



Instituto Politécnico
de Viana do Castelo

ASSOCIAÇÃO DE POLITÉCNICOS DO NORTE (APNOR)
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA
SELEÇÃO DE FORNECEDORES NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0**

Carlos Henrique Lopes Resende

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do
Grau de Mestre em Gestão das Organizações, Ramo de Gestão de Empresas

Orientada por

Professora Doutora Carla Alexandra Soares Gerales

Professor Doutor Francisco Rodrigues Lima Junior

Bragança, Dezembro de 2020



Instituto Politécnico
de Viana do Castelo

ASSOCIAÇÃO DE POLITÉCNICOS DO NORTE (APNOR)
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA
SELEÇÃO DE FORNECEDORES NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0**

Carlos Henrique Lopes Resende

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do
Grau de Mestre em Gestão das Organizações, Ramo de Gestão de Empresas

Orientada por

Professora Doutora Carla Alexandra Soares Gerales

Professor Doutor Francisco Rodrigues Lima Junior

Bragança, Dezembro de 2020.

Resumo

A indústria 4.0 compreende a aplicação de diferentes soluções tecnológicas de modo que os processos de negócios em toda a cadeia produtiva sejam integrados. A realização da seleção de fornecedores considerando os requisitos da indústria 4.0 é essencial na promoção de estratégias colaborativas entre fornecedores e fabricantes. Nesse enquadramento, por meio de uma revisão sistemática, foram caracterizados os estudos que propuseram modelos quantitativos para apoiar a seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0. No entanto, não foram encontrados modelos que empreguem critérios de avaliação de fornecedores relacionados a requisitos advindos da indústria 4.0, e que consideram a dificuldade de coletar dados para medir o desempenho dos fornecedores. Assim sendo, a fim de preencher a lacuna de pesquisa identificada, este estudo propõe um modelo de decisão para apoiar a seleção de critérios e fornecedores, com base na combinação de *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set* (HFLTS) com o método *Quality Function Deployment* (QFD) considerando um conjunto de critérios definidos a partir de requisitos advindos da indústria 4.0. Para isso, um modelo computacional foi desenvolvido no MS Excel e aplicado em um caso ilustrativo utilizando dados simulados. Por meio dos resultados da aplicação, é possível constatar a capacidade do método em apoiar a tomada de decisão em grupo e considerar pesos diferentes para os julgamentos dos decisores na escolha dos critérios e na avaliação dos fornecedores. A sensibilidade nos parâmetros de saída do modelo às alterações nos parâmetros de entrada sugere efetividade do modelo proposto.

Palavras-chave: seleção de fornecedores, indústria 4.0, revisão sistemática, tomada de decisão multicritério, HFLTS-QFD.

Abstract

Industry 4.0 comprises the application of different technological solutions so that business processes throughout the integrated production chain. Carrying out the selection of suppliers considering the requirements of industry 4.0 is essential in the promotion of collaborative collaborators between suppliers and manufacturers. In this context, through a systematic review, studies were characterized that proposed quantitative models to support the selection of suppliers in the context of industry 4.0. However, no models were found that use supplier evaluation criteria related to requirements arising from industry 4.0, and which consider it a difficulty to collect data to assess supplier performance. Therefore, in order to fill an identified research gap, this study proposes a decision model to support a selection of criteria and suppliers, based on the combination of Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set (HFLTS) with the Quality Function Deployment (QFD) method considering a set of criteria defined from the requirements arising from industry 4.0. For this, a computational model was developed in MS Excel and applied in an illustrative case using simulated data. Through the results of the application, it is possible to verify the capacity of the method to support group decision making and consider different weights for the judgments of decision makers in the choice of criteria and in the evaluation of suppliers. The sensitivity of the model's output parameters to changes in the input parameters, the effectiveness of the proposed model.

Keywords: supplier selection, industry 4.0, systematic review, multicriteria decision making, HFLTS-QFD.

Agradecimentos

Ao professor Francisco pelas orientações realizadas ao longo da minha trajetória acadêmica, além da amizade desenvolvida ao longo de quase quatro anos.

À professora Carla pela confiança e prontidão às necessidades físicas e estruturais ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade concedida.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pela bolsa disponibilizada durante o programa Verão com Ciência.

À minha família, especialmente, minha mãe Sirlene, meu pai José, meu irmão João Henrique, às minhas tias Maria, e meu tio Marcilei.

À minha companheira Thamires, pelo apoio, incentivo e carinho compartilhado.

Ao meu amigo Jeferson, o por quê? porque sim.

À minha amiga e professora do Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial (SENAC) Lilian, pelo pontapé inicial.

Lista de Acrónimos e Siglas

AHP- *Analytic Hierarchy Process*

ANFIS - *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*

ANP - *Analytic Network Process*

ARAS - *Addial Ratio Assessment*

BSC - *Balanced Scorecard*

BWM - *Best Worst Method*

COPRAS - *Complex Proportional Assessment*

DEA - *Data Envelopment Analysis*

DMUs - *Decision Making Units*

DEMATEL - *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*

ELECTRE - *ELimination Et Choice Translating REality*

ERP - *Enterprise Resource Planning*

HFLTS - *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets*

IA – *Inteligência Artificial*

IoS – *Internet of Services*

IoT – *Internet of Things*

ISM - *Interpretive Structural Modeling*

MACBETH - *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*

MAUT - *Multi-Attribute Utility Theory*

MCDM – *Multicriteria Decision Making*

MOORA - *Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis*

MRP - *Material Requirements Planning*

NSGA-II - *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*

ORESTE - *Organization Rangement Et Synthese De Donnes Relationnelles*

P&D – *Pesquisa e Desenvolvimento*

PME – *Pequenas e Médias Empresas*

PROMETHEE - *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*

PHFLTS - *Proportional Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets*

PVS - Preference Voting System

QFD - Quality Function Deployment

RFID - Radio Frequency Identification

SCF - Sistemas Ciber-Físicos

SMART - Simple Multi Attribute Rating Technique

TIC -Tecnologia da Informação e Comunicação

TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

VIKOR - VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

WASPAS - Weighted Aggregated Sum Product Assessment

Índice Geral

Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	ix
Introdução.....	1
1.1 Estrutura da dissertação	8
2. Referencial Teórico	9
2.1 Evolução do Processo de Compras	9
2.2 Indústria 4.0.....	11
2.2.1 Sistemas Ciber-Físicos	14
2.2.2 Internet of Things	16
2.2.3 Supply Chain 4.0	17
2.2.4 Procurement 4.0.....	19
2.2.5 Informações para a tomada de decisão	21
2.3 Seleção de Fornecedores	22
2.3.1 Critérios de Seleção de Fornecedores.....	24
2.4 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão	25
2.5 Modelos de decisão para seleção de critérios	27
2.6 Modelos de decisão para seleção de fornecedores na indústria 4.0.....	29
2.6.1 Procedimentos de Busca e Seleção de Artigos.....	30
2.6.2 Fatores de análise dos artigos	31
2.6.3 Resultados da Caracterização dos Estudos	32
2.6.4 Análise e Oportunidades de Pesquisa	39
2.7 Fundamentos da Teoria Hesitant Fuzzy	40
2.7.1 Definição de Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set (HFLTS).....	41
2.7.2 Transformação de expressões linguísticas em HFLTS	41
2.7.3 Distância entre dois HFLTS	42
2.7.4 Soluções ideais positivas e negativas.....	42
2.7.5 Grau de satisfação de uma alternativa	43
2.8 Quality Function Deployment	43
2.9 Método HFLTS-QFD	45

