sistemas ciberfísicos; Computação em nuvem; Big data analytics; Identificação por radiofrequência	Pg. 1
ALSUWAIDAN (2020)	Estudo de caso	Comunicação máquina-a-máquina; Internet das coisas; Sistemas ciberfísicos; Aprendizado de máquina; Big data	Pg. 2-4
ASSANDRE; MARTINS (2023)	Mapeamento científico	Big data analytics; Aprendizado de máquina; Mineração de dados; Aprendizado profundo; Computação em nuvem; Internet das coisas; Inteligência artificial	Figuras 6 e 7, Pg. 373-374
AZEVEDO et al. (2021)	Estudo de caso	Gestão da produção baseada em TI; Manufatura avançada; Impressão 3D/Manufatura aditiva; Sistemas ciberfísicos; Internet das coisas/internet dos serviços; Segurança cibernética; Computação em nuvem; Produtos/partes/materiais inteligentes; Tecnologia para economia/eficiência energética; Sistemas de controle inteligente; Tecnologia visual; Análise de dados/Big data	Figura 5, Pg. 13
BAMAKAN et al. (2021)	Modelagem	Inteligência artificial; Internet das coisas; Big data analytics; Blockchain	Pg. 678
BERRAH et al. (2021)	Estudo de caso	Big data; Internet das coisas; Integração de sistemas; Sistemas ciberfísicos; Realidade aumentada; Simulação; Computação em nuvem; Inteligência artificial; Segurança cibernética	Pg. 12-14
BIENHAUS; HADDUD (2018)	Levantamento	Inteligência artificial; Big data; Internet das coisas	Pg. 1
CLAUSEN et al. (2020)	Levantamento	Computação em nuvem; Internet das coisas; Big data; Inteligência artificial	Pg. 4
FREDERICO et al. (2020)	RSL	Internet das coisas; Big data analytics; Computação em nuvem; Inteligência artificial; Identificação por radiofrequência; Segurança cibernética; Robótica e automação; Realidade aumentada; Nanotecnologia; Tecnologia de sensores; Veículos autômatos; Impressão 3D; Tecnologia móvel; Omnichannel	Tabela 1, Pg. 7
KAMBUR; YILDIRIM (2022)	RSL	Internet das coisas; Simulação; Sistemas ciberfísicos; Fábricas inteligentes; Realidade virtual; Sistemas de computação em nuvem	Pg. 15
KLOVIENE; UOSYTE (2019)	Estudo de caso	Digitalização; Big data; Internet das coisas; Sistemas em nuvem; Interação homem-máquina; Robótica	Figura 2, Pg. 479
KORSEN; INGVALDSEN (2022)	Estudo de caso	Manufatura aditiva; Sensoria; Sistemas ciberfísicos; Internet das coisas; Big data; Análise de negócio; Manufatura em nuvem; Inteligência artificial; Simulação; Realidade aumentada	Pg. 1059
KUMAR et al. (2022)	Levantamento	Internet das coisas; Internet industrial das coisas; Big data analytics; Sistemas ciberfísicos; Realidade aumentada; Armazenamento/computação em nuvem; Blockchain; Inteligência artificial; Automação; Manufatura aditiva; Redes 5G; Gêmeos digitais	Pg. 365-366
LLINAS; ABAD (2019)	Levantamento	Robótica; Inteligência artificial; Big data; Impressão 3D; Internet das coisas	Pg. 191
LOPES; MARTINS (2021)	Mapeamento científico	Internet das coisas/dos serviços; Fábricas inteligentes; Big data analytics; Sistemas ciberfísicos; Simulação; Realidade aumentada; Robôs autônomos; Manufatura aditiva; Computação em nuvem; Segurança cibernética; Integração horizontal e vertical de sistemas	Pg. 1912-1913
MAHDIRAJI et al. (2022)	Levantamento	Realidade virtual; Simulação; Manufatura aditiva/impressão 3D; Inteligência artificial; Big data analytics; Tecnologias em nuvem; Internet das coisas; Identificação por radiofrequência; Comunicação máquina-a-máquina; Identificação e coleta de dados automáticas; Robótica; Drones de entrega; Sistemas ciberfísicos; Segurança cibernética	Tabela 3
OBERMAYER et al. (2022)	Estudo de caso	Aparelhos móveis; Plataformas de internet das coisas; Tecnologias de detecção de localização; Interfaces humano-máquina avançadas; Autenticação e detecção de fraudes; Impressão 3D; Sensores inteligentes; Big data analytics e algoritmos avançados; Interação com o consumidor em multinível e criação de perfil de consumidor; Realidade aumentada/vestuário; Computação em nuvem	Figura 1, Pg. 1030
PARHI et al. (2021)	RSL	Sistemas ciberfísicos; Internet das coisas; Cobótica; Robôs autônomos; Máquinas autônomas; Integração horizontal e vertical; Modelagem e simulação; Realidade aumentada; Gêmeos digitais; Big data analytics; Manufatura aditiva; Segurança cibernética; Manufatura em nuvem	Figura 7, Pg. 244
ROBERT et al. (2020)	Estudo de caso	Big data; Manufatura em nuvem; Internet das coisas; Sistemas ciberfísicos; Robótica	Figura 1, Pg. 5
SILVA JÚNIOR et al. (2022)	Levantamento	Simulação; Big data e análise; Internet das coisas; Computação em nuvem; Sistemas ciberfísicos; Segurança cibernética; Robótica colaborativa; Realidade aumentada; Manufatura aditiva; Integração de sistemas	Figura 2, Pg. 8
SOUIFI et al. (2022)	Modelagem	Sistemas ciberfísicos; Internet das coisas; Big data; Computação em nuvem; Gêmeos digitais; Cobótica; Realidade aumentada; Realidade virtual	Pg. 1
URBAN; ZAWADSKI (2022)	Estudo de caso	Realidade aumentada; Internet das coisas; Big data	Pg. 20
VIET; KRAVETS (2022)	RSL	Sistemas ciberfísicos; Internet das coisas; Nuvem; Big data; Gêmeos digitais; Aprendizado de máquina; Inteligência artificial; Realidade aumentada; Manufatura aditiva; Fábricas inteligentes; Blockchain	Pg. 22
VIMAL et al. (2022)	Levantamento	Internet das coisas; Comunicação máquina-a-máquina; Sistemas ciberfísicos; Computação em nuvem; Inteligência artificial; Big data analytics	Pg. 460
YIN; QIN (2019)	Estudo de caso	Plataformas baseadas na rede; Internet das coisas; Gestão do ciclo de vida do produto; Computação em nuvem; Sistemas ciberfísicos; Realidade virtual; Big data; Impressão/escaneamento 3D	Figura 2, Pg. 4

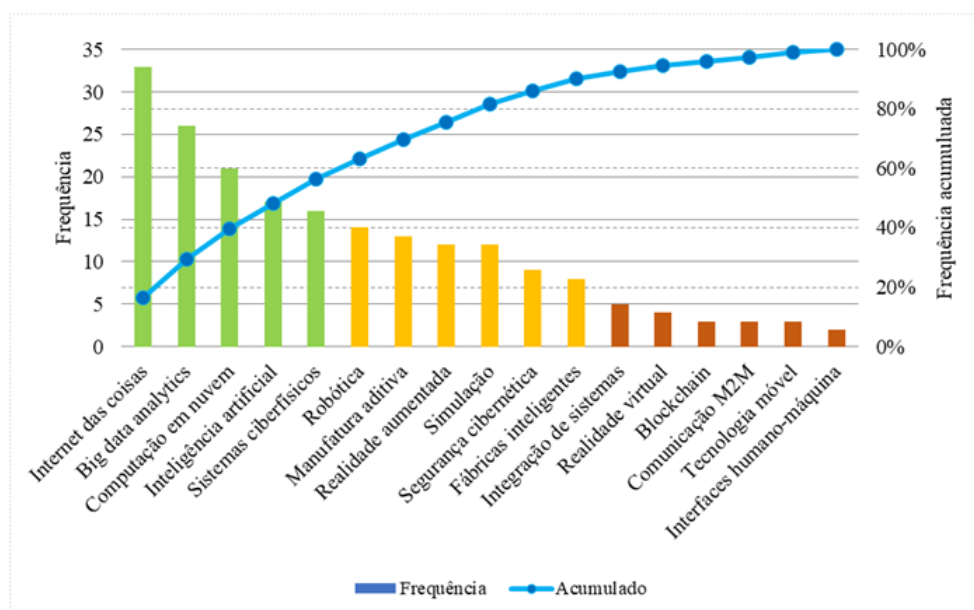
Fonte: o Autor (2024)

Quadro 12 - Síntese e definição das tecnologias da I4.0 associadas aos SMD.

Tecnologias segundo os artigos	ARTIGOS	Tecnologia da I4.0	Frequência total	Definição
Internet das coisas (23); Identificação por radiofrequência (3); Tecnologia de sensores (1); Sensores inteligentes (1); Sensórica (1); Internet das coisas/dos serviços (1); Internet das	AIMERA; JAIN (2019); ALMAKAYEEL (2023); ALSUWAIDAN (2020); ASSANDRE; MARTINS (2023); AZEVEDO et al. (2021); BAMAKAN et al. (2021); BERRAH et al. (2021); BIENHAUS; HADDUD (2018); CLAUSEN et al. (2020); FREDERICO et al. (2020); KAMBUR; YILDIRIM (2022);	Internet das coisas	33	Interconexão de dispositivos sensores e atuadores que fornece a habilidade de compartilhar informação por uma estrutura unificada (GUBBI et al., 2013)
Big data analytics (10); Big data (12); Análise de dados/Big data (1); Análise de big data e algoritmos avançados (1); Big data e análise (1); Mineração de dados (1)	AIMERA; JAIN (2019); ALMAKAYEEL (2023); ALSUWAIDAN (2020); ASSANDRE; MARTINS (2023); AZEVEDO et al. (2021); BAMAKAN et al. (2021); BERRAH et al. (2021); BIENHAUS; HADDUD (2018); CLAUSEN et al. (2020); FREDERICO et al. (2020); KLOVIENE; UOSYTE (2019); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); LLINAS; ABAD (2019); LOPES; MARTINS (2021); MAHDIRAJI et al. (2022); OBERMAYER et al. (2022); PARHI et al. (2021); ROBERT et al. (2020); SILVA JÚNIOR et al. (2022); SOUFI et al. (2022); URBAN; ZAWADSKI (2022); VIET; KRAVETS (2022); VIMAL et al. (2022); YIN; QIN (2019)	Big data analytics	26	Tecnologia de análise de dados projetada para lidar com desafios de tamanho, variedade e velocidade de dados (GANDOMI; HAIDER, 2015)
Computação em nuvem (12); Manufatura em nuvem (3); A nuvem (1); Nuvem (1); Tecnologias em nuvem (1); Sistemas de computação em nuvem (1); Sistemas em nuvem (1); Armazenamento/computação em nuvem (1)	AIMERA; JAIN (2019); ALMAKAYEEL (2023); ASSANDRE; MARTINS (2023); AZEVEDO et al. (2021); BERRAH et al. (2021); CLAUSEN et al. (2020); FREDERICO et al. (2020); KAMBUR; YILDIRIM (2022); KLOVIENE; UOSYTE (2019); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); MAHDIRAJI et al. (2022); LOPES; MARTINS (2021); OBERMAYER et al. (2022); PARHI et al. (2021); ROBERT et al. (2020); SILVA JÚNIOR et al. (2022); SOUFI et al. (2022); VIET; KRAVETS (2022); VIMAL et al. (2022); YIN; QIN (2019)	Computação em nuvem	21	Conjunto de computadores interconectados e virtualizados que providenciam e apresentam de forma dinâmica um recurso computacional mais unificado (BUYYA; RANJAN; CALHEIROS, 2009)
Inteligência artificial (12); Aprendizado de máquina (3); Aprendizado profundo (1); Identificação e coleta de dados automáticas (1)	ALSUWAIDAN (2020); ASSANDRE; MARTINS (2023); BAMAKAN et al. (2021); BERRAH et al. (2021); BIENHAUS; HADDUD (2018); CLAUSEN et al. (2020); FREDERICO et al. (2020); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); LLINAS; ABAD (2019); MAHDIRAJI et al. (2022); VIET; KRAVETS (2022); VIMAL et al. (2022)	Inteligência artificial	17	Tecnologia que aproveita computadores e máquinas para imitar as capacidades de resolução de problemas e a tomada de decisão da mente humana (IBM, 2020)
Sistemas ciberfísicos (16)	ALMAKAYEEL (2023); ALSUWAIDAN (2020); AZEVEDO et al. (2021); BERRAH et al. (2021); KAMBUR; YILDIRIM (2022); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); LOPES; MARTINS (2021); MAHDIRAJI et al. (2022); PARHI et al. (2021); ROBERT et al. (2020); SILVA JÚNIOR et al. (2022); SOUFI et al. (2022); VIET; KRAVETS (2022); VIMAL et al. (2022); YIN; QIN (2019)	Sistemas ciberfísicos	16	Sistemas que integram processos físicos, recursos computacionais e capacidades de comunicação (PASQUALETTI; DÖRFLER; BULLO, 2013)
Robótica (4); Cobótica (2); Robôs autônomos (3); Robótica colaborativa (1); Robótica e automação (1); Drones de entrega (1); Veículos autônomos (1); Máquinas autônomas (1)	AIMERA; JAIN (2019); FREDERICO et al. (2020); KLOVIENE; UOSYTE (2019); LLINAS; ABAD (2019); LOPES; MARTINS (2021); MAHDIRAJI et al. (2022); PARHI et al. (2021); ROBERT et al. (2020); SILVA JÚNIOR et al. (2022); SOUFI et al. (2022)	Robótica	14	Tecnologia interdisciplinar da ciência da computação e da engenharia cujo objetivo é a utilização de máquinas que podem ajudar os seres humanos (FREDERICO et al., 2020)
Manufatura aditiva (7); Impressão 3D (3); Manufatura aditiva/impressão 3D (1); Impressão 3D/Manufatura aditiva (1); Impressão/escaneamento 3D (1)	AIMERA; JAIN (2019); AZEVEDO et al. (2021); FREDERICO et al. (2020); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); LLINAS; ABAD (2019); LOPES; MARTINS (2021); MAHDIRAJI et al. (2022); OBERMAYER et al. (2022); PARHI et al. (2021); SILVA JÚNIOR et al. (2022); VIET; KRAVETS (2022); YIN; QIN (2019)	Manufatura aditiva	13	Tecnologia de fabricação de uma ampla variedade de estruturas e geometrias complexas de modelos de dados tridimensionais (NGO et al., 2018)
Realidade aumentada (11); Realidade aumentada/vestuário (1)	AIMERA; JAIN (2019); BERRAH et al. (2021); FREDERICO et al. (2020); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); LOPES; MARTINS (2021); OBERMAYER et al. (2022); PARHI et al. (2021); SILVA JÚNIOR et al. (2022); SOUFI et al. (2022); URBAN; ZAWADSKI (2022); VIET; KRAVETS (2022)	Realidade aumentada	12	Variação de ambiente virtual que imerge o usuário completamente em um ambiente sintético (AZUMA, 1997)
Simulação (7); Gêmeos digitais (4); Modelagem e simulação (1)	AIMERA; JAIN (2019); BERRAH et al. (2021); KAMBUR; YILDIRIM (2022); KORSEN; INGVALDSEN (2022); KUMAR et al. (2022); LOPES; MARTINS (2021); MAHDIRAJI et al. (2022); PARHI et al. (2021); SILVA JÚNIOR et al. (2022); SOUFI et al. (2022); VIET; KRAVETS (2022)	Simulação	12	A imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo (BANKS, 1996)
Segurança cibernética (8); Autenticação e detecção de fraudes (1)	AIMERA; JAIN (2019); AZEVEDO et al. (2021); BERRAH et al. (2021); FREDERICO et al. (2020); LOPES; MARTINS (2021); MAHDIRAJI et al. (2022); OBERMAYER et al. (2022); PARHI et al. (2021); SILVA JÚNIOR et al. (2022)	Segurança cibernética	9	Proteção do espaço cibernético, de informações eletrônicas, de tecnologias de informação e comunicação que suportam o espaço cibernético e os seus usuários (VON SOLMS; VAN NIEKERK, 2013)
Fábricas inteligentes (3); Automação (1); Gestão da produção baseada em TI (1); Digitalização (1); Manufatura avançada (1); Sistemas de controle inteligente (1)	AZEVEDO et al. (2021); KAMBUR; YILDIRIM (2022); KLOVIENE; UOSYTE (2019); KUMAR et al. (2022); LOPES; MARTINS (2021); VIET; KRAVETS (2022)	Fábricas inteligentes	8	Solução de fabricação que fornece processos de produção flexíveis, digitalizados, adaptáveis e autônomos (RADZWON et al., 2014)
Integração de sistemas (2); Integração horizontal e vertical de sistemas (2); Integração horizontal e vertical (1)	AIMERA; JAIN (2019); BERRAH et al. (2021); LOPES; MARTINS (2021); PARHI et al. (2021); SILVA JÚNIOR et al. (2022)	Integração de sistemas	5	Tecnologias para integração dos sistemas de informação e comunicação em diferentes níveis hierárquicos de uma organização, conectando os níveis de gestão aos níveis de produção (DALENOGARE et al., 2018)
Realidade virtual (4)	KAMBUR; YILDIRIM (2022); MAHDIRAJI et al. (2022); SOUFI et al. (2022); YIN; QIN (2019)	Realidade virtual	4	Estímulos sensoriais de alta fidelidade com o objetivo de produzir experiências realísticas que colocam o usuário em um ambiente simulado (BOWMAN; MCMAHAN, 2007)
Blockchain (3)	BAMAKAN et al. (2021); KUMAR et al. (2022); VIET; KRAVETS (2022)	Blockchain	3	Solução para bases de dados distribuídas que mantêm uma lista continuamente crescente de registro de dados e exige confirmação pelos nós participantes (YLI-HUUMO et al., 2016)
Comunicação máquina-a-máquina (3)	ALSUWAIDAN (2020); MAHDIRAJI et al. (2022); VIMAL et al. (2022)	Comunicação máquina-a-máquina	3	Refere-se à comunicação direta entre dispositivos usando qualquer meio de comunicação, como com fio ou sem fio (FREDERICO et al., 2020)
Tecnologia móvel (1); Redes 5G (1); Aparelhos móveis (1)	FREDERICO et al. (2020); KUMAR et al. (2022); OBERMAYER et al. (2022)	Tecnologia móvel	3	Dispositivos tecnológicos, que são portáteis e leves e, por meio de cabos de dados ou conexões sem fio, têm capacidade de Internet (KEENGWE; BHARGAVA, 2014)
Interfaces humano-máquina avançadas (1); Interação homem-máquina (1)	KLOVIENE; UOSYTE (2019); OBERMAYER et al. (2022)	Interfaces humano-máquina	2	Interação e comunicação entre usuário e máquina, criando um sistema técnico dinâmico (JOHANSEN, 2009).
Tecnologias de detecção de localização (1); Tecnologia para economia/eficiência energética (1); Produtos/partes/materiais inteligentes (1); Plataformas baseadas na rede (1); Omnichannel (1); Nanotecnologia (1); Interação com o consumidor em multinível e criação de perfil de consumidor (1); Gestão do ciclo de vida do produto (1); Análise de negócio (1); Tecnologia visual (1)	AZEVEDO et al. (2021); FREDERICO et al. (2020); KORSEN; INGVALDSEN (2022); OBERMAYER et al. (2022); YIN; QIN (2019)	Outros termos	10	-

Fonte: O Autor (2024).

Figura 7 - Classificação das tecnologias da I4.0 por frequência de citação (número de artigos).



Fonte: o Autor (2024).

4.5 DISCUSSÃO

Como mostra a Figura 6, o campo de pesquisa gerado pela interseção do estudo dos SMD e das novas tecnologias da I4.0 é pequeno, porém crescente, confirmando resultados de pesquisas anteriores (FREDERICO et al., 2021; LOPES; MARTINS, 2021). A maior parte dos artigos da amostra são de natureza empírica, como estudos de casos e *surveys* (Figura 7). Isso confirma que os poucos trabalhos existentes no campo são mais focados em aspectos técnicos do que gerenciais, e que os resultados são de limitada extrapolação (FREDERICO et al., 2021). Outros autores já haviam identificado que isso se reflete na estrutura intelectual do campo, cuja produção deriva das áreas de engenharia, tecnologia e ciência da computação, e poucos estudos são oriundos das áreas de gestão de operações e administração de empresas (LOPES; MARTINS, 2021).

Uma vez que a pesquisa sobre a Quarta Revolução Industrial é relativamente nova, justifica-se a falta de consenso sobre as tecnologias da I4.0, identificada no Quadro 11. Os SMD que usam as tecnologias da I4.0 se mostram mais autônomos e heterogêneos, e suas medidas de desempenho são capazes de capturar contextos locais e externos (LOPES; MARTINS, 2021). Modelos disponíveis incluem o de Shin et al. (2018), que é uma proposta para avaliar os aspectos de qualidade de uma organização na I4.0. A ferramenta se mostra particularmente útil para identificar pontos fracos nos SMD, mas carece de aprofundamento

sobre sua relação com as tecnologias da I4.0. Outro exemplo de modelo estrutural mais simples busca mostrar como as tecnologias da I4.0 têm influência nos processos dos SMD (KLOVIENE; UOSYTE, 2019). Já o modelo proposto por Yin e Qin (2019) é direcionado para o desenvolvimento de produtos, auxiliado pelas tecnologias da I4.0 e diretrizes de um SMD. Yin e Qin (2019) é significativo para o campo ao mostrar que a relação entre SMD e a I4.0 pode ser abordada por diferentes perspectivas dentro da gestão de empresas.

As 5 tecnologias classificadas no primeiro grupo (Figura 8) são mais frequentemente associadas aos SMD. Além da representatividade quantitativa em frequência de citação, os autores do campo reconhecem um maior número de especificidades relacionadas ao seu potencial colaborativo nos SMD:

1. *Internet das Coisas*: Promoção da produtividade, eficiência e confiabilidade ao conectar máquinas inteligentes, capacidade analítica preditiva e colaboração homem-máquina. Aumenta a colaboração remota entre as partes interessadas, possibilita a captura de dados em tempo real, melhora processos de tomada de decisão, e melhor a comunicação de forma geral (LOPES; MARTINS, 2021; MAHDIRAJI et al., 2022);
2. *Big Data Analytics*: Permite a análise preditiva do desempenho, a geração de dados para indicadores de desempenho, dá suporte a problemas de tomada de decisão, possibilita a utilização de dados não estruturados, e aumenta a transparência (ASSANDRE; MARTINS, 2023; LOPES; MARTINS, 2021; MAHDIRAJI et al., 2022; NUDURUPATI et al., 2022a).
3. *Computação em Nuvem*: Permite o armazenamento e computação de grandes volumes de dados, promovendo processos de produção e distribuição, gestão e compartilhamento de recursos, flexibilidade, e aumentando o desempenho à baixo custo (MAHDIRAJI et al., 2022);
4. *Inteligência Artificial*: Permite a utilização de dados não estruturados, a automação nos processos de coleta e análise de dados e a melhoria do desempenho (ASSANDRE; MARTINS, 2023; MAHDIRAJI et al., 2022);
5. *Sistemas Ciberfísicos*: Permite o monitoramento em tempo real da medição de desempenho, a melhoria em processos de tomada de decisão descentralizados, resolve problemas de confiança, e aumenta a segurança (MAHDIRAJI et al., 2022; LOPES; MARTINS, 2021).

4.6 CONCLUSÕES

O objetivo desta revisão sistemática da literatura era identificar quais tecnologias da I4.0 podem auxiliar os sistemas de medição de desempenho. A partir de um levantamento bibliográfico foram analisados os artigos do campo por uma visão tanto descritiva quanto

crítica. Percebe-se um aumento de interesse no campo e a dominância de pesquisas empíricas como estudos de caso e *surveys*. A partir de técnicas de análise de conteúdo foi possível identificar 75 termos sintetizados em 17 tecnologias associadas aos SMD. Destas, um grupo de 5 tecnologias se destaca, tanto pela frequência de citação como pelo reconhecimento dos autores do campo: internet das coisas, *big data analytics*, computação em nuvem, inteligência artificial, e sistemas ciberfísicos. Assim este trabalho preenche uma lacuna da literatura, ao tempo que é uma contribuição para gestores que buscam inovação na medição de desempenho.

5 PRÁTICAS DA GESTÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEL: REVISÃO TERCIÁRIA DA LITERATURA

5.1 INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade na Gestão de Cadeias de Suprimentos (GCS) ganhou relevância nos meios empresarial e acadêmico nas últimas décadas (PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019). Isso é uma consequência de fatores internos e externos, relacionados com o contínuo crescimento da concorrência ao nível global que exige mudanças nas estratégias organizacionais (AZEVEDO et al., 2021). Esses fatores direcionam a GCS a mudar sua perspectiva puramente econômica/financeira e a adotar práticas sustentáveis, culminando em resultados nas três dimensões da sustentabilidade: a social, a econômica e a ambiental (DROHOMERETSKI et al., 2015; ELKINGTON, 1997). Tais práticas são atividades empreendidas pelas cadeias de suprimentos a atingirem seus objetivos gerais de maneira lucrativa e reconhecem a necessidade de também considerar os valores ambientais e sociais (KOH et al., 2007; GIUNIPERO et al., 2012).

À aplicação dos conceitos de sustentabilidade na GCS dá-se o nome de Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável (GCSS), que cada vez mais se mostra fundamental para o sucesso das organizações (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019). A GCSS é definida como a “gestão das operações, recursos, informações e fundos da cadeia de suprimentos com o intuito de maximizar a lucratividade enquanto minimiza o impacto ambiental e maximiza o bem-estar social” (HASSINI; SURTI; SEARCY, 2012, p. 70). Apesar da crescente popularidade, a GCSS já vem sendo desenvolvida há décadas como uma solução para melhoria econômica, social e ambiental (ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021).

A literatura apresenta vários modelos já disponíveis como referências para melhorar a taxa de sucesso de implantação das práticas da GCSS (AZEVEDO et al., 2021). Porém, há falta de consenso sobre tais práticas, e desta forma, este capítulo tem por objetivo identificar quais são as práticas da GCSS. Para atingir o objetivo proposto, foi realizada uma revisão terciária da literatura, uma vez que existem revisões de literatura sobre o tema, auxiliada por bibliometria descritiva. A revisão terciária fornece uma análise mais ampla do campo, e proporciona uma atualização ao estado da arte (KITCHENHAM et al., 2007). Esse tipo de síntese investiga os resultados de revisões sistemáticas ou meta-análises já publicadas, que, por sua vez, observaram estudos primários para realizar suas compilações (KITCHENHAM et al., 2007).

O Capítulo é estruturado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se a fundamentação teórica sobre a GCSS e suas práticas (Seção 2). Em seguida expõe-se o método utilizado para identificação, coleta e análise de revisões (Seção 3). Na sequência, exibem-se os resultados dos métodos bibliográficos aplicados e discussões (Seção 4). Por fim, apresentam-se as conclusões deste trabalho (Seção 5).

5.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.2.1 Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável

Uma cadeia de suprimentos inclui todos os elos relacionados ao fluxo de produção e informações, desde os fornecedores, a produção, e distribuição e a venda para usuários finais (LAMBERT; POHLEN, 2001). A Figura 8 apresenta os elos considerados por Lambert e Pohlen (2001).

Figura 8 – Elos e fluxos da cadeia de suprimentos

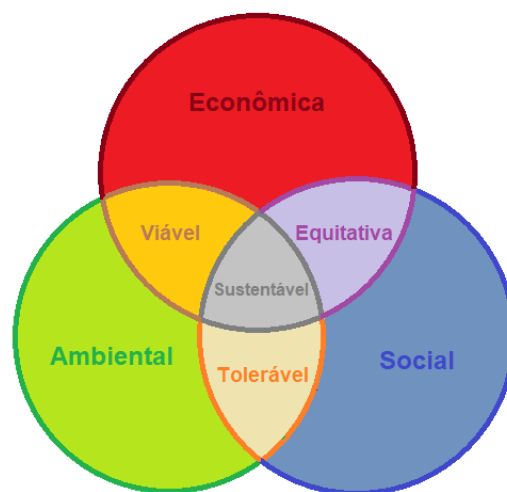


Fonte: Adaptado de Lambert e Pohlen (2001, p. 2, tradução do autor)

A definição mais popular de sustentabilidade surgiu em 1987 pelo Relatório Brundtland da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (PRESLEY; MEADE; SARKIS, 2007). Segundo o relatório, sustentabilidade é "atender às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas necessidades" (BRUNDTLAND, 1987, p. 8). A abordagem tridimensional da sustentabilidade também é amplamente reconhecida como *triple bottom line* (TBL), termo que vincula os modelos de negócios às exigências econômicas, ambientais e sociais para (ELKINGTON, 1997;

SANCHEZ-FLORES et al., 2020). Outros autores complementam o campo ao considerarem a **sustentabilidade parcial** (MORRISON-SAUNDERS; THERIVEL, 2006; SAYEM, 2012). A sustentabilidade parcial surge uma vez que os praticantes e acadêmicos nem sempre consideram todas as três dimensões, mas muitas vezes apenas uma única dimensão ou uma combinação de duas (TAJBAKSH; HASSINI, 2015). A partir disso, a sustentabilidade parcial é aquela resultante do cumprimento de um ou dois componentes da TBL (Figura 9).

Figura 9 - Relação entre a sustentabilidade, a sustentabilidade parcial, e as três dimensões.



Fonte: Sayem (2012, p. 6, tradução do autor)

A partir da disseminação do conceito de sustentabilidade, a consciência ambiental foi sendo incorporada à GCS gradativamente desde o início da década de 1990, devido a pressões externas e ao aumento da competitividade global (KHAN et al., 2021). O termo Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde (GCSV) surge nos anos seguintes pela incorporação de práticas ambientais às atividades da GCS tradicional (GREEN; MORTON; NEW, 1996; RAJEEV et al., 2017). Já a partir dos anos 2000, a GCSS se desenvolve como uma área que supre uma lacuna, integrando em sua estratégia a preocupação social, adicionada à consciência ambiental e ao tradicional objetivo econômico (KHAN et al., 2021; SEURING; MÜLLER, 2008). O objetivo da GCSS é fundir atividades sob as três dimensões, para alcançar vantagens competitivas sustentáveis da organização e ainda preservar os recursos para gerações futuras (ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021).

Nos últimos anos, a área da GCSS está crescendo e amadurecendo (LIS; SUDOLSKA; TOMANEK, 2020). Vários estudos empíricos e revisões foram desenvolvidos na área, que ainda possui muito potencial de crescimento devido à ainda baixa taxa de adoção de suas

práticas, especialmente em economias emergentes (KHAN et al., 2021). O foco principal da pesquisa sobre a GCSS ainda é a dimensão ambiental, enquanto os aspectos sociais são frequentemente secundários (GOLD; SEURING; BESKE, 2010; KHAN et al., 2021). Porém, cada vez mais a evolução da área atrai a atenção de pesquisadores e gestores no estudo de vários aspectos mais complexos sobre a GCSS (KHAN et al., 2021; RAJEEV et al., 2017). O aumento de interesse na área é justificado tanto pelas crescentes pressões externas para adoção de práticas verdes quanto pela necessidade de incorporar perspectivas sociais na GCS (KHAN et al., 2021; PANIGRAHI; BAHINIPATI; JAIN, 2018).

5.2.2 Práticas da Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável

As práticas da GCS envolvem atividades empreendidas pelas organizações para promover uma gestão eficaz de sua cadeia de suprimentos (KOH et al., 2007). Por sua vez, as práticas da GCSS são aquelas que “reconhecem a necessidade de considerar os valores ambientais e sociais, além dos econômicos, e que ajudarão a organização a atingir seus objetivos gerais de maneira lucrativa e sustentável” (GIUNIPERO et al., 2012).

Apesar da importância, não existe um consenso na literatura sobre quais são essas práticas. Diversos autores frequentemente consideram como práticas da GCSS a incorporação da sustentabilidade no design de produtos e processos, manufatura, logística, relações com clientes e fornecedores, na gestão da qualidade, e na minimização de impactos sociais e ambientais (BALIGA et al., 2019; ASIF et al., 2020). Nas últimas duas décadas, as práticas sustentáveis foram estudadas e implantadas em cadeias de suprimentos de vários setores industriais (BALIGA; RAUT; KAMBLE, 2019).

Motivos internos e externos levam a GCS a adotar práticas sustentáveis (DROHOMERETSKI et al., 2015; DUBEY; GUNASEKARAN; PAPADOPOULOS, 2017). Para obterem sucesso nas práticas, as cadeias de suprimentos devem colaborar com todas as partes interessadas enquanto maximizam a utilização de recursos, informações, o lucro, e as propostas de valor aos consumidores (PANIGRAHI; BAHINIPATI; JAIN, 2018).

Para que a GCS incorpore as práticas sustentáveis ela deve ampliar as suas preocupações focadas em lucro para incluir a proteção do meio-ambiente e os interesses da sociedade (AHMAD et al., 2017). Assim sendo, as práticas da GCSS são caracterizadas por duas tendências: foco ambiental e foco social (BALIGA; RAUT; KAMBLE, 2019). Em outras palavras, os estudos sobre o tema são desenvolvidos com o intuito de controlar o impacto no meio-ambiente ou para garantir o bem-estar das pessoas envolvidas. Até então, o foco

ambiental é o mais explorado no estudo e nas práticas da GCSS (RAJEEV et al., 2017; BALIGA; RAUT; KAMBLE, 2019).

Os autores da área listam as principais dificuldades em exercer as práticas: falta de treinamento, qualificação e/ou motivação; incompetências dos fornecedores; implicações em custo; dificuldades em operacionalizar; mudanças de valores; subjetividade das avaliações; complexidade no projeto para redução de recursos e eficiência; instalações inadequadas para práticas de logística reversa; falta de tecnologias modernas; e falhas nos atuais SMD (ABBASI et al., 2017; ANSARI; KANT, 2017; DUBEY; GUNASEKARAN; PAPADOPOULOS, 2017; KHAN et al., 2021).

Salienta-se que nem todas as dificuldades exercem o mesmo impacto para diferentes práticas (RAUT; NARKHEDE; GARDAS, 2017). Ainda, algumas práticas da GCSS são específicas à determinados elos da cadeia de suprimentos (HERRMANN et al., 2021). Assim, diferentes elos da cadeia de suprimentos podem ter mais facilidade ou dificuldade, e exigir maior ou menor colaboração da GCSS para estar alinhado aos objetivos estratégicos comuns.

5.3 MÉTODO DE PESQUISA

Para identificar quais são as práticas da GCSS foi realizada uma revisão terciária da literatura. A revisão terciária é uma revisão sistemática da literatura (RSL) de estudos secundários, relacionados à mesma questão de pesquisa. (KITCHENHAM et al., 2007). O resultado fornece uma visão geral do corpo de informações disponíveis para um determinado tópico, coletando e avaliando de forma sistemática informações de várias fontes (KITCHENHAM et al., 2007). Nesse sentido, a revisão terciária também possui um método rigoroso e auditável, e pode ser dividida em três fases: planejamento, condução e relato (KITCHENHAM et al., 2007).

Em um domínio onde já exista um número significativo de revisões, torna-se possível a condução de uma revisão terciária, a fim de responder questões mais abrangentes (KITCHENHAM et al., 2007). O protocolo adotado para a revisão terciária é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Protocolo para estudo terciário de revisões de literatura



Fonte: adaptado de Kitchenham et al. (2007) e Templier e Paré (2015).

Formulação do Problema: De acordo com o objetivo geral da pesquisa, o método visa identificar as práticas da GCSS. O trabalho justifica-se pela falta de consenso sobre as práticas da GCSS.

Busca na Literatura: A base indexadora *Web of Science* foi escolhida para coleta de dados, dado a abrangência de periódicos indexados e a organização de seus metadados (MONGEON; PAUL-HUS, 2016; SANTANA; COBO, 2020). Ainda, a escolha da base se justifica pelo crescente envolvimento de pesquisadores de diferentes países e áreas do conhecimento (ZU; LIU, 2020). Para garantir consistência na elegibilidade dos documentos, os seguintes princípios foram definidos: não foram considerados documentos cujo idioma não fosse inglês; foram considerados apenas revisões da literatura, publicadas em periódicos com processo de *peer-review*, para uma análise de produção científica mais qualificada e consolidada; e não se usou filtro de ano para as publicações. A seguinte *string* de busca foi utilizada, baseada em diversos autores que fizeram revisão de literatura sobre o tema (BALON, 2019; GIUFFRIDA; MANGIARACINA, 2020; PIMENTA et al., 2021; AGRAWAL et al., 2021):

TI=("pract*") AND TS=((("GSC*" OR "SSC*") OR (("supply chain*" OR "value chain" OR "distribution network") AND ("sustain*" OR "green*" OR "environ*" OR "social*" OR "ethic*"))))

Triagem para Inclusão: Para serem considerados à revisão terciária e à análise bibliométrica, foi realizada minuciosa leitura completa das obras a fim de reconhecer o método de pesquisa utilizado, sendo incluídas apenas pesquisas bibliográficas

Avaliação da Qualidade: As revisões aprovadas na etapa de triagem foram avaliadas quanto à sistematicidade de seus métodos. Apenas revisões com métodos sistematizados foram incluídas na análise, uma vez que revisões informais não permitem a reprodutibilidade.

Extração de Dados: Para a bibliometria, o pacote Bibliometrix, versão 3.2.1 possibilitou criação de gráficos e tabelas utilizando metadados dos documentos. Os registros da amostra foram processados no ambiente integrado de desenvolvimento RStudio, versão 2022.02.0

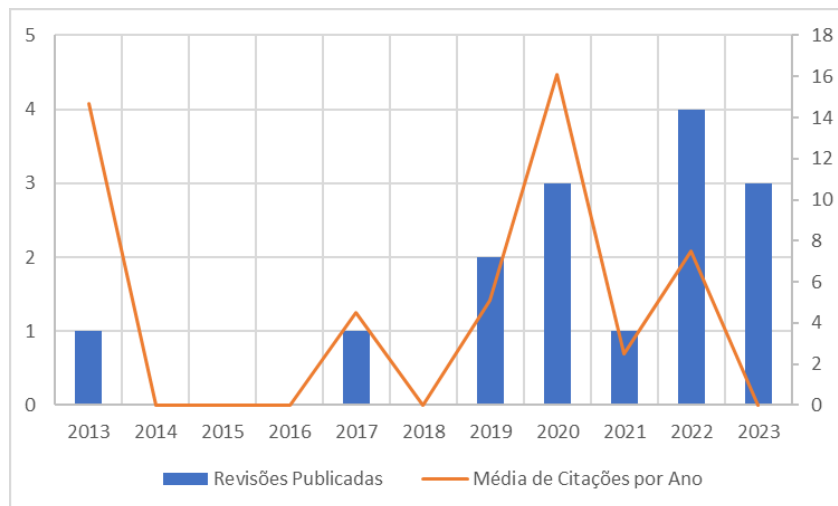
(ARIA; CUCCURULLO, 2017). Para a revisão terciária, foram consideradas relevantes todas as informações quanto às práticas da GCSS explicitadas dos artigos aprovados na avaliação da qualidade, seja na forma de texto, figuras ou tabelas. Nesta pesquisa, técnicas de bibliometria descritiva ajudam a caracterizar o campo e medir o impacto dos estudos de pesquisa (CHAUHAN, SINGH, 2019; SHARMA; JABBOUR; SOUSA JABBOUR, 2020).

Análise e Síntese de Dados: Com base nos dados coletados, apresenta-se um quadro resumo que lista as práticas da GCSS segundo a visão de diferentes autores. Um conjunto reduzido de práticas foi sintetizado e apresentado em um segundo quadro, com base em sua frequência de ocorrência, de maneira similar ao método proposto por Talib et al. (2010) para identificar as práticas da GCS. As respectivas definições são resultado da interpretação do autor das evidências desta revisão terciária.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A coleta de dados ocorreu em 06 de maio de 2023, e resultou em uma amostra inicial de 21 artigos. Dessa amostra inicial, 3 artigos foram excluídos na etapa de triagem por não possuírem foco metodológico bibliográfico. Outros 3 artigos foram eliminados na etapa de avaliação da qualidade por não se caracterizarem como RSL. Os 15 artigos considerados para extração de dados foram publicados entre 2013 e 2023. A produção científica e o impacto, medido em média de citações por ano, é exibido na Figura 11. Nota-se que existe um crescimento mais acentuado no número de revisões sobre o tema a partir de 2019, com número de 4 publicações em 2022 e 3 publicações em 2020 e 2023 (até maio). Esse aumento expressa um crescimento do interesse do tema no meio acadêmico nos últimos anos. Sobre o impacto, é possível notar picos em 2013 e 2020. Naturalmente, a curva de média de citações por ano é decrescente nos últimos anos.

Figura 11 – Produção Científica e Impacto das Revisões



Fonte: o Autor (2024)

A Tabela 1 apresenta as revisões identificadas. Nela, são listadas o número total de citações (TC) e o TC por ano. Percebe-se que Morali e Searcy (2013) e Asif et al. (2020) são os responsáveis pelos picos de impacto identificados na Figura 12. Morali e Searcy (2013) explora a sustentabilidade na GCS no Canadá; e Asif et al. (2020) explora práticas, pressões e *drivers* na GCSV. O periódico Sustainability se destaca com maior quantidade de publicações (3).

Tabela 1 – Revisões da amostra

Revisão	Periódico	Total de Citações (TC)	TC por ano
Morali e Searcy, 2013	J Bus Ethics	147	13,36
Asif et al., 2020	J Clean Prod	119	29,75
Ahmad et al., 2017	J Environ Plann Man	27	3,86
Duque-Urbe et al., 2019	Sustainability-Basel	24	4,80
Balon, 2020	Bus Strategy Dev	18	4,50
Baliga et al., 2019	Benchmarking	17	3,40
Agrawal et al., 2022	Bus Strateg Environ	14	7,00
Choudhary e Sangwan, 2022	Benchmarking	10	5,00
Giuffrida e Mangiaracina, 2020	Sustainability-Basel	8	2,00
Shekarian et al., 2022	Sustainability-Basel	6	3,00
Pimenta et al., 2021	Corp Soc Resp Env Ma	5	1,67
Schilling e Seuring, 2023	Int J Prod Res	1	1,00
Marculetiu et al., 2023	J Bus Logist	1	1,00
Yadav et al., 2023	Int J Oper Prod Man	0	0,00
Said et al., 2022	Middle East J Manag	0	0,00

Fonte: o Autor (2024)

As 15 revisões listadas na Tabela 1 foram analisadas quanto às bases consideradas, dimensões consideradas como foco e as práticas, como listadas pelos autores. Os resultados são expressos no Quadro 13, que resume de uma forma macroscópica as práticas da GCSS.