3. Modelo Proposto Para Seleção de Fornecedores	47
4. Aplicação Ilustrativa	60
4.1 Determinação e Avaliação dos Requisitos.....	60
4.2 Determinação e Avaliação dos Critérios	62
4.3 Avaliação da dificuldade de coleta de dados e escolha dos critérios	68
4.4 Avaliação e Seleção dos Fornecedores.....	73
5. Análise de Sensibilidade	75
Conclusões.....	79
Referências bibliográficas	82

Índice de Figuras

Figura 1: Evolução dos sistemas de tecnologia da informação no processo de compras	10
Figura 2: Etapas do gerenciamento de fornecedores	23
Figura 3: Formas de selecionar fornecedores	24
Figura 4: Distribuição dos estudos por ano de publicação	32
Figura 5: Estratégia da cadeia de suprimentos.....	38
Figura 6: Setor de atuação da empresa.....	38
Figura 7: Casa da Qualidade	44
Figura 8: Modelo proposto para a seleção de critérios e fornecedores.....	48
Figura 9: Conjunto básico de termos linguísticos definidos com sete termos	53
Figura 10: Conjunto básico de termos linguísticos definidos com cinco termos	58
Figura 11: Matriz para classificação de critérios de seleção de fornecedores	59
Figura 12: Matriz de classificação dos critérios	72
Figura 13: Matriz de classificação dos critérios no ambiente otimista	78
Figura 14: Matriz de classificação dos critérios no ambiente pessimista.....	78

Índice de Tabelas

Tabela 1: Artigos de revisão relacionados à seleção de fornecedores	4
Tabela 2: Resultado das buscas e seleção de artigos nas bases de dados	31
Tabela 3: Técnicas empregadas nos modelos de decisão	33
Tabela 4: Critérios utilizados pelos modelos e sua frequência de uso	37
Tabela 5: Algumas características dos modelos de decisão analisados	39
Tabela 6: Lista de possíveis requisitos para seleção de fornecedores no ambiente da indústria 4.0	50
Tabela 7: Expressões linguísticas usadas para avaliação dos requisitos, critérios e fornecedores	54
Tabela 8: Lista de possíveis critérios para seleção de fornecedores	55
Tabela 9: Requisitos selecionados pelos tomadores de decisão	61
Tabela 10: Avaliação do grau de importância dos requisitos usando expressões linguísticas	61
Tabela 11: Conversão da avaliação dos requisitos para o formato de HFLTS	61
Tabela 12: Resultado do cálculo dos pesos dos requisitos	62
Tabela 13: Critérios selecionados pelos decisores	62
Tabela 14: Avaliação da intensidade de relacionamento entre critérios e requisitos	64
Tabela 15: Conversão da avaliação de intensidade de relacionamento para o formato de HFLTS	65
Tabela 16: Resultado do cálculo do peso dos critérios	67
Tabela 17: Avaliação dos critérios em relação ao grau de dificuldade de coleta de dados	69
Tabela 18: Conversão dos julgamentos da dificuldade de coleta de dados em HFLTS	70
Tabela 19: Resultado do cálculo do grau de dificuldade da coleta de dados	71
Tabela 20: Avaliação das alternativas de fornecimento	73
Tabela 21: Conversão das avaliações das alternativas de fornecimento em HFLTS	73
Tabela 22: Classificação das alternativas de fornecimento	74
Tabela 23: Resultado da análise de sensibilidade para os cenários (pessimista, neutro e otimista)	77

Introdução

As cadeias de suprimentos são compostas por uma rede de empresas que possuem atividades interconectadas e juntas atuam para obter a satisfação do cliente. Essa rede compreende a coordenação, planejamento e o controle de produtos e serviços entre fornecedores e clientes. Nesse cenário, os múltiplos fluxos de materiais, informações e características das diferentes entidades associadas que cercam o sucesso financeiro das empresas envolvidas tornam a gestão da cadeia de suprimentos complexa (Barbosa-Póvoa & Pinto, 2018). Além disso, o fornecedor não deve apenas fornecer um produto com qualidade, mas também oferecer um serviço que agregue valor ao produto, pois, a prestação de serviços também faz parte do escopo de eficiência da gestão da cadeia de suprimentos, simultaneamente com o êxito na entrega do material. Igualmente, os fornecedores devem demonstrar capacidade tecnológica para auxiliar as atividades de pesquisa e desenvolvimento dos fabricantes (Shokri et al., 2010).

A globalização fez com que vários setores industriais enfrentassem adaptações para atender mercados com elevados níveis de requisitos. A expansão da oferta de produtos gerou competições em escala global e a necessidade de redução de preços. Algumas dimensões como qualidade e custo, que antes eram determinantes de vantagem competitiva, passaram a ser requisitos básicos

para entrar no mercado. Assim sendo, há a necessidade de desenvolvimento de novas fontes de vantagem competitiva por empresas de vários setores (Pires, 2016). Ainda nesse contexto, emerge a indústria 4.0, que representa o paradigma da quarta etapa da industrialização e compreende a integração e aplicação de diferentes soluções tecnológicas no estabelecimento da Internet of Things (IoT) e Sistemas Ciber-Físicos (SCF), de modo que os objetos e processos de negócios sejam integrados, tornando o ambiente inteligente (Duarte & Cruz-Machado, 2018). Inclusive, há o surgimento do conceito *supply chain 4.0*, que representa a utilização de soluções para facilitar o gerenciamento de vários segmentos, como agendamentos e gerenciamento de tarefas, gerenciamento de inventário, armazém e estratégia de transporte em toda a cadeia produtiva (Chandra, 2019). Portanto, nesse contexto, a gestão da cadeia de suprimentos não é representada apenas pelas atividades relacionadas ao controle de pedidos e movimentação de mercadorias. Mas sim, engloba a gestão de uma quantidade significativa de atividades complexas, que precisam ser coordenadas e rastreadas (Büyüközkan & Göçer, 2018).