Primeiro, nota-se que existe uma variedade de bases consideradas pelas revisões, sendo a Scopus e a *Web of Science* as mais comumente usadas. Segundo, ao analisar as revisões quanto às dimensões consideradas, e levando em conta o conceito de sustentabilidade parcial (conforme explicitado na Figura 16), percebe-se uma quantidade similar de revisões que abordam as três dimensões (sustentabilidade) e de revisões que desconsideram a dimensão social (sustentabilidade parcial de viabilidade). Terceiro, a maioria das revisões expressam de forma explícita uma lista de práticas, seja em tabelas, figuras ou no próprio texto do manuscrito. Porém, 3 RSL, apesar da sistematicidade do método, não são explícitas quanto às práticas consideradas. Quarto, muitos dos artigos com foco em sustentabilidade limitam-se ao classificar as práticas entre ambientais e sociais, negligenciando a dimensão econômica.

Logo em seguida, apresenta-se no Quadro 14 uma síntese das práticas identificadas, em um conjunto reduzido de 11 práticas, de maneira similar ao método proposto por Talib et al. (2010), em que agrupa as práticas por similaridade. Também são apresentadas suas respectivas definições, segundo a interpretação das evidências coletadas

Quadro 13 – Análise das práticas da GCSS segundo dados das revisões da amostra

Autores	Ano	Bases	Foco	Práticas segundo as revisões	Fonte
Morali, O; Searcy, C	2013	JSTOR, ProQuest, Science Direct, Scholars Portal, e Google Acadêmico	Sustentabilidade	Não Explicito	-
Ahmad, NKW; de Brito, MP; Rezaei, J; Tavasszy, LA	2017	Emerald, Elsevier, Springer, Wiley, e Google Acadêmico	Sustentabilidade	Comprometimento; Gestão de risco; Integração entre as funções; Gestão do desempenho; Gestão de fornecedores; Gestão da logística; Gestão da produção; Gestão da administração	pg 14-15 (Tabelas 4 e 5)
Baliga, R; Raut, R; Kamble, S	2019	Elsevier, Science Direct, Emerald Insight e EBSCO	Sustentabilidade	Ambiental: Design de produtos e processos sustentáveis; melhoria em embalagens; eficiência energética; logística reversa; compras ambientais; logística verde; colaboração de consumidores; certificação ambiental Social: Ética; saúde e segurança; Equidade; Bem-estar dos empregados; Bem-estar social; Direitos humanos; Comprar socialmente responsáveis; responsabilidade social ao consumidor	pg 363 (Figura 6)
Duque-Urbe, V; Sarache, W; Gutierrez, EV	2019	Scopus e Web of Science	Sustentabilidade	Gestão estratégica e liderança; Gestão de fornecedores; Gestão de compras; Gestão de armazenamento e inventário; Gestão do transporte e distribuição; Gestão da informação e tecnologia; Gestão da energia; Gestão da água; Gestão da comida; Design do hospital; Gestão do desperdício; Comportamento da equipe e comunidade	pg 6-7 (Tabela 1)
Balon, V	2020	Scopus	Viabilidade	Eco-design; Gestão do ambiente interno; Gestão de resíduos; Aspectos da compra verde; Qualidade; Recuperação de produtos	pg 6 (Figura 5)
Asif, MS; Lau, H; Nakandala, D; Fan, YQ; Hurriyet, H	2020	Web of Science, ScienceDirect, e ProQuest	Viabilidade	Certificações; Colaboração com consumidores; Manufatura verde; Compras verdes; Treinamento verde de empregados; Suprimentos verdes; Regulações governamentais; eco-design; logística reversa; cadeia de suprimentos em loop fechado; gestão ecológica de inventário; Marketing verde; avaliação de fornecedores	pg 5 (Figura 2)
Giuffrida, M; Mangiaracina, R	2020	Scopus, Web of Knowledge, e Google Acadêmico	Viabilidade	Não Explicito	-
Pimenta, HCD; Ball, P; Salonitis, K	2021	Scopus, Science Direct, Web of Science e Taylor & Francis online.	Sustentabilidade	Ambientais: Medição e melhoria do desempenho ambiental; Atingir conformidade ambiental legal e regulacional; design para o ambiente; melhorar processos do fornecedores - produção/equipamentos ecológicos; produção mais limpa & prevenção de poluição; Sistemas de gestão ambiental - ISO 14000; Redução de emissões perigosas no ambiente; Logística reversa; Programas de gestão ambiental; Redução na emissão de carbono; Eficiência energética; Economia de materiais; Gestão de fazendas; Integração logística; Melhoria de embalagens; Redução no consumo de água; Estratégias para assegurar subsistência; Eco-rotulagem; Biotecnologia; LCA; Manufatura enxuta; Controle, pesquisa, desenvolvimento e certificação de sementes; Gestão do solo Sociais: Condições de trabalho; Saúde e segurança; Direitos humanos; Código de conduta; Programas de responsabilidade corporativa social; Desenvolvimento da comunidade; Alfabetização de adultos; Padrões e comportamentos de trabalho éticos; Atingir conformidade legal e regulacional de saúde e segurança; Responsabilidade de produto; SA 8000; Empoderamento feminino; Preços justos; Problemas de gênero; Melhor acesso ao plano de saúde do trabalhador; Alívio da pobreza; Salários dignos e recompensas justas; desenvolvimento de habilidades dos trabalhadores; Melhor acesso à educação ao trabalhador; Melhor status nutricional ao trabalhador; Estabilidade de emprego; Problemas relacionados à escravidão; Gestão de desempenho social	pg 12-13 (Tabelas 8 e 9)
Shekarian, E; Ijadi, B; Zare, A; Majava, J	2022	Scopus	Sustentabilidade	Manufatura; Design; Logística; Planejamento e compra de suprimentos; Gestão de sistemas de informação; Gestão da qualidade; Segurança e proteção; Ética e responsabilidade social; Gestão financeira; Gestão estrutural; Programas promocionais	pg 5 (Figura 5)
Said, R; Joseph, C; Shaharudin, MR; Amran, A	2022	Scopus e Web of Science	Sustentabilidade	Não Explicito	-
Choudhary, K; Sangwan, KS	2022	Scopus	Viabilidade	Gestão ambiental interna; Compras Verdes; Cooperação com consumidores/distribuidores; Recuperação de investimentos; Eco-design; Design de embalagens; Logística reversa	pg 16-19 (Tabela 5)
Agrawal, R; Majumdar, A; Majumdar, K; Raut, RD; Narkhede, BE	2022	Scopus	Sustentabilidade	Design de produto; Compras e seleção de fornecedores; Manufatura; Rede de transporte e distribuição; Logística e logística reversa; Gestão de resíduos	pg 5-7
Yadav, S; Choi, TM; Kumar, A; Luthra, S; Naz, F	2023	Web of Science e ScienceDirect	Sustentabilidade	Práticas verdes internas; Práticas verdes externas; Responsabilidade social corporativa	pg 8
Schilling, L; Seuring, S	2023	Scopus e Web of Science	Sustentabilidade	Eliminação de desperdício; Gestão da qualidade total; Just-in-Time; Produção mais limpa; Logística mais limpa; ISO 14001; Logística reversa; Flexibilidade; Gestão de riscos; Dedicção à sustentabilidade; Desenvolvimento de parceiros; Relações de longo prazo; Seleção de parceiros; Integração logística; Integração tecnológica; Desenvolvimento conjunto; Certificação e padronização; Monitoramento seletivo; Gestão de grupos de pressão; Aprendizado; Gestão das partes interessadas; Inovação; e Avaliação do ciclo de vida	pg 4-5 (Tabelas 2 e 3)
Marculetiu, A; Ataseven, C; Mackelprang, AW	2023	25 diferentes periódicos	Sustentabilidade	Práticas internas: Integração interna de desenvolvimento de produtos verdes; Práticas de gestão de ambiente operacional Práticas a montante: gestão verde de fornecedores; Compras sustentáveis; colaboração sustentável ao lado do fornecimento Práticas a jusante: Distribuição sustentável; Integração com o consumidor no desenvolvimento de produtos verdes; Cooperação com consumidores incluindo requisitos ambientais Práticas de logística: Logística reversa; Logística verde; Capabilidade logística reversa sustentável	pg 259 (Figura 1)

Fonte: os Autor (2024)

Quadro 14 – Síntese das práticas da GCSS e suas respectivas definições

Revisões	Prática da GCSS	Definição
Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Design de produtos e processos sustentáveis	Projetar produtos e processos visando a minimização do impacto adverso sobre o meio ambiente, considerando as necessidades dos clientes e visando maximizar o lucro para cadeia de suprimentos
Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Manufatura sustentável	Manufatura que prioriza produtividade e eficiência ao tempo que minimiza a poluição ambiental e desperdícios de matéria e energia
Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Gestão sustentável de logística e armazenamento	Buscar benefícios sustentáveis por integração logística e pela gestão de armazenamento e inventário, guiadas por cooperação, otimização e consciência sustentável
Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Recuperação de produtos	Garantir logística reversa de materiais para reciclagem, reutilização ou recondicionamento
Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Schilling e Seuring (2023)	Gestão sustentável da qualidade	Orientar a gestão da qualidade para corresponder às estratégias sustentáveis da cadeia de suprimentos, às expectativas das partes interessadas, e às regulações governamentais, utilizando-se de uma arquitetura de colaboração para fins de padronização, certificação e gestão do desempenho
Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Gestão sustentável de fornecedores	Avaliar, selecionar e colaborar com os fornecedores na gestão de seus produtos, equipamentos, capital humano e sistemas de gestão, buscando construir relações de longo prazo para garantir sustentabilidade nas compras
Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Gestão sustentável de distribuidores e clientes	Selecionar e desenvolver distribuidores, buscando colaboração junto a consumidores para melhorar produtos e processos, regulamentação, promover da marca, aumentar satisfação e alcançar resultados em sustentabilidade
Balon et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Gestão ambiental	Avaliar e reduzir o impacto adverso das atividades industriais no meio ambiente, preservando a natureza pela gestão sustentável da coleta/extração de matérias-primas e na destinação de resíduos
Baliga et al. (2019); Pimenta et al. (2021); Shekarian et al. (2022); Yadav et al. (2023)	Responsabilidade social corporativa	Exercer conduta ética quanto a questões de impacto social, objetivando bem-estar de colaboradores e da sociedade ao considerar os direitos humanos, seja em aspectos empregatícios ou de mercado
Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Choudhary e Sangwan (2022); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Gestão do ambiente operacional	Promover comprometimento e dedicação para garantir saúde, segurança e sustentabilidade no ambiente operacional, gerenciando riscos e capacitando os colaboradores
Ahmad et al. (2017); Duque Uribe et al. (2019); Shekarian et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Gestão sustentável da informação e tecnologia	Criar valor a partir da inovação e gestão da informação e tecnologia, buscando resultados em sustentabilidade pela integração da GCSS

Fonte: o Autor (2024)

5.5 CONCLUSÕES

O objetivo desta revisão terciária da literatura era identificar as práticas da GCSS. A partir de um levantamento bibliográfico foram analisadas as RSL sobre o tópico por uma visão tanto descritiva quanto crítica. Percebe-se um aumento de interesse no campo e uma congruência de autores e periódicos sobre o tema. A partir de um conjunto de práticas sugeridas por diversos autores foram sintetizadas 11 práticas que caracterizam a incorporação da consciência sustentável na GCS. Essas práticas são definidas de acordo com a interpretação dos resultados, e assim este trabalho preenche uma lacuna da literatura, ao tempo que é uma contribuição para gestores que buscam maior desempenho econômico, ambiental e social.

6 USO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO PARA GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS: ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

6.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tanto no âmbito acadêmico quanto no empresarial, a relevância da sustentabilidade na gestão de cadeias de suprimentos (GCS) vem se tornando cada vez maior (PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019). Esse aumento de relevância se deve a fatores tanto internos e externos às cadeias de suprimentos, relacionados ao aumento da concorrência global e novas tendências nos negócios, o que exige mudanças nas estratégias organizacionais (BOURNE et al., 2018; AZEVEDO et al., 2021). Gradualmente, a GCS modifica sua abordagem puramente econômica/financeira ao considerar seu desempenho nas outras duas dimensões da sustentabilidade: a social e a ambiental (DROHOMERETSKI et al., 2015; ELKINGTON, 1997). A aplicação dos conceitos de sustentabilidade na GCS caracteriza a gestão da cadeia de suprimentos sustentável (GCSS) (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019).

A GCSS pode ser definida como a “gestão das operações, recursos, informações e fundos da cadeia de suprimentos com o intuito de maximizar a lucratividade enquanto minimiza o impacto ambiental e maximiza o bem-estar social” (TATICCHI et al., 2015, p. 6474, tradução do autor). Assim sendo, suas práticas ajudam as cadeias de suprimentos a atingirem objetivos para melhoria de desempenho econômico, social e ambiental (ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021; GIUNIPERO et al., 2012). A literatura do campo é exponencialmente crescente, com vários modelos já disponíveis como referências para melhorar a taxa de sucesso da implantação das práticas sustentáveis na GCS, e aumentando seu desempenho em sustentabilidade (AZEVEDO et al., 2021).

Para avaliar a eficácia e eficiência dessas práticas, a GCSS requer o uso de um Sistema de Medição de Desempenho (SMD) alinhado aos seus objetivos. Um SMD pode ser entendido como um conjunto de processos para gerenciar dados de desempenho, desenvolver as medidas de desempenho, e estabelecer objetivos estratégicos (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). Tais processos podem ser compreendidos como séries de ações necessárias para que o SMD complete seu ciclo de vida (BOURNE et al., 2000; HELDEN et al., 2012; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019). Evidências sugerem que os SMD que levam em consideração as três dimensões da sustentabilidade podem ajudar na GCSS e proporcionar

vantagens competitivas, atendendo às demandas internas e externas da cadeia de suprimentos (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005; MAESTRINI et al., 2017; NUDURUPATI; TEBBOUNE; HARDMAN, 2016; KUMAR et al., 2023).

Paralelamente, a evolução dos SMD é impulsionada pela digitalização consequente da Quarta Revolução Industrial. A adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) podem facilitar o desenvolvimento de SMD mais flexíveis e integrativos (CARVALHO et al., 2018; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; NUDURUPATI et al., 2021). Essa nova era de digitalização dos SMD tem o potencial de aumentar a operacionalização das atividades, e proporcionar feedback em tempo real (YIN; QIN, 2019).

As tecnologias da I4.0 apresentam o potencial de auxiliar no desenvolvimento de SMD mais específicos à medição de desempenho para as três dimensões da sustentabilidade (JABBOUR et al., 2018). Assim, a necessidade de mais pesquisa sobre a digitalização de SMD na GCSS é reconhecida pela comunidade acadêmica, que deseja ampliar a perspectiva do campo e aprofundar a discussão ao incluir não só a dimensão ambiental, mas também a social, menos valorizada tanto pelas organizações quanto pela academia (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019; JABBOUR et al., 2018). Nesse cenário torna-se importante que os meios empresarial e acadêmico conheçam mais profundamente sobre o uso das tecnologias da I4.0 nos SMD para a GCSS (AZEVEDO et al., 2021; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

Essa interseção entre os três temas forma um campo de estudo incipiente e promissor, uma vez que os processos dos SMD da GCSS podem ser impactados pela operacionalização das novas tecnologias (AZEVEDO et al., 2021). Surge, portanto, uma lacuna na literatura, dado que a exploração sobre o uso das tecnologias da I4.0 em SMD para a GCSS é limitado (FREDERICO et al., 2021; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021). A partir desta motivação, o objetivo geral deste estudo é mapear o campo pesquisa, identificando a utilidade das tecnologias da I4.0 nos processos dos SMD e a importância destes na medição de desempenho da GCSS. Assim, definem-se como objetivos específicos:

- *Mapear o campo de pesquisa que relaciona SMD, GCSS, e as tecnologias da I4.0;*
- *Identificar como as tecnologias da I4.0 podem ser úteis aos processos dos SMD para a GCSS.*

Para atingir tais objetivos, foram utilizados os métodos de mapeamento científico da literatura (técnicas de bibliometria descritiva e análise de redes sociais) e o método de análise de conteúdo.

As outras seções deste capítulo são organizadas da seguinte maneira: A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre GCSS, SMD na GCS e na GCSS, e o uso das tecnologias da I4.0 em SMD; Na Seção 3 é apresentado o método de pesquisa utilizado; Na Seção 4 apresentam-se os resultados obtidos; discussão perante a fundamentação é apresentada na Seção 5; e finalmente, a Seção 6 traz as conclusões da pesquisa.

6.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.2.1. Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis

A GCS refere-se ao planejamento, coordenação e controle eficientes de todos os elos da cadeia de suprimentos relacionados ao fluxo de produção e informações, incluindo fornecedores, fabricantes, distribuição/atacado e varejistas (LAMBERT; POHLEN, 2001). A partir da disseminação do conceito de sustentabilidade, gradativamente, a consciência ambiental foi sendo incorporada à GCS desde o início da década de 1990, devido a pressões externas e ao aumento da competitividade global (KHAN et al., 2021).

O termo Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde (GCSV) surge então pela incorporação de práticas ambientais às atividades da GCS tradicional (GREEN; MORTON; NEW, 1996; RAJEEV et al., 2017). Já a partir dos anos 2000, a GCSS se desenvolve integrando em sua estratégia a preocupação social, adicionada à consciência ambiental e ao tradicional objetivo econômico (KHAN et al., 2021; SEURING; MÜLLER, 2008).

O conceito de sustentabilidade na GCS ganhou relevância nos meios empresarial e acadêmico nas últimas décadas (PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019). O aumento de interesse na área é justificado tanto pelas crescentes pressões externas para adoção de práticas verdes quanto pela necessidade de incorporar perspectivas sociais na GCS (KHAN et al., 2021; PANIGRAHI; BAHINIPATI; JAIN, 2018) e pelo contínuo crescimento da concorrência ao nível global que exige mudanças nas estratégias organizacionais (AZEVEDO et al., 2021).

Esses fatores direcionam a GCS a mudar sua perspectiva puramente econômica/financeira e a monitorar o desempenho da cadeia de suprimentos sob o aspecto multidimensional possibilita gerar várias vantagens competitivas para as organizações (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005; BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; DROHOMERETSKI et al., 2015; ELKINGTON, 1997).

Em resumo, a GCSS surge como a GCS que considera a abordagem tridimensional da sustentabilidade, amplamente reconhecida como *triple bottom line* (TBL), termo que vincula os modelos de negócios às exigências econômicas, ambientais e sociais (ELKINGTON, 1997; SANCHEZ-FLORES et al., 2020). O objetivo da GCSS é aumentar seu desempenho considerando as três dimensões, adotando práticas sustentáveis para alcançar vantagens competitivas e ainda preservar os recursos para gerações futuras (GAMBOA-BERNAL; ORJUELA-CASTRO; MORENO-MANTILLA, 2020; ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021). Nos últimos anos, a área de pesquisa sobre GCSS está crescendo e amadurecendo (LIS; SUDOLSKA; TOMANEK, 2020).

Assim, as práticas da GCSS são definidas como aquelas que reconhecem a necessidade de considerar os valores ambientais e sociais, além dos econômicos, e que ajudarão a organização a atingir seus objetivos gerais de maneira lucrativa e sustentável (GIUNIPERO et al., 2012). Nas últimas duas décadas, essas práticas foram estudadas e implantadas em cadeias de suprimentos de vários setores industriais (BALIGA; RAUT; KAMBLE, 2019). Vários estudos empíricos e revisões foram desenvolvidos na área, que ainda possui muito potencial de crescimento devido à ainda baixa taxa de adoção de suas práticas, especialmente em economias emergentes (KHAN et al., 2021). Apresenta-se no Quadro 15 uma síntese de 11 práticas da GCSS, compiladas e definidas por uma revisão terciária da literatura do campo (SANTOS; LIZARELLI, 2023b).

Quadro 15 – Práticas da GCSS

Prática da GCSS	Revisões	Definição
Design de produtos e processos sustentáveis	Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Projetar produtos e processos visando a minimização do impacto adverso sobre o meio ambiente, considerando as necessidades dos clientes e visando maximizar o lucro para cadeia de suprimentos
Manufatura sustentável	Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Manufatura que prioriza produtividade e eficiência ao tempo que minimiza a poluição ambiental e desperdícios de matéria e energia
Gestão sustentável de logística e armazenamento	Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Buscar benefícios sustentáveis por integração logística e pela gestão de armazenamento e inventário, guiadas por cooperação, otimização e consciência sustentável
Recuperação de produtos	Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Garantir logística reversa de materiais para reciclagem, reutilização ou recondicionamento
Gestão sustentável da qualidade	Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Schilling e Seuring (2023)	Orientar a gestão da qualidade para corresponder às estratégias sustentáveis da cadeia de suprimentos, às expectativas das partes interessadas, e às regulações governamentais, utilizando-se de uma arquitetura de colaboração para fins de padronização, certificação e gestão do desempenho
Gestão sustentável de fornecedores	Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Avaliar, selecionar e colaborar com os fornecedores na gestão de seus produtos, equipamentos, capital humano e sistemas de gestão, buscando construir relações de longo prazo para garantir sustentabilidade nas compras
Gestão sustentável de distribuidores e clientes	Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Selecionar e desenvolver distribuidores, buscando colaboração junto à consumidores para melhorar produtos e processos, regulamentação, promover a marca, aumentar satisfação e alcançar resultados em sustentabilidade
Gestão ambiental	Balon et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Avaliar e reduzir o impacto adverso das atividades industriais no meio ambiente, preservando a natureza pela gestão sustentável da coleta/extração de matérias-primas e na destinação de resíduos
Responsabilidade social corporativa	Baliga et al. (2019); Pimenta et al. (2021); Shekarian et al. (2022); Yadav et al. (2023)	Exercer conduta ética quanto à questões de impacto social, objetivando bem-estar de colaboradores e da sociedade ao considerar os direitos humanos, seja em aspectos empregatícios ou de mercado
Gestão do ambiente operacional	Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Choudhary e Sangwan (2022); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Promover comprometimento e dedicação para garantir saúde, segurança e sustentabilidade no ambiente operacional, gerenciando riscos e capacitando os colaboradores
Gestão sustentável da informação e tecnologia	Ahmad et al. (2017); Duque Uribe et al. (2019); Shekarian et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Criar valor a partir da inovação e gestão da informação e tecnologia, buscando resultados em sustentabilidade pela integração da GCSS

Fonte: Adaptado de Santos e Lizarelli (2023b)

Para que a GCS incorpore as práticas sustentáveis ela deve ampliar as suas preocupações focadas em lucro para incluir a proteção do meio-ambiente e os interesses da sociedade (AHMAD et al., 2017). Após adaptar sua estratégia, para obterem sucesso nessas práticas, as cadeias de suprimentos devem colaborar com todas as partes interessadas enquanto maximizam a utilização de recursos, informações, lucro, e as propostas de valor aos consumidores (PANIGRAHI; BAHINIPATI; JAIN, 2018). A pesquisa na área é caracterizada por duas tendências: foco ambiental e foco social (BALIGA; RAUT; KAMBLE, 2019). Até então, o foco ambiental é o mais explorado nos meios acadêmico e empresarial (RAJEEV et al., 2017; BALIGA; RAUT; KAMBLE, 2019). Percebe-se que aspectos sociais são frequentemente secundários (GOLD; SEURING; BESKE, 2010; KHAN et al., 2021). Porém,

cada vez mais a evolução da área atrai a atenção de pesquisadores e gestores no estudo de vários aspectos mais complexos sobre a GCSS (KHAN et al., 2021; RAJEEV et al., 2017).

Os autores da área listam as principais dificuldades em exercer as práticas da GCSS: falta de treinamento, qualificação e/ou motivação; incompetências dos fornecedores; implicações em custo; dificuldades em operacionalizar; mudanças de valores; subjetividade das avaliações; complexidade no projeto para redução de recursos e eficiência; instalações inadequadas para práticas de logística reversa; falta de tecnologias modernas; e falhas nos atuais SMD (ABBASI et al., 2017; ANSARI; KANT, 2017; DUBEY; GUNASEKARAN; PAPADOPOULOS, 2017; KHAN et al., 2021). Salienta-se que nem todas as dificuldades exercem o mesmo impacto para diferentes práticas (RAUT; NARKHEDE; GARDAS, 2017). Ainda, algumas práticas da GCSS são específicas à determinados elos da cadeia de suprimentos (HERRMANN et al., 2021). Assim, diferentes elos da cadeia de suprimentos podem ter mais facilidade ou dificuldade, e exigir maior ou menor colaboração da GCSS para estar alinhado aos objetivos estratégicos comuns.

6.2.2 Sistemas de Medição de Desempenho na Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis

Originalmente, um SMD é definido como o conjunto de processos para desenvolver medidas, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). Os SMD são caracterizados por seus recursos, papéis e processos, e operam em um ciclo de vida de quatro etapas: design, implantação, uso e revisão (AZEVEDO et al., 2021; BOURNE et al., 2000; MATOS et al., 2019; FRANCO-SANTOS et al., 2007).

As características dos SMD, compreendidas por seus recursos, papéis e processos, se tornam mais complexas quando seu escopo abrange a cadeia de suprimentos (FRANCO-SANTOS et al., 2007; SANTOS; LIZARELLI; MARTINS, 2024a). Quanto aos recursos de um SMD entende-se as propriedades essenciais que o compõem (FRANCO-SANTOS et al., 2007). São os principais elementos necessários para a existência de um SMD (CHOONG, 2013). Sem esses recursos, um SMD é incapaz de se sustentar como sistema de medição (CHOONG, 2013; FRANCO-SANTOS et al., 2007). Quanto aos papéis dos SMD, pode-se entendê-los como propósitos ou funções. O único papel fundamentalmente necessário de um SMD é medir desempenho, que engloba o propósito de monitorar o progresso e medir/avaliar o desempenho (FRANCO-SANTOS et al., 2007). Dessa forma, os outros papéis são

suplementares e compilações particulares são propostas por diferentes autores do campo (SANTOS; LIZARELLI; MARTINS, 2024a).

Por último, quanto aos processos de um SMD, eles são as séries de ações necessárias para que o SMD complete seu ciclo de vida (BOURNE et al., 2000; HELDEN et al., 2012; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019). O ciclo de vida de um SMD é baseado na melhoria contínua e no ciclo PDCA (*plan-do-check-act*) e é amplamente difundido no campo, utilizado em estudos teóricos e empíricos, e auxilia na construção de uma compreensão sólida das etapas de seu desenvolvimento: design, implantação, uso e revisão (BITITCI; NUDURUPATI, 2002; BOURNE et al., 2000; NUDURUPATI et al. 2011; MATOS et al., 2019):

A partir do século XXI, a pesquisa sobre SMD interorganizacionais e a expansão de seu escopo ganham robustez na literatura (GUNASEKARAN et al., 2004; GUNASEKARAN; KOBU, 2007; BITITCI et al., 2012; BITITCI et al., 2018). O SMD com foco na GCS pode ser definido como um conjunto de processos para desenvolver medidas de estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho dos processos e relações da cadeia de suprimentos (BITITCI et al., 2018; MAESTRINI et al., 2017; NEELY et al., 1995). O SMD estabelece, portanto, um conjunto de métricas utilizadas para quantificar a eficiência e eficácia dos processos e relações da cadeia de suprimentos, abrangendo múltiplas funções organizacionais e empresas, possibilitando a coordenação da cadeia de suprimentos (MAESTRINI et al., 2017). As características dos SMD podem ser compreendidas em um novo contexto para a GCS, como mostra o Quadro 16 (SANTOS; LIZARELLI; MARTINS, 2024a).

Os objetivos dos SMD na GCS incluem alcançar alta eficiência no uso de recursos; altos níveis de serviço; e desenvolvimento da habilidade de responder ao ambiente dinâmico (BEAMON, 1999). Além disso, um SMD na GCS pode permitir a identificação de pontos de melhoria sob um aspecto mais amplo; entender os processos de negócios; melhorar os processos de tomada de decisão; e identificar desperdícios problemas e oportunidades (BALFAQIH et al., 2016; GUNASEKARAN; KOBU, 2007).

Quadro 16 – Características dos SMD na GCS

Recursos dos SMD na GCS	Autores	Papéis dos SMD na GCS	Autores	Processos dos SMD na GCS	Autores
Medidas de desempenho alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	Franco Santos et al. (2007); Choong (2013); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Gerenciar o desempenho de acordo com os objetivos estratégicos da GCS	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Demartini & Taticchi (2022); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Rojas-Lema et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e os objetivos da GCS	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)
Fluxo de informações em tempo real orientado à GCS e às partes interessadas	Franco Santos et al. (2007); Choong (2013); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Promover comunicação de dados e informações de forma transparente e em tempo real	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Demartini & Taticchi (2022); Matos et al. (2019); Rojas-Lema et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Revisão das especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, orientada à GCS e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)
Infraestrutura integrada à GCS para suporte à coleta e análise de dados	Franco Santos et al. (2007); Choong (2013); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Apoiar o desdobramento da estratégia da GCS, aumentando sua flexibilidade e facilitando a tomada de decisão de forma descentralizada	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Rojas-Lema et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)
Infraestrutura integrada à GCS para suporte à comunicação	Franco Santos et al. (2007); Choong (2013); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Promover a melhoria contínua, aumentando a eficiência e efetividade de sistemas e processos	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019); Rojas-Lema et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Implantação e integração da infraestrutura de suporte do SMD na GCS	Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020)
Objetivos estratégicos atualizados, alinhados à GCS e às partes interessadas	Franco Santos et al. (2007); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Promover aprendizado	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Matos et al. (2019); Rojas-Lema et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Coleta de dados em tempo real	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)
Partes interessadas que desempenham papel significativo no ciclo de vida do SMD	Matos et al. (2019)	Promover mudanças positivas na cultura organizacional	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Matos et al. (2019); Rojas-Lema et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)
		Compreender as necessidades das partes interessadas	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Hansen (2021); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Interpretação e avaliação do desempenho	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)
		Atender as necessidades das partes interessadas, adotando uma abordagem orientada ao consumidor	Franco-Santos et al. (2007); Pinheiro de Lima et al. (2013); Rocha et al. (2020); Hansen (2021); Demartini & Taticchi (2022); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Avaliação da eficiência e eficácia do SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019)
				Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)
				Tomada de decisão alinhada à GCS e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)
				Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaiah et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)

Fonte: Adaptado de Santos, Lizarelli e Martins (2024a)

Quanto aos processos, destaca-se que esse novo contexto de complexidade e novos papéis refletem em um maior número de atividades desempenhadas pelos SMD. De acordo com Santos, Lizarelli e Martins (2024a), por meio de revisão terciária e análise de conteúdo, definem-se os processos dos SMD na GCS conforme explícito no Quadro 17:

Quadro 17 – Processos dos SMD na GCS

Processos dos SMD na GCS	Autores	Definição
Modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e os objetivos da GCS	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Adaptar a infraestrutura de suporte conforme as especificações e metas da GCS
Revisão das especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, orientada à GCS e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Revisar regularmente as especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, mantendo o alinhamento com a GCS e as necessidades das partes interessadas
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Desenvolver e escolher medidas de desempenho que estejam alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD
Implantação e integração da infraestrutura de suporte do SMD na GCS	Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020)	Garantir uma infraestrutura de suporte que atenda ao SMD na GCS
Coleta de dados em tempo real	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Realizar a coleta de dados de forma contínua e em tempo real
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Analisar os dados em tempo real e realizar previsões para antecipar o desempenho futuro
Interpretação e avaliação do desempenho	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Interpretar e avaliar o desempenho com base nas análises realizadas
Avaliação da eficiência e eficácia do SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019)	Avaliar a eficiência e eficácia do SMD para garantir que atenda aos objetivos estabelecidos
Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Assegurar uma comunicação fluida e em tempo real de dados e informações entre os diversos elos da cadeia de suprimentos e as partes interessadas
Tomada de decisão alinhada à GCS e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Tomar decisões alinhadas à estratégia da GCS e às expectativas das partes interessadas
Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Treinar e capacitar as pessoas para colaborar efetivamente com o desenvolvimento contínuo do SMD

Fonte: Adaptado de Santos, Lizarelli e Martins (2024a)

Se desenvolvido com sucesso, um SMD na GCS traz benefícios em melhoria da qualidade, entrega, inovação e sustentabilidade (MAESTRINI et al., 2017). Ainda, avaliar o desempenho na GCS também revela lacunas entre o planejamento da GCS e o desempenho real, e permite rastrear problemas potenciais (AHMAD; ZABRI, 2018). Salienta-se que esses impactos positivos dos SMD na GCS se dão de forma direta e indireta, aumentando a cooperação, socialização e coordenação entre empresas ao compartilhar informações, resolvendo problemas, motivando mudanças e restringindo o uso do poder (BITITCI et al., 2018; BOURNE et al., 2018; FRANCO-SANTOS et al., 2012).

De forma geral, a medição de desempenho em sustentabilidade na GCS é um tópico que começou a ganhar maior atenção apenas a partir de 2005 (BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; TATICCHI et al., 2015; MISHRA et al., 2017). Desde então, reconhece-se que o desenvolvimento de SMD que considerem a sustentabilidade é necessário para o bem-estar das cadeias de suprimentos a longo prazo, dadas as pressões externas que enfrentam (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005; TIAN; SARKIS, 2020). Trata-se de um campo que reconhece a necessidade dos SMD de incorporar dimensões de sustentabilidade, e propõe modelos para sua integração na cadeia de suprimentos (BITITCI et al., 2012).

Tais sistemas de medição incorporam objetivos de sustentabilidade ambiental, como indicadores para mensurar a redução do impacto ambiental (ex., diferentes tipos de poluição) e o desperdício de recursos (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005; PHAM et al., 2020). Existem várias ferramentas potenciais para a medição de desempenho ambiental, incluindo medidas de ecoeficiência, *Life Cycle Assessment* e análise de fluxo de materiais (RABBI et al., 2020).

SMD para a sustentabilidade na GCS devem incorporar a dimensão social (TIAN; SARKIS, 2020). Ferramentas específicas para a medição do desempenho social incluem Avaliação de Impacto Social; análises de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável; Avaliação de Desempenho Social; abordagens Fuzzy aliadas a métodos de TDMC, para corrigir imprecisões em considerações sobre o julgamento humano; entre outras (KARIMI; JAFARZADEH-GHOUSHCHI; MOHTADI-BONAB, 2020; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018). Fatores sociais e consequências comportamentais raramente são investigadas, o que reforça ainda mais a necessidade de uma compreensão integrada dessa dimensão nos diversos níveis organizacionais da GCS (MURA et al., 2018).

Modelos tradicionais, que possuem forte relação com o design de SMD tradicionais, focados na dimensão econômica, podem ser desenvolvidos para incorporar ambas medidas sociais e ambientais, ajudando a identificar fatores-chave relacionados aos objetivos

estratégicos da cadeia de suprimentos (EPSTEIN; WISNER, 2001; HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005). Um exemplo comum de modelo utilizado no design de SMD para a GCSS são modificações no Balanced Scorecard para a Cadeia de Suprimentos, que incorporam as dimensões de sustentabilidade ao modelo que é amplamente difundido (MAESTRINI et al., 2017). Outro exemplo são as extensões para o *Supply Chain Operation Model* (SCOR), que incorporaram medidas ambientais (TIAN; SARKIS, 2020).

Na literatura, há o desenvolvimento de modelos para a medição de desempenho da GCSS. Hervani, Helms e Sarkis (2005) apresentam modelos específicos para etapa do design de SMD, adaptando os modelos tradicionais para incluir medidas ambientais. Hassini, Surti e Searcy (2012), que revisa a literatura sobre GCSS durante o período 2000-2010 para desenvolver modelos para o desenvolvimento de SMD, apresentam a relação entre as medidas das três dimensões da sustentabilidade (econômica, ambiental e social) e os elos da GCSS.

Tajbakhsh e Hassini (2015) consideram as três dimensões da sustentabilidade para o SMD proposto e sintetizam as medidas de desempenho disponíveis em uma estrutura que incorpora diferentes estágios das operações e processos de tomada de decisão na cadeia de suprimentos (Planejamento; Aquisição e Compras; Produção; Armazenamento e Logística; Atendimento ao Cliente; Retorno e Pós-venda). Malesios, Dey e Abdelaziz (2020) apresenta o desenvolvimento de um SMD para a GCSS focado em pequenas e médias empresas, benéfico para determinar meios de melhoria em nível regional e auxiliar gestores com medidas para melhorar o desempenho de sustentabilidade da cadeia de suprimentos. Em Karimi, Jafarzadeh-Ghouschi e Mohtadi-Bonab (2020), para cada dimensão da sustentabilidade são propostas medidas e práticas observando critérios prioritários. Izadikhah et al. (2020) propõem um modelo para medir especificamente o desempenho das cadeias de suprimentos humanitárias, com grande foco em medidas sociais e no bem-estar das pessoas envolvidas. Rajesh (2022) formula um modelo de previsão para avaliar e prever o desempenho de sustentabilidade das cadeias de suprimentos. Qorri, Mujkic e Kraslawski (2018) propõem uma nova estrutura conceitual e que fornece diretrizes concisas para avaliação de desempenho da GCSS. A estrutura proposta pelos autores integra sistematicamente três componentes: elos da cadeia de suprimentos; medidas de sustentabilidade e as partes interessadas.

Enfatiza-se que é necessário o desenvolvimento de um SMD adequado para a GCSS, alinhado com a gestão estratégica, e contextualizado para os seus ambientes interno e externo (MALVIYA; KANT, 2019). SMD

O principal problema dos modelos de SMD para a GCSS é que eles falham em compreender a importância dos relacionamentos entre as características dos SMD e as práticas

da GCSS (QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018). Uma vez que o campo é novo, nota-se que existe uma carência de coesão e difusão de uma fundamentação teórica comum (MISHRA et al., 2017; MURA et al., 2018). A literatura é fragmentada em nichos, limitada em quantidade, e, geralmente concentrando-se em apenas uma dimensão do desempenho, com poucos estudos enfatizando as três dimensões (TATICCHI et al., 2015; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018; PEÑALOZA; FORMOSO; SAURIN, 2021). Existe a carência de mais estudos sobre o desenvolvimento de SMD que estendam seu escopo e incorporem as três dimensões de sustentabilidade na GCSS de forma balanceada (BITITCI et al., 2012; BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; KHAN et al., 2021). Ainda, é comum que os estudos foquem apenas nas dimensões econômica e ambiental (CAZERI et al., 2017; MISHRA et al., 2017; TATICCHI et al., 2015; PEÑALOZA; FORMOSO; SAURIN, 2021).

O equilíbrio entre o foco ambiental, social e econômico não é o único fator relacionado ao sucesso do SMD na GCSS (NUDURUPATI; TEBBOUNE; HARDMAN, 2016; AMAN; SEURING, 2022). Ainda, incluem-se o estágio evolutivo da gestão sustentável da empresa (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005); o investimento no estágio inicial de implantação do SMD (GENG; MANSOURI; AKTAS, 2017); o alinhamento à gestão estratégica (JAWAAD; ZAFAR, 2019; MALVIYA; KANT, 2019); e as políticas para determinar estratégias de medição, processos, atividades e objetivos (QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018). Ao reconhecer essas relações, a tomada de decisão se torna mais complexa, porém mais correta (TATICCHI et al., 2014; VEGTER; HILLEGERSBERG; OLTHAAR, 2021).

Ainda, a inovação tecnológica exerce papel fundamental para garantir a medição eficaz e eficiente do desempenho da GCSS, o que inclui uma plataforma integradora comum para compartilhar informações e coordenar os processos entre as organizações (MAESTRINI et al., 2017; SZYMCZAK et al., 2018); a capacidade de coleta e análise de dados dos sistemas de informação de cada elo da cadeia de suprimentos (QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018); e a capacidade de inovação para responder a pressões externas (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005).

6.2.3 Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho

A quarta revolução industrial é comumente conhecida pelo termo “Indústria 4.0” (originalmente “Industrie 4.0”), utilizado pela primeira vez pelo Governo Federal Alemão em 2011, na apresentação em Hannover Messe (KAGERMANN et al., 2013; GRUSCHKA;

LÜSSEM, 2018). Apesar de existirem muitas definições, uma das mais aceitas é a de que a I4.0 é uma nova forma de organizar os recursos e processos industriais, deixando-os mais responsivos a um ambiente dinâmico (KAMBLE et al., 2018; LEMSTRA; MESQUITA, 2023). A emergência da I4.0 é devida ao aumento da competitividade global, e o tópico tornou-se importante para muitos campos de pesquisa (LIAO et al., 2017; MÜELLER et al., 2018). Assim, a I4.0 é caracterizada pelo uso intensivo de automação e tecnologias digitais na criação de valor e pela integração de produtos, equipamentos e pessoas ao ambiente produtivo e às partes interessadas (MITTAL et al., 2018; GALATI; BIGLIARDI, 2019; LEMSTRA; MESQUITA, 2023). Em uma visão de longo prazo, essa conectividade muda os atuais sistemas de manufatura para serem mais abertos, digitais, automatizados e inteligentes (LIAO et al., 2017; KAMBLE et al., 2019).

As novas tecnologias que compõem a I4.0 são baseadas na conectividade, em que uma grande quantidade de informação é gerenciada para conduzir a gestão industrial de maneira inovadora (KAGERMANN et al., 2013; SCHUMACHER et al. 2016). Como principal recurso, a I4.0 usa da conectividade entre máquinas, pedidos, funcionários, fornecedores e clientes, controles descentralizados, métodos de tomada de decisão e sistemas autônomos (KAGERMANN et al., 2013; SHROUF et al., 2014; LOPES; MARTINS, 2022). Avanços em gestão de dados surgem como ferramentas importantes para ajudar os gestores a tomar decisões em cenários complexos (BUBICZ et al., 2019). Possivelmente, o maior potencial do uso das tecnologias da I4.0 na produção industrial é na GCS, uma vez que existem múltiplas oportunidades estratégicas, operacionais, ambientais e sociais (MULLER et al., 2018; DALENOGARE et al., 2018; FRANK et al., 2019). Consequências da adaptação dos SMD para a GCS na I4.0 incluem a melhoria dos processos, dos fluxos de materiais, redução de mercadorias danificadas e do tempo de espera em toda a cadeia de suprimentos (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; SHARMA; JABBOUR; SOUSA JABBOUR, 2020). As tecnologias pertencentes à I4.0 apresentam um enorme potencial para reformular os processos de GCS em áreas como melhorar a eficiência, capacidade de resposta, e gestão da qualidade, aumentando o foco no cliente e o desempenho sustentável (FATORACHIAN; KAZEMI, 2020; NASIRI et al., 2020). Além disso, elas facilitam o relacionamento e a comunicação com os clientes e as partes interessadas (SHROUF et al., 2014; BAI et al., 2021).