A digitalização é uma das tecnologias que possibilita o desenvolvimento da próxima geração de cadeia de suprimentos, oferecendo flexibilidade e eficiência. Além da digitalização, a integração entre os elos da cadeia passou a ser essencial, uma vez que promove o desenvolvimento de estratégias colaborativas e sincronizadas entre fornecedores e fabricantes (Sancha et al., 2015). Essa integração é amplamente relevante no aperfeiçoamento do desempenho das empresas membros, pois, o planejamento individual sem levar em conta as parcerias com fornecedores pode resultar em bens e níveis de serviços com custos não competitivos, o que pode afetar a rentabilidade de longo prazo (Bettinger et al., 2017). Portanto, as pressões competitivas podem ser minimizadas através do desenvolvimento de estratégias de gerenciamento da base de fornecimento, na qual os fornecedores podem auxiliar na melhoria de áreas críticas do fabricante (Su & Gargeya, 2016).

A seleção de fornecedores é um dos processos de tomada de decisão mais importantes no âmbito do gerenciamento da cadeia de suprimentos. O objetivo dessa seleção é encontrar o fornecedor adequado que possa fornecer ao comprador os produtos ou serviços de qualidade certa pelo preço certo, nas quantidades certas e no momento certo (Taherdoost & Brard, 2019). Conforme relatado por De Boer et al. (2001) e Aissaoui et al. (2006), várias etapas de tomada de decisão compõem o processo de seleção de fornecedores. Primeiramente é necessário definir o que se pretende alcançar por meio da seleção de fornecedores, sendo que os tomadores de decisão devem identificar as necessidades de compra e quais alternativas estão disponíveis. Em seguida, é necessário formular os critérios, que podem ser quantitativos ou qualitativos. Na etapa de qualificação, o objetivo é eliminar os candidatos ineficientes e reduzir o conjunto de todos os fornecedores para um pequeno número. Por último, um ou mais fornecedores são selecionados e os pedidos são alocados entre eles.

Portanto, a necessidade de avaliar múltiplos fornecedores leva em consideração um conjunto de critérios, os quais geralmente possuem diferentes pesos e envolve especialistas de diferentes áreas funcionais da empresa, como qualidade, compras e logística, configurando um problema de decisão em grupo. Nesse contexto o conflito de decisão surge em vários níveis gerenciais, tornando difícil a

tomada de decisão. Assim sendo, a seleção de fornecedores deve ser abordada como um problema de decisão multicritério (Yu et al., 2019).

A tomada de decisão multicritério *Multicriteria Decision Making* (MCDM) é um ramo da pesquisa operacional que permite a realização de avaliações por gestores (ou especialistas) de acordo com o desempenho de um conjunto de alternativas em ambientes de múltiplos critérios. Um de seus objetivos é fornecer abordagens para classificação global de alternativas a fim de encontrar uma solução ideal de acordo com o desempenho individual destas alternativas em múltiplos critérios de avaliação (Jia & Liu, 2018). De acordo com Sierra et al. (2018), o processo de avaliação multicritério geralmente é composto por quatro etapas. Primeiramente, os critérios e alternativas são definidos. Em seguida, os pesos dos critérios que integram a estrutura de avaliação são determinados. Depois disso, as diferentes alternativas são avaliadas em relação a cada critério. Por fim, a pontuação global das alternativas é calculada considerando seu desempenho individual em cada critério, bem como seus pesos. Várias técnicas de decisão multicritério tem sido utilizadas no contexto da cadeia de suprimento, incluindo *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Analytic Network Process* (ANP), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) (Hodgett, 2016).

Dentre as técnicas aplicadas para apoiar a seleção de fornecedores, aquelas baseadas em lógica *fuzzy* vêm ganhando destaque na última década. Nos estudos de revisão da literatura sobre as abordagens de tomada de decisões para avaliação e/ou seleção de fornecedores Ho et al. (2010), Chai et al. (2013) e Govindan et al. (2013), foi constatada a vasta utilização da lógica *fuzzy*, principalmente em abordagens combinadas ou integradas a métodos de tomada de decisão multicritério. A ampla adoção dessas técnicas parece estar relacionada ao fato de serem adequadas a situações de decisão sob incerteza, caracterizadas pelo uso de variáveis qualitativas, julgamentos subjetivos e imprecisos (Alcântara, 2016).

De forma a caracterizar o problema de pesquisa, o presente estudo realizou levantamento bibliográfico de diversos estudos de revisão sistemática publicados nos últimos anos que discutiram fatores pertinentes ao processo de tomada de decisão para seleção de fornecedores. Foram encontrados 15 artigos que apresentam revisões sistemáticas da literatura sobre esse tema. A Tabela 1 sintetiza esses estudos.

Tabela 1: Artigos de revisão relacionados à seleção de fornecedores

Proposto por	Horizonte de tempo	Número de artigos revisados	Fatores considerados
Ho et al. (2010)	2000-2008	78	Critérios e técnicas quantitativas.
Wu e Barnes (2011)	2001-2011	140	Fases do processo de seleção, técnicas quantitativas, instituições de ensino, periódicos e países.
Chai et al. (2013)	2008-2012	123	Técnicas quantitativas e periódicos.
Genovese et al. (2013)	1987-2010	28	Critérios, países, periódicos, técnicas quantitativas e tipo de aplicação.
Igarashi et al. (2013)	1991-2011	60	Critérios, contexto da cadeia de suprimentos, fases do processo de seleção, perspectiva teórica e tipo de pesquisa.
Govindan et al. (2013)	1997-2011	33	Critérios, setor de aplicação e técnicas quantitativas.
Zimmer et al. (2016)	1997-2014	143	Critérios, dimensões da sustentabilidade, fases do gerenciamento sustentável de fornecedores, forma de validação dos resultados, países, periódicos, situação de decisão, <i>sourcing</i> , setor de aplicação, técnicas quantitativas, tipo de dados e tipo de aplicação.
Nallusamy et al. (2015)	2004-2014	52	Critérios, setor de aplicação e técnicas quantitativas.
Yıldız e Yayla (2015)	2001-2014	91	Critérios, setor de aplicação e técnicas quantitativas.
Wetzstein et al. (2016)	1990-2015	221	Abordagem operacional, critérios, estratégia ambiental, estratégias de seleção de fornecedores, estágios do processo de P&D, periódicos, origem geográfica e técnicas quantitativas.
Araújo et al. (2017)	1973-2015	119	Critérios, fases do processo de seleção, periódicos, metodologia, setor do projeto e técnicas quantitativas.
Simić et al. (2017)	1966-2016	54	Técnicas quantitativas.

Ocampo et al. (2018)	2006-2016	244	Periódicos, técnicas quantitativas e temas.
Zhang et al. (2020)	2009-2020	193	Critérios, periódicos, países, setor e técnicas quantitativas.
Chai e Ngai (2020)	2013-2018	95	Técnicas quantitativas.

Fonte: Elaborado pelo autor

Os estudos de revisão mostrados na Tabela 1 auxiliaram na caracterização a respeito de distintos elementos pertinentes a este estudo. Chai e Ngai (2020) foram os primeiros autores a identificar estudos que utilizem técnicas baseadas em *hesitant fuzzy sets* para apoiar o processo de seleção de fornecedores em situações de incerteza e hesitação. Além disso, o uso de expressões linguísticas para representar os julgamentos dos decisores no processo de avaliação e seleção de fornecedores foi identificado por Zhang et al. (2020) em modelos que adotam *intervalvalued intuitionistic uncertain linguistic set*, *hesitant fuzzy linguistic term set*, *the cloud model theory* e *interval 2-tuple linguistic variable*. Outra constatação é que nenhum dos estudos de revisão analisados encontrou modelos de decisão para seleção de fornecedores voltados a cadeias de suprimentos digitais, ou seja, modelos que incorporem requisitos advindos do contexto da indústria 4.0 ao processo de tomada de decisão.

Com o propósito de complementar os estudos de revisão sistemática, bem como identificar e caracterizar os modelos desenvolvidos para lidar com a seleção de fornecedores em cadeias de suprimentos digitais (ou *smarts*), este estudo realizou uma revisão sistemática que abrangeu artigos publicados em diversas bases de dados. Baseando-se em (Brandenburg et al., 2014; Zimmer et al., 2016; Lima Junior & Carpinetti, 2017; Lima Junior & Carpinetti, 2017), foram aplicadas diretrizes para elaboração de revisão sistemática a fim de mapear modelos quantitativos de apoio a tomada de decisão no processo de seleção de fornecedores no ambiente da indústria 4.0. Aplicados os procedimentos, foram encontrados 14 estudos, incluindo Büyüközkan e Göçer (2017), Büyüközkan e Göçer (2018), Sachdeva et al. (2019), Büyüközkan e Göçer (2019), Ghadimi et al. (2019), Kusi-Sarpong et al. (2019), Liao et al. (2019), Tozanli et al. (2019), Hasan et al. (2020), Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020), Torkayesh et al. (2020), Çalık (2020) e Zekhnini et al. (2020).

Assim sendo, com base nos resultados encontrados pelos estudos de revisão da literatura, e por meio da revisão sistemática complementar realizada por este estudo, constatou-se que:

- a) Há carência de estudos que utilizem critérios de avaliação de fornecedores relacionados a requisitos advindos da indústria 4.0. Também não foram encontrados modelos que suportem o processo de escolha de critérios de avaliação de fornecedores considerando suas inter relações com requisitos da indústria 4.0.
- b) Além disso, são raros os estudos que consideram a dificuldade de coletar dados sobre o desempenho dos fornecedores como um fator de decisão para escolha dos critérios. Ainda que os modelos de decisão propostos por Wu e Barnes (2010), Lima Junior e Carpinetti

(2016), Osiro et al. (2018) considerarem esse fator, nenhum deles é voltado ao contexto da indústria 4.0;

- c) É escassa na literatura a proposição de modelos que permitem aos tomadores de decisão utilizar dois ou mais termos linguísticos, bem como expressões linguísticas, para expressar seus julgamentos. Em diversos problemas de decisão, ao estimar o grau de uma alternativa para satisfazer um atributo, há casos em que os tomadores de decisão não têm certeza sobre um valor, mas tem hesitação entre vários valores possíveis (Xu, 2014). Nesse contexto, as expressões linguísticas podem ser usadas pelos decisores para aumentar a flexibilidade e expressividade das informações linguísticas (Rodriguez et al., 2012).

O desenvolvimento de um novo modelo de decisão, baseado na combinação de *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set* (HFLTS) com o método *Quality Function Deployment* (QFD), para apoiar a seleção de critérios e fornecedores no ambiente da indústria 4.0 pode contribuir para o preenchimento das lacunas apresentadas. O HFLTS foi desenvolvido Rodriguez et al. (2012), e possibilita usar dois ou mais termos linguísticos, e expressões linguísticas como “entre alto e baixo”, “no mínimo médio” e “no máximo alto” para representar os julgamentos dos decisores em relação a determinado requisito, critério ou alternativa (Rodriguez et al., 2012). Além do mais, a utilização das matrizes do QFD possibilita escolher critérios considerando a importância dos requisitos relacionados e a intensidade de relacionamento entre requisitos e critérios. Essas matrizes também podem ser usadas para avaliar a dificuldade de coleta de dados sobre o desempenho do fornecedor em cada critério, assim como avaliar as pontuações das alternativas de fornecimento. Ademais, o método HFLTS-QFD torna possível considerar pesos diferentes para os julgamentos dos decisores conforme seu nível de conhecimento técnico e experiência. Dessa maneira, ainda que as características descritas fazem do método HFLTS-QFD uma opção de uso para preencher as lacunas indicadas, não foi encontrado na literatura nenhum modelo de decisão para seleção de fornecedores baseado nesta técnica.

A partir da caracterização do problema de pesquisa, o objetivo geral deste trabalho é propor e aplicar um modelo de decisão para apoiar a escolha de critérios e a avaliação de fornecedores para seleção destes, com base na técnica HFLTS-QFD, considerando um conjunto de critérios definidos a partir de requisitos advindos da indústria 4.0. Por conseguinte, os objetivos específicos são:

- a) Realizar revisão sistematizada da literatura acadêmica sobre o uso de técnicas quantitativas de apoio à seleção de fornecedores no ambiente da indústria 4.0;
- b) Desenvolver um modelo conceitual que oriente o processo de tomada de decisão para seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0, a partir de uma sequência lógica de atividades inter-relacionadas;
- c) Implementar um modelo computacional baseado no modelo conceitual proposto e na técnica HFLTS-QFD;
- d) Aplicar o modelo em um caso ilustrativo;

- e) Realizar testes de análise de sensibilidade, a fim verificar como as saídas do modelo se comportam em diferentes cenários de decisão.