Para os SMD, essas novas tecnologias de informação e comunicação permitem análises mais robustas de dados, aumentam sua capacidade analítica, e fomentam a comunicação (NUDURUPATI et al., 2011). Os SMD que usam as tecnologias da I4.0 se mostram mais autônomos e heterogêneos, e suas medidas de desempenho são capazes de capturar contextos

locais e externos (LOPES; MARTINS, 2021). Isso possibilita SMD mais colaborativos, criando oportunidades e valores enquanto fomentam a inovação (NUDURUPATI et al., 2016; NUDURUPATI et al., 2021). Sistemas de produção inteligente também podem diagnosticar seu próprio desempenho e propor projetos de melhoria contínua (ARCIDIACONO; PIERONI, 2018; ALAVIAN et al., 2020; SANTOS; MARTINS, 2020; DALENOGARE et al., 2018). Assim, as tecnologias da I4.0 ajudam a atender as preocupações de uma variedade de stakeholders, auxiliando as empresas a melhorar sua competitividade (KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; BAI et al., 2022). Como nem todas as tecnologias da I4.0 possuem igual importância nos SMD (MAHDIRAJI et al., 2023; SANTOS; LIZARELLI, 2023a) o Quadro 18 destaca uma compilação das tecnologias da I4.0 mais frequentemente associadas aos SMD: Internet das Coisas (IoT); Big Data Analytics (BDA); Computação em Nuvem (CC); Inteligência Artificial (AI); e Sistemas Ciberfísicos (CPS) (SANTOS; LIZARELLI, 2023a). O Quadro 18 também apresenta propostas de definições, baseando-se em pesquisa bibliográfica, e segundo a compreensão dos autores (SANTOS; LIZARELLI, 2023a).

Quadro 18 – Tecnologias da I4.0 frequentemente associadas aos SMD

Tecnologia	Referências	Definição
Internet das coisas	Ajmera; Jain (2019); Almakayeel (2023); Alsuwaidan (2020); Assandre; Martins (2023); Azevedo et al. (2021); Bamakan et al. (2021); Berrah et al. (2021); Bienhaus; Haddud (2018); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Kambur; Yildirim (2022); Klovien; Uosyte (2019); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Llinas; Abad (2019); Lopes; Martins (2021); Mahdiraji et al. (2022); Obermayer et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Urban; Zawadski (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Interconexão de dispositivos sensores e atuadores fornecendo a habilidade de compartilhar informação entre plataformas por uma estrutura unificada
Big data analytics	Ajmera; Jain (2019); Almakayeel (2023); Alsuwaidan (2020); Assandre; Martins (2023); Azevedo et al. (2021); Bamakan et al. (2021); Berrah et al. (2021); Bienhaus; Haddud (2018); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Klovien; Uosyte (2019); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Llinas; Abad (2019); Lopes; Martins (2021); Mahdiraji et al. (2022); Obermayer et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Urban; Zawadski (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Novas tecnologias projetadas para lidar com desafios de tamanho, variedade e velocidade de dado
Computação em nuvem	Ajmera; Jain (2019); Almakayeel (2023); Assandre; Martins (2023); Azevedo et al. (2021); Berrah et al. (2021); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Kambur; Yildirim (2022); Klovien; Uosyte (2019); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Mahdiraji et al. (2022); Lopes; Martins (2021); Obermayer et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Conjunto de computadores interconectados e virtualizados que providenciam e apresentam de forma dinâmica um recurso computacional mais unificado, baseado em acordos estabelecidos pela negociação entre provedores de serviços e consumidores
Inteligência artificial	Alsuwaidan (2020); Assandre; Martins (2023); Bamakan et al. (2021); Berrah et al. (2021); Bienhaus; Haddud (2018); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Llinas; Abad (2019); Mahdiraji et al. (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022)	A tecnologia que aproveita computadores e máquinas para imitar as capacidades de resolução de problemas e a tomada de decisão da mente humana
Sistemas ciberfísicos	Almakayeel (2023); Alsuwaidan (2020); Azevedo et al. (2021); Berrah et al. (2021); Kambur; Yildirim (2022); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Lopes; Martins (2021); Mahdiraji et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Sistemas que integram processos físicos, recursos computacionais e capacidades de comunicação

Fonte: Adaptado de Santos e Lizarelli (2023a).

O campo de pesquisa gerado pela interseção do estudo dos SMD e das tecnologias da I4.0 é pequeno, porém crescente (FREDERICO et al., 2021; LOPES; MARTINS, 2021; LOPES; MARTINS, 2022). A maior parte dos artigos são de natureza empírica, como estudos de casos e pesquisas de levantamento, e os poucos trabalhos existentes no campo são mais focados em aspectos técnicos do que gerenciais, com resultados de limitada extrapolação (FREDERICO et al., 2021; KAMBLE et al., 2020; SANTOS; LIZARELLI, 2023a). Apesar da evolução do campo, ainda não é claro como a medição de desempenho pode ser auxiliada pelas tecnologias da I4.0 para a criação de subsistemas autônomos sujeitos a ambientes dinâmicos (BOURNE et al., 2018; SAHLIN; ANGELIS, 2019).

O aumento na complexidade entre as relações inter-organizacionais exige SMD que compreendam a cadeia de suprimentos estendida, para que possam explorar de forma global a criação de valor e de vantagem competitiva (BAI et al., 2021; LOPES; MARTINS, 2021). Assim, o desenvolvimento de um ambiente de I4.0 requer apoio de diferentes parceiros da cadeia de suprimentos em termos de colaboração, recursos humanos, coordenação, capacidades organizacionais e tecnológicas (FREDERICO et al., 2021; KAMBLE et al., 2020; BAI et al., 2021).

Diversos autores reconhecem o desenvolvimento de SMD para a GCS na I4.0 como uma lacuna significativa neste campo de estudo (GUNASEKARAN et al., 2015; BITITCI et al. 2018; SAHLIN; ANGELIS, 2019; FREDERICO et al., 2021; KAMBLE et al., 2020; ZAHOOR et al., 2021). O desenvolvimento de SMD para a GCS com a capacidade de tomada de decisão em tempo real é uma tendência de pesquisa, que busca a disponibilidade de informação adequada para todos os elos da cadeia de suprimentos (LOPES; MARTINS, 2021). Porém, as investigações realizadas não estão intimamente alinhadas às cadeias de suprimentos e se concentram mais especificamente na manufatura e em áreas técnicas (CHAUHAN; SINGH, 2019; FREDERICO et al., 2021).

Em particular, pesquisas que consideram a medição de desempenho em cadeias de suprimentos na era da I4.0 são escassas, apesar da relevância do tema (CHAUHAN; SINGH, 2019; FREDERICO et al., 2021; LOPES; MARTINS, 2022). Os modelos existentes falham em considerar a multidimensionalidade da sustentabilidade, ou a complexidade dos SMD, ou o escopo estendido da cadeia de suprimentos (NUDURUPATI et al., 2016; SHIN et al., 2018; KLOVIENE; UOSYTE, 2019; YIN; QIN, 2019; FREDERICO et al., 2021; KAMBLE et al., 2020; ZAHOOR et al., 2021).

Segundo Santos; Lizarelli e Martins (2023a), faltam estudos que relacionem o uso das tecnologias da I4.0 nos processos de *“Implantação e Integração da Infraestrutura de Suporte*

do SMD na GCS” e “Capacitação das Pessoas para Colaborar com o Desenvolvimento do SMD”. A literatura sobre o uso das tecnologias da 4.0 em processos como *“Design e Seleção de Medidas Alinhadas à Estratégia da GCS e Integradas ao SMD”*; *“Modificação da Infraestrutura de Suporte de Acordo com as Especificações e Objetivos da GCS”*; e *“Avaliação da Eficiência e Eficácia do SMD”* é bastante restrita, limitando-se a exploração de uma única tecnologia. Já os processos de *“Revisão das Especificações e Objetivos da Medição de Desempenho e da Infraestrutura de Suporte, Orientada à GCS e às Partes Interessadas”*; e *“Interpretação e Avaliação do Desempenho”* são mais explorados, com duas a três tecnologias sendo investigadas. Por último, *“Coleta de Dados em Tempo Real”*; *“Análise de Dados em Tempo Real e Predição do Desempenho”*; *Garantir o Fluxo de Dados e Informações Transparente e em Tempo Real entre os Elos da Cadeia de Suprimento e as Partes Interessadas*; e *“Tomada de Decisão Alinhada à GCS e às Partes Interessadas”* possuem um potencial maior na utilização das tecnologias da I4.0.

6.3 MÉTODO DE PESQUISA

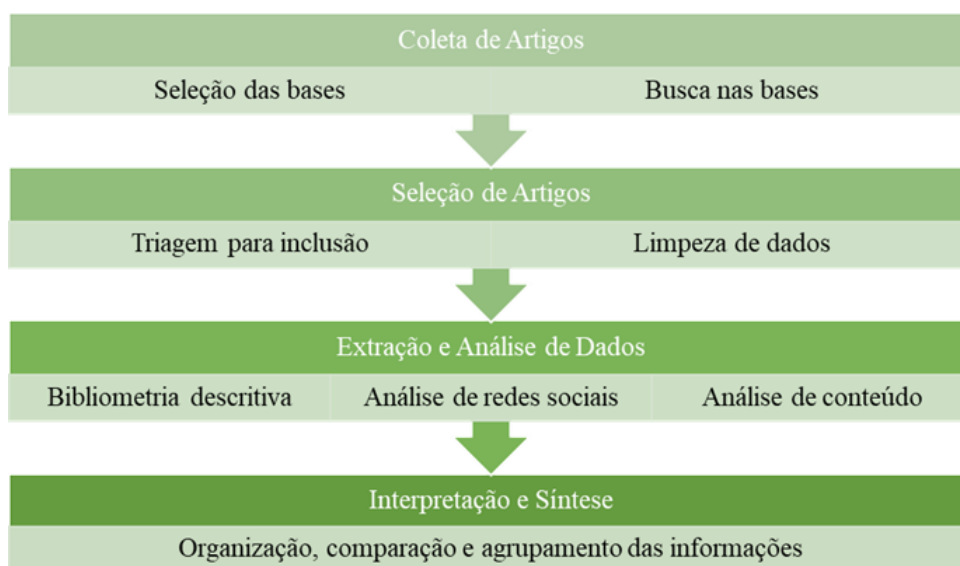
Os métodos bibliográficos utilizados neste capítulo incluem o mapeamento científico (auxiliado por técnicas de bibliometria descritiva e análise de redes sociais) e a análise de conteúdo (SMALL, 1999; COBO et al., 2011; SEURING; GOLD, 2012; WHITE; MARSH, 2006; ZUPIC; CATER, 2015).

O mapeamento científico permite analisar um campo de estudo de uma forma mais ampla que revisões sistemáticas, e objetiva identificar padrões na literatura por interpretações e descrições gráficas (ZUPIC; CATER, 2015). Auxiliado por softwares específicos, neste método, técnicas de bibliometria descritiva ajudam a caracterizar a amostra, validar sua centralidade, e medir o impacto e a qualidade dos estudos (ARIA; CUCCURULLO, 2017; CHAUHAN; SINGH, 2019; SHARMA et al., 2020). Técnicas de análise de redes sociais foram usadas no mapeamento científico para identificar relações entre temas de pesquisa, revelando padrões e linhas de pesquisa do campo científico (SMALL, 1999; COBO et al., 2011; ZUPIC; CATER, 2015; GUTIERREZ-SALCEDO et al., 2018; SHARMA et al., 2020).

Já a análise de conteúdo oferece um método sistêmico e rigoroso para extração de dados qualitativos em todas as formas de comunicação, e é amplamente utilizada como método de pesquisa na área de gestão de operações (SEURING; GOLD, 2012; TANGPONG, 2011; WHITE; MARSH, 2006). Sua utilização foi na compilação, classificação e síntese de informações da literatura. Ainda, foi possível identificar a relação entre os conceitos-chave da

pesquisa, objetivando identificar como os processos dos SMD se mostram importantes na medição de desempenho da GCSS como as tecnologias da I4.0 podem ser úteis aos processos dos SMD. A Figura 12 retrata as etapas do protocolo utilizado (KITCHENHAM et al., 2007; SEURING; GOLD, 2012; ZUPIC; CATER, 2015).

Figura 12 – Etapas do protocolo utilizado nos métodos bibliográficos



Fonte: adaptado de Kitchenham et al. (2007), Seuring e Gold (2012); e Zupic e Cater (2015).

Coleta de Artigos: As bases indexadoras *Web of Science* e *Scopus* foram escolhidas para coleta de dados, dado a abrangência de periódicos indexados e a organização de seus metadados, que permitiu a junção dos dados extraídos (MONGEON; PAUL-HUS, 2016; SANTANA; COBO, 2020). Ainda, a escolha da base se justifica pelo crescente envolvimento de pesquisadores de diferentes países e áreas do conhecimento, e pela necessidade de uma exploração abrangente (ZHU; LIU, 2020). Para unir os metadados de ambas as bases e identificar documentos replicados utilizou-se o pacote *Bibliometrix*, versão 4.1.3, rodado no ambiente integrado de desenvolvimento *RStudio*, versão 2023.09.1. No software, foram importados os arquivos resultantes da busca e convertidos em uma tabela (*dataframe*). A união das tabelas foi realizada pela função a função “*mergeDbSources*”, com a opção de remoção de entradas duplicadas. A tabela resultante foi salva em formal “.xlsx” para seleção de artigos relevantes no MS Excel. Os resultados foram extraídos das bases no formato de conjuntos de metadados, no formato “.bib”.

As referências utilizadas para construção da *string* de busca foram escolhidas a partir de outras revisões bibliográficas intimamente ligadas ao tema (SANTOS; LIZARELLI, 2023a,b; SANTOS; LIZARELLI, MARTINS, 2024a). A coleta de dados nas bases de dados

WoS e Scopus ocorreu em 10 de outubro de 2023. Contabilizando ambas as bases, 328 documentos foram encontrados seguindo os parâmetros do protocolo apresentado (Quadro 19).

Seleção de Artigos:

Inicialmente, dos 328 resultados, 186 são originários da base WoS e 142 da base Scopus. Após a retirada de duplicados, restaram 231 documentos. Em uma segunda etapa de seleção, foram analisados os títulos e resumos de cada um dos 231 artigos, a fim de reconhecer aqueles com relação aos três temas principais. Para garantir consistência na elegibilidade dos documentos, princípios de exclusão foram considerados, como mostra o Quadro 19. Nesta segunda fase, foram excluídos 98 artigos, pela aplicação dos critérios de exclusão:

- *Uso dos termos de busca de forma sinônima - GCSS (64):* A maioria dos artigos utilizavam os termos da *string* de busca como sinônimos, como “*environment*” no sentido de local (53); além de “*social*” relacionado as mídias sociais, conexões ou outros usos não relacionados (8); “*sustain**” como sinônimo de sustentação (2); e “*green*” como sinônimo de novo (1);
- *Uso dos termos de busca de forma sinônima - I4.0 (20):* Outra grande parte dos artigos removidos referiam-se aos termos “*internet*” (17) e “*cyber*”(3) em outros contextos;
- *Homônimos acronímicos (13):* Uma última parcela significativa foi excluída pela utilização das siglas “SSC” (8) e “GSC” (5) com outros significados;
- *Escopo limitado (1):* Apenas um artigo foi excluído por trazer tópicos relacionados aos três temas, mas não abordava a GCS, e sim a gestão de uma unidade empresarial.

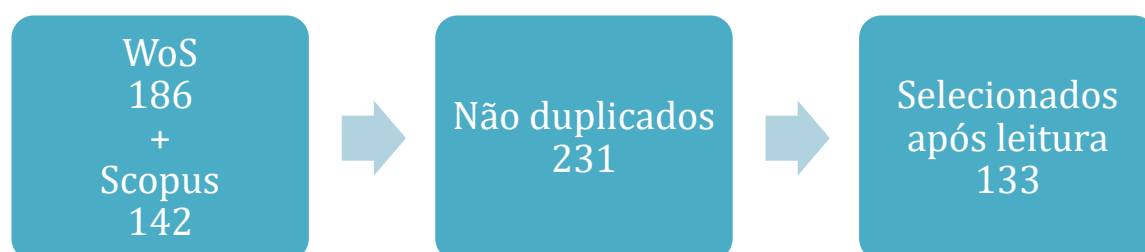
Quadro 19 – Protocolo do método bibliográfico

Bases de Dados	Web of Science; Scopus
String de Busca	<i>TS = (("performance measur*" OR "measur* performance" OR "performance manag*" OR "performance eval*" OR "performance metric*" OR "performance indicator*") AND (("GSC*" OR "SSC*") OR ("supply chain*" OR "value chain" OR "distribution network") AND ("sustain*" OR "green*" OR "environ*" OR "social*")))) AND ("Industr* 4.0" OR "smart manufacturing" OR "internet" OR "big data" OR "cloud" OR "artificial intelligence" OR "cyber*"))</i>
CrITÉrios de inclusão	• Documentos em inglês • Artigos e revisões publicadas em periódicos com processo de revisão por pares
CrITÉrios de exclusão	Artigos não relacionados ao tema, incluídos por: • Uso dos termos de busca de forma sinônima • Homônimos acronímicos • Escopo limitado (não abordar a cadeia de suprimentos)

Fonte: o Autor (2024)

A Figura 13 ilustra o processo de obtenção dos 133 artigos selecionados seguindo tal protocolo, sendo esta amostra final considerada aprovado na etapa de triagem, e submetidos aos métodos bibliográficos (bibliometria descritiva, análise de redes sociais e análise de conteúdo). Em relação a limpeza de dados, foi necessário unicamente a padronização de palavras-chaves utilizadas pelos autores (pela substituição de siglas).

Figura 13 – Resultado das etapas de coleta e seleção de artigos



Fonte: o Autor (2024).

Extração e Análise de Dados: A amostra final de artigos aprovados na etapa de seleção para inclusão foi submetida aos métodos bibliográficos.

- Para a obtenção de dados de bibliometria descritiva, os registros da amostra foram processados com uso do pacote Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017). O Bibliometrix possibilitou a criação de gráficos e tabelas utilizando metadados dos documentos extraídos das bases e agrupados no RStudio.
- O software VOSViewer (versão 1.6.19) foi utilizado para a elaboração do mapa de coocorrência de palavras-chave dos autores e para o mapa de densidade de termos, que permitiram aprofundar a discussão sobre a estrutura conceitual do campo (ECK; WALTMAN, 2014);
- Para a análise de conteúdo, foram compiladas todas as informações consideradas relevantes quanto ao uso das tecnologias da I4.0 em SMD para a GCSS (WHITE; MARSH, 2006). Em especial, buscou-se compreender como as tecnologias da I4.0 são úteis aos processos dos SMD e como estes se relacionam às práticas da GCSS. Foi elaborada uma planilha no Microsoft Excel® para a organização, comparação e agrupamento das informações extraídas.
- *Interpretação e Síntese:* As evidências coletadas foram analisadas, comparando dados da bibliometria descritiva, análise de redes sociais e análise de conteúdo. Os resultados representam um mapa da estrutura conceitual do campo (COBO et al., 2011), e são evidenciados em quadros-resumo e um modelo teórico, com as principais conclusões conforme interpretação.

6.4 RESULTADOS

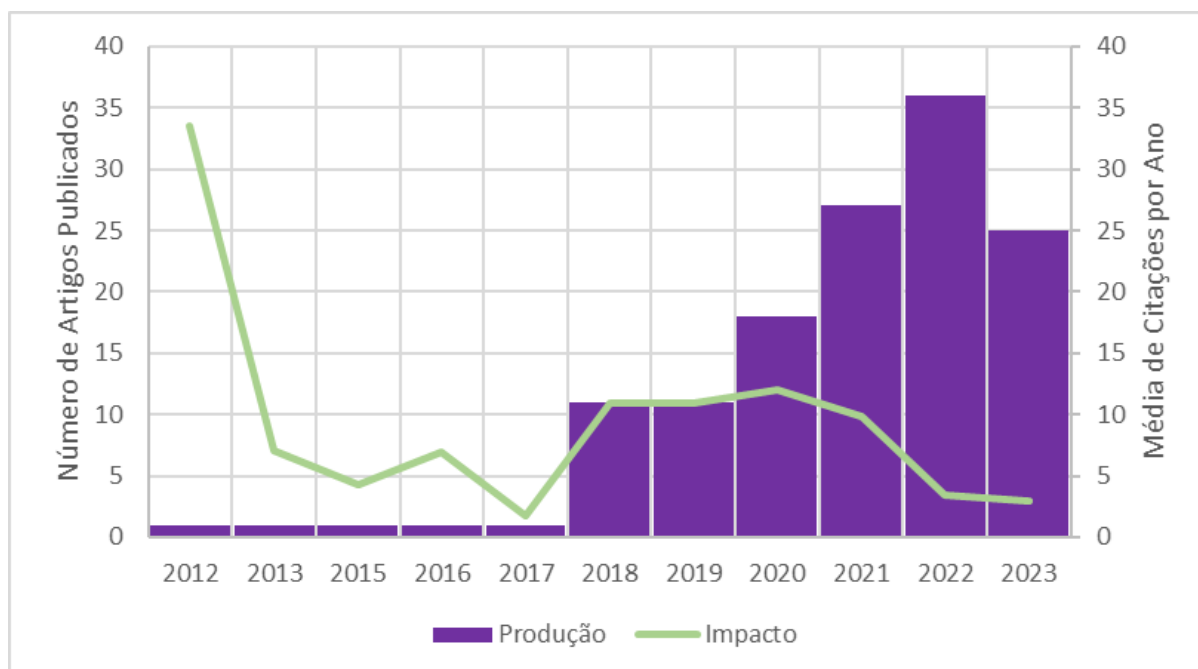
6.4.1 Mapeamento Científico

Dos 133 artigos considerados para o mapeamento científico, 105 são classificados como artigos, e 17 como revisões. O período de publicação é de 2012 a 2023. As próximas subseções apresentam os resultados das técnicas utilizadas nesta amostra, a fim de “*Mapear o campo de pesquisa que relaciona SMD, GCSS, e as tecnologias da I4.0*”.

6.4.1.1 Bibliometria Descritiva

Primeiramente, a amostra foi caracterizada em termos da produção científica do campo e seu impacto em média de citações por ano como exibido na Figura 14. Nota-se que existe um crescimento na produção científica a partir de 2018, que alcança um máximo de 36 publicações em 2022. Esse aumento na inclinação da curva expressa um crescimento do interesse do tema no meio acadêmico nos últimos anos. Sobre o impacto, é possível notar apenas um pico, em 2012 (com média de 33,5 citações por ano). Naturalmente, a curva de média de citações por ano é decrescente nos últimos anos.

Figura 14 - Produção científica anual e impacto, em média de citações por ano.



Fonte: o Autor (2024) – Dados extraídos pelo Bibliometrix

A Tabela 2 apresenta a lista dos documentos que se destacam em impacto, por total de citações (TC). Davis et al. (2012) é o artigo mais citado da amostra, com 402 TC. O artigo é responsável pelo pico de impacto de 2012 (Figura 14). Os autores são pioneiros no campo ao discutir a aplicação das tecnologias da I4.0 (ou *smart manufacturing*) na cadeia de suprimentos, dando ênfase ao uso de métricas de desempenho integradas e à tecnologia de sistemas ciberfísicos.

Já Manavalan e Jayakrishna (2018) é o segundo artigo em TC (393) e líder em TC por ano (78,60). Os autores exploram o uso da tecnologia de Internet das Coisas na GCSS, e revisam sobre as oportunidades em potencial e sobre a preparação para a digitalização,

incluindo aprofundamento sobre a relação com outras tecnologias e a importância da medição de desempenho neste cenário. Também vale destaque Wamba et al. (2020), sobre o uso de BDA na cadeia de suprimentos, focando em agilidade, adaptabilidade e métricas de desempenho (dimensão financeira). Também é importante destacar que a maioria dos artigos com maior TC são de 2018- 2021, o que confirma o resultado sobre o período de maior impacto (Figura 13).

Tabela 2 - Artigos da amostra, ordenados por total de citações (TC)

Artigo	Total de Citações	TC por ano
DAVIS J, 2012, COMPUT CHEM ENG	402	33,50
MANAVALAN E, 2019, COMPUT IND ENG	393	78,60
WAMBA SF, 2020, INT J PROD ECON	252	63,00
VENKATESH VG, 2020, ROBOT COMPUT-INTEGR MANUF	167	41,75
BAG S, 2021, BENCHMARKING	152	50,67
KAMBLE SS, 2020, INT J PROD ECON	147	36,75
KUMAR P, 2021, RESOUR CONSERV RECYCL	143	47,67
GARCIA-MUIÑA FE, 2018, SOC SCI	134	22,33
JEBLE S, 2018, INT J LOGIST MANAG	118	19,67
KOCHAN CG, 2018, INT J PROD ECON	101	16,83
ALHAWARI O, 2021, SUSTAINABILITY	98	32,67
BADIEZADEH T, 2018, COMPUT OPER RES	94	15,67
TSANG YP, 2018, IND MANAGE DATA SYST	91	15,17
NARA EOB, 2021, SUSTAIN PROD CONSUMP	85	28,33
SHARMA R, 2021, J ENTERP INF MANAG	85	28,33
KUO TC, 2018, J CLEAN PROD	82	13,67
LENNY KOH SC, 2013, INT J PROD RES	77	7,00

Fonte: o Autor (2024) – Dados extraídos pelo Bibliometrix

A Tabela 3 apresenta os 8 principais periódicos no campo dentre os 81 identificados. Destaca-se o periódico *Sustainability* com 14 publicações no tema. Os demais, possuem entre 3 a 4 publicações, com exceção do periódico *Computers & Industrial Engineering*, com 5 publicações. Existe uma convergência nos escopos dos periódicos da amostra: gestão de negócios, ciências de decisões, ciências da computação, ciências sociais e engenharia de produção.

Tabela 3 – Principais periódicos do campo

Periódico	Artigos
SUSTAINABILITY	14
COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING	5
APPLIED SCIENCES-BASEL	4
BENCHMARKING-AN INTERNATIONAL JOURNAL	4
INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS	4
INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH	4
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	4
MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY	4

Fonte: o Autor (2024) – Dados extraídos pelo Bibliometrix

Como última análise descritiva, investigam-se as palavras-chave de uso mais frequente na amostra de artigos. Das 527 palavras-chave da amostra, 43 possuem frequência de uso maior que 3 (Figura 15). Sobre as tecnologias da I4.0, identificam-se *internet of things*, *artificial intelligence/machine learning*, *big data/big data analytics*, *cyber-physical systems*, *cloud computing*, *blockchain* e *sumulation*. Termos relacionados aos processos dos SMD incluem *key performance indicators*, *performance measurement/evaluation/management*, *decision making/support systems* e *supply chain performance*. Já em relação à GCSS destacam-se *circular economy*, *sustainable manufacturing*, *logistics*, *envrionmental sustainability*, e *green supply chain/management*.

Figura 15 – Palavras-chave mais frequentemente usadas no campo.



Fonte: o Autor (2024) – Dados extraídos pelo Bibliometrix

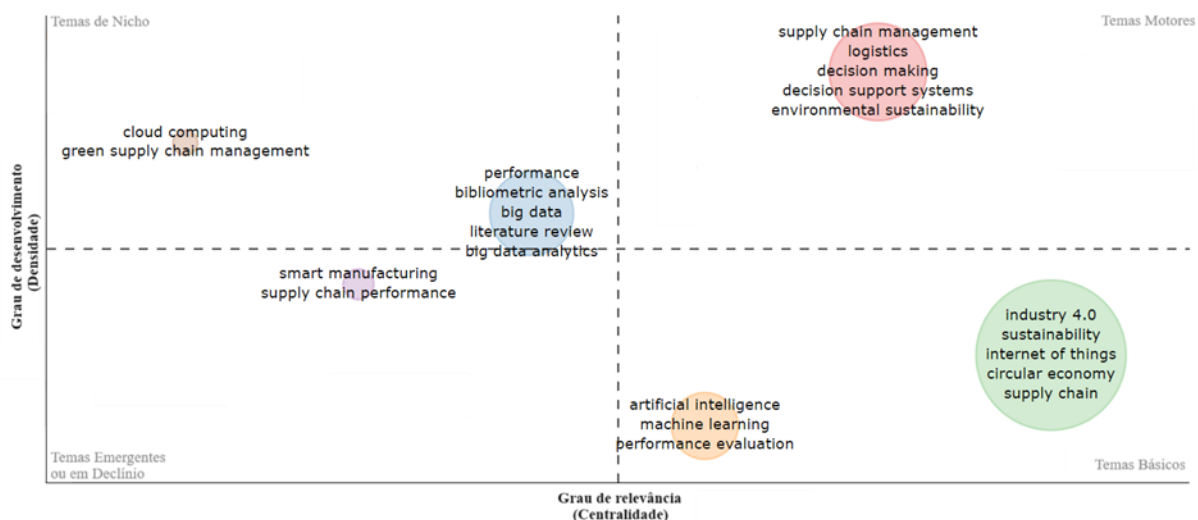
A análise de redes sociais realizada foi fundamentada no mapeamento da estrutura conceitual do conhecimento (COBO et al., 2011). Primeiramente, a partir das palavras-chave de maior relevância, foram mapeadas as suas co-ocorrências, que pode ser descrita como uma técnica de mineração de dados que utiliza as palavras em um documento para estabelecer relações (ZUPIC; CATER, 2015). A análise de palavras-chave relacionadas ao tema é outra evidência que os SMD ainda não são devidamente explorados pelo campo. A Figura 16 apresenta as palavras-chave mais recorrentes nos artigos da amostra na formação de 3 distintos clusters:

- Figura 16 – Co-ocorrência de palavras-chave dos autores



Aprofundando a análise da estrutura conceitual, apresenta-se a Figura 17, que mapeia os temas segundo sua relevância e grau de desenvolvimento (COBO et al., 2011). Os artigos são agrupados conforme a similaridade no uso das palavras-chave. Um cluster se classifica como “Emergente ou em Declínio”, e é caracterizado pelas palavras-chave *smart manufacturing* e *supply chain performance*. Dois clusters se enquadram como “Temas de Nicho”, e abordam a relação entre computação em nuvem e a GCSV e a relação entre BDA e desempenho, que parece ser um tema trabalhado em revisões sistemáticas. Dois outros clusters são considerados como “Básicos” relacionando a avaliação do desempenho à AI e tecnologias da I4.0 como IoT à sustentabilidade e a economia circular, ou seja, são *clusters* com alto grau de relevância e baixa densidade. Com maior grau de desenvolvimento e relevância, um último cluster trata da GCS, sustentabilidade ambiental e da tomada de decisão. O mapa de temas demonstra que há diversos temas que não trabalham diretamente a questão de medição de desempenho. Percebe-se que os SMD são abordados de forma superficial, usualmente na forma de conjunto de medidas ou com o papel de melhorar o desempenho. Os agrupamentos que trazem este tópico, estão associados a tópicos como AI e aprendizagem de máquina. Não há temas que trabalhem tecnologias da I4.0, sistemas ou medidas de desempenho e sustentabilidade na cadeia de suprimentos, mostrando a necessidade de estudos neste tópico.

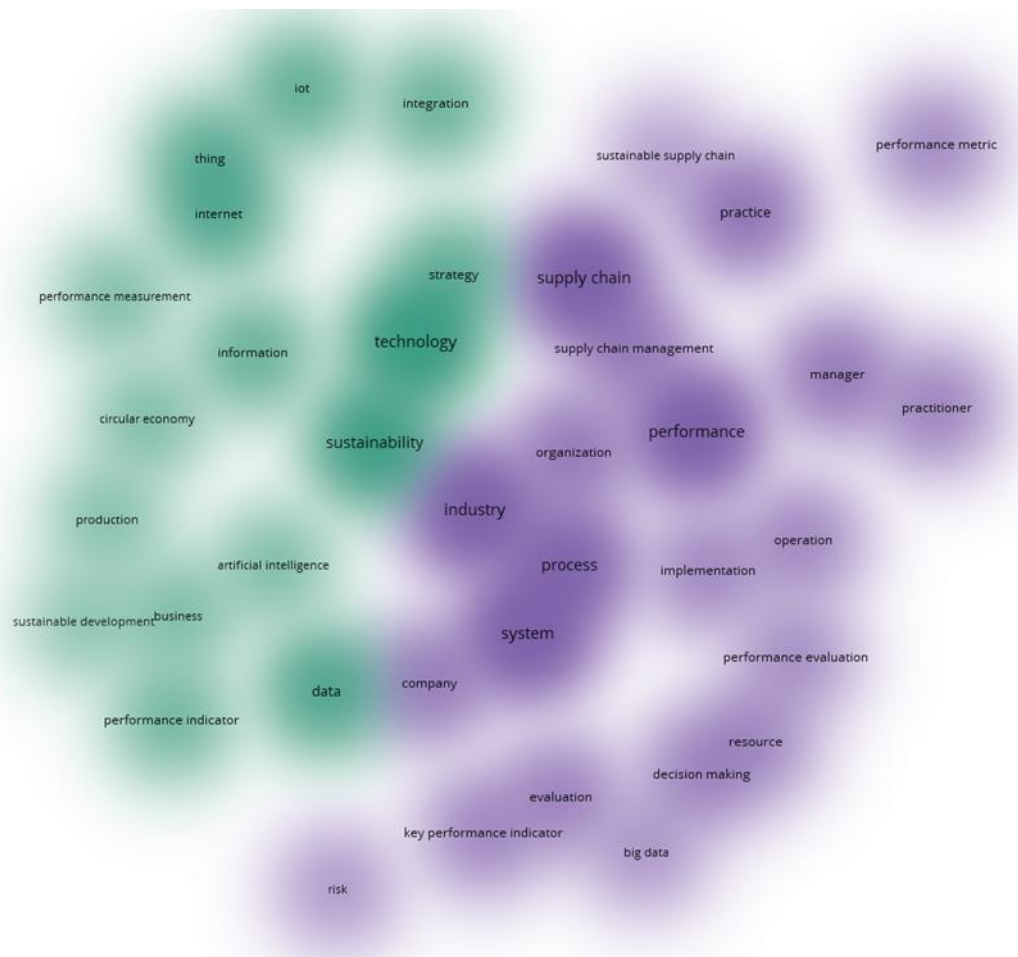
Figura 17 – Mapa de temas



Fonte: o Autor (2024) – Dados extraídos pelo Bibliometrix

Uma última análise de rede social foi realizada por mineração de dados, em títulos e resumos, cuja visualização se faz por mapa de densidade (Figura 18). Nota-se a formação de dois distintos clusters. No Cluster Verde, a relação entre a sustentabilidade e tecnologias como AI, próximo à produção e aos dados, e IoT, próximo a integração. Nesse cluster, observa-se também a relação entre estratégia, sustentabilidade e tecnologia. Ainda, a medição de desempenho é presente, relacionada com a economia circular e a informação. Já no Cluster Roxo, observa-se uma presença maior da GCS e das práticas da GCSS no desempenho e suas métricas. A avaliação de desempenho também se relaciona à tomada de decisão e à tecnologia de BDA.

Figura 18 - Mapa de densidade de termos em títulos e resumos



Fonte: o Autor (2024) – Dados extraídos pelo VOSViewer

6.4.2 Análise de Conteúdo

Os artigos da amostra foram submetidos à análise de conteúdo, sendo realizada a leitura integral das obras. Foram identificadas diversas relações entre os construtos, compilando-se todas as informações consideradas relevantes (WHITE; MARSH, 2006). Primeiramente, foi analisado *como os processos dos SMD se mostram importantes na medição de desempenho das práticas da GCSS*. Essas relações são detalhadas abaixo, e são resumidas no Quadro 20.

Design

Design e Seleção de Medidas Alinhadas à Estratégia da GCS e Integradas ao SMD: Segundo Cavalieri et al. (2022), a seleção de medidas é importante para monitorar o desempenho das três dimensões da sustentabilidade desde o início do ciclo de vida da produção. A escolha de medidas eficientes leva ao design de produtos e processos mais sustentáveis. Ao estarem alinhadas à estratégia da cadeia de suprimentos, tais medidas permitem o controle no uso de recursos naturais e no controle e mitigação de impactos ambientais. Indicadores específicos ajudam a medir a eficiência de práticas ecológicas como recuperação e reaproveitamento de produtos, minimização de resíduos e manufatura sustentável. Ainda, torna possível monitorar que a rede de distribuidores e clientes adotem práticas sustentáveis, apoiando o compromisso ambiental da GCS (CAVALIERI et al., 2022).

Implantação

Capacitação das Pessoas para Colaborar com o Desenvolvimento do SMD: O processo auxilia na gestão sustentável da informação e tecnologia ao garantir que os colaboradores tenham as habilidades necessárias para utilizar ferramentas e sistemas de medição de desempenho de forma eficaz (CAVALIERI et al., 2022). Com uma equipe capacitada, a cadeia de suprimentos pode gerenciar de maneira mais eficiente a coleta, análise e utilização de dados, promovendo decisões baseadas em informações precisas e sustentáveis. Isso facilita outras práticas sustentáveis de forma indireta, pela otimização de recursos e a inovação contínua, alinhando a estratégia da empresa aos seus objetivos ambientais e sociais (CAVALIERI et al., 2022).

Uso

Coleta de Dados em Tempo Real e Análise de Desempenho: Garante o monitoramento contínuo da qualidade, reduzindo defeitos e desperdícios na produção (ETHIRAJAN et al., 2020; NAGARAJAN et al., 2022; TSANG et al., 2018). Este monitoramento inclui o controle do impacto ambiental, identificando rapidamente áreas que necessitam de ajustes para reduzir emissões (CAVALIERI et al., 2022; GARCIA-MUIÑA et al., 2018; ROSSI et al., 2020) e o controle do uso de recursos e produção, ajudando a minimizar desperdícios (MORELLA et al., 2020; SANTOS et al., 2018; YADAV et al., 2021). Também ajuda a monitorar o desempenho logístico de toda a cadeia de suprimentos, otimizando rotas e o armazenamento, com menor consumo de energia e recursos (ETHIRAJAN et al., 2020; NAGARAJAN et al., 2022; TSANG et al., 2018; YADAV et al., 2021; SHARMA et al., 2022). Finalmente, ao facilitar a integração de dados (SHARMA et al., 2022), oferece dados dos ambientes operacionais para monitorar práticas éticas e sociais, garantindo o impacto positivo das ações da empresa na sociedade (ETHIRAJAN et al., 2020; TSANG et al., 2018; VENKATESH et al., 2020)

Análise de Dados em Tempo Real e Predição do Desempenho: A análise de dados em tempo real permite antecipar problemas de qualidade, evitando desperdícios e melhorando a eficiência dos processos (ETHIRAJAN et al., 2020; TSANG et al., 2018). A análise preditiva ajuda a otimizar a produção, identificando áreas para reduzir desperdícios e melhorar o uso de recursos (CAVALIERI et al., 2022; ROSSI et al., 2020; YADAV et al., 2021). Facilita-se assim a identificação de padrões de consumo de recursos e emissões, permitindo ações preventivas para reduzir impactos ambientais (CAVALIERI et al., 2022; MAHDIRAJI et al., 2023; XING et al., 2016). Quanto à logística e armazenamento, a análise de dados em tempo real permite prever demandas e otimizar rotas de transporte e armazenamento, minimizando impactos ambientais (TSANG et al., 2018; VENKATESH et al., 2020; YADAV et al., 2021). A predição de tendências e comportamentos ajuda a otimizar a cadeia de fornecimento e a garantir que práticas sustentáveis sejam mantidas (ETHIRAJAN et al., 2020; SHARMA et al., 2022) como, por exemplo, identificando produtos que podem ser recuperados ou reciclados de forma mais eficiente, contribuindo para a economia circular (NUDURUPATI et al., 2022b). A adaptação rápida ainda traz benefícios quanto à concepção de soluções mais eficientes e sustentáveis (NUDURUPATI et al., 2022b); inovação de sistemas de gestão da informação (SHARMA et al., 2022); prevenção de falhas no ambiente operacional (CAVALIERI et al., 2022; TSANG et al., 2018); e ajuste de ações sociais, antecipando as necessidades da comunidade (VENKAYESH et al., 2020).

Interpretação e Avaliação do Desempenho: A avaliação do desempenho garante que as práticas de qualidade atendam aos critérios ambientais e sociais, reduzindo desperdícios e defeitos (ETHIRAJAN et al., 2020; NAGARAJAN et al., 2022; TSANG et al., 2018). No design de produtos e processos sustentáveis, permite avaliar previamente o impacto ambiental e a eficiência dos produtos e processos, indicando áreas para melhorias sustentáveis (BADIEZADEH et al., 2017; NUDURUPATI et al., 2022b). Na manufatura, a interpretação dos dados de desempenho ajuda a identificar áreas de desperdício ou ineficiência na produção, promovendo ajustes para um processo mais sustentável (MANALAVAN; JAYAKRISHNA, 2019). Também é possível avaliar a eficiência do ambiente operacional, promovendo melhorias na gestão dos recursos e da infraestrutura (CAVALIERI et al., 2022; TSANG et al., 2018). A avaliação dos resultados das iniciativas ambientais e sociais permite a redução de impactos negativos (BADIEZADEH et al., 2017; XING et al., 2016). Nas operações logísticas, avalia o desempenho dos fornecedores (BADIEZADEH et al., 2017; FAZLOLLAHTABAR, 2023), identifica formas de reduzir emissões e otimizar o uso de recursos no transporte (TSANG et al., 2018) e permite analisar o desempenho da recuperação de produtos, ajustando processos para otimizar a reutilização e reciclagem (NUDURUPATI et al., 2022b). Por fim, este processo permite analisar como os sistemas de TI suportam as práticas sustentáveis, identificando oportunidades de melhoria na eficiência energética e na gestão de dados (MANALAVAN; JAYAKRISHNA, 2019).