A metodologia adotada para satisfazer os objetivos propostos foi definida de acordo com a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), esta pesquisa pode ser caracterizada como uma pesquisa quantitativa axiomática normativa, baseada em modelagem e simulação computacional. As pesquisas envolvendo modelos quantitativos baseiam-se na hipótese de que podemos construir modelos que explicam o comportamento de processos reais ou que capturam problemas de decisão enfrentados por gestores em processos operacionais reais. Dessa forma, modelos matemáticos podem ser desenvolvidos, analisados e testados para se analisar a relação causal entre variáveis de entrada e saída. Isto significa que a relação causal e quantitativa entre as variáveis do modelo pode servir para prever o comportamento dos processos ao invés de se restringir às explicações das observações feitas (Bertrand & Fransoo, 2002). A categoria axiomática, se refere a pesquisa que se preocupa em obter soluções por meio de um modelo existente na literatura e certificar que essas soluções forneçam *insights* sobre a estrutura do problema conforme definido no modelo. Além disso, produz conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis no modelo, com base em suposições sobre o comportamento de outras variáveis no modelo (Bertrand & Fransoo, 2002). Quanto à terminologia normativa, se refere ao desenvolvimento de ações para melhorar os resultados disponíveis na literatura existente e encontrar uma solução ótima para um problema definido. Por fim, a simulação diz respeito a utilizar certas técnicas matemáticas aplicadas em computadores que permitem replicar o comportamento de um sistema real por meio de um modelo (Fávero & Belfiore, 2019).

Os procedimentos de pesquisa utilizados no trabalho podem ser agrupados em cinco etapas, revisão bibliográfica, revisão sistemática dos modelos prévios para seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0, desenvolvimento do modelo quantitativo, aplicação em um caso ilustrativo e análise de sensibilidade. Essas etapas são descritas a seguir:

- a) A primeira etapa inicia pela revisão bibliográfica sobre indústria 4.0, seleção de fornecedores, bem como métodos multicritério de tomada de decisão, a partir de livros e artigos de periódicos científicos internacionais. Devido à necessidade de abranger estudos publicados em diversos periódicos relevantes, a revisão bibliográfica foi realizada nas bases de dados internacionais Science Direct, Emerald Insight, IEEE Xplore®, Scopus, Springer Nature e Taylor & Francis, como também, na ferramenta Google Scholar. As principais palavras-chave utilizadas no campo de pesquisa foram *“industry 4.0”*; *“Internet of Things”*; *“Supply Chain 4.0”*; *“procurement 4.0”*; *“Supplier Selection”*; *“Multicriteria decision-making”*. Não obstante, a revisão nas bases também possibilitou a elaboração da listagem de critérios e requisitos para apoiar a construção do modelo conceitual HFLTS-QFD;
- b) Na segunda etapa, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sistemática para caracterizar os modelos de decisão para selecionar fornecedores no contexto da indústria 4.0. Esse levantamento permitiu identificar limitações nos modelos existentes e apontar lacunas de pesquisa relacionada ao tema;

- c) Na terceira etapa, foi desenvolvido o modelo multicritério proposto por este estudo, incluindo o desenvolvimento do modelo conceitual e a implementação computacional do HFLTS-QFD (Osiro et al., 2018) no *software* Microsoft Excel. Os recursos do Excel o tornam ideal para esse fim, em virtude da interface amigável, manipulação flexível de dados, funções matemáticas integradas e gráficos instantâneos (Brown, 2000);
- d) A aplicação do modelo desenvolvido foi realizada na quarta etapa por meio de um caso ilustrativo utilizando dados simulados;
- e) Na quinta etapa, a análise de sensibilidade verificou o impacto da introdução de pequenas alterações nos parâmetros de entrada específicos sobre os resultados (Chen et al., 2010);

1.1 Estrutura da dissertação

Este estudo está organizado da seguinte forma:

- A seção 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre assuntos relacionados a indústria 4.0, seleção de fornecedores, métodos multicritério de tomada de decisão e método HFLTS-QFD. Além disso, são apresentados o referencial teórico a respeito de modelos de decisão para seleção de critérios e a pesquisa bibliográfica sistemática para caracterizar os modelos de decisão para selecionar fornecedores no contexto da indústria 4.0;
- A seção 3 é apresentado o modelo conceitual HFLTS-QFD;
- A seção 4 é exibida a aplicação do modelo HFLTS-QFD em um caso ilustrativo utilizando dados simulados;
- A seção 5 apresenta a análise de sensibilidade do modelo proposto;
- Por fim, são apresentadas as conclusões do estudo, destacando as limitações da aplicação do modelo proposto e as oportunidades de pesquisa futura.

2. Referencial Teórico

2.1 Evolução do Processo de Compras

Algumas das principais atividades de suporte produtivo e logístico são executadas pelo setor de compras (Pooler, Pooler, & Farney, 2004). Esse detém a responsabilidade da criação de valor através da aquisição de suprimentos, além de realizar o controle eficiente dos custos por meio da gestão operacional e estratégica de atividades relacionadas (Thruilogachantar & Zailani, 2011). As pesquisas e práticas no gerenciamento de compras e suprimentos evoluíram ao longo do tempo. Em virtude do advento de novas tecnologias, houve transformações no escopo/responsabilidade da função de compras, como também, em sua definição (Gadde & Wynstra, 2018). Nesse sentido, Gadde e Wynstra (2018) definem o gerenciamento de compras como “o gerenciamento de recursos externos da empresa de modo que o fornecimento de todos os bens, serviços, capacidades e conhecimentos necessários para executar e manter gerenciamento das atividades primárias e de suporte da empresa seja garantido nas condições mais favoráveis”. O processo de transformação da função de compras pode ser idealizado a partir do esquema proposto por Glas e Kleemann (2016). Os autores desenvolveram um diagrama com as curvas de evolução do uso de tecnologias

da informação no processo de compras. Na Figura 1, os eixos são representados pela profundidade de integração entre as organizações e o potencial de automação de todo o processo de compras.

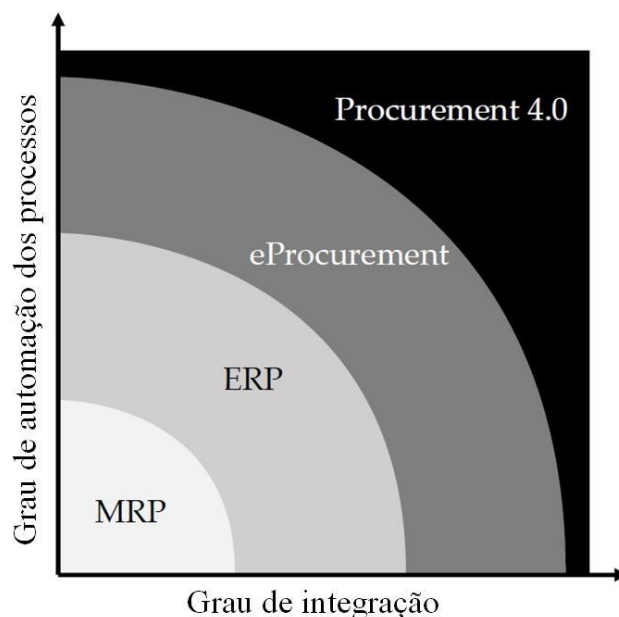


Figura 1: Evolução dos sistemas de tecnologia da informação no processo de compras

Fonte: adaptado de Glas e Kleemann (2016, p. 60).