Garantir o Fluxo de Dados e Informações de Forma Transparente e em Tempo Real entre os Elos da Cadeia de Suprimento e as Partes Interessadas: Facilita o monitoramento de inventários e transporte de forma eficiente, reduzindo custos e impactos ambientais (TSANG et al., YADAV et al., 2021). Permite a comunicação eficiente sobre o status e condições dos produtos para recuperação, otimizando o processo de reaproveitamento (NANDI et al., 2021; NUDURUPATI et al., 2022b). Informações sobre impacto ambiental são compartilhadas em tempo real, permitindo ajustes rápidos e alinhados com as metas ambientais (CAVALIERI et al., 2022; MAHDIRAJI et al., 2023; XING et al., 2016), bem como ajustes no design de produtos e processos (NUDURUPATI et al., 2022b). Também garante que distribuidores e clientes recebam dados precisos sobre práticas sustentáveis, promovendo maior transparência e colaboração (CAVALIERI et al., 2022; NANDI et al., 2021). Na manufatura, permite a troca de informações sobre o uso de recursos e a produção, promovendo ajustes em tempo real para reduzir desperdícios e melhorar a eficiência (CAVALIERI et al., 2022; GARCIA-MUIÑA et al., 2018; MORELLA et al., 2020; YADAV et al., 2021). A transparência nos dados permite

monitorar a qualidade de forma contínua, identificando falhas rapidamente e corrigindo-as de maneira eficiente (NAGARAJAN et al., 2022; TSANG et al., 2018).

Tomada de Decisão Integrada à GCS e às Partes Interessadas: A tomada de decisões integrada assegura que as ações da empresa sejam socialmente responsáveis, impactando positivamente as comunidades e o bem-estar social (GARCIA-MUIÑA et al., 2018). Essas decisões informadas incluem o controle sobre o uso de tecnologias, promovendo a sustentabilidade na gestão de dados e recursos de TI (MANALAVAN et al., 2019). Para a gestão de fornecedores, isso significa levar em conta a sustentabilidade, garantindo uma cadeia de suprimentos alinhada com as práticas ambientais e sociais (FAZLOLLAHTABAR, 2023). A tomada de decisão Integrada ao processo de design, o processo assegura que os produtos e processos sejam desenvolvidos com foco na sustentabilidade, desde a concepção até a produção (NUDURUPATI et al., 2022b; ROSSI et al., 2020). Para a manufatura, as decisões baseadas em dados sustentáveis ajudam a otimizar os processos de produção, reduzindo desperdícios e melhorando a eficiência energética (CAVALIERI et al., 2022; MANALAVAN. JAYAKRISHNA, 2019; SANTOS et al., 2018). As decisões de qualidade são feitas com base em critérios sustentáveis, melhorando a durabilidade dos produtos e reduzindo defeitos (CAVALIERI et al., 2022; XING et al., 2016; NAGARAJAN et al., 2022). As decisões estratégicas também refletem na maneira como são conduzidas a recuperação e a reciclagem de produtos, promovendo economia circular (MANALAVAN; JAYAKRISHNA, 2019; NUDURUPATI et al., 2022b; ROSSI et al., 2020).

Quadro 20 – Relações entre os Processos dos SMD e as Práticas da GCSS

Processos dos SMD		Etapa do Ciclo de Vida	Práticas da GCSS	Como	Autores
1	Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	Design	Design de produtos e processos sustentáveis; Gestão ambiental; Gestão sustentável de distribuidores e clientes; Manufatura sustentável; Recuperação de produtos	Alinhando o design e a seleção de medidas à estratégia de sustentabilidade da GCS. O SMD deve possibilitar o monitoramento e a avaliação do impacto da produção de forma transparente, para identificação de áreas críticas para melhoria.	Cavalieri et al. (2022)
4	Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD	Implantação	Gestão sustentável da informação e tecnologia	Desenvolvendo habilidades nos colaboradores para gestão e uso eficiente do SMD, promovendo a sustentabilidade.	Cavalieri et al. (2022)
5	Coleta de dados em tempo real	Uso	Gestão ambiental; Gestão do ambiente operacional; Manufatura sustentável; Gestão sustentável de logística e armazenamento; Gestão sustentável da qualidade; Gestão sustentável da informação e tecnologia; Gestão sustentável de distribuidores e clientes; Responsabilidade social corporativa	Monitorando em tempo real o uso de recursos, emissões e resíduos da produção e das operações logísticas, para identificar oportunidades de redução de desperdício e de impactos negativos. Ainda, a coleta de dados sobre o ambiente operacional e sobre segurança são importantes para a dimensão social.	Garcia-Muiña et al. (2018); Santos et al. (2018); Tsang et al. (2018); Ethirajan et al. (2020); Morella et al. (2020); Rossi et al. (2020); Venkatesh et al. (2020); Yadav et al. (2021); Cavalieri et al. (2022); Sharma et al. (2022)
6	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho		Gestão ambiental; Gestão do ambiente operacional; Manufatura sustentável; Gestão sustentável da qualidade; Gestão sustentável de distribuidores e clientes; Gestão sustentável da informação e tecnologia; Gestão sustentável de logística e armazenamento; Design de produtos e processos sustentáveis; Recuperação de produtos; Responsabilidade social corporativa	Aperfeiçoando a manufatura sustentável e auxiliando no design de produtos e processos. A análise preditiva melhora a eficiência na gestão ambiental. Ainda, existe a possibilidade de melhorar o ambiente operacional e facilitar a gestão da informação.	Xing et al. (2016); Tsang et al. (2018); Ethirajan et al. (2020); Rossi et al. (2020); Venkatesh et al. (2020); Yadav et al. (2021); Cavalieri et al. (2022); Nudurupati et al. (2022b); Sharma et al. (2022); Mahdiraji et al. (2023)
7	Interpretação e avaliação do desempenho		Design de produtos e processos sustentáveis; Recuperação de produtos; Gestão ambiental; Gestão sustentável de fornecedores; Responsabilidade social corporativa; Gestão do ambiente operacional; Gestão sustentável da qualidade; Gestão sustentável da informação e tecnologia; Manufatura sustentável; Gestão sustentável de logística e armazenamento; Gestão sustentável de distribuidores e clientes	Aprimora a gestão da qualidade dos produtos e processos ao facilitar a identificação de oportunidades de melhoria. A avaliação de desempenho é aplicável às práticas relacionadas à design, gestão logística, seleção de fornecedores e gestão ambiental.	Xing et al. (2016); Badiezhadeh et al. (2017); Tsang et al. (2018); Manavalan; Jayakrishna (2019); Ethirajan et al. (2020); Cavalieri et al. (2022); Nudurupati et al. (2022b); Fazlollahabbar (2023)
8	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e as partes interessadas		Gestão ambiental; Gestão sustentável de distribuidores e clientes; Gestão do ambiente operacional; Gestão sustentável da qualidade; Manufatura sustentável; Gestão sustentável de logística e armazenamento; Design de produtos e processos sustentáveis; Recuperação de produtos	Fornecendo dados e informações para aprimorar a eficiência da gestão da qualidade e facilitando a cooperação entre os elos da cadeia e parceiros comerciais. Assim, promovem-se manufatura e logística mais ecológicas, e melhor reuso/reciclagem de produtos.	Xing et al. (2016) ; Garcia-Muiña et al. (2018); Tsang et al. (2018); Manavalan; Jayakrishna (2019); Morella et al. (2020); Nandi et al. (2021); Yadav et al. (2021); Cavalieri et al. (2022); Nudurupati et al. (2022b); Mahdiraji et al. (2023)
9	Tomada de decisão integrada à GCS e às partes interessadas		Gestão ambiental; Manufatura sustentável; Gestão sustentável de fornecedores; Responsabilidade social corporativa; Gestão sustentável da informação e tecnologia; Recuperação de produtos; Gestão sustentável da qualidade; Design de produtos e processos sustentáveis	Melhorando a integração das decisões com a cadeia de suprimentos, ao incorporar feedback das partes interessadas nas decisões. Consideram-se assim aspectos ambientais e sociais na tomada de decisão e reforçam-se critérios de sustentabilidade na seleção e gestão de fornecedores.	Xing et al. (2016) ; Garcia-Muiña et al. (2018); Santos et al. (2018); Manavalan; Jayakrishna (2019); Rossi et al. (2020); Cavalieri et al. (2022); Nudurupati et al. (2022b); Fazlollahabbar (2023)

Fonte: O Autor (2024)

Em uma segunda análise, foram levantadas informações sobre *como as tecnologias da I4.0 podem ser úteis aos processos dos SMD* (Quadro 21).

Design

Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD: IoT facilita o processo ao permitir a coleta de dados em tempo real por meio de sensores conectados. Esses sensores monitoram diversos parâmetros ambientais, operacionais e de qualidade, fornecendo informações precisas e contínuas. Com base nesses dados, é possível desenvolver e refinar parâmetros da medição de desempenho que estão diretamente alinhados às metas da GCS. Assim a IoT facilita o design de medidas mais específicas e dinâmicas (CAVALIERI et al., 2022).

Implantação

Implantação e integração da infraestrutura de suporte do SMD na GCS: A IoT auxilia ao conectar dispositivos e sistemas, permitindo monitoramento remoto, automatização de processos e análise de dados em tempo real. Isso melhora a tomada de decisão, otimiza recursos e viabiliza manutenção preditiva, promovendo eficiência e confiabilidade na GCS (CAVALIERI et al., 2022).

Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD: A IoT e a BDA auxiliam na capacitação para o SMD ao permitir troca de informações e experiências em tempo real, conectando colaboradores e dispositivos. BDA oferece novas fontes de insights ao analisar grandes volumes de dados, identificando padrões e oportunidades de aprendizado, tornando a capacitação mais dinâmica e personalizada. A IoT complementa a capacitação ao conectar dispositivos e sistemas, permitindo acesso em tempo real a dados e experiências práticas (CAVALIERI et al., 2022).

Uso

Coleta de dados em tempo real: O processo é significativamente auxiliado pelas tecnologias IoT, BDA e CPS, que podem trabalhar sozinhos ou de forma integrada. A IoT utiliza sensores para capturar dados operacionais e de ambiente, permitindo o monitoramento em tempo real e a transmissão dessas informações de maneira remota e contínua (SANTOS et al., 2018; VENKATESH et al., 2020; NAGARAJAN et al., 2022). A BDA processa esses grandes volumes de dados, identificando padrões, gerando insights e ampliando a capacidade de controle e resposta em tempo real (SANTOS et al., 2018). Por sua vez, CPS conecta os sensores

às plataformas digitais, promovendo a integração dos dados coletados e possibilitando o diagnóstico automatizado e preciso dos equipamentos (MORELLA et al., 2020; ROSSI et al., 2020). A combinação dessas tecnologias aprimora o monitoramento, aumenta a eficiência da GCS e oferece maior confiabilidade na tomada de decisão (SANTOS et al., 2018; CAVALIERI et al., 2022).

Análise de dados em tempo real e predição do desempenho: A prática de "Análise de dados em tempo real e predição do desempenho" na cadeia de suprimentos é fortalecida por tecnologias avançadas que permitem o processamento rápido e eficiente de grandes volumes de dados. A IoT coleta dados em tempo real por meio de sensores espalhados pela cadeia (YADAV et al., 2021; MAHDIRAJI et al., 2023), enquanto BDA processa e transforma esses dados, estruturados ou não, em insights preditivos (TSANG et al., 2018; VENKATESH et al., 2020). A CC facilita o armazenamento e processamento remoto dos dados, viabilizando acessibilidade e escalabilidade (XING et al., 2016; MAHDIRAJI et al., 2023). A AI analisa os dados com algoritmos avançados, identificando padrões e tendências para melhorar a precisão das previsões (NUDURUPATI et al., 2022b; SHARMA et al., 2022). Já os CPS conectam os sensores a plataformas digitais, possibilitando modelagem, simulação e otimização de processos (ROSSI et al., 2020). Juntas, essas tecnologias aprimoram a automação, predição e a tomada de decisão na cadeia de suprimentos ao permitir análises em tempo real e antecipando cenários (TSANG et al., 2018; MAHDIRAJI et al., 2023).

Interpretação e avaliação do desempenho: O processo é potencializado por tecnologias como a IoT, que disponibiliza os dados em tempo real coletados por sensores, e permitem a avaliação imediata dos processos (ETHIRAJAN et al., 2020; CAVALIERI et al., 2022). Já BDA permite a avaliação com grandes volumes de dados e dados complexos, facilitando avaliações mais rápidas e precisas (BADIEZADEH et al., 2017; FAZLOLLAHTABAR, 2023). A CC fornece recursos escaláveis para armazenamento e processamento, viabilizando análises de desempenho acessíveis de qualquer lugar (XING et al., 2016; TSANG et al., 2018). A IA aprimora a avaliação ao aplicar algoritmos avançados para identificar padrões e realizar análises preditivas (NUDURUPATI et al., 2022b; SHARMA et al., 2022). Por último, CPS integram o controle da produção em tempo real e a estimativa de desempenho para otimização contínua dos processos (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019).

Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e as partes interessadas: Facilitada pela conectividade entre ativos físicos e sistemas proporcionada pela IoT, onde dados de sensores e dispositivos são compartilhados em tempo real ao longo da cadeia de suprimentos (GARCIA-MUIÑA et al., 2018; NANDI et al., 2021; YADAV et al., 2021). BDA auxilia na visualização e interpretação desses dados, promovendo maior transparência ao transformar informações complexas em insights acessíveis (MAHDIRAJI et al., 2023). A CC facilita o armazenamento e o compartilhamento de dados, documentos e informações entre diferentes setores e elos da cadeia, assegurando que todas as partes interessadas possam acessar e agir sobre as informações de maneira instantânea, independentemente de sua localização (XING et al., 2016; NUDURUPATI et al., 2022b).

Tomada de decisão integrada à GCS e às partes interessadas: O processo é aprimorado pela IoT que permite decisões rápidas e alinhadas com as necessidades operacionais (GARCIA-MUIÑA et al., 2018; CAVALIERI et al., 2022). BDA aliada a IA e aprendizado de máquina processam grandes volumes de dados de forma descentralizada, identificando padrões e gerando insights para uma tomada de decisão mais autônoma e precisa, mesmo em cenários complexos (SANTOS et al., 2018; NUDURUPATI et al., 2022b; FAZLOLLAHTABA, 2023). A CC oferece a flexibilidade necessária para integrar informações de diferentes partes da cadeia de suprimentos e stakeholders, facilitando a colaboração e o alinhamento das decisões em tempo real (XING et al., 2016; ROSSI et al., 2020). Com isso, as tecnologias contribuem para uma gestão de dados mais eficiente, melhor adaptação do modelo de negócios e decisões mais rápidas e informadas.

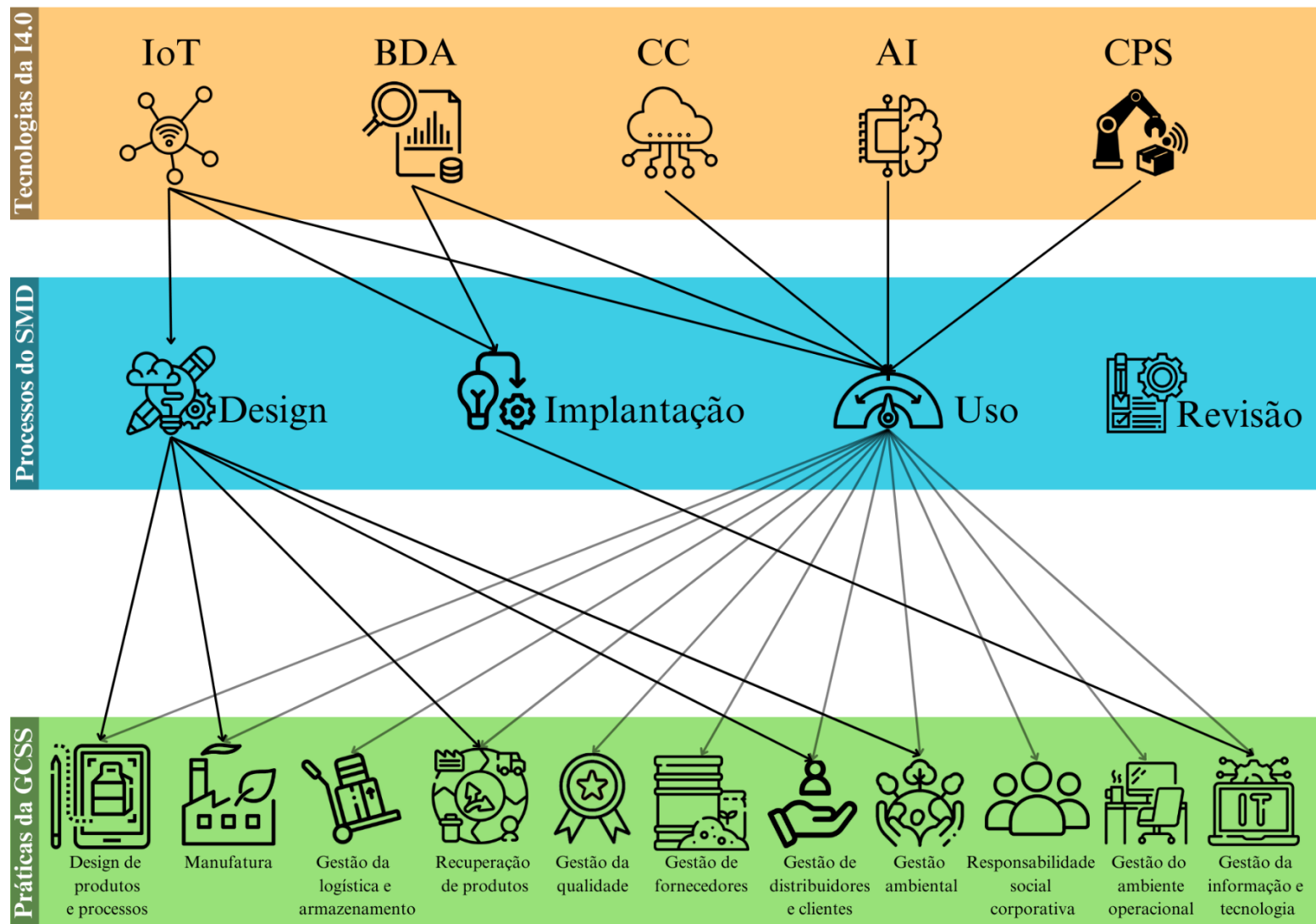
Quadro 21 – Relações entre os Processos dos SMD e as Tecnologias da I4.0

Processos dos SMD		Etapa do Ciclo de Vida	Tecnologias da I4.0	Como	Autores
1	Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	Design	Internet das coisas	A coleta de dados por sensores permite o desenvolvimento de parâmetros para a medição de desempenho	Cavalieri et al. (2022)
3	Implantação e integração da infraestrutura de suporte do SMD na GCS	Implantação	Internet das coisas	Permitindo a integração da infraestrutura de suporte e da tomada de decisão	Cavalieri et al. (2022)
4	Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD		Internet das coisas	Pela troca de informações e experiências em tempo real	Cavalieri et al. (2022)
			Análise de Big Data	Pela possibilidade de obter novas fontes de informações	Cavalieri et al. (2022)
5	Coleta de dados em tempo real		Internet das coisas	Sensores coletam de dados e permitem o monitoramento em tempo real, gerando informações compartilháveis de forma remota	Garcia-Muiña et al. (2018); Tsang et al. (2018); Santos et al. (2018); Ethirajan et al. (2020); Rossi et al. (2020); Venkatesh et al. (2020); Yadav et al. (2021); Cavalieri et al. (2022); Nagarajan et al. (2022); Sharma et al. (2022)
			Análise de Big Data	Permitindo que novos tipos de dados sejam gerados e ampliando a capacidade de controle em tempo real	Santos et al. (2018)
			Sistemas ciberfísicos	Tais sistemas permitem a conexão entre sensores e a plataforma digital, permitindo monitoramento em tempo real e diagnóstico dos equipamentos	Morella et al. (2020); Rossi et al. (2020)
6	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho		Internet das coisas	A ubiquidade e o aumento do poder computacional permitem análises preditivas e o processamento de grande volume de dados	Tsang et al. (2018); Rossi et al. (2020); Yadav et al. (2021); Cavalieri et al. (2022); Sharma et al. (2022); Mahdiraji et al. (2023)
			Análise de Big Data	Com aumento de poder computacional para a conversão de dados em informações preditivas, mesmo quando esses dados se apresentam em grande volume ou não são estruturados	Tsang et al. (2018); Ethirajan et al. (2020); Venkatesh et al. (2020); Mahdiraji et al. (2023)
			Computação em Nuvem	Por armazenamento em nuvem e análise de dados em tempo real, permitindo predição de desempenho	Xing et al. (2016); Tsang et al. (2018); Mahdiraji et al. (2023)
			Inteligência Artificial	Aumentando a capacidade de análise em tempo real e análise preditiva, inclusive para dados não estruturados	Nudurupati et al. (2022b); Sharma et al. (2022)
			Sistemas ciberfísicos	Pela análise de dados junto a sensores, que auxilia em modelagem, simulação e otimização de processos, com o intuito de melhorar a automação e a predição	Rossi et al. (2020)
7	Interpretação e avaliação do desempenho		Internet das coisas	Proporcionando a disponibilidade da informação para otimização	Tsang et al. (2018); Manavalan; Jayakrishna (2019); Ethirajan et al. (2020); Cavalieri et al. (2022); Nudurupati et al. (2022b)
			Análise de Big Data	Pela interpretação de dados complexos e a possibilidade de uma avaliação mais rápida e precisa	Badiezadeh et al. (2017); Fazlollahabbar (2023)
			Computação em Nuvem	Proporcionando recursos computacionais para avaliação do desempenho em nuvem	Xing et al. (2016) ; Tsang et al. (2018); Nagarajan et al. (2022)
			Inteligência Artificial	Auxilia na avaliação de dados complexos e em análises preditivas	Tsang et al. (2018); Nudurupati et al. (2022b); Sharma et al. (2022); Fazlollahabbar (2023)
			Sistemas ciberfísicos	Possibilitam o controle da produção em tempo real e estimar a atividade de operadores	Manavalan; Jayakrishna (2019)
8	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e as partes interessadas	Uso	Internet das Coisas	Pela conectividade e comunicação entre ativos físicos, dados, documentos e informações podem ser compartilhados em tempo real	Garcia-Muiña et al. (2018); Tsang et al. (2018); Manavalan; Jayakrishna (2019); Morella et al. (2020); Nandi et al. (2021); Yadav et al. (2021); Cavalieri et al. (2022); Nagarajan et al. (2022); Mahdiraji et al. (2023)
			Análise de Big Data	Auxiliando na visualização da informação, na transparência e na conectividade dos ativos	Mahdiraji et al. (2023)
			Computação em Nuvem	Gerando conexão e comunicação dentro e fora da empresa, seja em diferentes setores ou entre diferentes elos. Possibilitando compartilhamento de dados, documentos e informações em tempo real	Xing et al. (2016); Tsang et al. (2018); Morella et al. (2020); Nagarajan et al. (2022); Nudurupati et al. (2022b)
9	Tomada de decisão integrada à GCS e às partes interessadas		Internet das Coisas	A disponibilidade de informações ajuda a alinhas as decisões em tempo real	Garcia-Muiña et al. (2018); Santos et al. (2018); Manavalan; Jayakrishna (2019); Cavalieri et al. (2022); Nagarajan et al. (2022); Mahdiraji et al. (2023)
			Análise de Big Data	Sistema de tomada de decisão em grupo e a integração de dados permitem análise de dados de forma descentralizada e autonoma, com tomada de decisão em tempo real	Santos et al. (2018); Cavalieri et al. (2022); Fazlollahabbar (2023)
			Computação em Nuvem	Com melhor gestão de dados, e consequente melhor adaptação do modelo de negócios	Xing et al. (2016); Rossi et al. (2020); Nudurupati et al. (2022b)
			Inteligência Artificial	Gerando informações por aprendizado de máquinas, com descentralização e autonomia, para tomada de decisão em tempo real e em cenários mais complexos	Nudurupati et al. (2022b); Fazlollahabbar (2023)

O Autor (2024)

Com base nas análises anteriores, a Figura 19 apresenta a compilação das informações que vinculam a aplicação das tecnologias da I4.0 nos SMD para auxiliar a GCSS, fornecendo um modelo teórico baseado na literatura. Não foram identificadas relações diretas entre a aplicação das tecnologias da I4.0 em SMD para as práticas da GCSS. No entanto, as evidências sugerem que os processos dos SMD são mediadores da aplicação tecnológica neste sentido. No modelo, fica evidente que a literatura associa as tecnologias da I4.0 à etapa de uso do SMD, majoritariamente. Exceções incluem a aplicabilidade de IoT para design para desenvolvimento de medidas e parâmetros e IoT e BDA para implantação, suportando a tomada de decisão e promovendo a troca de informações em tempo real (CAVALIERI et al., 2022). Ainda, a etapa de implantação associa-se à prática de gestão sustentável da informação e tecnologia.

Figura 19 – Modelo Teórico



Fonte: O Autor (2024)

6.5 DISCUSSÃO

As evidências coletadas pelas técnicas de bibliometria descritiva, redes sociais e análise de conteúdo permitem realizar a interpretação da estrutura conceitual do campo, tendências e oportunidades/demandas de novos estudos. Percebe-se o campo de pesquisa ainda é muito novo, e surge do interesse de particular de autores ocasionais, uma vez que não existem autores de alta produtividade.

Desde 2018, nota-se que esse interesse é crescente, e uma evolução no campo de pesquisa sobre o tópico. Artigos mais importantes são responsáveis pela característica da curva de impacto entre 2017 e 2021, e focam mais nos temas de I4.0 e GCSS, propondo levantamento da literatura e/ou modelos que relacionam as tecnologias da I4.0 e as práticas da GCSS. Tais artigos se mostram pioneiros no campo, mesmo que seu foco não seja no desenvolvimento aprofundado de SMD.

Observa-se que as tecnologias da I4.0 têm revolucionado a forma como as empresas abordam os SMD para a GCSS. Nota-se também o uso frequente de palavras-chaves relacionadas a tecnologias investigadas, e ainda outras cujo potencial ainda deve ser mais bem explorado em SMD, como blockchain e simulação (SANTOS; LIZARELLI, 2023a). Muitas das tecnologias não são exploradas quanto à capacidade de auxiliar os processos de capacitação.

Fica evidente que na literatura, a IoT é a tecnologia mais frequentemente relacionada aos SMD na GCSS. Segundo os autores, é possível aproveitar a interconexão de dispositivos para melhorar a medição de desempenho em diversos aspectos. Nos processos de coleta e de análise de dados, isso impacta principalmente nas práticas relacionadas à logística e armazenamento, manufatura sustentável e gestão do ambiente operacional (ETHIRAJAN et al., 2020; VENKATESH et al., 2020; YADAV et al., 2021; CAVALIERI et al., 2022). Ainda, a tecnologia favorece processos como o design e seleção de medidas, ao considerar a integração da cadeia de suprimentos (CAVALIERI et al., 2022).

O fluxo de dados e informações transparente e em tempo real entre os elos, permitido pela IoT, também favorece as práticas de gestão da qualidade e gestão sustentável de distribuidores e clientes (NANDI et al., 2021; NAGARAJAN et al., 2022). A ubiquidade de informações permite também a interpretação e avaliação do desempenho para processos de tomada de decisão de forma conjunta e mais eficaz, seja na manufatura sustentável, na gestão da informação e tecnologia ou na recuperação de produtos (MANALAVAN; JAYAKRISHNA, 2019; NUDURUPATI et al., 2022b).

A CC é geralmente relacionada aos processos de análise de dados em tempo real, garantir o fluxo de informações na GCSS, na interpretação e avaliação do desempenho e na tomada de decisão alinhada (XING et al., 2016; TSANG et al., 2018; ROSSI et al., 2020). Oferecendo armazenamento escalável e capacidade de processamento avançada, esses processos impactam as práticas da GCSS de design de produtos e processos sustentáveis, a recuperação de produtos e a gestão da qualidade (TSANG et al., 2018; NAGARAJAN et al., 2022; NUDURUPATI et al., 2022b).

A BDA se destaca nos processos de análise de dados em tempo real e predição do desempenho e interpretação e avaliação do desempenho. Esses processos são particularmente relevantes na gestão do ambiente operacional, gestão sustentável da qualidade, gestão sustentável de logística e armazenamento e gestão sustentável de fornecedores (BADIEZADEH et al., 2017; TSANG et al., 2018; VENKATESH et al., 2020; FAZLOLLAHTABAR (2023)

Já a AI é uma tecnologia menos abordada, sendo particularmente útil na análise de dados em tempo real, interpretação e avaliação do desempenho, predição do desempenho e tomada de decisão integrada (TSANG et al., 2018; NUDURUPATI et al., 2022b; SHARMA et al., 2022). Práticas da GCSS que melhor se beneficiam do uso dessa ferramenta no processo de gestão de dados incluem a recuperação de produtos e a gestão sustentável, tanto de fornecedores quanto de distribuidores e clientes (NUDURUPATI et al., 2022b; SHARMA et al., 2022; FAZLOLLAHTABAR, 2023). Já os CPS são raramente relacionados ao tema, são pouco explorados, e indicam um campo de desenvolvimento futuro, sendo mais relevantes no processo de coleta e análise de dados para a prática de manufatura sustentável (ROSSI et al., 2020).

Quanto aos processos dos SMD, percebe-se a ênfase na análise de dados em tempo real e na predição de desempenho (TSANG et al., 2018; NAGARAJAN et al., 2022; NUDURUPATI et al., 2022b). Coleta de dados em tempo real, garantia do fluxo transparente de informações e interpretação do desempenho da GCSS também se mostram propícias à digitalização (GARCIA-MUIÑA et al., 2018; TSANG et al., 2018; CAVALIERI et al., 2022).

A tomada de decisão integrada à GCS e às partes interessadas também se mostra essencial a práticas como design de produtos e processos sustentáveis, manufatura sustentável e recuperação de produtos (SANTOS et al., 2018; NUDURUPATI et al., 2022b). Do ciclo de vida do SMD na GCS, constituído pelas etapas de *design*, implantação, uso e revisão (BOURNE et al., 2000; MAESTRINI e tal., 2017), o foco do campo é apenas o seu uso.

No entanto, a capacitação das pessoas para colaborar no desenvolvimento do SMD e o design de medidas alinhadas à estratégia da GCS ainda carecem de atenção (CAVALIERI et al., 2022). Raramente os artigos consideram o SMD sob um novo nível de complexidade na GCS (SANTOS; LIZARELLI, MARTINS, 2024a). A falta de aprofundamento na área dificulta relacionar os objetivos estratégicos almejados pela GCSS e a aplicabilidade das tecnologias da I4.0: os processos relacionados à implantação, revisão e modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e os objetivos da GCS não são mencionados no campo. Da mesma forma, o processo de avaliação da eficiência e eficácia do SMD, não foi encontrado pela análise de conteúdo.

Quanto às práticas da GCSS, existe uma maior frequência em estudos sobre gestão ambiental, gestão da qualidade, logística e armazenamento sustentáveis, manufatura sustentável e gestão do ambiente operacional (MORELLA et al., 2020; SANTOS et al., 2018; TSANG et al., 2018; MAHDIRAJI et al., 2023). Muitas outras práticas, porém, não são devidamente exploradas, como responsabilidade social corporativa e gestão sustentável da informação e tecnologia (SANTOS; LIZARELLI, 2023b).

Em sua maioria, os artigos da amostra buscam apresentar soluções para o desempenho em sustentabilidade a partir de tecnologias da I4.0. Assim, o estudo do impacto das tecnologias da I4.0 se apresenta como secundário, oriundo do atual interesse na digitalização da gestão de operações da cadeia de suprimentos, em busca de resultados em sustentabilidade. O papel da literatura existente sobre SMD ainda é pouco valorizado nessa tendência, e aspectos do seu ciclo de vida são negligenciados. A ênfase nas práticas relacionadas à sustentabilidade ambiental e a adoção das tecnologias da I4.0 nos SMD indicam uma transformação significativa no paradigma da GCSS. No entanto, há desafios a serem superados, especialmente pela falta de estudos relacionados à sustentabilidade social e à avaliação eficiente dos SMD.

Observa-se, portanto, uma lacuna na literatura em relação ao uso das tecnologias da I4.0 no design, implantação e revisão dos SMD para a GCSS. Essas etapas do ciclo de vida são críticas, e exigem maior investigação para garantir uma implementação eficaz dos SMD na GCSS. Além disso, poucos estudos consideram todos os elos da GCSS, sendo que a maioria se refere à cadeia de suprimentos de forma genérica. Apenas Cavalieri et al. (2022) menciona o SMD abrangendo tanto fornecedores quanto distribuidores e clientes.

6.6 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo era mapear o atual estado de pesquisa do campo de estudo que relaciona SMD, GCSS, e as tecnologias da I4.0. Para atingir tal objetivo, foram utilizados os métodos de mapeamento científico da literatura (técnicas de bibliometria descritiva e análise de redes sociais) e análise de conteúdo.

Os resultados apontam para um campo de pesquisa ainda em sua infância, conforme evidenciado a ausência de autores altamente produtivos. A colaboração emergente entre os pesquisadores sugere um interesse crescente neste domínio desde 2018, indicando uma trajetória ascendente que demanda atenção contínua. A análise das publicações destacou a relevância dos artigos que exploram as interconexões entre I4.0 e GCSS, muitas vezes pioneiros, embora aprofundem menos nos SMD. Esta tendência indica um foco predominante na busca por soluções de desempenho ambiental através das tecnologias da I4.0, com os SMD sendo abordados de maneira superficial.

As descobertas deste estudo têm implicações significativas tanto para a academia quanto para a prática. O estudo destaca lacunas significativas na literatura, especialmente nas fases do ciclo de vida dos SMD, como design, implantação e revisão. Isso sugere a necessidade de pesquisas adicionais nessas áreas para preencher essas lacunas e avançar o conhecimento no campo. A análise também revela uma tendência emergente de colaboração entre pesquisadores, indicando um interesse crescente no campo e a necessidade de colaborações interdisciplinares para abordar questões complexas que envolvem SMD, GCSS e tecnologias da I4.0. Os resultados destacam a importância de estudos que explorem as interconexões entre I4.0 e GCSS, especialmente em relação ao desempenho ambiental. Isso sugere que os acadêmicos devem se esforçar para produzir pesquisas relevantes para a prática e que contribuam para a solução de problemas do mundo real.

A partir da construção de um modelo teórico, a investigação revelou lacunas significativas na literatura, particularmente nas fases do ciclo de vida dos SMD de design, implantação e revisão. Essas etapas, muitas vezes negligenciadas, demandam uma pesquisa mais aprofundada para assegurar uma implementação eficaz dos SMD. Além disso, a falta de consideração dos elos da GCSS e a predominância de estudos genéricos sobre cadeia de suprimentos destacam áreas adicionais para futuras investigações. A falta de pesquisa nas fases de design, implantação e revisão dos SMD destaca a importância de uma abordagem holística para a implementação eficaz dessas tecnologias na prática.

As empresas devem investir em pesquisas e práticas que abordem todas essas fases para garantir resultados bem-sucedidos. Ainda, as organizações devem explorar maneiras de alavancar essas tecnologias de forma integrada para otimizar a eficiência e a eficácia da cadeia de suprimentos. As descobertas destacam a importância de uma abordagem colaborativa entre acadêmicos e profissionais da indústria para abordar as lacunas identificadas na literatura. Nesse sentido, as empresas devem buscar parcerias com instituições acadêmicas para conduzir pesquisas aplicadas que abordem desafios específicos enfrentados na implementação de SMD para a GCSS auxiliados por tecnologias da I4.0.

Dentre as limitações desse estudo incluem-se a amostra limitada de artigos analisados (pesquisas futuras podem expandir a amostra para incluir um conjunto diferente de publicações e conferências relevantes); limitações específicas dos métodos de pesquisa utilizados; e a falta de validação empírica de suas descobertas. Essas implicações, limitações e propostas de pesquisa futura podem orientar tanto os acadêmicos quanto os profissionais na exploração e no avanço do campo de estudo.

7 USO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO PARA GESTÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS: PROPOSTA DE MODELO

7.1 INTRODUÇÃO

A motivação para esta pesquisa surge no contexto da Quarta Revolução Industrial, e em um cenário de crescente conscientização sobre sustentabilidade nos âmbitos acadêmico e empresarial (PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019; NUDURUPATI et al., 2021). Nas últimas décadas, a gestão da cadeia de suprimentos (GCS) vem modificando sua abordagem puramente econômica/financeira ao considerar seu desempenho nas outras duas dimensões da sustentabilidade: a social e a ambiental (DROHOMERETSKI et al., 2015; ELKINGTON, 1997). A gestão da cadeia de suprimentos sustentável (GCSS) é aquela que aplica os princípios da sustentabilidade nas operações da GCS (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019), que pode ser definida como a “gestão das operações, recursos, informações e fundos da cadeia de suprimentos com o intuito de maximizar a lucratividade enquanto minimiza o impacto ambiental e maximiza o bem-estar social” (TATICCHI et al., 2015, p. 6474, tradução do autor). As práticas da GCSS têm por objetivo a melhoria de desempenho em sustentabilidade da cadeia de suprimentos considerando suas três (ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021; GIUNIPERO et al., 2012).

A fim de examinar a efetividade das práticas sustentáveis, a GCSS necessita de uma série de procedimentos destinados a administrar informações de desempenho, criar indicadores de avaliação e definir metas estratégicas, usualmente a partir de um Sistema de Medição de Desempenho (SMD) (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). A literatura científica disponível mostra que para garantir uma avaliação ampla da cadeia de suprimentos, é necessário considerar não apenas os aspectos operacionais, mas também as questões ambientais, sociais e econômicas em toda a cadeia de suprimentos (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018; TUNI; RENTIZELAS; DUFFY, 2018). Isso implica adotar indicadores de desempenho que capturem não apenas eficiência e lucratividade, mas também impactos ambientais, condições de trabalho justas e relações sustentáveis com as comunidades locais (BUBICZ; BARBOSA-PÓVOA; CARVALHO, 2019; TUNI; RENTIZELAS; DUFFY, 2018).

Assim, o SMD deve ser projetado de forma a refletir os objetivos de sustentabilidade da GCSS e permitir uma avaliação completa e equilibrada do desempenho em toda a cadeia de

suprimentos. Os objetivos de sustentabilidade da GCSS devem ser compartilhados por todos os elos da cadeia de suprimentos mensurados para verificar o atingimento dos objetivos (LIS; SUDOLSKA; TOMANEK, 2020; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018).

Os SMD atuais também devem ser compatíveis com as tendências dos negócios, que incluem transparência; descentralização da tomada de decisão; inovação; e responsividade (BOURNE et al., 2018; MELNYK et al., 2014; NUDURUPATI; TEBBOUNE; HARDMAN, 2016, KUMAR et al., 2023). Essas tendências impactam os SMD e seus objetivos estratégicos, exigindo novas medidas; métodos de implantação e de compartilhamento de informações; e formas de uso (NUDURUPATI; GARENGO; BITITCI, 2021). Apesar da evolução da área de estudo sobre SMD, a base teórica ainda é predominantemente fundamentada na pesquisa de controle de sistemas, e negligencia outros possíveis papéis dos SMD em um cenário de ubiquidade digital e de descentralização na tomada de decisão (BOURNE et al., 2018; NUDURUPATI et al., 2021).

A tecnologia desempenha um papel crucial na medição e melhoria do desempenho da cadeia de suprimentos, permitindo uma integração mais eficaz entre os elos da cadeia (AZEVEDO et al., 2021; BAI; SARKIS, 2020; DALENOGARE et al., 2018; IVASCU, 2020). Isso ajuda as empresas a atender às demandas das partes interessadas e a melhorar sua competitividade (BAI; ORZES; SARKIS, 2022). A adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) permitem o desenvolvimento de SMD mais dinâmicos e adaptáveis (CARVALHO et al., 2018; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; NUDURUPATI et al., 2021). Essa nova era de digitalização dos SMD tem o potencial de facilitar a operacionalização de seus processos, e proporcionar feedback em tempo real (YIN; QIN, 2019).

A interseção entre os três temas forma um campo de estudo incipiente e promissor, uma vez que o uso das tecnologias da I4.0 promete auxiliar nos processos dos SMD da GCSS (JABBOUR et al., 2018; AZEVEDO et al., 2021). Existe a necessidade de SMD desenvolvidos especificamente para a GCSS, incorporando de forma equilibrada as três dimensões de sustentabilidade (BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; CAZERI et al., 2017; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018; VEGTER; HILLEGERSBERG; OLTHAAR, 2021). Outros reconhecem a necessidade de pesquisas interdisciplinares no desenvolvimento de SMD flexíveis para corresponder à era digital, que melhor detalhem as relações entre as tecnologias da I4.0 e os SMD (BITITCI et al. 2018; FREDERICO et al., 2019; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; AZEVEDO et al., 2021).

Surge, portanto, uma específica lacuna na literatura, e a oportunidade de novas pesquisas para identificar como as tecnologias da I4.0 podem auxiliar SMD nas práticas da GCSS (FREDERICO et al., 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021). Evidenciado por tais autores, identifica-se um problema relacionado à falta de um modelo que relacione o uso das tecnologias da I4.0, os processos dos SMD, e as práticas da GCSS (JABBOUR et al., 2018; AZEVEDO et al., 2021). Assim, este capítulo é estruturado sob um objetivo geral de **propor um modelo de SMD para a GCSS auxiliado pelas tecnologias da I4.0**. O modelo desenvolve-se a partir de três objetivos específicos:

- Classificar o uso das **tecnologias da I4.0** em relação aos **processos dos SMD**;
- Classificar as relações entre os **processos dos SMD** e as **práticas da GCSS**;
- Desenvolver e validar o modelo.

Para esse fim, o método de pesquisa aplicado combina coleta de dados por pesquisas de levantamento com especialistas e análise de dados por métodos de tomada de decisão multicritério (TDMC). O modelo proposto é discutido perante uma estruturada revisão da literatura sobre o uso das tecnologias da I4.0 em processos dos SMD, e seu relacionamento com a GCSS. A validação do modelo é realizada perante um subgrupo de especialistas, em entrevistas semiestruturadas.

As demais seções deste Capítulo são organizadas da seguinte maneira: A Seção 2 consiste na revisão da literatura sobre as relações entre os temas principais da pesquisa, discutindo sobre o uso das tecnologias da I4.0 nos SMD, na GCS e na GCSS; A Seção 3 descreve e justifica o método de pesquisa utilizado; A Seção 4 apresenta os resultados da coleta e análise de dados; A Seção 5 apresenta a proposta de modelo e sua validação; A Seção 6 apresenta a discussão dos resultados, e finalmente, a Seção 7 traz as conclusões do Capítulo. Após a compilação das referências citadas são apresentados nos Apêndices A, B, C e D os instrumentos de pesquisa utilizados na coleta de dados empíricos. Os Apêndices E, F, e G apresentam os algoritmos matemáticos dos métodos de TDMC. Os Apêndices H e I apresentam os questionários utilizados para validação do modelo, utilizado como referência em entrevistas semiestruturadas.