Antes da década de 1970, a função de compras foi caracterizada pela inexistente cooperação com fornecedores. Era reconhecida somente como fonte de suprimento para atividades operacionais, além de ser a principal responsável pela redução de custos de aquisição (Thru-logachantar & Zailani, 2011; Gadde & Wynstra, 2018). Já o setor comercial, preocupava-se somente com a venda de produto acabado. Em vista disso, a função de compras era considerada uma subfunção irrelevante (Poissonnier, 2017). A aplicação de tecnologia da informação nas organizações se desenvolveu a partir da década de 1970. Naquela época a demanda por materiais da produção era estruturada utilizando o sistema eletrônico nomeado *Material Requirements Planning* (MRP). O sistema era limitado quanto à integração dos departamentos internos, como produção, gerenciamento de materiais e/ou compras (Glas, & Kleemann, 2016). Outro contexto que incentivou a alteração na função de compras, ainda na década de 1970, foram as transformações econômicas caracterizadas pelo aumento da disputa por novos mercados, das expectativas do consumidor, como também, o advento de novas tecnologias (Cho et al., 2019). Esse cenário foi caracterizado por uma forte integração empresarial por meio dos sistemas *Enterprise Resource Planning* (ERP). O objetivo desses sistemas era fornecer uma base única para todas as funções de negócios de uma empresa, e a funcionalidade era focada na administração e suporte de tarefas operacionais (Glas, & Kleemann, 2016).

O próximo estágio do uso de tecnologia da informação em compras foi estabelecido na década de 1990, com o conceito de *e-Procurement*. Esse termo foi conceituado por Tatsis et al. (2006) como “a integração, gerenciamento, automação, otimização e ativação do processo de compras de uma organização, usando ferramentas e tecnologias eletrônicas e aplicativos baseados na Web”. Os

principais benefícios do *e-Procurement* são o aumento do poder de barganha da empresa de compras frente aos fornecedores, redução de despesas administrativas por meio da automatização de processos, melhoria do fluxo de comunicação e informação, tempo de ciclo de pedidos mais curtos e conseqüentemente redução do nível de estoque, como também, a possibilidade de construir relacionamento a longo prazo com os fornecedores (Tatsis et al., 2006). Da mesma forma, *e-Procurement* também está relacionado com a redução do número de fornecedores, e foco nos fornecedores mais conectados e interessados em alianças estratégicas (Paesbrugghe et al., 2017). Por meio dessas alianças, os gestores podem envolvê-los em programas de desenvolvimento específicos (Mogre et al., 2017).

No século XXI, a gestão de compras e suprimentos passou a desempenhar um papel de destaque nas organizações. A função de compras não se limita mais em obter o material certo, mas também na quantidade certa, no tempo e local adequados (Thrulogachantar & Zailani, 2011). Atualmente, os clientes estão mais rigorosos no estabelecimento de seus requisitos. Há a reivindicação de flexibilidade no prazo de entrega e exigência de adaptação e personalização dos processos de gestão para atender simultaneamente os requisitos de vários clientes (Thrulogachantar & Zailani, 2011). Há, inclusive, a preocupação com o gerenciamento do fluxo físico e de informações, de modo a sincronizar as decisões de suprimento e planejamento da produção com as necessidades de atendimento da demanda, com o objetivo de cometer a diminuição de estoques e melhorias nas respostas aos clientes (Filho & Alberto, 2006).

Por fim, em respeito ao último estágio de desenvolvimento da função de compras, Bäckstrand et al. (2019) relatam que no cenário previsto da gestão de compras e suprimento, a maioria das decisões sobre fornecimento será automatizada, incluindo atividades anteriormente consideradas estratégicas. Esse estágio de uso tecnologia da informação em compras é nomeado como *Procurement 4.0*, e envolve a automação, digitalização e integração dos dados na cadeia de suprimento. Além de compreender uma variedade de processos e mudanças dentro da empresa à medida que se empenha para desenvolver novas proposições de valor e incorporar o gerenciamento de fornecedores dentro do *software* de compra (Bag et al., 2020). Embora já existam possibilidades técnicas inovadoras para automatizar e digitalizar processos de compras, o potencial de muitas empresas ainda não foi esgotado. O uso de tecnologias digitais na função de compras e a Indústria 4.0 oferecem às empresas muitas opções de otimização, incluindo aumento da produtividade e alívio das atividades rotineiras de compras, liquidez aprimorada, previsão de demanda com ótimo custo-benefício e atendimento de pedidos, criando transparência, melhorando a prestação de serviços e reduzindo o estoque (Zafari & Teuteberg, 2018). O tópico *procurement 4.0* será abordado com maior profundidade na seção 3.2.4. Antes disso, são apresentados alguns conceitos fundamentais sobre a indústria 4.0.

2.2 Indústria 4.0

O controle do processo de manufatura de maneira independente, a combinação de tecnologias e a integração de informações, de modo a viabilizar a gestão operacional além dos limites organizacionais, são alguns dos fatores que permeiam a definição do conceito de indústria 4.0 (Erol

et al., 2016; Glas & Kleemann, 2016). O termo “indústria 4.0” surgiu pela primeira vez em um artigo publicado pelo governo alemão em 2011, como forma de apresentar a estratégia de alta tecnologia para 2020 (Zhou et al., 2015). Previamente ao vislumbre desse elevado nível de desenvolvimento industrial, a história revelou o advento de algumas revoluções no modo de produção. A primeira revolução foi estabelecida pela invenção da máquina a vapor e ficou marcada pela constituição das bases da industrialização. A segunda revolução foi definida pelo surgimento da eletricidade e produção em massa. A terceira revolução é delineada pelo uso dos computadores, Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) e surgimento da automação industrial. A quarta revolução fornece base para mudanças radicais, que podem envolver o uso de conexões de redes sem fio, tecnologias cibernéticas, automação integrada e baseada em computação em nuvem, permitindo assim a construção de fábricas cada vez mais inteligentes (Dalenogare et al., 2018; Luthra & Mangla, 2018).

O desenvolvimento da tecnologia da informação possibilitou o compartilhamento de grande quantidade de informações e dados ao longo da cadeia de suprimentos. As empresas passaram a perceber que a digitalização cria um senso de proximidade em relação aos processos além de impactar na aquisição da vantagem competitiva (Büyükköçkan & Göçer, 2018). Nesse cenário, o grau de compartilhamento de informações também tem impacto positivo no desempenho. De acordo com Fuchs et al. (2018), as empresas que frequentemente trocam informações com fornecedores e clientes são mais flexíveis e confiáveis, e alcançam resultados de desempenho mais altos do que empresas menos abertas ao compartilhamento de informações. Contudo, segundo Glas e Kleemann (2016), além da indústria 4.0 não se limitar à dimensão técnica de digitalização e compartilhamento de informações, a base para explicar os negócios na era digital ainda é fraca, sendo difícil analisar mais detalhadamente os efeitos da Indústria 4.0 sobre as diferentes áreas funcionais das empresas. Essa análise é ainda mais incerta quando se considera que as revoluções industriais anteriores tiveram o seu efeito principal no chão de fábrica, enquanto a Indústria 4.0 supostamente afeta também outros departamentos (Schuh et al., 2014).