7.2 REVISÃO DA LITERATURA

7.2.1 Práticas da GCSS

A GCSS surge como a GCS que considera a abordagem tridimensional da sustentabilidade, amplamente reconhecida como *triple bottom line* (TBL), termo que vincula os modelos de negócios às exigências econômicas, ambientais e sociais (ELKINGTON, 1997; SANCHEZ-FLORES et al., 2020). Seu objetivo é aumentar seu desempenho considerando as três dimensões, adotando práticas sustentáveis para alcançar vantagens competitivas e ainda preservar os recursos para gerações futuras (GAMBOA-BERNAL; ORJUELA-CASTRO; MORENO-MANTILLA, 2020; ALLEN; ZHU; SARKIS, 2021). As práticas da GCSS são definidas como aquelas que “reconhecem a necessidade de considerar os valores ambientais e sociais, além dos econômicos, e que ajudarão a organização a atingir seus objetivos gerais de maneira lucrativa e sustentável” (GIUNIPERO et al., 2012). Apresenta-se no Quadro 22 uma compilação das 11 práticas da GCSS e suas respectivas definições, identificadas por revisão terciária da literatura (SANTOS; LIZARELLI, 2023b).

Quadro 22 – Práticas da GCSS

Prática da GCSS	Revisões	Definição
Design de produtos e processos sustentáveis	Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Projetar produtos e processos visando a minimização do impacto adverso sobre o meio ambiente, considerando as necessidades dos clientes e visando maximizar o lucro para cadeia de suprimentos
Manufatura sustentável	Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Manufatura que prioriza produtividade e eficiência ao tempo que minimiza a poluição ambiental e desperdícios de matéria e energia
Gestão sustentável de logística e armazenamento	Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Buscar benefícios sustentáveis por integração logística e pela gestão de armazenamento e inventário, guiadas por cooperação, otimização e consciência sustentável
Recuperação de produtos	Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Garantir logística reversa de materiais para reciclagem, reutilização ou acondicionamento
Gestão sustentável da qualidade	Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Schilling e Seuring (2023)	Orientar a gestão da qualidade para corresponder às estratégias sustentáveis da cadeia de suprimentos, às expectativas das partes interessadas, e às regulações governamentais, utilizando-se de uma arquitetura de colaboração para fins de padronização, certificação e gestão do desempenho
Gestão sustentável de fornecedores	Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Avaliar, selecionar e colaborar com os fornecedores na gestão de seus produtos, equipamentos, capital humano e sistemas de gestão, buscando construir relações de longo prazo para garantir sustentabilidade nas compras
Gestão sustentável de distribuidores e clientes	Baliga et al. (2019); Arif et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Choudhary e Sangwan (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Selecionar e desenvolver distribuidores, buscando colaboração junto à consumidores para melhorar produtos e processos, regulamentação, promover a marca, aumentar satisfação e alcançar resultados em sustentabilidade
Gestão ambiental	Balon et al. (2020); Pimenta et al. (2021); Agrawal et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Avaliar e reduzir o impacto adverso das atividades industriais no meio ambiente, preservando a natureza pela gestão sustentável da coleta/extração de matérias-primas e na destinação de resíduos
Responsabilidade social corporativa	Baliga et al. (2019); Pimenta et al. (2021); Shekarian et al. (2022); Yadav et al. (2023)	Exercer conduta ética quanto à questões de impacto social, objetivando bem-estar de colaboradores e da sociedade ao considerar os direitos humanos, seja em aspectos empregatícios ou de mercado
Gestão do ambiente operacional	Ahmad et al. (2017); Baliga et al. (2019); Duque Uribe et al. (2019); Arif et al. (2020); Balon (2020); Pimenta et al. (2021); Choudhary e Sangwan (2022); Shekarian et al. (2022); Marculetiu et al. (2023); Schilling e Seuring (2023)	Promover comprometimento e dedicação para garantir saúde, segurança e sustentabilidade no ambiente operacional, gerenciando riscos e capacitando os colaboradores
Gestão sustentável da informação e tecnologia	Ahmad et al. (2017); Duque Uribe et al. (2019); Shekarian et al. (2022); Schilling e Seuring (2023)	Criar valor a partir da inovação e gestão da informação e tecnologia, buscando resultados em sustentabilidade pela integração da GCSS

Fonte: Adaptado de Santos e Lizarelli (2023b)

7.2.2 Processos dos SMD para GCSS

A medição de desempenho na GCSS é um tópico que ganha maior atenção apenas a partir de 2005, principalmente visando o controle do desempenho ambiental (BESKE-JANSSEN; JOHNSON; SCHALTEGGER, 2015; TATICCHI et al., 2015; MISHRA et al., 2017). Originalmente, um SMD é definido como o conjunto de processos para desenvolver medidas de desempenho, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho (BITITCI et al., 2018; NEELY et al., 1995). Cada vez mais, reconhece-se que o desenvolvimento de SMD que considerem a sustentabilidade da cadeia de suprimentos a longo prazo é necessário para lidar melhor com as pressões externas que enfrentam (HERVANI; HELMS; SARKIS, 2005; TIAN; SARKIS, 2020).

De acordo com a revisão terciária da literatura e análise de conteúdo de Santos, Lizarelli e Martins (2024a), os processos dos SMD na GCS são explícitos no Quadro 23. Esses processos são as séries de ações necessárias para que o SMD complete seu ciclo de vida de quatro etapas: design, implantação, uso e revisão (BOURNE et al., 2000; HELDEN et al., 2012; GUTIERREZ et al., 2015; MATOS et al., 2019). Dentro de um ciclo de vida de quatro etapas: design, implantação, uso e revisão.

Quadro 23 – Processos dos SMD na GCS

Etapa do Ciclo de Vida	Processos dos SMD na GCS	Autores	Definição
Design	Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Desenvolver e escolher medidas de desempenho que estejam alinhadas à estratégia da GCS e integradas ao SMD
	Modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e os objetivos da GCS	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Adaptar a infraestrutura de suporte conforme as especificações e metas da GCS
Implantação	Implantação e integração da infraestrutura de suporte do SMD na GCS	Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020)	Garantir uma infraestrutura de suporte que atenda ao SMD na GCS
	Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Treinar e capacitar as pessoas para colaborar efetivamente com o desenvolvimento contínuo do SMD
Uso	Coleta de dados em tempo real	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Realizar a coleta de dados de forma contínua e em tempo real
	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Analisar os dados em tempo real e realizar previsões para antecipar o desempenho futuro
	Interpretação e avaliação do desempenho	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Interpretar e avaliar o desempenho com base nas análises realizadas
	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimento e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Santos & Martins (2021)	Assegurar uma comunicação fluida e em tempo real de dados e informações entre os diversos elos da cadeia de suprimentos e as partes interessadas
	Tomada de decisão alinhada à GCS e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Tomar decisões alinhadas à estratégia da GCS e às expectativas das partes interessadas
	Avaliação da eficiência e eficácia do SMD	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Elgazzar et al. (2019); Matos et al. (2019)	Avaliar a eficiência e eficácia do SMD para garantir que atenda aos objetivos estabelecidos
Revisão	Revisão das especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, orientada à GCS e às partes interessadas	Bourne et al. (2005); Franco Santos et al. (2007); Balfaqih et al. (2016); Glas et al. (2018); Elgazzar et al. (2019); Kamble & Gunasekaran (2019); Matos et al. (2019); Kamble et al. (2020); Santos & Martins (2021)	Revisar regularmente as especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, mantendo o alinhamento com a GCS e as necessidades das partes interessadas

Fonte: Adaptado de Santos, Lizarelli e Martins (2024a)

7.2.3 Tecnologias para SMD

Em um contexto de quarta revolução na fabricação industrial, comumente conhecida pelo termo “Indústria 4.0”, novas tecnologias baseadas na conectividade, avanços em gestão de dados surgem como ferramentas importantes para ajudar os gestores a tomar decisões em cenários complexos (BUBICZ et al., 2019). Como nem todas as tecnologias da I4.0 possuem igual importância na medição de desempenho (MAHDIRAJI et al., 2023; SANTOS; LIZARELLI, 2023a) o Quadro 24 destaca uma compilação das tecnologias da I4.0 mais frequentemente associadas aos SMD, identificadas por revisão sistemática da literatura e análise de conteúdo (SANTOS; LIZARELLI, 2023a).

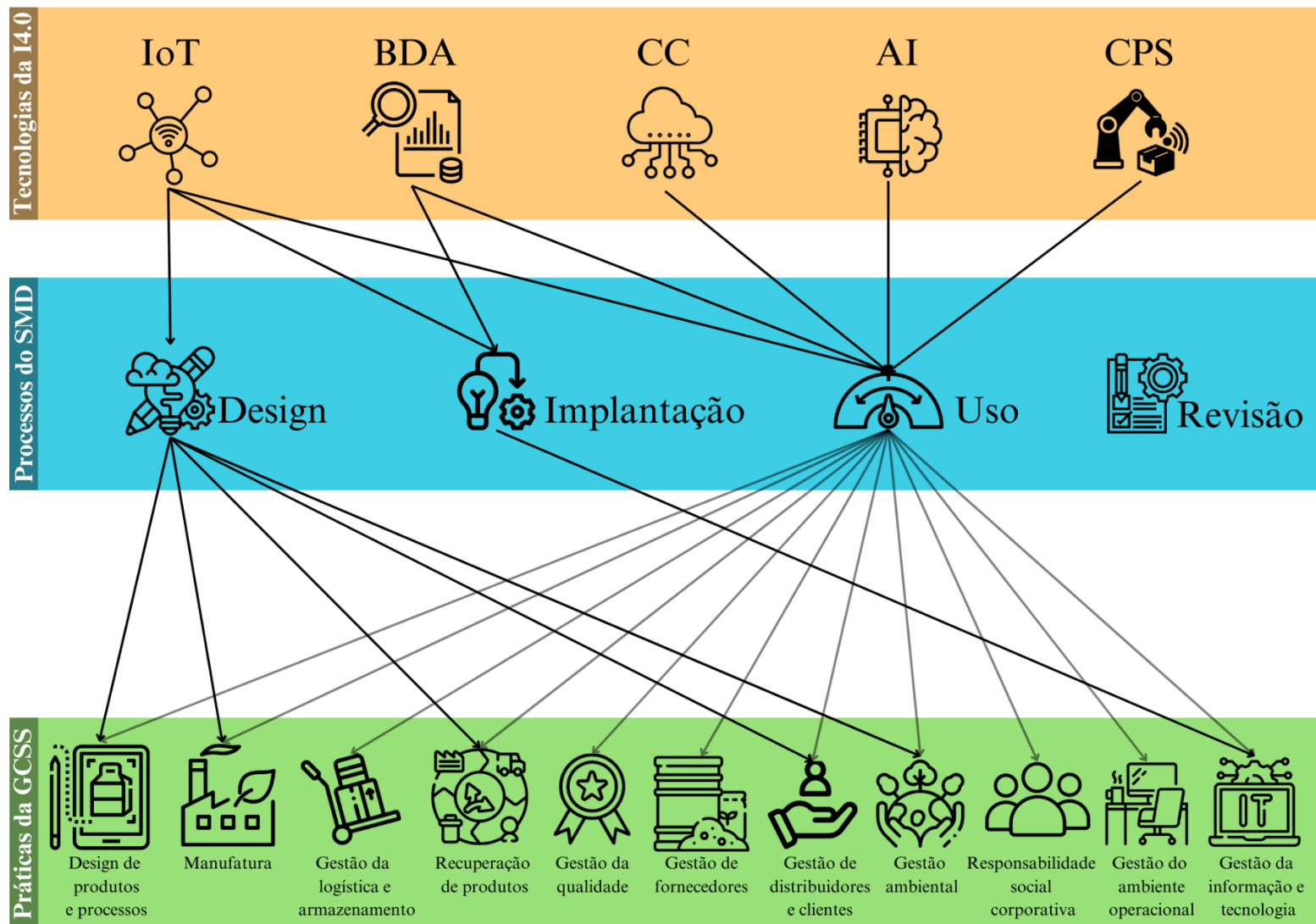
Quadro 24 – Tecnologias da I4.0 frequentemente associadas aos SMD

Tecnologia	Referências	Definição
Internet das coisas	Ajmera; Jain (2019); Almakayeel (2023); Alsuwaidan (2020); Assandre; Martins (2023); Azevedo et al. (2021); Bamakan et al. (2021); Berrah et al. (2021); Bienhaus; Haddud (2018); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Kambur; Yildirim (2022); Klovienne; Uosyte (2019); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Llinas; Abad (2019); Lopes; Martins (2021); Mahdiraji et al. (2022); Obermayer et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Urban; Zawadski (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Interconexão de dispositivos sensores e atuadores fornecendo a habilidade de compartilhar informação entre plataformas por uma estrutura unificada
Big data analytics	Ajmera; Jain (2019); Almakayeel (2023); Alsuwaidan (2020); Assandre; Martins (2023); Azevedo et al. (2021); Bamakan et al. (2021); Berrah et al. (2021); Bienhaus; Haddud (2018); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Klovienne; Uosyte (2019); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Llinas; Abad (2019); Lopes; Martins (2021); Mahdiraji et al. (2022); Obermayer et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Urban; Zawadski (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Novas tecnologias projetadas para lidar com desafios de tamanho, variedade e velocidade de dado
Computação em nuvem	Ajmera; Jain (2019); Almakayeel (2023); Assandre; Martins (2023); Azevedo et al. (2021); Berrah et al. (2021); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Kambur; Yildirim (2022); Klovienne; Uosyte (2019); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Mahdiraji et al. (2022); Lopes; Martins (2021); Obermayer et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Conjunto de computadores interconectados e virtualizados que providenciam e apresentam de forma dinâmica um recurso computacional mais unificado, baseado em acordos estabelecidos pela negociação entre provedores de serviços e consumidores
Inteligência artificial	Alsuwaidan (2020); Assandre; Martins (2023); Bamakan et al. (2021); Berrah et al. (2021); Bienhaus; Haddud (2018); Clausen et al. (2020); Frederico et al. (2020); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Llinas; Abad (2019); Mahdiraji et al. (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022)	A tecnologia que aproveita computadores e máquinas para imitar as capacidades de resolução de problemas e a tomada de decisão da mente humana
Sistemas ciberfísicos	Almakayeel (2023); Alsuwaidan (2020); Azevedo et al. (2021); Berrah et al. (2021); Kambur; Yildirim (2022); Korsen; Ingvaldsen (2022); Kumar et al. (2022); Lopes; Martins (2021); Mahdiraji et al. (2022); Parhi et al. (2021); Robert et al. (2020); Silva Júnior et al. (2022); Souifi et al. (2022); Viet; Kravets (2022); Vimal et al. (2022); Yin; Qin (2019)	Sistemas que integram processos físicos, recursos computacionais e capacidades de comunicação

Fonte: Adaptado de Santos e Lizarelli (2023a).

Com base nas práticas da GCSS, no ciclo de vida dos SMD, e nas tecnologias da I4.0, apresenta-se na Figura 20 um modelo teórico baseado em evidências da literatura (SANTOS; LIZARELLI; MARTINS, 2024b). No modelo proposto, a literatura ressalta predominantemente a associação das tecnologias da I4.0 à fase de uso dos SMD. Esta etapa fundamental evidencia o uso das tecnologias nos processos de coleta, análise, interpretação de dados e uso das informações na tomada de decisões. As tecnologias proporcionam a possibilidade de análise preditiva e otimização em desempenho em tempo real, bem como insights valiosos para a tomada de decisões. Assim, a integração das tecnologias se mostra essencial para maximizar a eficácia e a eficiência operacional no contexto da GCSS. Ainda, existe a identificação de potencial de IoT para design e IoT e BDA para implantação. De forma similar, a etapa de uso se destaca em relação às práticas da GCSS, seguida da etapa de design, com menor reconhecimento. A etapa de implantação também associa-se à prática de gestão sustentável da informação e tecnologia.

Figura 20 – Modelo Teórico



Fonte: O Autor (2024)

7.3 MÉTODO DE PESQUISA

Para atingir o objetivo geral foi utilizado um método que combina coleta de dados por **pesquisas de levantamento** com especialistas e análise de dados por **métodos de tomada de decisão multicritério** (TDMC) (REN; LUO, 2018). A pesquisa de levantamento é “um método de coleta de dados dos entrevistados através do uso de questionários padronizados ou entrevistas” (BHATTACHERJEE, 2012, p. 75, tradução do autor). Vantagens desse método incluem a possibilidade de medir grande variedade de dados não observáveis; a coleta de dados remota; e a possibilidade de análises subamostrais (BHATTACHERJEE, 2012).

A amostragem por conveniência se mostra a mais apropriada para esse estudo, e é utilizada devido ao baixo número de especialistas com a expertise exigida pelos questionários, sendo priorizada a qualidade do processo de avaliação sobre a quantidade de respostas (SUEN; HUANG; LEE, 2014). Para os métodos de TDMC escolhidos para a análise de dados, pesquisas similares e recentes comumente utilizam grupos de 4 a 15 especialistas (ROMSTAMZADEH et al., 2015; MALVIYA; KANT, 2018; ABDULLAH et al., 2019; BAHADORI et al., 2020; KAUR; SINGH; SINGH, 2021). Estudos sobre a utilização da opinião de especialistas mostram que o erro médio do grupo baixa rapidamente a partir de 8 a 12 respondentes, com pouca melhoria obtida ao aumentar o número de respondentes (FUSFELD; FOSTER, 1971; KLEE, 1972). Apesar de uma grande quantidade de respondentes não ser necessária para análise com métodos de TDMC, buscou-se extrapolar esses números (FUSFELD; FOSTER, 1971; KLEE, 1972).

Para a coleta de dados foram realizados dois levantamentos distintos, condizentes com os objetivos específicos. Os instrumentos de pesquisa utilizados foram dois questionários diferentes (Q1 e Q2), elaborados no Google Forms ®. O questionário Q1 tem o propósito de compilar a avaliação de um grupo de especialistas para “Classificar o **uso das tecnologias da I4.0** em relação aos **processos dos SMD**”. Já o questionário Q2 visa a coleta de dados para “Classificar os **processos dos SMD** em relação às **práticas da GCSS**” e “Classificar as **práticas da GCSS** em relação aos **processos dos SMD**”. A elaboração dos questionários levou em conta recomendações sobre design e tamanho de questionários para pesquisas de levantamento (KROSNICK; PRESSER, 2010; CERNAT, 2022). Os questionários Q1 e Q2 estão disponibilizados nos Apêndices A e B.

A partir da coleta de dados, foram utilizados dois métodos de TDMC para análise de dados: o ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR), para análise dos dados coletados pelo questionário Q1, e o Preference Ranking Organization METHod for

Enrichment Evaluation (PROMETHEE), para análise dos dados coletados pelo questionário Q2. Para superar a imprecisão do julgamento humano sobre as preferências, os métodos de TDMC foram associados à teoria de conjuntos *Fuzzy* (GELDERMANN; SPENGLER; RENTZ, 2000; WANG; CHANG, 2005; WU; LEE, 2007).

A partir do confronto entre as evidências bibliográficas e empíricas foi realizada a validação do modelo perante um subgrupo de especialistas, em entrevistas semiestruturadas. O protocolo utilizado para essas etapas é descrito nas próximas subseções.

7.3.1 Coleta de Dados

Para contextualizar o respondente, os questionários, apresentam as listagens e definições dos processos dos SMD na GCS, principais tecnologias da I4.0 usadas em SMD, e práticas da GCSS (SANTOS; LIZARELLI, 2024b). Em sequência, os questionários apresentam uma seção de caracterização do respondente e sua experiência profissional, da empresa em que trabalha e do seu contato com tecnologias da I4.0. Dados descritivos obtidos nesta etapa da coleta de dados são apresentados em duas partes, caracterizando, para cada grupo, os respondentes e suas empresas (GODINHO FILHO; GANGA; GUNASEKARAN, 2016). Para todos os efeitos, seus nomes e os nomes de suas empresas foram retidos.

Quanto a coleta de dados para uso na elaboração do modelo, ambos os questionários oferecem aos respondentes opções na forma de variáveis linguísticas, para que possam expressar sua opinião sobre as relações estudadas. A Tabela 4 explicita sobre a relação entre as variáveis linguísticas utilizadas nos questionários e os conjuntos *Fuzzy* correspondentes. Para o questionário Q1 foram utilizadas variáveis linguísticas relacionadas à avaliação da utilidade das tecnologias da I4.0 no auxílio dos processos dos SMD (HADI-VENCHEH; MOHAMADGHASEMI, 2014; PHAM et al., 2017). No questionário Q2, as variáveis linguísticas traduzem, sob a avaliação dos especialistas, a importância dos processos dos SMD nas práticas da GCSS (WANG; CHANG, 2005; HADI-VENCHEH; MOHAMADGHASEMI, 2014; FIROUZABADI; MEHRIZI, 2015; PERVEZ et al., 2020). A escala *Fuzzy* utilizada é do tipo triangular, com incrementos no valor de 0,25 (KAVILAL et al., 2017; MOHAMMADFAM et al., 2022).

Tabela 4 - Variáveis linguísticas utilizadas nos questionários e escala *Fuzzy*

Variável Linguística		Escala <i>Fuzzy</i>
Q1	Q2	
Muito Baixa	Irrelevante	(0; 0; 0,25)
Baixa	Pouco Importante	(0; 0,25; 0,5)
Mpédia	Importância Média	(0,25; 0,5; 0,75)
Alta	Muito Importante	(0,5; 0,75; 1,0)
Muito Alta	Essencial	(0,75; 1,0; 1,0)

Fonte: o Autor (2024)

Um teste piloto foi realizado para assegurar a eficiência e eficácia do método de coleta de dados, avaliando diferentes aspectos sobre a qualidade dos questionários (KROSNICK; PRESSER, 2010; ELKMASH et al., 2022). Essa medida foi realizada visando assegurar a viabilidade do método de coleta de dados, identificando eventuais inconsistências e equívocos na sua formulação (DE OLIVEIRA SILVA et al., 2019). O teste foi realizado enviando ambos os questionários para três especialistas acadêmicos, professores universitários com mais de cinco anos de experiência em pesquisa e publicação na área de SMD. Foi solicitado aos especialistas que preenchessem uma Ficha de Avaliação dos questionários, disponibilizada no Apêndice C, para facilitar a identificação e resolução de problemas. Segundo a opinião dos acadêmicos, os questionários se mostraram pertinentes ao objetivo. O teste piloto permitiu detectar e corrigir pequenos problemas de clareza, gramática e semântica. Também se adicionou a possibilidade aos respondentes de inserir comentários. Nessa etapa também foi considerado a possibilidade de que respondentes indicassem não conhecimento de tecnologias específicas e suas relações com os processos dos SMD, e definiu-se que estas questões específicas seriam desconsideradas (KROSNICK; PRESSER, 2010).

Após os ajustes, os questionários Q1 e Q2 foram revisados e enviados a dois grupos de especialistas com língua nativa português para garantir atribuição das variáveis linguísticas (Grupo 1 e Grupo 2, respectivamente), utilizando o LinkedIn e e-mails como meios de comunicação (LOPES, 2023).

A seleção dos respondentes incluiu critérios como conhecimento específico em GCS, experiência profissional, língua nativa e inclinação à participação (MOHAMMADEFAM et al., 2022). Os especialistas foram selecionados pelos seus perfis de conhecimento e/ou experiência em GCSS e medição de desempenho. Também foram escolhidos respondentes cujas empresas se caracterizavam a diversos setores da economia, e aos diferentes elos da cadeia de

suprimentos (FREDERICO et al. 2021; LOPES; MARTINS, 2022). Uma vez que a inclinação à participação também é importante (KROSNICK; PRESSER, 2010; MOHAMMADFAM et al., 2022), para motivar os respondentes, uma quantia de 5,00 R\$ foi doada a uma instituição de caridade para cada questionário respondido. O comprovante da doação é apresentado no Apêndice D.

7.3.2 Análise de Dados

As especificações dos métodos VIKOR e PROMETHEE utilizados para análise de dados, são exibidas nas próximas subseções. Os Apêndices E e F apresentam, respectivamente, os algoritmos utilizados. Os dados coletados foram analisados sem a aplicação de técnicas de limpeza de dados, para não enviesar a avaliação (REUNING; PLUTZER, 2020).

Uma vez que os conjuntos *Fuzzy* não são adequados para operações matriciais, é comum utilizar-se de um algoritmo de defuzzificação junto à aplicação dos métodos de TDMC. A abordagem de desfuzzificação escolhida foi a convencional, utilizada anteriormente aos cálculos dos métodos de TDMC (WU et al., 2009). O método utilizado neste capítulo foi o CFCS (*Converting Fuzzy Data into Crisp Scores*), reconhecido como um algoritmo que possui vantagens estatísticas sobre outros (OPRICOVIC; TZENG, 2003; UYGUN; KAÇAMAK; KAHRAMAN, 2015), e o algoritmo é apresentado no Apêndice G.

7.3.2.1 VIKOR

O método VIKOR objetiva a classificação e seleção de uma solução, composta por um conjunto de alternativas (OPRICOVIC; TZENG, 2004). Sua fundamentação considera a distância de cada alternativa entre a melhor e a pior alternativa possível, sendo uma solução efetiva e simples para situações complexas (MARDANI et al., 2016). O Apêndice E apresenta o algoritmo do método VIKOR. É um método propício para selecionar alternativas em forma de conjuntos, sendo um dos métodos de TDMC mais utilizados na literatura (KAHRAMAN et al., 2007; KUO et al., 2012; OPRICOVIC; TZENG, 2004). Neste estudo, sua escolha se justifica pela possibilidade de agrupar as alternativas em classes (ELTARABISHI et al., 2020). O VIKOR se mostra um método mais sensível e constante, principalmente para cenários de pesos iguais e menores números de alternativas (SALABUN et al., 2020). Neste trabalho, o método VIKOR foi utilizado atingir o objetivo específico “**Classificar o uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD**”.

7.3.2.2 PROMETHEE

PROMETHEE é um nome comum para um grupo de métodos de otimização multicritério, existente em seis versões consecutivas (PROMETEE I — PROMETEE VI) (RAMIK, 2020). De particular interesse para este trabalho, o PROMETHEE II (superação completa) é um método que possui várias vantagens em precisão sobre outros métodos de TDMC (KALOGERAS et al., 2005; SALABUN et al., 2020). Ainda, o método se destaca entre outros similares quando o número de alternativas é maior (SALABUN et al., 2020), assim, fornecendo uma estrutura racional para problemas de decisão e/ou superação, o método permite identificar conflitos e sinergias entre as alternativas (BRANS, 1985). O Apêndice F apresenta o algoritmo do método PROMETHEE II. Neste trabalho, o método PROMETHEE foi utilizado atingir o objetivo específico “**Classificar as relações entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS**”.

7.3.3. Desenvolvimento do Modelo e Validação

Para atingir o objetivo específico de “Desenvolver e validar o modelo” e, assim, o objetivo geral da pesquisa de “**Propor um modelo de SMD para a GCSS auxiliado pelas tecnologias da I4.0**” foram consideradas as análises resultantes dos dois métodos de TDMC, segundo três critérios, definidos com o intuito de considerar todas as relações mais importantes e evidenciar lacunas:

1. Independente de classificação, são representados no modelo **todas** as tecnologias da I4.0; processos dos SMD (agrupados segundo o ciclo de vida); e práticas da GCSS;
2. São representadas por setas as relações mais significativas, definidas pelos **50% maiores valores** de a_{ij} ;
3. O **design das setas** é correspondente a classificação dos construtos, sendo atribuído linha pontilhada para **tecnologias da I4.0 e práticas da GCSS** de classificação mais baixa.

Em uma segunda etapa, para garantir a validade e generalização da pesquisa, o modelo empírico foi comparado ao modelo teórico (SANTOS; LIZARELLI; MARTINS, 2024b). Essa abordagem de pesquisa bibliográfica-empírica é apoiada por autores da área de SMD, que incentivam a pesquisa que pondera a produção científica acadêmica junto à opinião de gestores (MISHRA et al. 2017). A área de gestão de operações também apoia a triangulação de métodos na pesquisa (CHOI; CHENG; ZHAO, 2016).

A validação de um modelo único foi realizada a partir de entrevistas semiestruturadas com dois subgrupos de especialistas respondentes, escolhidos entre os respondentes de maior experiência de ambos os questionários. O intuito foi esclarecer as divergências entre o modelo teórico e os resultados empíricos. Instrumentos de pesquisa apropriados foram elaborados, e são apresentados no Apêndices H e I.

7.4 RESULTADOS

7.4.1 Coleta de Dados

Foram coletadas 29 avaliações pelo questionário Q1 (Grupo 1) e 28 avaliações pelo questionário Q2 (Grupo 2). Assim, a quantidade de avaliações obtidas extrapola a necessária para este tipo de estudo (FUSFELD; FOSTER, 1971; KLEE, 1972). O comprovante de doação à instituição de caridade é disponibilizado no Apêndice D.

7.4.1.1 Dados Descritivos do Grupo 1

A Tabela 5 resume os dados descritivos dos 29 respondentes do Grupo 1. Em sua maioria, os respondentes são analistas (41%) ou gerentes (28%) de cargos relacionados à GCS. A maior parte dos respondentes trabalha em cargos associados à GCS há mais de 3 anos (69%). Na empresa atual, a experiência dos respondentes é geralmente de 1 a 6 anos (69%).

Quanto às empresas dos 29 respondentes do Grupo 1, os dados são descritos na Tabela 6. Os setores mais comuns na amostra são o automotivo (34%) e o alimentício (17%). Quanto ao tamanho da empresa em que o respondente trabalha, a maioria se caracteriza como grande empresa (83%). A maioria dos respondentes classificou a empresa em mais de um elo da cadeia de suprimentos, destacando-se a manufatura (59%).

Tabela 5 – Dados descritivos de respondentes (Grupo 1)

Caracterização dos Respondentes	Total	Porcentagem (%)
Cargo		
Analistas	12	41%
Gerentes	8	28%
Coordenadores	3	10%
Consultores	2	7%
Especialistas	2	7%
Supervisores	2	7%
Tempo de trabalho associado à GCS		
Entre 1 a 3 anos	9	31%
Entre 3 a 6 anos	8	28%
Entre 6 a 12 anos	9	31%
Mais que 12 anos	3	10%
Tempo de trabalho na empresa		
Entre 1 a 3 anos	9	31%
Entre 3 a 6 anos	11	38%
Entre 6 a 12 anos	5	17%
Mais que 12 anos	4	14%

Fonte: o Autor (2024)

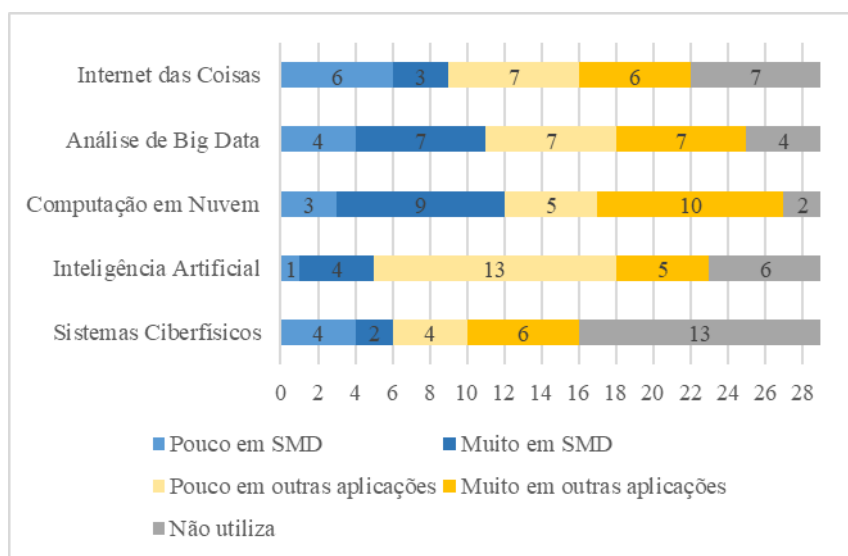
Tabela 6 – Dados descritivos das empresas (Grupo 1)

Caracterização das Empresas	Total	Porcentagem (%)
Sector e principais produtos		
Automotivo (Veículos; Peças e acessórios)	10	34%
Alimentício (Chocolates; Itens de cesta básica; Molhos e condimentos; Ração animal)	5	17%
Serviços (Sistemas de gestão; Consultoria; Metalurgia; Transporte e Armazenagem)	4	14%
Beleza e Cuidados Pessoais (Cosméticos; Perfumes; Fraldas)	3	10%
Bens de consumo (Calçados; Outros)	2	7%
Energético (Serviços de perfuração; Gases liquefeitos)	2	7%
Saúde (Implantes dentários; Medicamentos)	1	3%
Construção (Cimento)	1	3%
Químico (Fitas adesivas)	1	3%
Tamanho da empresa		
Microempresa (até 19 empregados)	2	7%
Empresa de pequeno porte (20 - 99 empregados)	1	3%
Empresa de médio porte (100 - 499 empregados)	2	7%
Grande empresa (acima de 500 empregados)	24	83%
Elo da cadeia de suprimentos*		
Fornecedor	14	41%
Manufatura	20	59%
Distribuidor/Atacado	12	35%
Varejo	9	26%

Fonte: o Autor (2024)

Quanto à utilização das tecnologias da I4.0 nas empresas do Grupo 1 (Figura 21), os dados coletados mostram a computação em nuvem se destaca, inclusive em SMD. BDA e IoT também se destacam na aplicação em SMD. CPS possui menor frequência que as outras tecnologias, e AI a menor aplicação em SMD.

Figura 21 – Utilização das tecnologias da I4.0 nas empresas (Grupo 1)



Fonte: o Autor (2024)

7.4.1.2 Dados Descritivos do Grupo 2

A Tabela 7 resume os dados descritivos dos 28 respondentes do Grupo 2. De forma similar, em sua maioria, os respondentes são analistas (39%) ou gerentes (25%) de cargos relacionados à GCS. A maior parte dos respondentes trabalha em cargos associados à GCS entre 3 e 12 anos (66%). Nestas empresas, em particular, a experiência dos respondentes é geralmente de 1 a 6 anos (64%).

Quanto às empresas dos 28 respondentes do Grupo 2, os dados são descritos na Tabela 8. Os setores mais comuns são o automotivo (32%) e o alimentício (18%). Quanto ao tamanho, a maioria das empresas em que os respondentes trabalham, se caracteriza como grande empresa (82%). A maioria das empresas se classifica com mais de um elo da cadeia de suprimentos, destacando-se a manufatura (64%).

Tabela 7 – Dados descritivos de respondentes (Grupo 2)

Caracterizaçãodos Respondentes	Total	Porcentagem (%)
Cargo		
Analistas	11	39%
Gerentes	7	25%
Coordenadores	4	14%
Consultores	1	4%
Especialistas	2	7%
Supervisores	3	11%
Tempo de trabalho associado à GCS		
Entre 1 a 3 anos	8	29%
Entre 3 a 6 anos	7	25%
Entre 6 a 12 anos	10	36%
Mais que 12 anos	3	11%
Tempo de trabalho na empresa		
Entre 1 a 3 anos	9	32%
Entre 3 a 6 anos	9	32%
Entre 6 a 12 anos	7	25%
Mais que 12 anos	3	11%

Fonte: o Autor (2024)

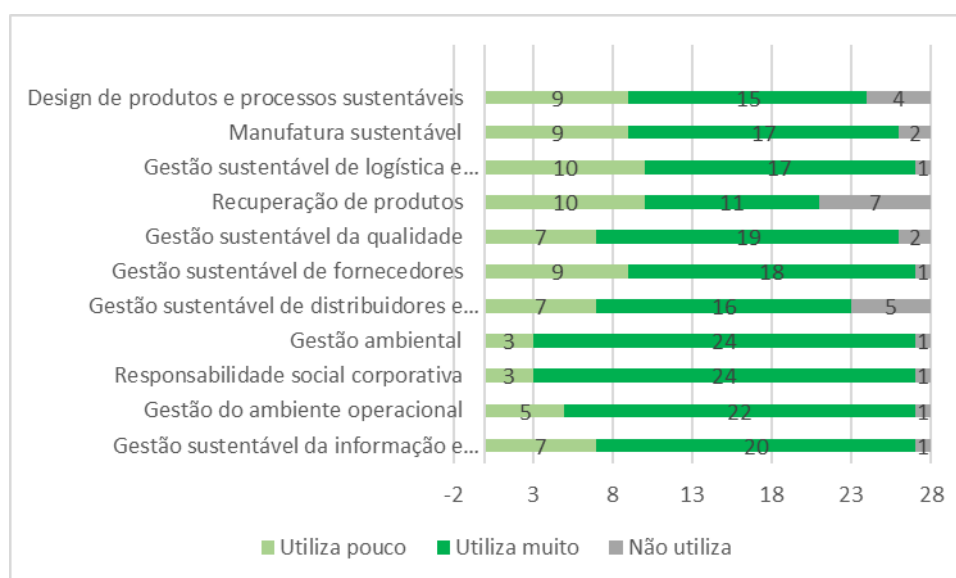
Tabela 8 – Dados descritivos das empresas (Grupo 2)

Caracterizaçãodas Empresas	Total	Porcentagem (%)
Setor e principais produtos		
Automotivo (Veículos; Peças e acessórios)	9	32%
Alimentício (Aperitivos; Artigos de cesta básica; Chocolates; Temperos e condimentos)	5	18%
Serviços (Sistemas de gestão; Consultoria; Metalurgia; Transporte e Armazenagem)	4	14%
Beleza e Cuidados Pessoais (Cosméticos; Perfumes; Lava roupas e amaciante)	3	11%
Químico (Fitas adesivas; Outros)	2	7%
Energético (Serviços de perfuração; Gases liquefeitos)	2	7%
Construção (Cimento; Locação de equipamentos)	1	4%
Saúde (Implantes dentários; Instrumentação hospitalar)	1	4%
Bens de consumo (Variados)	1	4%
Tamanho da empresa		
Microempresa (até 19 empregados)	2	7%
Empresa de pequeno porte (20 - 99 empregados)	1	4%
Empresa de médio porte (100 - 499 empregados)	2	7%
Grande empresa (acima de 500 empregados)	23	82%
Elo da cadeia de suprimentos*		
Fornecedor	11	39%
Manufatura	18	64%
Distribuidor/Atacado	10	36%
Varejo	7	25%

Fonte: o Autor (2024)

Quanto à adoção das práticas da GCSS nas empresas do Grupo 2, os respondentes apontaram quais práticas estão presentes nos elos em que as empresas atuam (Figura 25). As práticas de Gestão Sustentável da Logística e Armazenamento, Gestão sustentável de fornecedores, Gestão ambiental, Responsabilidade social corporativa, Gestão do ambiente operacional, e Gestão sustentável da informação e tecnologia se destacam como mais frequentes. Estas últimas quatro, são caracterizadas como de alta utilização pelos respondentes.

Figura 22 – Adoção das práticas da GCSS nas empresas (Grupo 2)



Fonte: o Autor (2024)

7.4.2 Análise de Dados

Primeiramente, os dados coletados como variáveis linguísticas foram desfuzificados, pelo método CFCS apresentado no Apêndice G (OPRICOVIC; TZENG, 2003; WU et al., 2009). As avaliações no formato *crisp* foram então compiladas nas matrizes da média das avaliações A , como indicado na etapa de ambos os métodos de TDMC (Apêndices E e F). Para “Classificar as **práticas da GCSS** em relação aos **processos dos SMD**”, foi utilizada a matriz transposta A^T . Apenas três respondentes do Grupo 1 indicaram não conhecimento de tecnologias específicas e suas relações com os processos SMD, estas questões específicas foram desconsideradas para estes respondentes (KROSNICK; PRESSER, 2010).

7.4.2.1 VIKOR

A partir da matriz *A* original, resultante da média das avaliações obtidas a partir do Grupo 1, foi possível avaliar as **Tecnologias da I4.0 mais úteis no auxílio de SMD**. A Tabela 9 exibe os valores a_{ij} (com destaque as relações com valor superior a mediana, em negrito) que relacionam o uso das tecnologias aos processos, os respectivos parâmetros *S*, *R* e *Q* do método VIKOR, e a classificação correspondente (A, B, C, D). A tecnologia de Computação em Nuvem é classificada como mais útil (A). A BDA é classificada com alta utilidade também (B), seguida de IoT (C).

Tabela 9 – Tecnologias da I4.0 mais úteis no auxílio de SMD (II)

		Processos dos SMD											<i>S</i>	<i>R</i>	<i>Q</i>	Classificação
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Geral	Internet das Coisas	0,63	0,64	0,69	0,68	0,85	0,81	0,79	0,82	0,73	0,76	0,69	5,45	1,00	0,74	C
	Análise de Big Data	0,80	0,70	0,71	0,68	0,79	0,80	0,82	0,81	0,81	0,77	0,75	2,65	0,79	0,32	B
	Computação em Nuvem	0,73	0,75	0,80	0,69	0,82	0,81	0,78	0,85	0,76	0,76	0,71	2,28	0,51	0,00	A
	Inteligência Artificial	0,75	0,68	0,67	0,67	0,66	0,77	0,75	0,69	0,68	0,71	0,67	8,97	1,00	1,00	D
	Sistemas Ciberfísicos	0,60	0,66	0,73	0,71	0,68	0,75	0,73	0,72	0,70	0,67	0,66	8,91	1,00	1,00	D

Fonte: o Autor (2024) – Processos dos SMD: 1. Design e seleção de medidas; 2. Modificação da infraestrutura de suporte; 3. Implantação e integração da infraestrutura de suporte; 4. Capacitação das pessoas; 5. Coleta de dados em tempo real; 6. Análise de dados em tempo real e predição do desempenho; 7. Interpretação e avaliação do desempenho; 8. Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real; 9. Tomada de decisão alinhada; 10. Avaliação da eficiência e eficácia da medição; 11. Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição.

Dessa forma, cumpre-se o objetivo específico de “**Classificar o uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD**”. As tecnologias de CC e BDA se mostram mais versáteis, com aplicação reconhecida em um maior número de processos dos SMD. Isso é esperado uma vez que ambas as tecnologias oferecem escalabilidade, capacidade de processamento em tempo real e análise de grandes volumes de dados, facilitando a tomada de decisão baseada em insights profundos e atualizados (SANTOS et al., 2018; MAHDIRAJI et al., 2023). A literatura destaca essas capacidades como essenciais para a eficiência e adaptabilidade dos SMD em ambientes empresariais dinâmicos (MAHDIRAJI et al., 2023). A CC pode ser considerada mais útil que a BDA em certos contextos porque serve como a infraestrutura fundamental que permite o armazenamento, o processamento e a análise de grandes volumes de dados (XING et al., 2016; TSANG et al., 2018; NAGARAJAN et al.,

2022). Sem ela, a BDA seria limitada por capacidades locais de hardware e software, restritos em termos de eficiência energética e custo. Assim, entende-se que a CC facilita a implementação e a operação de tecnologias de BDA, além de outras soluções digitais, tornando-se uma base essencial para a transformação digital dos SMD nas cadeias de suprimentos (TSANG et al., 2018).