A indústria 4.0 é definida por Pfohl et al. (2015) como “a soma de todas as inovações disruptivas derivadas e implementadas em uma cadeia de valor para abordar as tendências de digitalização, autonomização, transparência, mobilidade, modularização, colaboração em rede e socialização de produtos e processos”. Nesse enquadramento, para Shafiq et al. (2015) alguns dos objetivos da indústria 4.0 incluem a possibilidade de adaptação automática e flexível da cadeia de produção as mudanças de requisitos. Garantir o rastreamento e autoconsciência de peças e produtos, bem como sua comunicação com máquinas e outros produtos. Aperfeiçoar os paradigmas de interação homem-máquina, incluindo coexistência com robôs ou maneiras radicalmente novas de interagir e operar fábricas. Por fim, favorecer o surgimento de novos tipos de serviços e modelos de negócios que contribuem para mudar as formas de interação da cadeia de valor.

Para Chen et al. (2008), o potencial tecnológico da indústria 4.0 é caracterizado pela interoperabilidade, que é nada mais que a capacidade de dois sistemas se entenderem e usarem a funcionalidade um do outro. O ideal é que essa integração possa ocorrer nos níveis de dados, serviços e processos. De outra forma, Kagermann et al. (2013) complementam que a indústria 4.0

é representada por três tipos de integração: horizontal através das redes de valor, vertical com os sistemas de manufatura em rede, e por fim, integração digital em todo o ciclo de vida do produto. A integração horizontal em toda a rede de valor se refere à integração dos vários sistemas utilizados nas diferentes etapas do processo de manufatura, e planejamento de um negócio. A ideia é que elementos tangíveis e intangíveis possam fluir facilmente entre as diferentes empresas ao longo da cadeia de suprimento. A integração vertical refere-se à integração de vários sistemas físicos e de informação nos diferentes níveis hierárquicos com o propósito de criar um sistema de fabricação flexível e reconfigurável. Por fim, a integração digital em todo o ciclo de vida do produto diz respeito aos objetivos da integração horizontal e vertical em conjunto, e tem como premissa a oferta de suporte na aquisição de matéria-prima, fabricação e uso do produto até o fim de sua vida útil (Duarte & Cruz-Machado, 2018).

A combinação de tecnologias da internet com tecnologias orientadas para o desenvolvimento de objetos “inteligentes” (máquinas e produtos) possibilita do ponto de vista do mercado, que as empresas ofereçam novas soluções digitais para os clientes, como serviços baseados na Internet incorporados em produtos. Do ponto de vista operacional, viabiliza a redução dos tempos de configuração, custos de mão-de-obra e material e tempos de processamento, resultando em maior produtividade dos processos de produção (Dalenogare et al., 2018). Nesse sentido, as principais tecnologias que possibilitam esses aperfeiçoamentos e que caracterizam a indústria 4.0 são: sistemas cyber-físico, IoT, *big data*, *big data analytics*, impressão 3D, computação em nuvem (Narula et al., 2019), internet de serviços, modularização e robótica, realidade aumentada, realidade virtual (Dallasega et al., 2018), Inteligência Artificial (IA), tecnologia de telemática, *blockchain* (Torbacki & Kijewska, 2019), computação quântica, plataformas S&OP, *omni-channel* e *automated e-sourcing* (Arenkov et al., 2019). Juntamente, há outras tecnologias e conceitos já conhecidos que foram incorporados ao conceito de indústria 4.0, tais como automação, *Radio Frequency Identification* (RFID), nanotecnologia, ERP, *business intelligence*, sistemas de otimização, digitalização, tecnologias de sensores, *Machine-to-Machine* (M2M) (Frederico et al., 2019), simulação e prototipagem (Kamble, Gunasekaran & Dhone, 2019).

Prest e Sopher (2016) investigaram oito tecnologias emergentes que estão intimamente relacionadas à transformação digital e ao desenvolvimento de cadeia de suprimentos 4.0. A pesquisa envolveu um total de 900 especialistas de diferentes setores da indústria. Uma das principais observações destacadas pelos especialistas foram que as principais tecnologias que podem ser fonte de disruptiva e vantagem competitiva no futuro são: robótica e automação, ferramentas de otimização de inventário e rede, sensores e identificação automática, e análise preditiva. Todavia, um dos desafios da cadeia de suprimentos para implementar com êxito essas tecnologias é o acesso à força de trabalho qualificada.

Ainda em respeito aos desafios, por meio de uma pesquisa com proprietários de Pequenas e Médias Empresas (PME) dos Estados Unidos, foi constatado que 77% não tinham planos de implementar sensores inteligentes ou qualquer tipo de tecnologia relacionada a IoT (Calatayud et al., 2019). Isso vem de frente com o fato de que as PME possuem pouca familiaridade com os novos paradigmas

de produção e cadeia de suprimentos, tornando-as menos propensas a investir em novas tecnologias. O baixo nível de digitalização das PME e a tendência para a adoção de tecnologias relacionada a indústria 4.0 em grandes fabricantes e fornecedores pode impedir o aproveitamento total dos benefícios da integração horizontal e vertical ao longo da cadeia de suprimentos (Calatayud et al., 2019).

Do mesmo modo, a Indústria 4.0 é relativamente nova para os países em desenvolvimento, uma vez que historicamente esses países são focados na comercialização de *commodities* e adoção de tecnologias para aumento da produtividade, ao invés de tecnologias orientadas para diferenciação de produtos. Dessa forma, a adoção de tecnologias mais avançadas torna-se desafiadora (Dalenogare et al., 2018). O desenvolvimento da indústria 4.0 nesses países sofre impedimentos estruturais no setor de logística, principalmente no transporte terrestre, a menos que seja tratado do ponto de vista político, esses impedimentos podem se tornar barreiras à transformação da cadeia de suprimentos (Calatayud et al., 2019).