Já a IoT se destaca em processos relacionados à gestão de dados porque possibilita a coleta contínua e em tempo real de informações através de sensores e dispositivos conectados, o que é essencial para monitoramento, controle e otimização de forma automática (CAVALIERI et al., 2022; NAGARAJAN et al., 2022; MAHDIRAJI et al., 2023). A AI e os CPS, embora extremamente poderosos em aplicações específicas como automação e tomada de decisão avançada, possuem uso mais limitado devido à complexidade de integração, custos de implementação e necessidade de conhecimento especializado (SHARMA et al., 2022; ROSSI et al., 2020).

7.4.2.2 PROMETHEE

A partir da matriz *A* original, resultante da média das avaliações obtidas a partir do Grupo 2, foi possível avaliar os processos dos SMD mais importantes para a GCSS. A Tabela 10 exibe os valores a_{ij} (com destaque as relações com valor superior a mediana, em negrito) que relacionam os processos dos SMD às práticas da GCSS, os respectivos parâmetros ϕ do método PROMETHEE II, e a classificação correspondente.

Destacam-se como processos mais importantes os processos 1 (Design e Seleção de Medidas Alinhadas à Estratégia da GCS e Integradas ao SMD); 4 (Capacitação das Pessoas para Colaborar com o Desenvolvimento do SMD); 7; (Interpretação e Avaliação do Desempenho); 9 (Tomada de Decisão Alinhada à GCS e às Partes Interessadas); 10 (Avaliação da Eficiência e Eficácia do SMD); e 11 (Revisão das Especificações e Objetivos da Medição de Desempenho e da Infraestrutura de Suporte, Orientada à GCS e às Partes Interessadas).

Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da GCS se mostram fundamentais para alinhar a estratégia sustentável, monitorar continuamente a cadeia de suprimentos e avaliar impactos positivos e negativos das práticas (CAVALIERI et al., 2022). Já a capacitação das pessoas é essencial para desenvolver habilidades colaborativas para promover a sustentabilidade (CAVALIERI et al., 2022). A interpretação e avaliação do desempenho facilita o monitoramento e otimização no uso de recursos naturais e redução de impactos

negativos, tanto nas três dimensões (XING et al., 2016; TSANG et al., 2018; CAVALIERI et al., 2022; FAZLOLLAHTABAR, 2023). Consequentemente, a tomada de decisão na GCS é facilitada pela integração das partes interessadas (NUDURUPATI et al., 2022b; FAZLOLLAHTABAR, 2023).

Tabela 10 – Processos dos SMD mais importantes para a GCSS

		Práticas da GCSS											ϕ	Classificação
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Geral	Design e seleção de medidas	0,80	0,83	0,78	0,75	0,79	0,78	0,80	0,82	0,83	0,78	0,81	0,41	$\Phi > 0$
	Modificação da infraestrutura de suporte	0,71	0,73	0,78	0,70	0,71	0,64	0,75	0,74	0,65	0,75	0,77	-2,31	$\Phi < 0$
	Implantação e integração da infraestrutura de suporte	0,74	0,73	0,77	0,72	0,72	0,67	0,77	0,75	0,69	0,74	0,81	-1,74	$\Phi < 0$
	Capacitação das pessoas	0,91	0,86	0,85	0,84	0,88	0,81	0,87	0,87	0,86	0,86	0,91	2,77	$\Phi > 0$
	Coleta de dados em tempo real	0,76	0,75	0,77	0,65	0,79	0,69	0,74	0,71	0,57	0,71	0,83	-2,18	$\Phi < 0$
	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	0,74	0,74	0,75	0,65	0,81	0,64	0,74	0,72	0,59	0,71	0,83	-2,38	$\Phi < 0$
	Interpretação e avaliação do desempenho	0,82	0,81	0,84	0,75	0,82	0,80	0,82	0,82	0,73	0,82	0,83	0,69	$\Phi > 0$
	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	0,82	0,81	0,79	0,75	0,82	0,76	0,77	0,73	0,69	0,78	0,84	-0,32	$\Phi < 0$
	Tomada de decisão alinhada	0,88	0,85	0,87	0,86	0,87	0,87	0,87	0,89	0,86	0,86	0,86	2,83	$\Phi > 0$
	Avaliação da eficiência e eficácia da medição	0,87	0,84	0,83	0,78	0,85	0,79	0,83	0,85	0,76	0,81	0,85	1,30	$\Phi > 0$
	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	0,80	0,81	0,82	0,78	0,84	0,82	0,82	0,82	0,74	0,83	0,84	0,91	$\Phi > 0$

Fonte: o Autor (2024)

Nota. Práticas da GCSS: 1. Design de produtos e processos sustentáveis; 2. Manufatura sustentável; 3. Gestão sustentável de logística e armazenamento; 4. Recuperação de produtos; 5. Gestão sustentável da qualidade; 6. Gestão sustentável de fornecedores; 7. Gestão sustentável de distribuidores e clientes; 8. Gestão ambiental; 9. Responsabilidade social corporativa; 10. Gestão do ambiente operacional; 11. Gestão sustentável da informação e tecnologia.

Em sequência, a partir da matriz A^T , resultante da transposta da média das avaliações obtidas a partir do Grupo 2, foi possível avaliar as práticas da GCSS mais condicionadas aos processos dos SMD. A Tabela 11 exibe os valores a_{ij} (com destaque as relações com valor superior a mediana, em negrito) que relacionam as práticas da GCSS aos processos dos SMD, os respectivos parâmetros ϕ do método PROMETHEE II, e a ordenação correspondente.

Dessa forma, cumpre-se o objetivo específico de **Classificar as relações entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS**. Destacam-se como práticas mais condicionadas aos SMD as práticas 1 (Design de produtos e processos sustentáveis); 2 (Manufatura sustentável); 3 (Gestão sustentável de logística e armazenamento); 5 (Gestão sustentável da qualidade); 7 (Gestão sustentável de distribuidores e clientes); 8 (Gestão Ambiental); e 11 (Gestão sustentável da informação e tecnologia).

Tabela 11 – Práticas da GCSS mais condicionadas aos SMD

		Processos dos SMD											Φ	Classificação
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Geral	Design de produtos e processos sustentáveis	0,80	0,71	0,74	0,91	0,76	0,74	0,82	0,82	0,88	0,87	0,80	0,67	$\Phi > 0$
	Manufatura sustentável	0,83	0,73	0,73	0,86	0,75	0,74	0,81	0,81	0,85	0,84	0,81	0,31	$\Phi > 0$
	Gestão sustentável de logística e armazenamento	0,78	0,78	0,77	0,85	0,77	0,75	0,84	0,79	0,87	0,83	0,82	0,69	$\Phi > 0$
	Recuperação de produtos	0,75	0,70	0,72	0,84	0,65	0,65	0,75	0,75	0,86	0,78	0,78	-1,36	$\Phi < 0$
	Gestão sustentável da qualidade	0,79	0,71	0,72	0,88	0,79	0,81	0,82	0,82	0,87	0,85	0,84	0,80	$\Phi > 0$
	Gestão sustentável de fornecedores	0,78	0,64	0,67	0,81	0,69	0,64	0,80	0,76	0,87	0,79	0,82	-1,23	$\Phi < 0$
	Gestão sustentável de distribuidores e clientes	0,80	0,75	0,77	0,87	0,74	0,74	0,82	0,77	0,87	0,83	0,82	0,40	$\Phi > 0$
	Gestão ambiental	0,82	0,74	0,75	0,87	0,71	0,72	0,82	0,73	0,89	0,85	0,82	0,20	$\Phi > 0$
	Responsabilidade social corporativa	0,83	0,65	0,69	0,86	0,57	0,59	0,73	0,69	0,86	0,76	0,74	-2,16	$\Phi < 0$
	Gestão do ambiente operacional	0,78	0,75	0,74	0,86	0,71	0,71	0,82	0,78	0,86	0,81	0,83	-0,02	$\Phi < 0$
	Gestão sustentável da informação e tecnologia	0,81	0,77	0,81	0,91	0,83	0,83	0,83	0,84	0,86	0,85	0,84	1,70	$\Phi > 0$

Nota. Processos dos SMD: 1 - Design e seleção de medidas, 2 - Modificação da infraestrutura de suporte, 3 - Implantação e integração da infraestrutura de suporte, 4 - Capacitação das pessoas, 5 - Coleta de dados em tempo real, 6 - Análise de dados em tempo real e predição do desempenho, 7 - Interpretação e avaliação do desempenho, 8 - Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real, 9 - Tomada de decisão alinhada, 10 - Avaliação da eficiência e eficácia da medição, 11 - Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição.

7.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO E VALIDAÇÃO EXTERNA

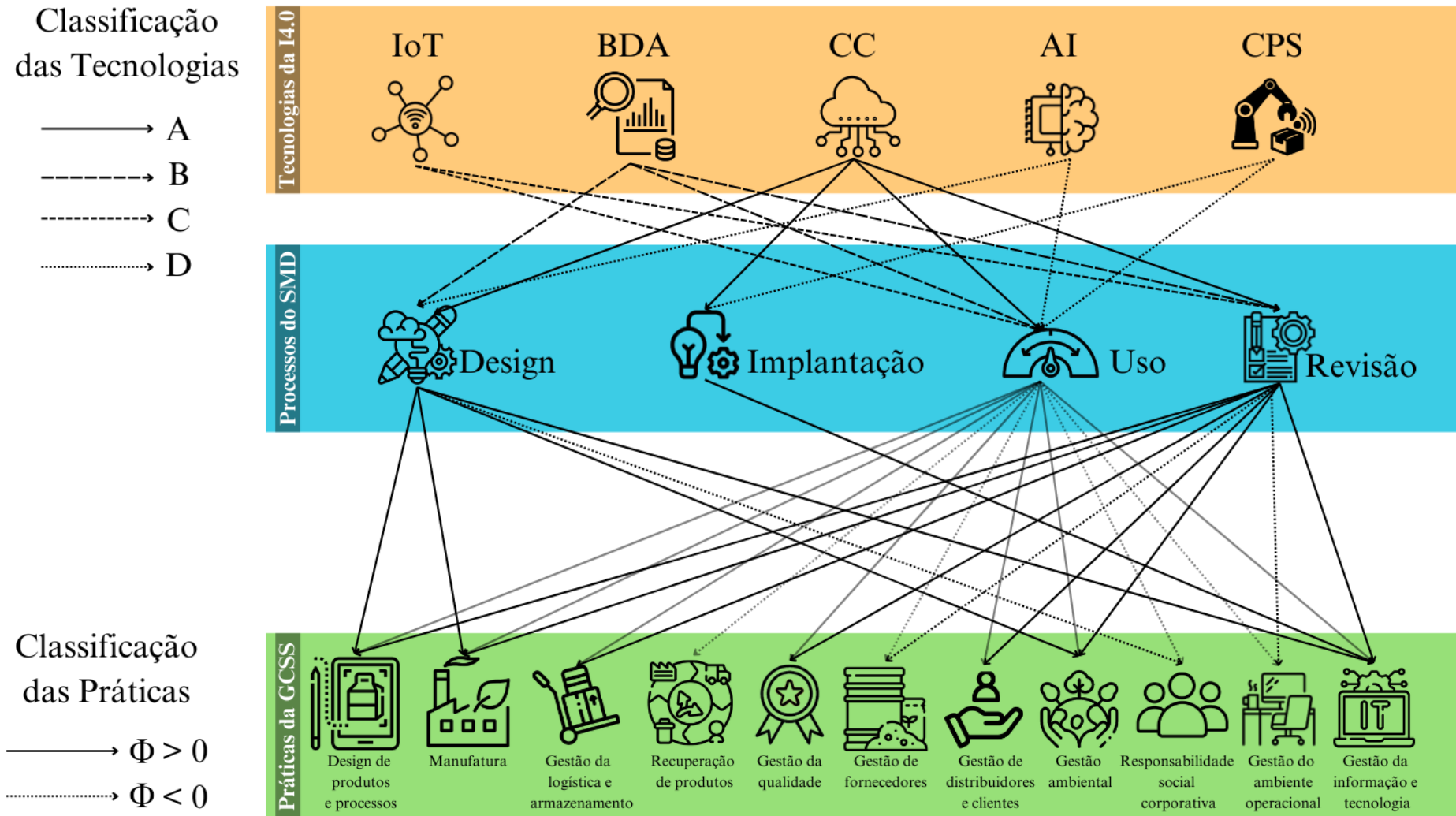
Para atingir o objetivo específico de “Desenvolver e validar o modelo” foram considerados os resultados das análises VIKOR e PROMETHEE. O Quadro 25 apresenta todas as relações consideradas, indicando pela coloração a classificação dos construtos, e exibindo a quantificação das avaliações. Em sequência, na Figura 23, apresenta-se o modelo resultante da compilação de evidências empíricas coletadas. São representados no modelo todas as tecnologias da I4.0; processos dos SMD (agrupados segundo o ciclo de vida); e práticas da GCSS; são representadas por setas as relações mais significativas, definidas pelos 50% maiores valores de a_{ij} ; o design das setas é correspondente a classificação dos construtos, sendo atribuído linha pontilhada para tecnologias da I4.0 e práticas da GCSS de classificação mais baixa.

Quadro 25 – Relação entre os construtos analisados

Tecnologias mais úteis da 14.0	Avaliação	Processos mais importantes do SMD	Etapa do Ciclo de Vida do SMD	Avaliação	Práticas da GCSS
Análise de Big Data	0,80	Design e seleção de medidas	Design	0,80	Design de produtos e processos sustentáveis
Internet das Coisas	0,82	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	Uso	0,82	
Internet das Coisas	0,79	Interpretação e avaliação do desempenho		0,82	
Análise de Big Data	0,81	Tomada de decisão alinhada		0,88	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	Revisão	0,80	
Internet das Coisas	0,76	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,87	
Análise de Big Data	0,80	Design e seleção de medidas	Design	0,83	Manufatura sustentável
Computação em Nuvem	0,73			0,83	
Análise de Big Data	0,81	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	Uso	0,81	
Internet das Coisas	0,82			0,81	
Internet das Coisas	0,79			Interpretação e avaliação do desempenho	
Análise de Big Data	0,81	Tomada de decisão alinhada		0,85	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	Revisão	0,81	
Internet das Coisas	0,76	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,84	
Análise de Big Data	0,82	Interpretação e avaliação do desempenho	Uso	0,84	
Análise de Big Data	0,81	Tomada de decisão alinhada		0,87	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	Revisão	0,82	Gestão sustentável de logística e armazenamento
Análise de Big Data	0,77	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,83	
Internet das Coisas	0,76			0,83	
Análise de Big Data	0,81	Tomada de decisão alinhada	Uso	0,86	Recuperação de produtos
Análise de Big Data	0,80	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	Uso	0,81	Gestão sustentável da qualidade
Computação em Nuvem	0,81			0,81	
Internet das Coisas	0,81			0,81	
Análise de Big Data	0,81	Tomada de decisão alinhada		0,87	
Análise de Big Data	0,81	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real		0,82	
Computação em Nuvem	0,85			0,82	
Análise de Big Data	0,82	Interpretação e avaliação do desempenho	Revisão	0,82	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição		0,84	
Análise de Big Data	0,77	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,85	
Análise de Big Data	0,81	Tomada de decisão alinhada	Uso	0,87	Gestão sustentável de fornecedores
Computação em Nuvem	0,76			0,87	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	Revisão	0,82	Gestão sustentável de distribuidores e clientes
Computação em Nuvem	0,76	Tomada de decisão alinhada		0,87	
Computação em Nuvem	0,78	Interpretação e avaliação do desempenho	Uso	0,82	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	Revisão	0,82	
Análise de Big Data	0,77	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,83	
Computação em Nuvem	0,73	Design e seleção de medidas	Design	0,82	Gestão ambiental
Computação em Nuvem	0,76	Tomada de decisão alinhada		0,89	
Computação em Nuvem	0,78	Interpretação e avaliação do desempenho		0,82	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	Revisão	0,82	
Análise de Big Data	0,77	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,85	
Computação em Nuvem	0,76			0,85	
Computação em Nuvem	0,73	Design e seleção de medidas	Design	0,83	Responsabilidade social corporativa
Inteligência Artificial	0,75			0,83	
Computação em Nuvem	0,76	Tomada de decisão alinhada	Uso	0,86	
Computação em Nuvem	0,76	Tomada de decisão alinhada		0,86	Gestão do ambiente operacional
Inteligência Artificial	0,75	Interpretação e avaliação do desempenho	Uso	0,82	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição		0,83	
Computação em Nuvem	0,76	Avaliação da eficiência e eficácia da medição	Revisão	0,81	
Inteligência Artificial	0,75	Design e seleção de medidas	Implantação	0,81	Gestão sustentável da informação e tecnologia
Computação em Nuvem	0,80	Implantação e integração da infraestrutura de suporte		0,81	
Sistemas Ciberfísicos	0,73	da infraestrutura de suporte		0,81	
Inteligência Artificial	0,75	Interpretação e avaliação do desempenho	Uso	0,83	
Análise de Big Data	0,79	Coleta de dados em tempo real		0,83	
Computação em Nuvem	0,82			0,83	
Internet das Coisas	0,85			0,83	
Computação em Nuvem	0,81			0,83	
Inteligência Artificial	0,77	Análise de dados em tempo real e predição do desempenho		0,83	
Sistemas Ciberfísicos	0,75			0,83	
Computação em Nuvem	0,85	Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	Revisão	0,84	
Computação em Nuvem	0,76	Tomada de decisão alinhada		0,86	
Análise de Big Data	0,75	Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição		0,84	
Computação em Nuvem	0,76	Avaliação da eficiência e eficácia da medição		0,85	

Fonte: O Autor (2024)

Figura 23 – Modelo empírico preliminar (pré-validação)



Fonte: o Autor (2024)

7.5.1 Validação do Modelo

Os resultados da pesquisa de levantamento foram discutidos e interpretados em comparação às evidências da literatura. Ao confrontar os resultados empíricos com o modelo teórico de Santos, Lizarelli e Martins (2024b), observam-se disparidades. Enquanto a etapa de uso do SMD de uso é unânime, existem divergências entre a aplicação das tecnologias da I4.0 em outras etapas do ciclo de vida. Ainda, a teoria negligencia o papel das etapas de design e de revisão do sistema para diferentes práticas da GCSS.

Estas discrepâncias sugerem a necessidade de uma análise mais aprofundada para compreender as razões por trás das diferenças entre a teoria e a prática. Tais desvios podem indicar limitações no modelo proposto ou variáveis não consideradas, exigindo uma revisão crítica das relações consideradas. Este contraste destaca tanto a complexidade das aplicações quanto a falta de maturidade do campo, evidenciando a necessidade contínua de refinamento e aprimoramento do modelo para melhorar a compreensão do mundo real.

A validação do modelo foi realizada a partir de entrevistas semiestruturadas com um subgrupo de especialistas respondentes, escolhidos pelos critérios “conhecimento específico em GCS”, “experiência profissional”, e “inclinação à participação” (MOHAMMADFAM et al., 2022). O Quadro 26 apresenta as características dos especialistas escolhidos para a etapa de validação.

Quadro 26 – Características dos especialistas entrevistados

Entrevistado	Cargo	Área	Tempo de trabalho em um cargo associado à GCS	Tempo de trabalho na mesma empresa	Setor	Tamanho da Empresa
Especialista 1	Especialista	Logística	Entre 6 a 12 anos	Entre 6 a 12 anos	Automotivo	Grande empresa
Especialista 2	Gerente	Qualidade	Entre 6 a 12 anos	Entre 6 a 12 anos	Químico	Grande empresa
Especialista 3	Supervisor	ESG	Entre 6 a 12 anos	Entre 6 a 12 anos	Alimentício	Grande empresa
Especialista 4	Gerente	Planejamento	Entre 6 a 12 anos	Entre 6 a 12 anos	Alimentício	Grande empresa

Fonte: O autor (2024)

Para esclarecer sobre as relações conflitantes, instrumentos de pesquisa elaborados a fim de validar o modelo proposto foram desenvolvidos e são apresentados no Apêndice H e I. Os resultados das entrevistas são resumidos nos Quadros 27 e 28:

Internet das Coisas: Na etapa de design dos SMD, a IoT fornece informações cruciais para o desenvolvimento a partir do feedback dos equipamentos, promovendo a inovação junto aos fornecedores. Durante a implantação, a IoT é utilizada na instalação de projetos para medição de desempenho e no treinamento de funcionários, facilitando a implementação do sistema e incentivando a inovação. Na etapa de revisão, a tecnologia é aplicada em equipamentos e transportes para a coleta de dados, fornecendo uma retroalimentação valiosa para o SMD, integrando logística, rastreamento, captura automatizada de dados e melhorando a comunicação.

Análise de Big Data: No design, a BDA envolve a extração e seleção de informações, consolidando e integrando análises para selecionar novas medidas de desempenho e prever tendências com base em dados históricos. Na implantação, essa tecnologia apoia o desenvolvimento de novos projetos com base em ciência de dados e na composição das interfaces visuais de medição. Na fase de revisão, continua a extrair e selecionar informações, consolidando dados e fornecendo uma fonte rica de informações para futuros designs e coleta computacional de dados.

Computação em Nuvem: Durante a etapa de design, a CC ajuda na organização e consolidação das medidas de desempenho, mapeando as ferramentas necessárias e definindo métodos de controle. Na implantação, otimiza os custos e suporta as interfaces visuais de medição, servindo como uma plataforma de comunicação e repositório de informações armazenadas. Na etapa de revisão, garante a atualização constante dos dados provenientes da cadeia de suprimentos, essencial para a manutenção e aprimoramento dos SMD.

Inteligência Artificial: Na etapa de design, a AI generativa é explorada para aprimorar o design do sistema, sendo também utilizada no Serviço de Atendimento ao Cliente para melhorar o relacionamento com os clientes e analisar informações para estabelecer um sistema mais robusto. A AI permite uma interpretação mais profunda das métricas de desempenho, ajustando-se dinamicamente às necessidades do sistema.

Sistemas Ciberfísicos: Na fase de implantação, os CPS estabelecem conexões cruciais para compor a medição de desempenho, vinculando equipamentos ao sistema de controle e gerenciando dados na manufatura. A atualização do sistema ocorre em tempo real, aumentando a capacidade da medição de desempenho e automatizando o processo para garantir precisão e eficiência.

Etapa de Design: Para a gestão da informação e tecnologia e gestão de distribuidores e clientes, o design do SMD é essencial para otimização e redução de custos, devendo levar em consideração limitações de compartilhamento e proteção de dados. Para a responsabilidade

social corporativa, sua influência depende das ações específicas das empresas, mas corrobora no levantamento de medidas de desempenho social e estabelecimento de metas, objetivando a geração de evidências. Na recuperação de produtos, o design de medidas relacionadas aos ciclos de recuperação, reciclagem e reaproveitamento levam a melhoria contínua, a redução de desperdício e o aumento do valor agregado.

Etapas de Revisão: De modo geral, a etapa de revisão é necessária para adaptação às mudanças estratégicas internas e/ou externas da cadeia de suprimentos, garantindo responsividade a distúrbios. A revisão periódica da medição das práticas é essencial ao menos em nível estratégico, sendo vinculada à gestão de distribuidores e clientes, gestão ambiental e gestão do ambiente operacional aos processos de auditorias e a retroalimentação de informações na GCSS. Assim, estabelecem-se diretrizes para a qualidade e segurança e garante-se a retroalimentação das informações sobre o desempenho em sustentabilidade.

Assim, apresenta-se na Figura 24 a proposta de modelo de SMD para a GCSS auxiliado por tecnologias da I4.0. As relações identificadas como mais fortes são representadas por linhas contínuas, enquanto as secundárias são pontilhadas. Ainda, a coloração indica se a validação da relação foi feita pela triangulação de dados bibliográficos e empíricos (pesquisa de levantamento e métodos de TDMC), em preto, ou pela confirmação das evidências bibliográficas ou empíricas com os especialistas, em roxo.

Percebe-se que a compilação de evidências e seguinte validação trazem à tona uma principal serventia das tecnologias da I4.0 nas etapas de uso e revisão do SMD. Isso se deve primeiramente às capacidades de coleta, análise e comunicação fornecidas pelas tecnologias da I4.0 (XING et al., 2016; TSANG et al., 2018; MAHDIRAJI et al., 2023). Ainda, evidencia-se que as tecnologias de IoT, BDA e CC auxiliam na criação de uma plataforma de gestão de conhecimento em tempo real, que reatualiza o ciclo de vida da medição de desempenho com aumentada capacidade de análise, armazenamento e comunicação.

Quadro 27 – Opinião dos especialistas sobre as relações conflitantes (Tecnologias da I4.0 e Processos dos SMD)

Tecnologia da I4.0	Etapa do Ciclo de Vida	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4
Internet das Coisas	Design	Fornecer informações para o design a partir do feedback de equipamentos	-	-	Design do sistema junto e inibição à fornecedores
Análise de Big Data		Extração e seleção de informações; Consolidação e integração das análises	Análise de dados históricos para selecionar novas medidas e previsão	Análise do feedback da etapa de revisão	Design de novas linhas; Levantamento da infraestrutura de medição
Computação em Nuvem		-	Organização e consolidação das medidas de desempenho; Mapeamento das ferramentas necessárias à implantação	Definição dos métodos de controles	-
Inteligência Artificial		Potencial da AI generativa para ajudar no design do sistema	Uso no SAC para relacionamento com os clientes	Analisar as informações para estabelecimento de um sistema mais robusto	-
Internet das Coisas	Implantação	Uso para implantação de projetos para medição de desempenho	Treinamento de funcionários	-	Implantação do sistema e inovação junto à fornecedores
Análise de Big Data		Extração e seleção de informações; Consolidação e integração das análises	Desenvolvimento de novos projetos baseados em ciência de dados; Composição da interface visual da medição	-	Controle dos processos de implantação
Computação em Nuvem		Otimização de custos	Suporte à interface visual da medição;	Plataforma de comunicação	Fonte de informações armazenadas
Sistema Ciberfísico		Conexão para compor a medição de desempenho; Ligar o equipamento ao sistema de controle	Gestão de dados na manufatura	Atualização do sistema em tempo real	Aumenta a capacidade da medição de desempenho; Automação da medição
Internet das Coisas	Revisão	Uso em equipamentos e transportes para coleta de dados; Retroalimentação de informações no SMD; Integração da logística e rastreamento;	-	Captura de dados automatizada; Comunicação	-
Análise de Big Data		Extração e seleção de informações; Consolidação e integração das análises	Retroalimentação de informações de desempenho	Fonte de informações para design	Coleta e computação de dados
Computação em Nuvem		-	Atualização constante de dados provenientes da cadeia de suprimentos	Troca de informações na cadeia de suprimentos	Revisão de parâmetros da medição; Gerenciamento autônomo e manual de informações

Fonte: O autor (2024)

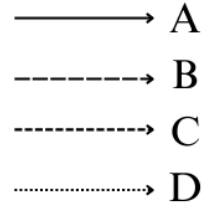
Quadro 28 – Opinião dos especialistas sobre as relações conflitantes (Processos dos SMD e Práticas da GCSS)

Etapa do Ciclo de Vida	Prática da GCSS	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4
Design	Recuperação de Produtos	Design de medidas relacionadas a ciclos de reciclagem, reaproveitamento de produtos e desenho de novas linhas	Levantamento de medidas relacionadas a recuperação de produtos	Design para melhoria contínua	Mapeamento do valor agregado; Medidas de reciclagem visando redução de desperdício
	Gestão de Distribuidores e Clientes	Design e otimização dos processos relacionados	-	Levar em considerações limitações de compartilhamento e proteção de dados	Levantamento de informações sobre a cadeia de suprimentos para redução de custos
	Responsabilidade Social Corporativa	Design e otimização dos processos relacionados (de forma mais indireta, sendo muito dependente da prática)	Levantamento de medidas sociais	Design para geração de evidências; Levar em considerações limitações de compartilhamento e proteção de dados	Estabelecimento de metas
	Gestão da Informação e Tecnologia	Design e otimização dos processos relacionados	-	Levar em considerações limitações de compartilhamento e proteção de dados	Relação de influência indireta
Revisão	Design de Produtos e Processos	A etapa de revisão é necessária em todas essas práticas. Uma vez que existe uma meta é preciso revisar a medição periodicamente, ao menos no nível estratégico.	Revisão das medidas de desempenho	Adaptação à mudanças estratégicas internas e/ou externas; Responsividade à distúrbios na cadeia de suprimentos; Priorização da medição	Relação indireta com todas as práticas
	Manufatura		-		
	Gestão da Logística e Armazenamento		Retroalimentação de informações para identificação de estoques parados e redução de custos de estoque		
	Gestão da Qualidade		Estabelecer diretrizes de qualidade, segurança e resultados		
	Gestão de Fornecedores		-		
	Gestão de Distribuidores e clientes		Auditoria física e sistêmica pela cadeia de suprimentos		
	Gestão ambiental		Auditoria da emissão de poluentes em toda a cadeia logística		
	Gestão do ambiente operacional		Auditorias de segurança; Análise e mitigação de acidentes		
	Gestão da informação e tecnologia		Essencial para suportar a auditoria física e sistêmica pela cadeia de suprimentos		

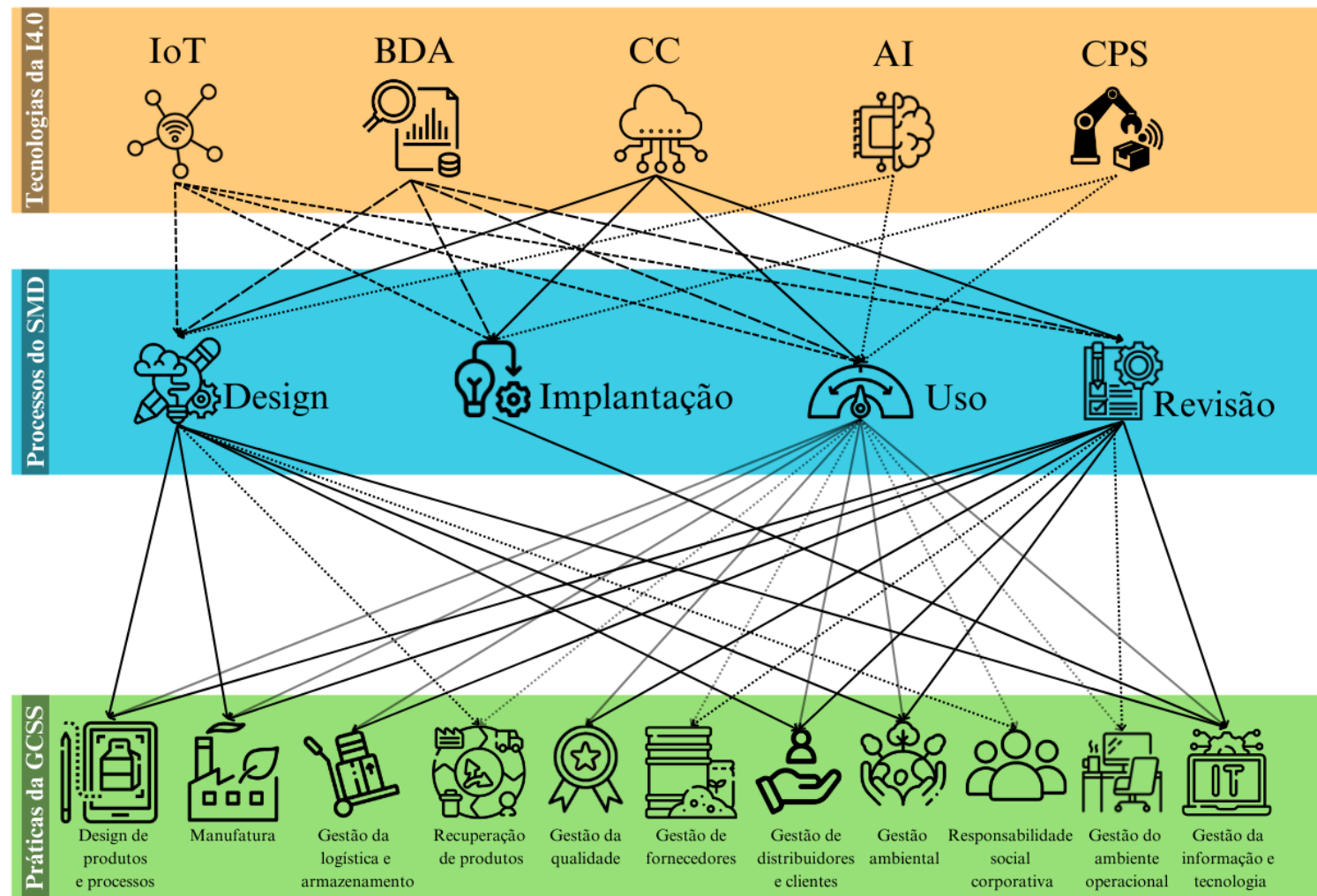
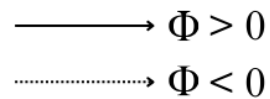
Fonte: O autor (2024)

Figura 24 – Modelo de SMD auxiliado por Tecnologias da I4.0 para a GCSS

Classificação das Tecnologias



Classificação das Práticas



Fonte: O autor (2024)

7.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo proposto desenvolve-se a partir de três objetivos específicos, alcançados pelo método proposto:

I Classificar o uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD

O impacto potencial das novas tecnologias da I4.0 nos SMD é evidente, o que confirma o proposto por Azevedo et al. (2021). Isso se caracteriza como um avanço para um campo de estudo incipiente e promissor, como exposto por Frederico et al. (2021) e Lopes e Martins (2021). O feedback em tempo real proporcionado pela digitalização dos SMD no contexto da I4.0 é uma das principais vantagens identificadas, o que confirma o proposto por Yin e Qin (2019). As tecnologias também mostram potencial de evidenciar problemas durante o processo de avaliação de desempenho, o que corrobora com o proposto por Ahmad e Zabri (2018).

As tecnologias de IoT e CC facilitam a transmissão de dados e informações na cadeia de suprimentos, permitindo à GCSS que atinja ainda maiores níveis no uso de recursos e a habilidade de responder a ambientes dinâmicos, solucionado assim problemas a muito identificados na literatura (BEAMON, 1999). A IoT permite a interconexão de dispositivos e sensores, facilitando a coleta contínua de dados operacionais, o que é essencial para a monitorização do desempenho e a identificação de anomalias. A CC, por sua vez, oferece uma plataforma escalável para o armazenamento e processamento desses dados, permitindo que as organizações acessem informações críticas de qualquer lugar e a qualquer momento, promovendo a agilidade nas decisões.

Essas tecnologias também trazem uma plataforma de comunicação e integração que auxiliam as empresas a atender preocupações das partes interessadas competitividade (KAMBLE et al., 2020; LOPES; MARTINS, 2021; BAI et al., 2022). As tecnologias IoT e CC são fundamentais para a transformação dos SMD, proporcionando uma infraestrutura robusta para a coleta e análise de dados em tempo real. A combinação destas tecnologias proporciona uma plataforma integradora comum para compartilhar informações e coordenar os processos entre as organizações, como proposto por Maestrini et al. (2017) e Szumczak et al. (2018).

Além disso, análises de dados auxiliadas por BDA, AI e CPS possibilitam capacidades ao SMD como a identificação de melhorias sob um aspecto mais amplo, automatizando e descentralizando os processos de tomada de decisão e identificando desperdícios e oportunidades, como indicado em Gunasekaran e Kobu (2007) e Balfaqih et al (2016).

As tecnologias de AI e BDA desempenham um papel crucial na melhoria da eficiência dos SMD. A AI permite a automação de processos analíticos, proporcionando insights mais rápidos e precisos sobre o desempenho organizacional. Isso não apenas acelera a tomada de decisões, mas também melhora a precisão das previsões de desempenho, conforme destacado por Kamble et al. (2020). A BDA, por sua vez, capacita os SMD a processar grandes volumes de dados em tempo real, permitindo uma análise mais robusta e a identificação de padrões que podem ser utilizados para otimizar operações. Essa capacidade de análise avançada é fundamental para a adaptação a ambientes dinâmicos e para a implementação de melhorias contínuas, conforme sugerido por Azevedo et al. (2021). Assim, a integração dessas tecnologias não apenas fortalece a capacidade analítica dos SMD, mas também promove uma cultura de inovação e agilidade nas organizações, alinhando-as com as demandas contemporâneas do mercado. Já os CPS integram o mundo físico e digital, possibilitando a simulação e otimização de processos em tempo real, o que é vital para a melhoria contínua dos SMD.

Juntas, essas tecnologias não apenas aumentam a eficiência operacional, mas também promovem uma maior transparência e colaboração entre os elos da cadeia de suprimentos, conforme evidenciado por Mahdiraji et al. (2023) e Cavalieri et al. (2022). Essa sinergia tecnológica é essencial para que as organizações se adaptem rapidamente às mudanças do mercado e atendam às expectativas dos stakeholders.

II Classificar as relações entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS

Para o campo de pesquisa que relaciona os SMD e a GCSS, a colaboração do modelo proposto evidencia-se ao explorar a abordagem sistêmica da medição de desempenho (MISHRA et al., 2017; QORRI; MUJKIĆ; KRASLAWSKI, 2018). A pesquisa confirma também que o aumento na complexidade das relações inter-organizacionais exige SMD mais complexos, como exposto por Bai et al. (2021) e Lopes e Martins (2021), que identificam a necessidade do apoio de novas ferramentas para atingir novos objetivos. A exploração dos SMD para a GCS supre um campo majoritariamente atuante na manufatura e em áreas técnicas, como exposto por Chauhan e Singh (2019) e Frederico et al. (2021).

Além disso, elas facilitam o relacionamento e a comunicação com os clientes e as partes interessadas (SHROUF et al., 2014; BAI et al., 2021). Enfatiza-se que é necessário o desenvolvimento de um SMD adequado para a GCSS, alinhado com a gestão estratégica, e contextualizado para os seus ambientes interno e externo (MALVIYA; KANT, 2019).

Os resultados apontam que os impactos dos SMD na GCSS se dão de forma direta ou indireta, confirmando pesquisas sobre GCS de especialistas do campo de estudo sobre os SMD (BITITCI et al., 2018; BOURNE et al., 2018; FRANCO-SANTOS et al., 2012). Isto ocorre pelo aumento da cooperação, socialização e coordenação das empresas visando melhoria em desempenho sustentável. Apesar do principal foco econômico e ambiental, como exposto por Rajeev et al. (2017) e Baliga, Raut e Kamble (2019), também se identificou potencial dos SMD para melhorar a capacidade de análise de fatores sociais, o que, como apresentado por Mura et al. (2018), é frequentemente negligenciado.

Assim, os resultados mostram que os processos dos SMD podem se mostrar relevantes na medição de desempenho ambiental, social e econômico, o que confirma as propostas anteriores (AHMAD et al., 2017). Ao incorporar as três dimensões de sustentabilidade na GCSS de forma balanceada, o modelo proposto traz novas perspectivas ao campo (CAZERI et al., 2017; PEÑALOZA; FORMOSO; SAURIN, 2021; KHAN et al., 2021). Na cadeia de suprimentos, práticas como gestão da logística e armazenamento, gestão sustentável de fornecedores e gestão de distribuidores e clientes comprovam que é necessário adaptar estratégias e focar em colaboração para otimizar o uso de recursos e informações, confirmando o proposto por Panigrahi, Bahinipati e Jain (2018).

III Desenvolver e validar o modelo

O modelo proposto é um avanço a modelos propostos anteriormente na literatura, e auxilia no entendimento de como as tecnologias da I4.0 podem ser utilizadas para a criação de subsistemas autônomos sujeitos a ambientes dinâmicos, um problema já identificado na literatura por Bourne et al. (2018) e Sahlin e Angelis (2019). A inclusão das práticas da GCSS no framework expande o modelo inicial de Hervani, Helms e Sarkis (2005). As relações identificadas entre processos do SMD (e suas etapas do ciclo de vida) e as práticas da GCSS também aprofundam o modelo de Hassini, Surti e Searcy (2012) ao considerar a abordagem sistêmica dos SMD.

Já a aplicabilidade das tecnologias da I4.0 é elucidada em relação ao modelo de Tajbakhsh e Hassini (2015), principalmente em relação aos processos de tomada de decisão na cadeia de suprimentos. O modelo ainda pode ser revisto futuramente sob perspectivas específicas como para pequenas e médias empresas, como proposto por Malesios, Dey e Abdelaziz (2020) e/ou cadeias de suprimentos humanitárias, como proposto por Izadikhah et al. (2020). Modelos mais recentes como os de Qorri, Mujkic e Kraslawski (2018), Karimi,

Jafarzadeh-Ghoushchi e Mohtadi-Bonab (2020) e Rajesh (2022) ganham renovada importância, uma vez que novas evidências corroboram com suas estruturas.

A criação de um modelo que integre as tecnologias da I4.0 em SMD para a GCSS é um passo para enfrentar os desafios contemporâneos enfrentados pelas organizações. A literatura já apontava a necessidade de um modelo estruturado que conectasse esses elementos, como destacado por Jabbour et al. (2018) e Azevedo et al. (2021), que identificaram lacunas na inter-relação entre as tecnologias emergentes e os processos de gestão. Além disso, a pesquisa de Bourne et al. (2018) e Sahlin e Angelis (2019) enfatizam a importância de desenvolver subsistemas autônomos que possam se adaptar a ambientes dinâmicos, um aspecto que o modelo proposto aborda de maneira eficaz. A inclusão das práticas da GCSS no framework não apenas amplia modelos existentes, mas também responde à uma abordagem mais sistêmica na análise dos SMD.

A aplicabilidade das tecnologias da I4.0, conforme discutido por Tajbakhsh e Hassini (2015), é essencial para a modernização dos processos de tomada de decisão na cadeia de suprimentos, reforçando a relevância do modelo proposto. Por fim, a possibilidade de revisitar e adaptar o modelo para contextos específicos, como pequenas e médias empresas e cadeias de suprimentos humanitárias, conforme sugerido por Malesios, Dey e Abdelaziz (2020) e Izadikhah et al. (2020), demonstra a flexibilidade e a aplicabilidade do modelo em diferentes cenários, corroborando a importância de estruturas mais recentes, como as de Qorri, Mujkic e Kraslawski (2018), Karimi, Jafarzadeh-Ghoushchi e Mohtadi-Bonab (2020) e Rajesh (2022).

7.6.1 Guia Prático para Gestores

Com base nas informações compiladas, um guia prático para gestores de cadeias de suprimentos sobre a aplicação do modelo pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. *Compreensão do Modelo*: Os gestores devem se familiarizar com os construtos do modelo proposto, incluindo os processos dos SMD, as tecnologias da I4.0 e as práticas de GCSS. Também é necessário que se compreenda sobre o potencial do uso das tecnologias para melhorar a medição de desempenho nas três dimensões;
2. *Definição de Objetivos*: Definir objetivos específicos e mensuráveis que se deseja alcançar em relação as três dimensões da sustentabilidade;
3. *Avaliação do Contexto Atual*: Realize uma análise detalhada dos processos atuais da cadeia de suprimentos para identificar oportunidades de melhoria. Utilizar o modelo para avaliar quais

processos de medição de desempenho são fundamentais e quais tecnologias da I4.0 são viáveis;

4. *Planejamento da Implementação*: Criar um cronograma de implementação que inclua etapas, recursos necessários e responsáveis por cada tarefa. Assegurar-se de que os recursos financeiros, humanos e tecnológicos estejam disponíveis para a implementação;
5. *Capacitação da Equipe*: Proporcionar treinamento para a equipe sobre as tecnologias da I4.0 e como elas se integram aos SMD. Envolver os colaboradores no processo de implementação para garantir que todos compreendam o modelo e suas funções;
6. *Implementação do Modelo*: Seguir o plano de ação, implementando as tecnologias e ajustando os processos conforme necessário. Utilizar as ferramentas de monitoramento para também acompanhar o desempenho do SMD em si e a eficácia das tecnologias implementadas.
7. *Avaliação e Ajustes*: Avaliar os resultados obtidos em relação aos objetivos estabelecidos. Utilizar métricas de desempenho para medir o sucesso. Coletar *feedback* da equipe, elos e stakeholders, fazendo ajustes no modelo e nos processos conforme necessário;
8. *Documentação e Compartilhamento de Resultados*: Documentar todo o processo de implementação, incluindo desafios enfrentados e soluções encontradas. Comunicar os resultados e aprendizados com outros elos da cadeia de suprimentos e stakeholders, promovendo uma cultura de melhoria contínua.

7.7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa tinha o objetivo de suprir uma lacuna da literatura ao propor um modelo de SMD para a GCSS auxiliado pelas tecnologias da I4.0. Para esse fim foi realizado pesquisas de levantamento com especialistas e análise de dados pelos métodos de TDMC *Fuzzy*-VIKOR e *Fuzzy*-PROMETHEE. O modelo é proposto a partir da classificação do uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD e pela preferência dos processos dos SMD quando relacionadas às práticas da GCSS. As relações encontradas sobre o uso das tecnologias da I4.0 nos processos dos SMD são apoiadas pela literatura ou pela validação do modelo, com um subgrupo de especialistas, em entrevistas semiestruturadas.

As tecnologias mais úteis incluem a CC e BDA, que se mostram mais versáteis, com aplicação reconhecida em um maior número de processos dos SMD. As tecnologias se destacam na computação e disponibilização de dados, sendo possível considerá-las fundamentais para a estruturação da gestão organizacional no contexto da I4.0. Já a IoT se destaca em processos relacionados à gestão de dados e comunicação, sendo específica e auxiliar à plataformas de gestão de dados. A AI possui uso mais limitado à análise de dados e

avaliação do desempenho, sendo reconhecida nas etapas de design, uso e revisão, principalmente. Resultados indicam que os CPS auxiliam na coleta de dados e na tomada de decisão autônoma.

Já os processos dos SMD mais importantes para a GCSS são Design e Seleção de Medidas Alinhadas à Estratégia da GCS e Integradas ao SMD; Capacitação das Pessoas para Colaborar com o Desenvolvimento do SMD; Interpretação e Avaliação do Desempenho; Garantir o Fluxo de Dados e Informações Transparente e em Tempo Real entre os Elos da Cadeia de Suprimento e as Partes Interessadas; Tomada de Decisão Alinhada à GCS e às Partes Interessadas; Avaliação da Eficiência e Eficácia do SMD; e Revisão das Especificações e Objetivos da Medição de Desempenho e da Infraestrutura de Suporte, Orientada à GCS e às Partes Interessadas. Em outras palavras, as etapas de uso e revisão do SMD se destacam na maioria das práticas da GCSS.

Algumas práticas como Design de produtos e processos sustentáveis; Manufatura sustentável; Gestão sustentável de logística e armazenamento; Gestão sustentável da qualidade; Gestão sustentável de distribuidores e clientes; Gestão Ambiental; e Gestão sustentável da informação e tecnologia se mostraram mais relacionadas ao SMD, e devem ser consideradas prioritárias quanto à medição de desempenho.

Com a pesquisa apresentada pretende-se contribuir para a literatura ao se caracterizar como um primeiro esforço investigativo abrangente sobre o uso de tecnologias da I4.0 em SMD para a GCSS. As implicações deste estudo permitem uma gestão mais eficiente e responsiva pelo uso das tecnologias de CC e BDA, principalmente. No entanto, a pesquisa possui limitações intrínsecas aos métodos utilizados, incluindo o uso ainda incipiente das tecnologias em certos processos, o que pode não refletir completamente sobre seus potenciais.

Oportunidades para trabalhos futuros incluem a expansão do modelo para incluir novas tecnologias emergentes, a exploração de métodos alternativos de análise de dados para melhorar a precisão do modelo e a realização de estudos longitudinais para avaliar o uso do modelo ao longo do tempo. Além disso, seria benéfico investigar como diferentes culturas organizacionais, realidades econômicas alternativas e diferentes setores podem afetar a implementação e eficácia dos SMD digitais na GCSS.

8 CONCLUSÕES DA TESE

A motivação desta pesquisa surge da necessidade de explorar como as tecnologias da I4.0 podem auxiliar os SMD para a GCSS. Assim, o objetivo desta tese era propor um modelo de SMD auxiliado pelas tecnologias da I4.0 para a GCSS. Como apresentado no Capítulo 1, o modelo proposto surge em um contexto de conscientização sobre sustentabilidade (em todas suas dimensões), evolução dos SMD e inovações da Quarta Revolução Industrial.

A partir do alinhamento teórico-metodológico, apresentado no Capítulo 2, foi possível desenvolver o modelo proposto por meio da combinação de métodos bibliográficos e empíricos e preencher diversas lacunas de pesquisa. Primeiramente, por meio de revisão terciária da literatura, são levantados os recursos, papéis e processos dos SMD na GCS (Capítulo 3). Propõe-se uma atualizada lista de 6 recursos, 8 papéis e 11 processos dos SMD na GCS. Este último levantamento, é fundamental para a elaboração do modelo proposto e para a seguinte exploração do ciclo de vida do SMD. Ainda, espera-se que os resultados desta etapa da pesquisa por si só tragam renovada discussão para o campo sobre a caracterização dos SMD. Segundo, Por meio de revisão sistemática da literatura, identificam-se as tecnologias da I4.0 que podem auxiliar os SMD (Capítulo 4). Um grupo de 5 tecnologias se destaca, tanto pela frequência de citação como pelo reconhecimento dos autores do campo: internet das coisas, big data analytics, computação em nuvem, inteligência artificial, e sistemas ciberfísicos. Terceiro, as 11 práticas da GCSS são identificadas por revisão terciária da literatura, e definidas de acordo com a interpretação das evidências levantadas, preenchendo outra lacuna e trazendo consenso ao campo.

Ainda utilizando de mapeamento científico da literatura (técnicas de bibliometria descritiva e análise de redes sociais) e análise de conteúdo, investiga-se o campo de estudo que relaciona SMD, GCSS, e as tecnologias da I4.0 (Capítulo 6). Nesse sentido, foi possível identificar como os processos dos SMD se mostram importantes na medição de desempenho da GCSS e como as tecnologias da I4.0 podem ser úteis nesses processos. A análise das publicações destacou a relevância dos artigos que exploram as interconexões entre I4.0 e GCSS, muitas vezes pioneiros, embora aprofundem menos nos SMD. A partir da construção de um modelo teórico, a investigação revelou lacunas significativas na literatura, particularmente nas fases do ciclo de vida dos SMD de design, implantação e revisão.

Por último, para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram realizadas pesquisas de levantamento para o desenvolvimento do modelo proposto (Capítulo 7). As etapas de coleta e análise de dados são descritas, e os instrumentos de pesquisa são exibidos como apêndices. A

análise de dados foi realizada por métodos apropriados de TDMC (VIKOR e PROMETHEE). A utilização da teoria de conjuntos *Fuzzy* incorporada aos métodos de TDMC permitiu reduzir erros na quantificação de constructos de origem qualitativa. A aplicação dos métodos de TDMC permitiu analisar preferências no uso das tecnologias da I4.0 em relação aos processos dos SMD, bem como das relações destes com as práticas da GCSS. A partir da triangulação entre resultados bibliográficos e empíricos foi possível desenvolver e validar o modelo proposto.

A presente tese é um esforço de contribuição a um campo de pesquisa emergente, e fundamenta-se na base teórica disponível. As análises e discussões desenvolvidas são direcionados a gestores que buscam um modelo para tomada de decisões e superior desempenho na GCSS. Ainda, existe contribuição a acadêmicos que também objetivem desenvolver o campo, permitindo a adaptação do modelo para indústrias específicas, a inclusão de tecnologias emergentes e a exploração de novas metodologias para medir o impacto direto das práticas de sustentabilidade, ampliando assim o escopo e a aplicabilidade dos achados. A tese esclarece sobre prioridades para a aplicação de SMD na GCSS para incorporarem a digitalização proposta pela I4.0, estenderem seu escopo na cadeia de suprimentos, e compreenderem todas as suas dimensões.

Embora o modelo apresentado busque oferecer uma contribuição significativa para o campo, é crucial reconhecer suas limitações em termos de validade, confiabilidade e replicabilidade. Essas considerações são essenciais para a interpretação dos resultados e para a identificação de direções futuras para pesquisas adicionais que possam fortalecer a base teórica e prática do modelo proposto. A validação do modelo foi realizada através de entrevistas semiestruturadas com um subgrupo de especialistas, o que, embora forneça insights valiosos, pode limitar a generalização dos resultados, uma vez que as percepções de um grupo restrito podem não refletir a diversidade de opiniões existentes no campo. Já a confiabilidade dos resultados deve ser analisada em futuras pesquisas em diferentes contextos ou com diferentes amostras, para averiguar se o método produz resultados semelhantes. Por último, as limitações na replicabilidade do modelo podem surgir da especificidade do contexto em que foi desenvolvido, incluindo as particularidades das cadeias de suprimentos analisadas e as tecnologias da Indústria 4.0 consideradas.

8.1 AGENDA DE PESQUISA

Existe um consenso no campo que novos esforços de pesquisa são necessários para compreensão e difusão do uso das tecnologias da I4.0 nos SMD para a GCSS. A partir dos resultados e discussões desenvolvidos nesta tese, propõe-se para o campo uma agenda de pesquisa que visa contribuir para o avanço do conhecimento na interseção dos três temas, promovendo não apenas uma compreensão mais profunda de seus elementos, mas também oferecendo direções práticas para melhorar eficiência na medição do desempenho em sustentabilidade:

1. Aprofundamento teórico sobre as características dos SMD na GCS

- Realizar estudos empíricos sobre os recursos, processos e papéis dos SMD na GCS, principalmente para as fases de *design*, implantação e revisão;
- Atualizar a teoria existente para uma nova realidade de medição de desempenho, sob escopo ampliado e ambiente dinâmico;
- Adaptação de Tecnologias Digitais para SMD na GCS.

2. Desenvolvimento ou adaptação de tecnologias digitais para SMD para a GCS

- Avaliar a viabilidade e eficácia das tecnologias de IoT, BDA, CC, AI e CPS considerando sua implementação prática e os benefícios tangíveis para a medição do desempenho na cadeia de suprimentos.
- Investigar como os SMD podem se beneficiar de tecnologias emergentes como Gêmeos Digitais, Realidade Aumentada, Realidade Virtual, Segurança Cibernética, e Blockchain;
- Desenvolvimento de novas tecnologias digitais, priorizando os processos identificados como tendo “maior potencial ao uso das tecnologias da I4.0”.

3. Desenvolver o campo da GCSS em busca de um consenso sobre suas práticas

- Validação e definição de abordagens sustentáveis que devem ser incorporadas GCS;
- Pesquisas específicas para a dimensão social e adaptação de avanços nas outras dimensões;
- Desenvolver diretrizes e princípios que orientem empresas e pesquisadores na implementação efetiva de práticas sustentáveis na GCSS.

4. Novos estudos teóricos e empíricos sobre o uso das tecnologias da I4.0 nos SMD para a GCSS

- Conduzir novos estudos teóricos e empíricos para investigar as relações pouco exploradas entre as tecnologias da I4.0, os SMD e a GCSS;

- Priorizar a análise de como as tecnologias da I4.0 podem ser estrategicamente integradas aos SMD para impulsionar a sustentabilidade na GCSS;

5. Desenvolvimento e Enriquecimento do Modelo Proposto

- Enriquecer o modelo por meio de novos dados empíricos, utilizando estudos de caso e pesquisas de levantamento para validar e aprimorar as premissas teóricas, adaptando o modelo à realidade prática das cadeias de suprimentos;
- Investigar particularidades sobre setor, tamanho, escopo, complexidade, regionalidade, cultura, economia e temporalidade;
- Esforços de melhoria e/ou atualização do modelo proposto, e o aprofundamento nas discussões levantadas, seja pelo enriquecimento de métodos utilizados ou pela discussão perante novos resultados.

APOIO

A presente tese foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, M. Towards socially sustainable supply chains–themes and challenges. **European Business Review**, v. 29, n. 3, p. 261-303, 2017.
- ABDULLAH, Lazim; CHAN, Waimun; AFSHARI, Alireza. Application of PROMETHEE method for green supplier selection: a comparative result based on preference functions. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 15, p. 271-285, 2019.
- AGRAWAL, Rohit et al. Attaining sustainable development goals (SDGs) through supply chain practices and business strategies: A systematic review with bibliometric and network analyses. *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 7, p. 3669-3687, 2022.
- AHMAD, N. K. W. *et al.* An integrative framework for sustainable supply chain management practices in the oil and gas industry. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 60, n. 4, p. 577-601, 2017.
- AHMAD, K.; ZABRI, S. M. The deployment of performance measurement system under the supply chain management environment: the case of Malaysian manufacturing companies. **Management and Production Engineering Review**, v. 9, n.1, p. 3-12, 2018.
- AHMED, Hasib et al. Innovative Approaches To Sustainable Supply Chain Management In The Manufacturing Industry: A Systematic Literature Review. *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*, v. 3, n. 02, p. 01-13, 2024.
- ALAVIAN, P. *et al.* Smart production systems: automating decision-making in manufacturing environment. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 3, p. 828-845, 2020.
- ALLEN, S. D.; ZHU, Q.; SARKIS, J. Expanding conceptual boundaries of the sustainable supply chain management and circular economy nexus. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 2, p. 100011, 2021.
- AMAN, S.; SEURING, S. Interestingly it's innovation: Reviewing sustainability performance management in the base of the pyramid (BoP). **Technovation**, v. 112, p. 102394, 2021.
- ANSARI, Z. N.; KANT, R. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. **Journal of cleaner production**, v. 142, p. 2524-2543, 2017.
- ARCIDIACONO, G.; PIERONI, A. The revolution lean six sigma 4.0. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 8, n. 1, p. 141-149, 2018.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.
- ASIF, M. S. *et al.* Adoption of green supply chain management practices through collaboration approach in developing countries–From literature review to conceptual framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 124191, 2020.
- ASSANDRE, Junior; MARTINS, Roberto. Analysis of Scientific Production on the Use of Big Data Analytics in Performance Measurement Systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 100, 2023.

AZEVEDO, S. G. *et al.* Support of advanced technologies in supply chain processes and sustainability impact. **Applied Sciences**, v. 11, n. 7, p. 3026, 2021.

BAHADORI, Mohammadkarim *et al.* A supplier selection model for hospitals using a combination of artificial neural network and fuzzy VIKOR. **International Journal of Healthcare Management**, v. 13, n. 4, p. 286-294, 2020.

BAI, C.; SARKIS, J. A supply chain transparency and sustainability technology appraisal model for blockchain technology. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 7, p. 2142-2162, 2020.

BAI, C.; ORZES, G.; SARKIS, J. Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. **Industrial Marketing Management**, v. 101, p. 176-190, 2022.

BAI, C.; QUAYSON, M.; SARKIS, J. COVID-19 pandemic digitization lessons for sustainable development of micro-and small-enterprises. **Sustainable production and consumption**, v. 27, p. 1989-2001, 2021.

BALFAQIH, H. *et al.* Review of supply chain performance measurement systems: 1998–2015. **Computers in industry**, v. 82, p. 135-150, 2016.

BALIGA, R.; RAUT, R.; KAMBLE, S. The effect of motivators, supply, and lean management on sustainable supply chain management practices and performance: Systematic literature review and modeling. **Benchmarking: An International Journal**, v. 27, n. 1, 2019.

BALON, V. Green supply chain management: Pressures, practices, and performance—An integrative literature review. **Business Strategy & Development**, v. 3, n. 2, p. 226-244, 2020.

BADIEZADEH, Taliva; SAEN, Reza Farzipoor; SAMAVATI, Tahmoures. Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. **Computers & operations research**, v. 98, p. 284-290, 2018.

BEAMON, B. M. Measuring supply chain performance. **International journal of operations & production management**, v. 19, n. 3, p. 275-292, 1999.

BESKE-JANSSEN, P.; JOHNSON, M. P.; SCHALTEGGER, S. 20 years of performance measurement in sustainable supply chain management—what has been achieved?. **Supply chain management: An international Journal**, vol. 20, n. 6, 2015.

BHATTACHERJEE, A. **Social science research: Principles, methods, and practices**. Ed. 2. 2012.

BITITCI, Umit; NUDURUPATI, S. Driving continuous improvement. **Manufacturing Engineer**, v. 81, n. 5, p. 230-235, 2002.

BITITCI, U. S. *et al.* Managerial processes: business process that sustain performance. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 31, n. 8, p. 851-891, 2011.

BITITCI, U. S. *et al.* Towards a theoretical foundation for performance measurement and management. **International Journal of Management Reviews**, v. 20, n. 3, 2018.

BITITCI, U. S. *et al.* Value of maturity models in performance measurement. **International journal of production research**, v. 53, n. 10, p. 3062-3085, 2015.

BITITCI, U. S. *et al.* Dynamics of performance measurement and organisational culture. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 26, n. 12, 2006.

BITITCI, U. *et al.* Performance measurement: challenges for tomorrow. **International journal of management reviews**, v. 14, n. 3, p. 305-327, 2012.

BORTOLINI, Marco; GALIZIA, Francesco Gabriele; MORA, Cristina. Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. **Journal of manufacturing systems**, v. 49, p. 93-106, 2018.

BOURNE, M. Researching performance measurement system implementation: the dynamics of success and failure. **Production Planning & Control**, v. 16, n. 2, p. 101-113, 2005.

BOURNE, M. *et al.* Performance measurement and management: a system of systems perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2788-2799, 2018.

BOURNE, M. *et al.* Designing, implementing and updating performance measurement systems. **International journal of operations & production management**, v. 20, n. 7, p. 751-771, 2000.

BOURNE, M. *et al.* Implementing performance measurement systems: a literature review. **International Journal of Business Performance Management**, v. 5, n. 1, p. 1-24, 2003.

BOURNE, M. *et al.* The success and failure of performance measurement initiatives: Perceptions of participating managers. **International journal of operations & production management**, v. 22, n. 11, 2002.

BRANS, J.-P.; VINCKE, P.H. Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). **Management science**, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985.

BRANS, J.-P.; VINCKE, P.H.; MARESCHAL, Bertrand. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. **European journal of operational research**, v. 24, n. 2, p. 228-238, 1986.

BRANS, Jean-Pierre; DE SMET, Yves. PROMETHEE methods. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, p. 187-219, 2016.

BRAZ, R. G. F.; SCAVARDA, L. F.; MARTINS, R. A. Reviewing and improving performance measurement systems: An action research. **International journal of production economics**, v. 133, n. 2, p. 751-760, 2011.

BRUNDTLAND, G. H. **Report of the World Commission on environment and development**: "our common future". United Nations, 1987.

BUBICZ, M. E.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D.; CARVALHO, A. Incorporating social aspects in sustainable supply chains: Trends and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117500, 2019.

CARVALHO, N. *et al.* Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 671-678, 2018.

CAVALIERI, Adriane; REIS, João; AMORIM, Marlene. A conceptual model proposal to assess the effectiveness of iot in sustainability orientation in manufacturing industry: An environmental and social focus. **Applied Sciences**, v. 12, n. 11, p. 5661, 2022.

CAZERI, G. T. *et al.* Performance measurement of green supply chain management: a literature review and gaps for further research. **Brazilian journal of operations & production management**, v. 14, n. 1, p. 60-72, 2017.

CERNAT, Alexandru et al. The Impact of Survey Mode Design and Questionnaire Length on Measurement Quality. *Sociological Methods & Research*, p. 00491241221140139, 2022.

CHAUHAN, C.; SINGH, A. A review of Industry 4.0 in supply chain management studies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 863-886, 2019.

CHOI, T.-M.; CHENG, T. C. E.; ZHAO, X. Multi-methodological research in operations management. **Production and Operations Management**, v. 25, n. 3, p. 379-389, 2016.

CHOONG, K. K. Understanding the features of performance measurement system: a literature review. **Measuring business excellence**, vol 17, n. 4, p. 102-121, 2013.

COBO, Manuel J. et al. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for information Science and Technology**, v. 62, n. 7, p. 1382-1402, 2011.

CORALLO, Angelo et al. Shop floor digital twin in smart manufacturing: A systematic literature review. **Sustainability**, v. 13, n. 23, p. 12987, 2021.

DALENOGARE, L. S. *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of production economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.

DAVIS, Jim et al. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Computers & Chemical Engineering*, v. 47, p. 145-156, 2012.

DE OLIVEIRA SILVA, Jorge Henrique et al. Antecedents and consequents of student satisfaction in higher technical-vocational education: evidence from Brazil. **International Journal for Educational and Vocational Guidance**, v. 20, p. 351-373, 2020.

DEMARTINI, Melissa; TATICCHI, Paolo. Performance measurement and management. A literature review focussed on the role played by management theories with a deep dive into the industry 4.0 environment. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 71, n. 4, p. 1008-1033, 2022.

DROHOMERETSKI, E. *et al.* The Application of sustainable practices and performance measures in the automotive industry: a systematic literature review. **Engineering management journal**, v. 27, n. 1, p. 32-44, 2015.

DUBEY, R.; GUNASEKARAN, A.; PAPADOPOULOS, T. Green supply chain management: theoretical framework and further research directions. **Benchmarking: An International Journal**, v. 41, n. 1, 2017.

ECK, N. J. V.; WALTMAN, L. Visualizing bibliometric networks. In: **Measuring scholarly impact**. Springer, Cham, 2014. p. 285-320.

ELGAZZAR, Sara; TIPI, Nicoleta; JONES, Glynis. Key characteristics for designing a supply chain performance measurement system. *International journal of productivity and performance management*, v. 68, n. 2, p. 296-318, 2019.

ELKINGTON, J. The triple bottom line. **Environmental management: Readings and cases**, v. 2, p. 49-66, 1997.

ELKMASH, Marwa Rabe Mohamed; ABDEL-KADER, Magdy Gamal; BADR EL DIN, Bassant. An experimental investigation of the impact of using big data analytics on customers' performance measurement. **Accounting research journal**, v. 35, n. 1, p. 37-54, 2022.

- ELTARABISHI, F. *et al.* Multi-Criteria Decision Making Methods And Their Applications—A Literature Review. In: **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, 2020.
- EPSTEIN, M. J.; WISNER, P. S. Using a balanced scorecard to implement sustainability. **Environmental quality management**, v. 11, n. 2, p. 1-10, 2001.
- ETHIRAJAN, Manavalan; KANDASAMY, Jayakrishna; KUMARAGURU, Senthilkumaran. Connecting engineering technology with enterprise systems for sustainable supply chain management. **Smart and Sustainable Manufacturing Systems**, v. 4, n. 1, p. 33-48, 2020.
- FAZLOLLAHTABAR, Hamed. Rough DT2R2ML for renewable energy supplier selection in the presence of big data. **Concurrency and Computation: Practice and Experience**, v. 35, n. 23, p. e7773, 2023.
- FATORACHIAN, H.; KAZEMI, H. Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. **Production Planning & Control**, v. 32, n. 1, p. 63-81, 2021.
- FERREIRA, A.; OTLEY, D. The design and use of performance management systems: An extended framework for analysis. **Management accounting research**, v. 20, n. 4, p. 263-282, 2009.
- FIROUZABADI, S.; MEHRIZI, S. ERP software quality assessment using fuzzy VIKOR. **Uncertain Supply Chain Management**, v. 3, n. 2, p. 189-196, 2015.
- FOLAN, Paul; BROWNE, Jim. A review of performance measurement: Towards performance management. **Computers in industry**, v. 56, n. 7, p. 663-680, 2005.
- FRANCO, M.; BOURNE, M.. Are strategic performance measurement systems really effective: a closer look at the evidence. In: **Proceedings of the EurOMA Conference**. INSEAD Paris, France, 2004. p. 163-74.
- FRANCO-SANTOS, M. *et al.* Towards a definition of a business performance measurement system. **International journal of operations & production management**, v. 27, n. 8, p. 784-801, 2007.
- FRANCO-SANTOS, M.; LUCIANETTI, L.; BOURNE, M. Contemporary performance measurement systems: A review of their consequences and a framework for research. **Management accounting research**, v. 23, n. 2, p. 79-119, 2012.
- FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International journal of production economics**, v. 210, p. 15-26, 2019.
- FREDERICO, G. F. *et al.* Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda. **Supply Chain Management: An International Journal**, p. 1-35, 2019.
- FREDERICO, G. F. *et al.* Performance measurement for supply chains in the Industry 4.0 era: a balanced scorecard approach. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 70, n. 4, p. 789-807, 2021.
- FUSFELD, Alan R.; FOSTER, Richard N. The Delphi technique: Survey and comment: Essentials for corporate use. **Business Horizons**, v. 14, n. 3, p. 63-74, 1971.
- GALATI, Francesco; BIGLIARDI, Barbara. Industry 4.0: Emerging themes and future research avenues using a text mining approach. **Computers in Industry**, v. 109, p. 100-113, 2019.
- GAMBOA-BERNAL, J. P.; ORJUELA-CASTRO, J. A.; MORENO-MANTILLA, C. E. The Sustainable Supply Chain: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends. **Ingeniería**, v. 25, n. 3, p. 355-377, 2020.
- GARCIA-MUIÑA, Fernando E. *et al.* The paradigms of Industry 4.0 and circular economy as enabling drivers for the competitiveness of businesses and territories: The case of an Italian ceramic tiles manufacturing company. **Social Sciences**, v. 7, n. 12, p. 255, 2018.

GARENGO, P.; BITITCI, U. Towards a contingency approach to performance measurement: an empirical study in Scottish SMEs. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 27, n. 8, 2007.

GELDERMANN, J.; SPENGLER, T.; RENTZ, O. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. **Fuzzy sets and systems**, v. 115, n. 1, p. 45-65, 2000.

GENG, R.; MANSOURI, S. A.; AKTAS, E. The relationship between green supply chain management and performance: A meta-analysis of empirical evidences in Asian emerging economies. **International journal of production economics**, v. 183, p. 245-258, 2017.

GIUFFRIDA, Maria; MANGIARACINA, Riccardo. Green practices for global supply chains in diverse industrial, geographical, and technological settings: a literature review and research agenda. **Sustainability**, v. 12, n. 23, p. 10151, 2020.

GIUNIPERO, Larry C.; HOOKER, Robert E.; DENSLOW, Diane. Purchasing and supply management sustainability: Drivers and barriers. **Journal of purchasing and supply management**, v. 18, n. 4, p. 258-269, 2012.

GODINHO FILHO, Moacir; GANGA, Gilberto Miller Devós; GUNASEKARAN, Angappa. Lean manufacturing in Brazilian small and medium enterprises: implementation and effect on performance. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 24, p. 7523-7545, 2016.

GOLD, S.; SEURING, S.; BESKE, P. Sustainable supply chain management and inter-organizational resources: a literature review. **Corporate social responsibility and environmental management**, v. 17, n. 4, p. 230-245, 2010.

GOPAL, P. R. C.; THAKKAR, J. A review on supply chain performance measures and metrics: 2000-2011. **International journal of productivity and performance management**, v. 61, n. 5, p. 518-547, 2012.

GORSKI, T. A.; DUMITRASCU, Dănuț Dumitru. Performance Management: A Bibliometric Analysis From 1976 To 2022. In: **Proceedings of The 16th International Management Conference**. "Management and resilience strategies for a post-pandemic future," Bucharest, 2022.

GREEN, K.; MORTON, B.; NEW, S.. Purchasing and environmental management: interactions, policies and opportunities. **Business strategy and the environment**, v. 5, n. 3, p. 188-197, 1996.

GRUSCHKA, N.; LÜSSEM, J. Information Quality Challenges in Industry 4.0. In: **ICIQ**. 2016. p. 85-92.

GUERSOLA, Mariana; LIMA, Edson Pinheiro De; STEINER, Maria Teresinha Arns. Supply chain performance measurement: a systematic literature review. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 31, n. 1, p. 109-131, 2018.

GUNASEKARAN, A.; KOBU, B. Performance measures and metrics in logistics and supply chain management: a review of recent literature (1995–2004) for research and applications. **International journal of production research**, v. 45, n. 12, p. 2819-2840, 2007.

GUNASEKARAN, A. *et al.* Performance measures and metrics in outsourcing decisions: A review for research and applications. **International Journal of Production Economics**, v. 161, p. 153-166, 2015.

GUNASEKARAN, A.; PATEL, C.; MCGAUGHEY, R. E. A framework for supply chain performance measurement. **International journal of production economics**, v. 87, n. 3, p. 333-347, 2004.

GUO, F. *et al.* Locations appraisal framework for floating photovoltaic power plants based on relative-entropy measure and improved hesitant fuzzy linguistic DEMATEL-PROMETHEE method. **Ocean & Coastal Management**, v. 215, p. 105948, 2021.

GUTIERREZ, D. M. *et al.* Evolution of the performance measurement system in the Logistics Department of a broadcasting company: An action research. **International Journal of Production Economics**, v. 160, p. 1-12, 2015.

GUTIÉRREZ-SALCEDO, María et al. Some bibliometric procedures for analyzing and evaluating research fields. **Applied intelligence**, v. 48, p. 1275-1287, 2018.

HADI-VENCHEH, A.; MOHAMADGHASEMI, Amir. A new hybrid fuzzy multi-criteria decision making model for solving the material handling equipment selection problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 28, n. 5, p. 534-550, 2015.

HANSEN, Allan. The purposes of performance management systems and processes: a cross-functional typology. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 41, n. 8, p. 1249-1271, 2021.

HASSINI, E.; SURTI, C.; SEARCY, C. A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. **International journal of production economics**, v. 140, n. 1, p. 69-82, 2012.

HELDEN, G. Jan van; JOHNSEN, Åge; VAKKURI, Jarmo. The life-cycle approach to performance management: Implications for public management and evaluation. **Evaluation**, v. 18, n. 2, p. 159-175, 2012.

HERRMANN, F. F. *et al.* Green Supply Chain Management: Conceptual Framework and Models for Analysis. **Sustainability**, v. 13, n. 15, p. 8127, 2021.

HERVANI, A. A.; HELMS, M. M.; SARKIS, J. Performance measurement for green supply chain management. **Benchmarking: An international journal**, v. 12, n. 4, p. 330-353, 2005.

HUTOMO, A. *et al.* Green Human Resource Management, Customer Environmental Collaboration And The Enablers Of Green Employee Empowerment: Enhancing An Environmental Performance. **Dinasti International Journal Of Economics, Finance & Accounting**, v. 1, n. 2, p. 358-372, 2020.

HWANG, G. *et al.* Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment. **International journal of production research**, v. 55, n. 9, p. 2590-2602, 2017.

IVASCU, L. Measuring the implications of sustainable manufacturing in the context of industry 4.0. **Processes**, v. 8, n. 5, p. 585, 2020.

IZADIKHAH, M. *et al.* Developing a new chance constrained NDEA model to measure performance of sustainable supply chains. **Annals of Operations Research**, p. 1-29, 2020.

JÄÄSKELÄINEN, Aki; LAIHONEN, Harri; LÖNNQVIST, Antti. Distinctive features of service performance measurement. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 34, n. 12, p. 1466-1486, 2014.

JABBOUR, A. B. L. S. de *et al.* When titans meet–Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 18-25, 2018.

JAWAAD, M.; ZAFAR, S. Improving sustainable development and firm performance in emerging economies by implementing green supply chain activities. **Sustainable Development**, v. 28, n. 1, p. 25-38, 2020.

KAGERMANN, H. *et al.* Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final report of the Industrie**, v. 4, n. 0, p. 82, 2013.

KAHRAMAN, C. *et al.* Hierarchical fuzzy TOPSIS model for selection among logistics information technologies. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 20, n. 2, p. 143-168, 2007.

KALOGERAS, N. *et al.* Evaluating the financial performance of agri-food firms: a multicriteria decision-aid approach. **Journal of Food Engineering**, v. 70, n. 3, p. 365-371, 2005.

KAMBLE, S. S. *et al.* A performance measurement system for industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMEs-A review and empirical investigation. **International journal of production economics**, v. 229, p. 107853, 2020.

KAMBLE, S. S. *et al.* Modeling the internet of things adoption barriers in food retail supply chains. **Journal of Retailing and Consumer Services**, v. 48, p. 154-168, 2019.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A. Big data-driven supply chain performance measurement system: a review and framework for implementation. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 1, p. 65-86, 2019.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process safety and environmental protection**, v. 117, p. 408-425, 2018.

KANG, H. S. *et al.* Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International journal of precision engineering and manufacturing-green technology**, v. 3, n. 1, p. 111-128, 2016.

KARIMI, A.; JAFARZADEH-GHOUSHCHI, S.; MOHTADI-BONAB, M. A. Presenting a new model for performance measurement of the sustainable supply chain of Shoa Panjereh Company in different provinces of Iran (case study). **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 11, n. 1, p. 140-154, 2020.

KAVILAL, E. G.; VENKATESAN, S. Prasanna; KUMAR, KD Harsh. An integrated fuzzy approach for prioritizing supply chain complexity drivers of an Indian mining equipment manufacturer. **Resources Policy**, v. 51, p. 204-218, 2017.

KAUR, Mandeep; SINGH, Kanwarpreet; SINGH, Doordarshi. Identification of barriers to synergistic implementation of TQM-SCM. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 38, n. 1, p. 363-388, 2021.

KENNERLEY, M.; NEELY, A. A framework of the factors affecting the evolution of performance measurement systems. **International journal of operations & production management**, v. 22, n. 11, p. 1222-1245, 2002.

KENNERLEY, M.; NEELY, A. Measuring performance in a changing business environment. **International journal of operations & production management**, v. 23, n. 2, p. 213-229, 2003.

KHAN, S. A. R. *et al.* A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123357, 2021.

KITCHENHAM, B. A. *et al.* Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. 2007.

KLEE, Albert J. The utilization of expert opinion in decision-making. **AIChE Journal**, v. 18, n. 6, p. 1107-1115, 1972.

KLOVIENĖ, L.; UOSYTĖ, I. Development of performance measurement system in the context of industry 4.0: a case study. **Inžinerinė ekonomika**, v. 30, n. 4, p. 472-482, 2019.

KOH, L. S. C. *et al.* The impact of supply chain management practices on performance of SMEs. **Industrial management & data systems**, v. 107, n. 1, p. 103-124, 2007.

KONYA, A. Green supplier selection criteria: From a literature review to a comprehensive knowledge base. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4208, 2019.

KRIPPENDORFF, Klaus. **Content analysis: An introduction to its methodology**. Sage publications, 2018.

KROSNICK, J.A.; PRESSER, S. (2010). **Question and questionnaire design**. In: Wright, J.D. & Marsden, P.V. (Eds.), **Handbook of Survey Research**, (pp. 263-314). Bingley, UK: Emerald Group Publishing.
KUMAR, Anup *et al.* Sustainable supply chain management, performance measurement, and management: a review. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5290, 2023.

- KUO, M.-S.; LIANG, G.-S. A soft computing method of performance evaluation with MCDM based on interval-valued fuzzy numbers. **Applied Soft Computing**, v. 12, n. 1, p. 476-485, 2012.
- LAMBERT, D. M.; POHLEN, T. L. Supply Chain Metrics International Journal of Logistics Management. 2001.
- LEITE, Luciana R. et al. Bibliometric analysis of literature on performance measurement systems and sustainability. In: **IIE Annual Conference. Proceedings**. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), 2012. p. 1.
- LEMSTRA, Mary Anny Moraes Silva; DE MESQUITA, Marco Aurélio. Industry 4.0: A tertiary literature review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 186, p. 122204, 2023.
- LIAO, Y. *et al.* Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. **International journal of production research**, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.
- LIS, A.; SUDOLSKA, A.; TOMANEK, M. Mapping research on sustainable supply-chain management. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 3987, 2020.
- LOPES, M. A. Estudo empírico sobre os facilitadores para adequação dos sistemas de medição de desempenho às tecnologias da Indústria 4.0. Tese de Doutorado (UFSCar). 2023.
- LOPES, M. A.; MARTINS, R. A. Mapping the impacts of industry 4.0 on performance measurement systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 11, p. 1912-1923, 2021.
- LOPES, M. A.; MARTINS, R. A. Sistemas de Medição de Desempenho na Indústria 4.0: uma Revisão Sistemática. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 42, 2022, Foz do Iguaçu. Anais do XLII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 2022, p. 0-14.
- LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of industrial information integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.
- LUO, Jianli et al. Agri-food supply chain management: Bibliometric and content analyses. **Sustainability**, v. 10, n. 5, p. 1573, 2018.
- MA, Fei et al. Multi-stakeholders' assessment of bike sharing service quality based on DEMATEL–VIKOR method. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 22, n. 5, p. 449-472, 2019.
- MAESTRINI, V. *et al.* Supply chain performance measurement systems: A systematic review and research agenda. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 299-315, 2017.
- MAHAMA, Habib. Management control systems, cooperation and performance in strategic supply relationships: A survey in the mines. **Management Accounting Research**, v. 17, n. 3, p. 315-339, 2006.
- MAHDIRAJI, H. A. et al. The role of Industry 4.0 technologies on performance measurement systems of supply chains during global pandemics: an interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy approach. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 40, n. 5, p. 1147-1171, 2023.
- MALESIOS, C.; DEY, P. K.; ABDELAZIZ, F. B. Supply chain sustainability performance measurement of small and medium sized enterprises using structural equation modeling. **Annals of Operations Research**, v. 294, n. 1, p. 623-653, 2020.
- MALVIYA, Rakesh Kumar; KANT, Ravi. Prioritising the solutions to overcome the barriers of green supply chain management implementation: a hybrid fuzzy AHP-VIKOR framework approach. **Journal of Decision Systems**, v. 27, n. 4, p. 275-320, 2018.
- MALVIYA, R. K.; KANT, R. Developing integrated framework to measure performance of green supply chain management: A comparative case analysis. **Benchmarking: An International Journal**, v. 27, n. 2, p. 634-665, 2019.

MANAVALAN, Ethirajan; JAYAKRISHNA, Kandasamy. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & industrial engineering*, v. 127, p. 925-953, 2019.

MARCULETIU, Alina; ATASEVEN, Cigdem; MACKELPRANG, Alan W. A review of how pressures and their sources drive sustainable supply chain management practices. *Journal of Business Logistics*, v. 44, n. 2, p. 257-288, 2023.

MARDANI, A. *et al.* VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, v. 8, n. 1, p. 37, 2016.

MATOS, Lucas dos Santos; ENSSLIN, Sandra Rolim; ENSSLIN, Leonardo. Review on the Performance Measurement Systems Life Cycle. *Lex Localis-Journal of Local Self-Government*, v. 17, n. 4, p. 939-959, 2019.

MELNYK, S. A. *et al.* Is performance measurement and management fit for the future?. *Management accounting research*, v. 25, n. 2, p. 173-186, 2014.

MISHRA, D. *et al.* Green supply chain performance measures: A review and bibliometric analysis. *Sustainable Production and Consumption*, v. 10, p. 85-99, 2017.

MISHRA, Deepa *et al.* Supply chain performance measures and metrics: a bibliometric study. *Benchmarking: An international journal*, v. 25, n. 3, p. 932-967, 2018.

MITTAL, S; KHAM, M; ROMERO, D; WUEST, T. A Critical Review of Smart Manufacturing & Industry 4.0 Maturity Models: Implications for Small and Medium-sized Enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, v. 49, p. 194-214, 2018.

MOHAMMADFAM, Iraj *et al.* Analysis of factors affecting human reliability in the mining process design using Fuzzy Delphi and DEMATEL methods. *Sustainability*, v. 14, n. 13, p. 8168, 2022.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A.. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016.

MORALI, Oguz; SEARCY, Cory. A review of sustainable supply chain management practices in Canada. *Journal of business ethics*, v. 117, p. 635-658, 2013.

MORELLA, Paula *et al.* Development of a new kpi for the economic quantification of six big losses and its implementation in a cyber physical system. *Applied Sciences*, v. 10, n. 24, p. 9154, 2020.

MORRISON-SAUNDERS, A.; THERIVEL, R. Sustainability integration and assessment. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, v. 8, n. 03, p. 281-298, 2006.

MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K.-I. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, v. 10, n. 1, p. 247, 2018.

MURA, M. *et al.* The evolution of sustainability measurement research. *International Journal of Management Reviews*, v. 20, n. 3, p. 661-695, 2018.

NAGARAJAN, Senthil Murugan *et al.* Integration of IoT based routing process for food supply chain management in sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 76, p. 103448, 2022.

NANDI, Santosh *et al.* Conceptualising Circular economy performance with non-traditional valuation methods: Lessons for a post-Pandemic recovery. *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 26, n. 6, p. 662-682, 2023.

NARIMISSA, O.; KANGARANI-FARAHANI, A.; MOLLA-ALIZADEH-ZAVARDEHI, S. Drivers and barriers for implementation and improvement of Sustainable Supply Chain Management. *Sustainable Development*, v. 28, n. 1, p. 247-258, 2020.

- NASIRI, M. *et al.* Digital-related capabilities and financial performance: the mediating effect of performance measurement systems. **Technology analysis & strategic management**, v. 32, n. 12, p. 1393-1406, 2020.
- NEELY, A. The performance measurement revolution: why now and what next?. **International journal of operations & production management**, v. 19, n. 2, p. 205-228, 1999.
- NEELY, A.; ADAMS, C.; KENNERLEY, M. **The performance prism: The scorecard for measuring and managing business success**. London: Prentice Hall Financial Times, 2002.
- NEELY, A.; GREGORY, M.; PLATTS, K. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. **International journal of operations & production management**, v. 15, n. 4, p. 80-117, 1995.
- NEELY, A. *et al.* Designing performance measures: a structured approach. **International journal of operations & Production management**, v. 17, n. 11, p. 1131-1152, 1997.
- NUDURUPATI, S. S. *et al.* State of the art literature review on performance measurement. **Computers & Industrial Engineering**, v. 60, n. 2, p. 279-290, 2011.
- NUDURUPATI, S. S.; GARENGO, Patrizia; BITITCI, Umit S. Impact of the changing business environment on performance measurement and management practices. **International Journal of Production Economics**, v. 232, p. 107942, 2021.
- NUDURUPATI, S. S.; TEBBOUNE, Sofiane; HARDMAN, Julie. Contemporary performance measurement and management (PMM) in digital economies. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 3, p. 226-235, 2016.
- NUDURUPATI, S. S.; *et al.* Transforming sustainability of Indian small and medium-sized enterprises through circular economy adoption. **Journal of Business Research**, v. 149, p. 250-269, 2022a.
- NUDURUPATI, S. S. *et al.* Performance measurement in data intensive organisations: resources and capabilities for decision-making process. **Production Planning & Control**, p. 1-21, 2022b.
- OPRICOVIC, S.; TZENG, G.-H. Defuzzification within a multicriteria decision model. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, v. 11, n. 05, p. 635-652, 2003.
- OPRICOVIC, S.; TZENG, G.-H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **European journal of operational research**, v. 156, n. 2, p. 445-455, 2004.
- OPRICOVIC, Serafim. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 12983-12990, 2011.
- PANIGRAHI, S. S.; BAHINIPATI, B.; JAIN, V. Sustainable supply chain management: A review of literature and implications for future research. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 30, n. 5, p. 1001-1049, 2018.
- PEÑALOZA, G. A.; FORMOSO, C. T.; SAURIN, T. A. A resilience engineering-based framework for assessing safety performance measurement systems: A study in the construction industry. **Safety science**, v. 142, p. 105364, 2021.
- PERVEZ, AKM Kanak *et al.* The Meagerness of Simple Likert Scale in Assessing Risk: How Appropriate the Fuzzy Likert is?. **NUST Journal of Social Sciences and Humanities**, v. 6, n. 2, p. 138-150, 2020.
- PHAM, Thi Yen; MA, Hye Min; YEO, Gi Tae. Application of Fuzzy Delphi TOPSIS to locate logistics centers in Vietnam: The Logisticians' perspective. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, v. 33, n. 4, p. 211-219, 2017.
- PHAM, H. *et al.* Moving towards sustainability: A theoretical design of environmental performance measurement systems. **Journal of cleaner production**, v. 269, p. 122273, 2020.

- PIERONI, M. PP; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. CA. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. **Journal of cleaner production**, v. 215, p. 198-216, 2019.
- PIMENTA, H. C. D.; BALL, P.; SALONITIS, K. Supply chain environmental and social sustainability practice diffusion: Bibliometrics, content analysis and conceptual framework. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 28, n. 6, p. 1870-1890, 2021.
- PINHEIRO DE LIMA, Edson et al. Performance measurement systems: A consensual analysis of their roles. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 2, p. 524-542, 2013.
- PRESLEY, A.; MEADE, L.; SARKIS, J. A strategic sustainability justification methodology for organizational decisions: a reverse logistics illustration. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 18-19, p. 4595-4620, 2007.
- QORRI, A.; MUJKIĆ, Z.; KRASLAWSKI, A. A conceptual framework for measuring sustainability performance of supply chains. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 570-584, 2018.
- RABBI, M. *et al.* Green supply chain performance prediction using a Bayesian belief network. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1101, 2020.
- RAJEEV, A. *et al.* Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 299-314, 2017.
- RAJESH, R. Sustainability performance predictions in supply chains: Grey and rough set theoretical approaches. **Annals of Operations Research**, p. 1-30, 2020.
- RAMÍK, J. Pairwise comparison matrices in decision-making. In: **Pairwise Comparisons Method**. Springer, Cham, 2020. p. 17-65.
- RAUT, R. D.; NARKHEDE, B.; GARDAS, B. B. To identify the critical success factors of sustainable supply chain management practices in the context of oil and gas industries: ISM approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 33-47, 2017.
- REN, Linxiu; LUO, Changkun. Questionnaire survey and DEMATEL method approach for analysis the influent factors of chinese scientific Principal Investigators. **Int. J. Clin. Exp. Med**, v. 11, n. 2, p. 848-855, 2018.
- REUNING, Kevin; PLUTZER, Eric. Valid vs. invalid straightlining: The complex relationship between straightlining and data quality. In: **Survey Research Methods**. 2020. p. 439-459.
- REZAEI, M.; SHIRAZI, M. A.; KARIMI, B. IoT-based framework for performance measurement: A real-time supply chain decision alignment. **Industrial Management & Data Systems**, v. 117, n. 4, 2017.
- ROCHA, L. M. *et al.* The roles related to performance measurement systems use: a study based on clusters statistics analysis. **Gestão & Produção**, v. 27, 2020.
- ROMPHO, Nopadol et al. Evolving landscape of performance measurement research: a bibliometric analysis. **Measuring Business Excellence**, 2024.
- ROSSI, Jessica; BIANCHINI, Augusto; GUARNIERI, Patricia. Circular economy model enhanced by intelligent assets from industry 4.0: The proposition of an innovative tool to analyze case studies. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7147, 2020.
- ROSTAMZADEH, Reza et al. Application of fuzzy VIKOR for evaluation of green supply chain management practices. **Ecological Indicators**, v. 49, p. 188-203, 2015.
- SAHLIN, J.; ANGELIS, J. Performance management systems: reviewing the rise of dynamics and digitalization. **Cogent Business & Management**, v. 6, n. 1, p. 1642293, 2019.

SALAŁUN, Wojciech; WĄTRÓBSKI, Jarosław; SHEKHOVTSOV, Andrii. Are mcdm methods benchmarkable? A comparative study of topsis, vikor, copras, and prometsee ii methods. **Symmetry**, v. 12, n. 9, p. 1549, 2020.

SÁNCHEZ-FLORES, R. B. *et al.* Sustainable supply chain management—a literature review on emerging economies. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 6972, 2020.

SANTANA, M.; COBO, M. J. What is the future of work? A science mapping analysis. **European Management Journal**, v. 38, n. 6, p. 846-862, 2020.

SANTOS, Javier *et al.* Using problem-oriented monitoring to simultaneously improve productivity and environmental performance in manufacturing companies. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, n. 2, p. 183-193, 2019.

SANTOS, P. H. A.; MARTINS, R. A. Food Waste and Performance Measurement Systems: A Systematic Review of the Literature. **Revista de Administração de Empresas**, v. 61, 2021.

SANTOS, P. H. A.; MARTINS, R. A. Continuous improvement programs and industry 4.0: descriptive bibliometric analysis. In: **International Conference on Quality Engineering and Management**. 2020. p. 683-697.

SAYEM, M. Values orientation in business through service innovation: a conceptual framework. **International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC)**, v. 3, 2012.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia Cirp**, v. 52, p. 161-166, 2016.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of cleaner production**, v. 16, n. 15, p. 1699-1710, 2008.

SEURING, Stefan; GOLD, Stefan. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 17, n. 5, p. 544-555, 2012.

SHARMA, R.; JABBOUR, C. J. C.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.. Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 34, n. 1, p. 230-266, 2020.

SHARMA, Janpriy; TYAGI, Mohit; BHARDWAJ, Arvind. Valuation of inter-boundary inefficiencies accounting IoT based monitoring system in processed food supply chain. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, p. 1-23, 2023.

SHEPHERD, C.; GÜNTHER, H. Measuring supply chain performance: current research and future directions. **Behavioral operations in planning and scheduling**, v. 55, n. 3-4, p. 242-258, 2006.

SHIN, Wan Seon *et al.* A Quality Scorecard for the era of Industry 4.0. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 29, n. 9-10, p. 959-976, 2018.

SHROUF, F.; ORDIERES, J.; MIRAGLIOTTA, G. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. In: **2014 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management**. IEEE, 2014. p. 697-701.

SIMONS, T. Top Management Team Consensus, Heterogeneity, and Debate as Contingent Predictors of Company Performance: the Complementarity of Group Structure and Process. In: **Academy of Management Proceedings**. Briarcliff Manor, NY 10510: Academy of Management, 1995. p. 62-66.

SMALL, H. Visualizing science by citation mapping. **Journal of the American society for Information Science**, v. 50, n. 9, p. 799-813, 1999.

SOORI, Mohsen *et al.* Blockchains for Industrial Internet of Things in Sustainable Supply Chain Management of Industry 4.0, A Review. **Sustainable Manufacturing and Service Economics**, p. 100026, 2024.

- STEFANOVIC, N. Collaborative predictive business intelligence model for spare parts inventory replenishment. **Computer Science and Information Systems**, v. 12, n. 3, p. 911-930, 2015.
- SUEN, L.-J. W.; HUANG, H.-M.; LEE, H.-H. A comparison of convenience sampling and purposive sampling. **Hu Li Za Zhi**, v. 61, n. 3, p. 105, 2014.
- SZYMCZAK, M. *et al.* Key factors for information integration in the supply chain—measurement, technology and information characteristics. **Journal of Business Economics and Management**, v. 19, n. 5, p. 759-776, 2018.
- TAJBAKHSI, A.; HASSINI, E. Performance measurement of sustainable supply chains: a review and research questions. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 64, n. 6, p. 744-783, 2015.
- TALIB, Faisal; RAHMAN, Zillur; QURESHI, M. N. A study of total quality management and supply chain management practices. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 60, n. 3, p. 268-288, 2011.
- TANGPONG, C. Content analytic approach to measuring constructs in operations and supply chain management. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 6, p. 627-638, 2011.
- TATICCHI, P. *et al.* A review of decision-support tools and performance measurement and sustainable supply chain management. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 21, p. 6473-6494, 2015.
- TEMPLIER, Mathieu; PARÉ, Guy. A framework for guiding and evaluating literature reviews. **Communications of the Association for Information Systems**, v. 37, n. 1, p. 6, 2015.
- TIAN, X.; SARKIS, J. Expanding green supply chain performance measurement through emergy accounting and analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 225, p. 107576, 2020.
- TOLEDO, R. F. **Modelo para Integrar Sustentabilidade na Gestão de Projetos**. Tese. Universidade Federal Fluminense. 2020.
- TROCHIM, W. M. The research methods knowledge base.(2nd eds.). **Cincinnati: Atomic Dog Publishing**, 2006.
- TSANG, Yung Po *et al.* An Internet of Things (IoT)-based risk monitoring system for managing cold supply chain risks. **Industrial Management & Data Systems**, v. 118, n. 7, p. 1432-1462, 2018.
- TUNI, A.; RENTIZELAS, A.; DUFFY, A. Environmental performance measurement for green supply chains: A systematic analysis and review of quantitative methods. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 48, n. 8, p. 765-793, 2018.
- UYGUN, Ö.; KAÇAMAK, H.; KAHRAMAN, Ü. A. An integrated DEMATEL and Fuzzy ANP techniques for evaluation and selection of outsourcing provider for a telecommunication company. **Computers & Industrial Engineering**, v. 86, p. 137-146, 2015.
- VEGTER, D.; HILLEGERSBERG, J. van; OLTHAAR, M. Performance measurement systems for circular supply chain management: current state of development. **Sustainability**, v. 13, n. 21, p. 12082, 2021.
- VENKATESH, V. G. *et al.* System architecture for blockchain based transparency of supply chain social sustainability. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 63, p. 101896, 2020.
- WAMBA, Samuel Fosso *et al.* The performance effects of big data analytics and supply chain ambidexterity: The moderating effect of environmental dynamism. **International Journal of Production Economics**, v. 222, p. 107498, 2020.
- WANG, T.-C.; CHANG, T.-H. Fuzzy VIKOR as an aid for multiple criteria decision making. **Taiwan: Institute of Information Management I-Shou University**, 2005.

WHITE, Marilyn Domas; MARSH, Emily E. Content analysis: A flexible methodology. **Library trends**, v. 55, n. 1, p. 22-45, 2006.

WU, W.-W.; LEE, Y.-T. Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method. **Expert systems with applications**, v. 32, n. 2, p. 499-507, 2007.

WU, Hung-Yi; TZENG, Gwo-Hshiung; CHEN, Yi-Hsuan. A fuzzy MCDM approach for evaluating banking performance based on Balanced Scorecard. **Expert systems with applications**, v. 36, n. 6, p. 10135-10147, 2009.

XING, Ke; QIAN, Wei; ZAMAN, Atiq Uz. Development of a cloud-based platform for footprint assessment in green supply chain management. **Journal of cleaner production**, v. 139, p. 191-203, 2016.

YADAV, Sanjeev; GARG, Dixit; LUTHRA, Sunil. Development of IoT based data-driven agriculture supply chain performance measurement framework. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 34, n. 1, p. 292-327, 2021.

YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1-2, p. 848-861, 2018.

YIN, Y.; QIN, S.-F. A smart performance measurement approach for collaborative design in Industry 4.0. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 11, n. 1, 2019.

ZAHOOR, S. *et al.* A Review on Integrated Supply Chain Performance Measurement System Concerning Industry 4.0: A developing world perspective. In: **Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, Singapore, p. 5849-5859, 2021.

ZHU, J.; LIU, W. A tale of two databases: The use of Web of Science and Scopus in academic papers. **Scientometrics**, v. 123, n. 1, p. 321-335, 2020.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational research methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.

APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO 1 (Q1): AVALIAÇÃO DO USO DAS TECNOLOGIAS DA I4.0 NOS PROCESSOS DOS SMD NA GCS

Avaliação do uso das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para a Gestão de Cadeias de Suprimentos

Agradeço a sua colaboração!!

O objetivo desta pesquisa é "Propor um modelo de sistema de medição de desempenho para a gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis auxiliado pelas tecnologias da Indústria 4.0". Nesta etapa, contamos com sua ajuda para avaliar a utilidade das **tecnologias da Indústria 4.0** nos **processos dos sistemas de medição de desempenho**.

ATENÇÃO: Pede-se ao respondente que responda às questões considerando a realidade atual de sua empresa e da cadeia de suprimentos.

Um **sistema de medição de desempenho** na **gestão de cadeia de suprimentos** pode ser definido como *"um conjunto de processos para desenvolver medidas de desempenho, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho dos processos e relações da cadeia de suprimentos"*.

Ao englobar a cadeia de suprimentos, o sistema de medição de desempenho deve ser mais dinâmico, integrado e estar alinhado a uma estratégia comum, auxiliando na gestão da informação e coordenando a medição de desempenho em todos os seus níveis.

Os **processos dos sistemas de medição de desempenho** na **gestão da cadeia de suprimentos** são:

1. Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da gestão de cadeia de suprimentos e integradas ao sistema de medição de desempenho;
2. Modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e objetivos da gestão da cadeia de suprimentos;
3. Implantação e integração da infraestrutura de suporte do sistema de medição de desempenho na gestão da cadeia de suprimentos;
4. Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do sistema de medição de desempenho;
5. Coleta de dados em tempo real;
6. Análise de dados em tempo real e predição do desempenho;
7. Interpretação e avaliação do desempenho;
8. Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimentos e as partes interessadas;
9. Tomada de decisão alinhada à gestão da cadeia de suprimentos e às partes interessadas;
10. Avaliação da eficiência e eficácia do sistema;
11. Revisão das especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, orientada à gestão da cadeia de suprimentos e às partes interessadas.

Já as **tecnologias da Indústria 4.0** em questão são:

1. Internet das Coisas: interconexão de dispositivos sensores e atuadores fornecendo a habilidade de compartilhar informação entre plataformas por uma estrutura unificada;
2. Análise de Big Data: novas tecnologias projetadas para lidar com desafios de tamanho, variedade e velocidade na análise de dados;
3. Computação em Nuvem: conjunto de computadores interconectados e virtualizados que providenciam recursos computacionais;
4. Inteligência artificial: tecnologia que aproveita computadores e máquinas para imitar as capacidades de resolução de problemas e a tomada de decisão da mente humana ;
5. Sistemas Ciberfísicos: sistemas que integram processos físicos, recursos computacionais e capacidades de comunicação.

Primeiramente, responda as questões descritivas, e por fim avalie as 5 tecnologias em questão.

Tempo total estimado de 10 minutos.

Questões Descritivas (Parte 1/2)

Qual a relação de seu cargo com a gestão da cadeia de suprimentos? *

- ☐ Diretor da cadeia de suprimentos
- ☐ Gerente de compras
- ☐ Gerente de planejamento
- ☐ Gerente de logística
- ☐ Coordenador de comércio exterior
- ☐ Coordenador de PCP
- ☐ Comprador
- ☐ Analista de logística
- ☐ Outro: _____

A quanto tempo você trabalha em um cargo associado à gestão da cadeia de suprimentos?

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ Entre 1 a 3 anos
- ☐ Entre 3 a 6 anos
- ☐ Entre 6 a 12 anos
- ☐ Mais que 12 anos

A quanto tempo você trabalha nesta empresa? *

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ Entre 1 a 3 anos
- ☐ Entre 3 a 6 anos
- ☐ Entre 6 a 12 anos
- ☐ Mais que 12 anos

Qual o setor industrial da empresa? *

Sua resposta

Qual o principal produto da empresa? *

Qual o tamanho de sua empresa? *

- ☐ Microempresa (até 19 empregados)
- ☐ Empresa de pequeno porte (20 - 99 empregados)
- ☐ Empresa de médio porte (100 - 499 empregados)
- ☐ Grande empresa (acima de 500 empregados)

Sua empresa se caracteriza como qual(is) elo(s) da cadeia de suprimentos? *

- ☐ Fornecedor
 - ☐ Manufatura
 - ☐ Distribuidor/Atacado
 - ☐ Varejo

Qual(is) das tecnologias em questão é(são) utilizada(s) pela empresa? *

	Não utiliza	Utiliza pouco em sistema de medição de desempenho	Utiliza muito em sistema de medição de desempenho	Utiliza pouco apenas em outras aplicações	Utiliza muito apenas em outras aplicações
Internet das Coisas	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de Big Data	☐	☐	☐	☐	☐
Computação em Nuvem	☐	☐	☐	☐	☐
Inteligência Artificial	☐	☐	☐	☐	☐
Sistemas Ciberfísicos	☐	☐	☐	☐	☐

Avaliação das Tecnologias da 14.0 nos processos dos Sistemas de Medição de Desempenho na Gestão de Cadeias de Suprimentos (Parte 2/2)

1. Para um sistema de medição de desempenho da gestão de cadeias de suprimentos, como você avalia a utilidade da **Internet das Coisas** no auxílio do processo de: *

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Design e seleção de medidas	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia da medição	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	☐	☐	☐	☐	☐

2. Para um sistema de medição de desempenho da gestão de cadeias de suprimentos, como você avalia a utilidade da **Análise de Big Data** no auxílio do processo de: *

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Design e seleção de medidas	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia da medição	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	☐	☐	☐	☐	☐

3. Para um sistema de medição de desempenho da gestão de cadeias de suprimentos, como você avalia a utilidade da **Computação em Nuvem** no auxílio do processo de: *

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Design e seleção de medidas	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia da medição	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	☐	☐	☐	☐	☐

4. Para um sistema de medição de desempenho da gestão de cadeias de suprimentos, como você avalia a utilidade da **Inteligência Artificial** no auxílio do processo de: *

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Design e seleção de medidas	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia da medição	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	☐	☐	☐	☐	☐

5. Para um sistema de medição de desempenho da gestão de cadeias de suprimentos, como você avalia a utilidade dos **Sistemas Ciberfísicos** no auxílio do processo de: *

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Design e seleção de medidas	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia da medição	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão da infraestrutura e dos objetivos da medição	☐	☐	☐	☐	☐

Sugestões, Críticas e/ou Comentários

Por favor, compartilhe suas sugestões, críticas ou comentários que você acredita serem relevantes

Sua resposta

APÊNDICE B - QUESTIONÁRIO 2 (Q2): AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DOS SMD PARA A GCSS

Avaliação dos processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para a Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis

Agradeço a sua colaboração!!

O objetivo desta pesquisa é "Propor um modelo de sistema de medição de desempenho para a gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis auxiliado pelas tecnologias da Indústria 4.0". Nesta etapa, contamos com sua ajuda para avaliar **os processos dos sistemas de medição de desempenho na gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis**.

ATENÇÃO: Pede-se ao respondente que responda às questões considerando a realidade atual de sua empresa e da cadeia de suprimentos.

Um **sistema de medição de desempenho na gestão de cadeias de suprimentos** pode ser definido como *"um conjunto de processos para desenvolver medidas de desempenho, estabelecer objetivos, e gerenciar dados de desempenho dos processos e relações da cadeia de suprimentos"*.

Ao englobar a cadeia de suprimentos, o sistema de medição de desempenho deve ser mais **dinâmico, integrado** e estar **alinhados a uma estratégia comum**, auxiliando na gestão da informação e coordenando a medição de desempenho em todos os seus níveis.

Os processos dos sistemas de medição de desempenho na gestão de cadeias de suprimentos são:

1. Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia da gestão de cadeia de suprimentos e integradas ao sistema de medição de desempenho;
2. Modificação da infraestrutura de suporte de acordo com as especificações e objetivos da gestão da cadeia de suprimentos;
3. Implantação e integração da infraestrutura de suporte do sistema de medição de desempenho na gestão da cadeia de suprimentos;
4. Capacitação das pessoas para colaborar com o desenvolvimento do sistema de medição de desempenho;
5. Coleta de dados em tempo real;
6. Análise de dados em tempo real e predição do desempenho;
7. Interpretação e avaliação do desempenho;
8. Garantir o fluxo de dados e informações de forma transparente e em tempo real entre os elos da cadeia de suprimentos e as partes interessadas;
9. Tomada de decisão alinhada à gestão da cadeia de suprimentos e às partes interessadas;
10. Avaliação da eficiência e eficácia do sistema;
11. Revisão das especificações e objetivos da medição de desempenho e da infraestrutura de suporte, orientada à gestão da cadeia de suprimentos e às partes interessadas.

Já as **práticas da gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis** são:

1. Design de produtos e processos sustentáveis;
2. Manufatura sustentável;
3. Gestão sustentável de logística e armazenamento;
4. Recuperação de produtos;
5. Gestão sustentável da qualidade;
6. Gestão sustentável de fornecedores;
7. Gestão sustentável de distribuidores e clientes;
8. Gestão ambiental;
9. Responsabilidade social corporativa;
10. Gestão do ambiente operacional;
11. Gestão sustentável da informação e tecnologia.

Primeiramente, responda as questões descritivas, e por fim avalie os 11 processos em questão.

Tempo total estimado de 10 minutos.

Questões Descritivas (Parte 1/2)

Qual a relação de seu cargo com a gestão da cadeia de suprimentos? *

- ☐ Diretor da cadeia de suprimentos
- ☐ Gerente de compras
- ☐ Gerente de planejamento
- ☐ Gerente de logística
- ☐ Coordenador de comércio exterior
- ☐ Coordenador de PCP
- ☐ Comprador
- ☐ Analista de logística
- ☐ Outro: _____

A quanto tempo você trabalha em um cargo associado à gestão da cadeia de suprimentos?

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ Entre 1 a 3 anos
- ☐ Entre 3 a 6 anos
- ☐ Entre 6 a 12 anos
- ☐ Mais que 12 anos

A quanto tempo você trabalha nesta empresa? *

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ Entre 1 a 3 anos
- ☐ Entre 3 a 6 anos
- ☐ Entre 6 a 12 anos
- ☐ Mais que 12 anos

Qual o setor industrial da empresa? *

Sua resposta

Qual o principal produto da empresa? *

Sua resposta

Qual o tamanho de sua empresa? *

- ☐ Microempresa (até 19 empregados)
- ☐ Empresa de pequeno porte (20 - 99 empregados)
- ☐ Empresa de médio porte (100 - 499 empregados)
- ☐ Grande empresa (acima de 500 empregados)

Sua empresa se caracteriza como qual(is) elo(s) da cadeia de suprimentos? *

- ☐ Fornecedor
 - ☐ Manufatura
 - ☐ Distribuição/Atacado
 - ☐ Varejo

Qual(is) das práticas da gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis em questão é(são) utilizada(s) pela empresa?

	Não utiliza	Utiliza pouco	Utiliza muito
Design de produtos e processos sustentáveis	☐	☐	☐
Manufatura sustentável	☐	☐	☐
Gestão sustentável de logística e armazenamento	☐	☐	☐
Recuperação de produtos	☐	☐	☐
Gestão sustentável da qualidade	☐	☐	☐
Gestão sustentável de fornecedores	☐	☐	☐
Gestão sustentável de distribuidores e clientes	☐	☐	☐
Gestão ambiental	☐	☐	☐
Responsabilidade social corporativa	☐	☐	☐
Gestão do ambiente operacional	☐	☐	☐
Gestão sustentável da informação e tecnologia	☐	☐	☐

Avaliação dos Processos dos Sistemas de Medição de Desempenho na Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis (Parte 2/2)

1. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para **Design de produtos e processos sustentáveis**? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

2. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para **Manufatura sustentável**? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

3. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão sustentável de logística e armazenamento? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

4. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Recuperação de produtos? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

5. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão sustentável da qualidade? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

6. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para **Gestão sustentável de fornecedores**? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

7. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão sustentável de distribuidores e clientes? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

8. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão ambiental? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

9. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Responsabilidade social corporativa? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

10. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão do ambiente operacional? *

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

11. Como você avalia os processos dos Sistemas de Medição de Desempenho para **Gestão sustentável da informação e tecnologia**?

	Irrelevante	Pouco importante	Importância média	Muito importante	Essencial
Design e seleção de medidas alinhadas à estratégia	☐	☐	☐	☐	☐
Modificação da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Implantação e integração da infraestrutura de suporte	☐	☐	☐	☐	☐
Capacitação das pessoas	☐	☐	☐	☐	☐
Coleta de dados em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Análise de dados em tempo real e predição do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Interpretação e avaliação do desempenho	☐	☐	☐	☐	☐
Garantir o fluxo de informações de forma transparente e em tempo real	☐	☐	☐	☐	☐
Tomada de decisão alinhada	☐	☐	☐	☐	☐
Avaliação da eficiência e eficácia do sistema	☐	☐	☐	☐	☐
Revisão das especificações e objetivos da medição e sua infraestrutura	☐	☐	☐	☐	☐

Sugestões, Críticas e/ou Comentários

Por favor, compartilhe sugestões, críticas e/ou comentários que você acredita serem relevantes.

Sua resposta

APÊNDICE C - FICHA DE AVALIAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS

Caro(a) professor(a), peço que avalie o questionário em relação aos seguintes critérios, atribuindo uma pontuação de 1 (muito insatisfatório) a 5 (excelente) em cada categoria. Além disso, forneça comentários específicos caso ache necessário. Sua avaliação nos ajudará a melhorar a qualidade do questionário.

I Apresentação e Instruções para os Respondentes:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

II Clareza das Perguntas Descritivas:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

III Relevância das Perguntas Descritivas:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

IV Clareza das Questões Principais:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

V Facilidade Geral e Comodidade:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

VI Sequência Lógica das Questões:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

VII Formato Geral e Layout:

- ☐ 1 - Muito Insatisfatório
- ☐ 2 - Insatisfatório
- ☐ 3 - Neutro
- ☐ 4 - Satisfatório
- ☐ 5 – Excelente

Comentários:

Comentários Adicionais [inclua quaisquer comentários adicionais sobre os questionários, sugestões de melhoria, ou observações que considere relevantes]:

APÊNDICE D - COMPROVANTE DE DOAÇÃO

Recibo de doação nº 000-100.149560/2023



Instituição

Instituto Ayrton Senna

CNPJ: 00.328.072/0001-62

Endereço: Rua Doutor Fernandes Coelho, 85, Pinheiros, São Paulo, SP

Recebemos de PAULO HENRIQUE AMORIM SANTOS inscrito no CPF/CNPJ sob o nº 071.807.459-95 a quantia supra de R\$345,00 (Trezentos E Quarenta e Cinco Reais) referente a doação realizada em 25/11/2023 para ser aplicada em atividades do objeto social Apoio a Educação - IAS através da campanha via plataforma da Abraça uma Causa (ias.abraceumacausa.com.br).

Instituto Ayrton Senna

Informamos que, conforme a lei nº 9.250, de 26 de Dezembro de 1995, art 12, este recibo de doação não pode ser deduzido do Imposto de Renda.

APÊNDICE E - MÉTODO VIKOR

Neste trabalho, os valores utilizados no método VIKOR provêm da avaliação de q alternativas sujeitas a um grupo de n critérios. Essa avaliação é realizada por um número de m especialistas, que atribuem para cada alternativa uma variável linguística que seja mais apropriada a cada critério em questão. Apesar da coleta de dados ser realizada na forma de números em conjuntos *Fuzzy*, o método opera com números *crisp*, convertidos a partir do método de desfuzificação CFCS (Apêndice G). A desfuzificação foi realizada pela abordagem convencional, sendo utilizada em um momento anterior à aplicação do método de TDMC (OPRICOVIC, 2011).

A seguir, detalha-se a matemática do método VIKOR, adaptada de Opricovic e Tzeng (2004).

Etapas 1 - Gerar a matriz que corresponde à média da influência direta do grupo de critérios e determinar o melhor e o pior valor para todos os critérios

A matriz das médias de avaliações A é expressa por:

$$A = [a_{ij}]_{q \times n} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m F_{ij}^k$$

onde m é o número de especialistas e F_{ij}^k é a matriz obtida pela avaliação individual de cada especialista, expressa por:

$$F_{ij}^k = [f'_{ij}]_{q \times n}^k$$

Sendo que, para mitigar o impacto de respostas que não aderiram ao rigor esperado:

$$\begin{aligned} f'_{ij} &= f_{ij} \text{ , se } \sigma_j^k \neq 0 \\ f'_{ij} &= 0 \text{ , se } \sigma_j^k = 0 \end{aligned}$$

Onde σ_j^k representa o desvio padrão das atribuições f_{ij} , que são os valores *crisp* provenientes das atribuições de cada especialista a cada critério de cada alternativa.

O melhor valor de cada critério j (X_i^+) é dado pelo maior valor de a_{ij} , se benéfico, ou menor valor, se não benéfico. O pior valor de cada critério j (X_i^-) é dado pelo menor valor de a_{ij} , se benéfico, ou maior valor, se não benéfico.

Etapas 2- Calcular as distâncias normalizadas de Manhattan (S_i) e Chebyshev (R_i)

Calcular as distâncias pelas seguintes equações:

$$S_i = \sum_{j=1}^m \left(\frac{X_i^+ - X_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \right)$$

$$R_i = \max \left(\frac{X_i^+ - X_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \right)$$

Etapa 3 - Computar os parâmetros classificatórios Q

Calcular a distância do valor ideal Q_i dado pela equação:

$$Q_i = 0,5 \cdot \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + 0,5 \cdot \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}$$

onde:

$$\begin{aligned} S^* &= \min S_i & S^- &= \max S_i \\ R^* &= \min R_i & R^- &= \max R_i \end{aligned}$$

Etapa 4 - Classificar as alternativas pelos valores S, R e Q

Ordenar em ordem crescente os valores de Q_i e as respectivas distâncias S_i e R_i .

*Etapa 5 - Propor uma solução sob as duas condições: **vantagem aceitável** e **estabilidade aceitável**. Se uma das condições não for satisfeita, propor um conjunto como solução.*

Vantagem aceitável:

$$Q(q^2) - Q(q^1) \geq DQ$$

Onde $D = \frac{1}{q-1}$

Estabilidade aceitável: alternativa q^1 também deve ser a mais bem classificada por S ou R.

Se uma das condições não for satisfeita, então um conjunto de soluções é proposto, que consiste em:

- Estabilidade aceitável não satisfeita: alternativas q^1 e q^2
- Vantagem aceitável não satisfeita: alternativas $q^1, q^2, \dots, q^h$, onde q^h é determinado pela relação:

$$Q(q^h) - Q(q^1) < DQ$$

Esclarece-se que neste trabalho, para fins de classificação, o parâmetro DQ foi utilizado segmentar a faixa de parâmetros classificatórios Q em quatro classes:

$$\begin{aligned} 0 &\geq Q < 0,25 \rightarrow A \\ 0,25 &\geq Q < 0,5 \rightarrow B \\ 0,5 &\geq Q < 0,75 \rightarrow C \\ 0,75 &\geq Q \leq 1 \rightarrow D \end{aligned}$$

APÊNDICE F - MÉTODO PROMETHEE

Neste trabalho, os valores utilizados no método PROMETHEE II provêm da avaliação de q alternativas sujeitas a um grupo de n critérios. Essa avaliação é realizada por um número de m especialistas, que atribuem para cada alternativa uma variável linguística que seja mais apropriada a cada critério em questão. Apesar da coleta de dados ser realizada na forma de números em conjuntos *fuzzy*, o método opera com números *crisp*, convertidos a partir do método de desfuzificação CFCS (Apêndice G). A desfuzificação foi realizada pela abordagem convencional, sendo utilizada em um momento anterior à aplicação do método de TDMC (OPRICOVIC, 2011).

A seguir, detalha-se a matemática do método PROMETHEE II, adaptada de Brans, Vincke e Marecshal (1986).

Etapa 1 - Gerar a matriz que corresponde à média das avaliações do grupo de alternativas

A matriz das médias de avaliações A é expressa por:

$$A = [a_{ij}]_{q \times n} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m F_{ij}^k$$

onde m é o número de especialistas e F_{ij}^k é a matriz obtida pela avaliação individual de cada especialista, expressa por:

$$F_{ij}^k = [f'_{ij}]_{q \times n}^k$$

Sendo que, para mitigar o impacto de respostas que não aderiram ao rigor esperado:

$$f'_{ij} = f_{ij} \text{ , se } \sigma_j^k \neq 0$$
$$f'_{ij} = 0 \text{ , se } \sigma_j^k = 0$$

Onde σ_j^k representa o desvio padrão das atribuições f_{ij} , que são os valores *crisp* provenientes das atribuições de cada especialista a cada critério de cada alternativa.

Etapa 2: Normalização da matriz de avaliação

Seja R a matriz normalizada da matriz de avaliação A definida por:

$$R = [r_{ij}]_{q \times n}$$

Onde:

$$r_{ij} = \frac{[a_{ij} - \min(a_{ij})]}{[\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})]}$$

para critérios considerados como benéficos, ou

$$r_{ij} = \frac{[\max(a_{ij}) - a_{ij}]}{[\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})]}$$

para critérios considerados como não-benéficos. Assim, cada elemento r_{ij} da matriz R representa a avaliação entre as alternativas de forma contextualizada.

Etapa 3: Calcular as diferenças avaliativas de cada alternativa em relação às outras

Considerar para cada par de alternativas a e b a matriz linha D de diferenças avaliativas, em que

$$D^{a-b} = [d_{ij}^{a-b}]_{l \times n}$$

$$d_{ij}^{a-b} = r_{aj} - r_{bj}$$

Etapa 4: Calcular a função de preferência $P_j(a, b)$

Considerar apenas as diferenças positivas segundo a função de preferência $P_j(a, b)$:

$$P_j(a, b) = 0, \text{ se } d_{ij}^{a-b} \leq 0$$

$$P_j(a, b) = d_{ij}^{a-b}, \text{ se } d_{ij}^{a-b} > 0$$

Etapa 5: Calcular a preferência agregada $\pi(a, b)$

Onde:

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n P_j(a, b)}{n}$$

Etapa 6: Determinar os fluxos de classificação de entrada ϕ^- e saída ϕ^+

Definidos para cada alternativa a por:

$$\phi^- = \frac{1}{q-1} \sum_{b=1}^q \pi(b, a)$$

$$\phi^+ = \frac{1}{q-1} \sum_{b=1}^q \pi(a, b)$$

para $a \neq b$.

Etapa 7: Calcular o fluxo líquido para cada alternativa

Definido para cada alternativa a por:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

Etapa 8 (PROMETHEE II): Determinar a classificação de todas as alternativas dependendo do seu valor do fluxo líquido

O método PROMETHEE II se resume à classificação em ordem decrescente dos valores de $\phi(a)$.

APÊNDICE G - MÉTODO DE DEFUZZIFICAÇÃO CFCS

As pesquisas de levantamento utilizadas nesta tese coletam dados na forma de variáveis linguísticas, associadas a conjuntos triangulares *Fuzzy*. Tais conjuntos podem ser expressos como $f_{ij} = (e_{ij}, m_{ij}, d_{ij})$, e o valor *crisp* correspondente a cada atribuição dos especialistas pode ser determinado pelo algoritmo CFCS (OPRICOVIC; TZENG, 2003):

Etapa 1: Normalização

Seja:

$$\begin{aligned}d_i^{max} &= \max d_{ij} \\e_i^{min} &= \min e_{ij} \\ \Delta_{min}^{max} &= d_i^{max} - e_i^{min}\end{aligned}$$

Calcula-se, para todos os conjuntos j , os seguintes valores:

$$\begin{aligned}x_{ej} &= (e_{ij} - e_i^{min}) / \Delta_{min}^{max} \\x_{mj} &= (m_{ij} - e_i^{min}) / \Delta_{min}^{max} \\x_{dj} &= (d_{ij} - e_i^{min}) / \Delta_{min}^{max}\end{aligned}$$

Etapa 2: Calcular os valores normalizados para a esquerda (es) e direita (ds)

$$\begin{aligned}x_j^{es} &= x_{mj} / (1 + x_{mj} - x_{ej}) \\x_j^{ds} &= x_{dj} / (1 + x_{dj} - x_{mj})\end{aligned}$$

Etapa 3: Calcular o valor crisp normalizado total

$$x_j^{crisp} = [x_j^{es} (1 - x_j^{es}) + x_j^{ds} x_j^{ds}] / [1 - x_j^{es} + x_j^{ds}]$$

Etapa 4: Calcular os valores crisp

$$f_{ij} = e_i^{min} + x_j^{crisp} \Delta_{min}^{max}$$

APÊNDICE H - QUESTIONÁRIO DAS ENTREVISTAS SEMI-ESTRUTURADAS

O questionário possui uma estrutura inicial dividida em três fases, com o objetivo de confirmar as relações identificadas entre o uso das tecnologias da I4.0, os processos dos SMD, as práticas da GCSS e os elos da cadeia de suprimentos.

Fase I: Relação entre as tecnologias da I4.0 e os processos dos SMD

Q1: Como a tecnologia de **Internet das Coisas** pode ser utilizada nas etapas do ciclo de vida dos SMD

- Design?
- Implantação?
- Revisão?

Q2: Como a tecnologia de **Análise de Big Data** pode ser utilizada nas etapas do ciclo de vida dos SMD

- Design?
- Implantação?
- Revisão?

Q3: Como a tecnologia de **Computação em Nuvem** pode ser utilizada nas etapas do ciclo de vida dos SMD

- Design?
- Implantação?
- Revisão?

Q4: Como a tecnologia de **Inteligência Artificial** pode ser utilizada na etapa do ciclo de vida dos SMD

- Design?

Q5: Como a tecnologia de **Sistemas Ciberfísicos** pode ser utilizada na etapa do ciclo de vida dos SMD

- Implantação?

APÊNDICE I - QUESTIONÁRIO DAS ENTREVISTAS SEMI-ESTRUTURADAS

O questionário possui uma estrutura inicial dividida em três fases, com o objetivo de confirmar as relações identificadas entre o uso das tecnologias da I4.0, os processos dos SMD, as práticas da GCSS e os elos da cadeia de suprimentos.

Fase I: Relação entre os processos dos SMD e as práticas da GCSS

Q1: Qual a importância da etapa de **Design** nas práticas da GCSS

- Recuperação de produtos?
- Gestão sustentável de distribuidores e clientes?
- Responsabilidade social corporativa?
- Gestão sustentável da informação e tecnologia?

Q2: Qual a importância da etapa de **Revisão** nas práticas da GCSS

- Design sustentável de produtos e processos?
- Manufatura sustentável?
- Gestão sustentável da logística e armazenamento?
- Gestão sustentável da qualidade?
- Gestão sustentável de fornecedores?
- Gestão sustentável de distribuidores e clientes?
- Gestão ambiental?
- Gestão sustentável do ambiente operacional?
- Gestão sustentável da informação e tecnologia?

APÊNDICE J - LISTA DE ARTIGOS DO COMPÊNDIO

Em todos os trabalhos do compêndio, o aluno Paulo Henrique Amorim Santos foi responsável pela coleta e análise de dados, pela exibição e interpretação de resultados, e pela escrita do manuscrito. A Prof^a Fabiane Letícia Lizarelli e o Prof. Roberto Antonio Martins auxiliaram nas etapas de planejamento e revisão dos documentos.

Artigo I: SANTOS, P. H. A.; LIZARELLI, F. L.; MARTINS, R. A. Recursos, papéis e processos dos sistemas de medição de desempenho na gestão de cadeias de suprimentos. *Revista de Gestão*, São Paulo, 2024a. Submetido para publicação (em versão reduzida).

Artigo II: SANTOS, P. H. A.; LIZARELLI, F. L. Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho: Revisão Sistemática da Literatura. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 30, 2023. Bauru. Anais do XXX Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 2023a, p. 1-17.

Artigo III: SANTOS, P. H. A.; LIZARELLI, F. L. Práticas da Gestão da Cadeia de Suprimentos Sustentável: Revisão Terciária da Literatura. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 43, 2023, Fortaleza. Anais do XLIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 2023b, p. 0-14.

Artigo IV: SANTOS, P. H. A.; LIZARELLI, F. L.; MARTINS, R. A. Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis: Análise Bibliográfica. 2024b. Artigo em preparação.

Artigo V: SANTOS, P. H. A.; LIZARELLI, F. L.; MARTINS, R. A. Uso das Tecnologias da Indústria 4.0 em Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis: Proposta de Modelo. 2024c. Artigo em preparação.