A eficiência da cadeia de suprimentos determina a competitividade de empresas, bem como a atratividade dos países para novos investimentos. A adoção de novas tecnologias pode melhorar significativamente o desempenho da cadeia de suprimentos (Calatayud et al., 2019). A partir disso, para Zhu et al. (2018) a criação de políticas desenvolvidas pelo governo é essencial para efetiva realização da transição tecnológica. Inclusive, em um contexto microeconômico, a alta gerência é de fundamental importância na execução de políticas organizacionais estratégicas relacionadas a operações de manufatura no contexto da Indústria 4.0 (Luthra & Mangla, 2018). É importante evidenciar que o estabelecimento da Indústria 4.0 concebe preocupações legais e ambientais, que englobam a confidencialidade de informações compartilhadas, agravamento do desequilíbrio ecológico relacionado ao consumo de recursos e problemas climáticos. Logo, o emprego de tecnologias modernas exige o estabelecimento de equilíbrio ambiental, social e econômico, além de novas abordagens éticas, técnicas e legais (Luthra & Mangla, 2018; Müller et al., 2018).

Dado que, para o desenvolvimento de um ambiente de negócio inteligente e processos de negócios integrados compreende a integração e aplicação de diferentes fontes de inteligência. Nas próximas seções serão discutidas as principais tecnologias que caracterizam a indústria 4.0. Sistemas Ciber-Físicos (SCF) e Internet of Things (IoT).

2.2.1 Sistemas Ciber-Físicos

Os Sistemas Ciber-Físicos (SCF) são sistemas embarcados de larga escala, sensíveis ao tempo e controlados em rede por sensores e atuadores que exigem alta interação de tecnologias, com o objetivo de monitorar e controlar o mundo físico (Jiang et al., 2018). Para Monostori et al. (2016), consistem em sistemas de colaboração de unidades computacionais que estão intensamente conectados ao ambiente físico, fornecendo e utilizando serviço de acesso e processamento de dados. Essa integração ocorre por meio de tecnologia de cálculo, comunicação e controle, a fim de realizar a detecção e o controle em tempo real de grandes sistemas de engenharia e serviços de informação (Jiang et al., 2018).

Para melhor entendimento, Bagheri et al. (2015) exemplifica o funcionamento de um SCF na prática. Entretanto, a priori é necessário o entendimento conceitual que um *cyber-twin* ou *digital twin* é uma réplica digital de um item físico, que é armazenado em uma plataforma de nuvem e representa seu status com base na análise de dados e informações sensoriais físicas (Negri et al., 2018). Estabelecido o conceito, o funcionamento do sistema ciber-físico advém da transformação de dados em informações por cada máquina. O *cyber-twin* de cada máquina e seus componentes serão criados para acompanhar as mudanças nas máquinas e componentes similares. Os *cyber-twin* usam algoritmos adaptativos propostos para observar e aprender os padrões de vários regimes de trabalho de cada tipo de máquina. Isso significa que um *cyber-twin* analisa e gera um *status* de funcionamento de sua máquina, além de identificar regimes de trabalho. Ao mesmo tempo, comunica com outros *cyber-twin* para sincronizar o conhecimento adquirido através da rede. Cada *cyber-twin* compartilha conhecimento adquirido de sua máquina com outras máquinas. O objetivo é fornecer a capacidade de auto comparação entre as máquinas. Os dados gerados pela interconexão de grandes números de sistemas fornecem à fábrica autoconsciência em suas operações (Jiang et al., 2018).

Um modelo composto de 5 níveis para desenvolver e implantar um SCF em ambientes de manufatura foi proposto por Lee et al. (2015). O primeiro nível está relacionado a proporcionar conexão avançada de rede para efetuar aquisição de dados em tempo real para máquinas e seus componentes. O segundo nível é definir a ferramenta para efetuar conversão de dados para informações. O nível cibernético é representado no terceiro nível, nesse ponto, a arquitetura de rede atua no *hub* central de informações, as informações estão sendo enviadas para todas as máquinas conectadas na rede. O quarto nível é a geração de conhecimento, aqui, os usuários conseguirão tomar a decisão correta comparando informações. No quinto nível é a realização do controle de *feedback* entre o ciberespaço e o espaço físico, em que os sistemas coletam informações do mundo real e se comunicam com sistemas cibernéticos, que analisam as descobertas por meio de um ciclo de *feedback*.

Todavia, Bagheri et al. (2015) acrescenta que o sucesso da implantação da estrutura proposta depende do desempenho das funções de análise de dados definida no terceiro nível, pois servirá como uma ponte que conecta as funções de aquisição e cognição dos dados. Para Monostori et al. (2016), enquanto o primeiro nível é criado as condições organizacionais e estruturais para a implementação do SCF, os quatro níveis superiores representam maturidade das realizações em relação ao processamento de informação, conhecimento e os aspectos de cooperação e colaboração. Entretanto, para Mitchell e Chen (2014), os SCF apresentam problemas comuns em outros tipos de sistemas, relacionados à disponibilidade, configurabilidade, controle distribuído, operação em tempo real, tolerância a falhas, escalabilidade, autonomia, confiabilidade, segurança, heterogeneidade, federação e dispersão geográfica. Além dos SCF, outra tecnologia característica da indústria 4.0 consiste na IoT, que é discutida a seguir.

2.2.2 Internet of Things

A Internet of Things (IoT) refere-se à interconexão em rede de objetos do cotidiano que são equipados com inteligência onipresente (Xia et al. 2012). O aumento da onipresença da Internet integrando todos os objetos para interação por meio de sistemas incorporados, levará a uma rede altamente distribuída de dispositivos que se comunicam com seres humanos e outros dispositivos (Xia et al. 2012). International Telecommunication Union (2015) define a IoT como “uma infraestrutura global para a sociedade da informação, possibilitando serviços avançados interconectando coisas (físicas e virtuais) com base em tecnologia da informação e comunicação interoperáveis existentes e em evolução”. Para Manavalan e Jayakrishna (2019), o preceito da IoT é conectar os sistemas e dispositivos por meio da internet, os sistemas são conectados com ajuda de sensores e estão cientes do ambiente e são intuitivos em suas ações.

Os dispositivos transmitem uma quantidade enorme de dados. Estando conectados, são mais fáceis de usar e compreendem uns aos outros com a ajuda da rede. Para tanto, as tecnologias IoT são compostas por vários blocos funcionais que facilitam o gerenciamento do sistema e a comunicação com outros dispositivos. O bloco “Dispositivo” possui a função de fornecer atividades de controle, atuação e monitoramento, por meio de troca e/ou coleta de dados com outros dispositivos e aplicativos. O bloco “Segurança” fornece funções de autenticação, autorização, integridade e segurança dos dados. O bloco “Serviços” está relacionado a funções de governança do sistema como, publicação e análise de dados. Além do mais, os sistemas IoT possuem “identidade única” e “integração à rede de informação” (Ray, 2018).

Sobre o contexto histórico do desenvolvimento da IoT, vale mencionar que, inicialmente, a internet foi projetada para realizar transferências de arquivos. A partir de 1983, passou-se a realizar comunicação entre processos. Em seguida, em 1994, com o surgimento da *World Wide Web*, possibilitou-se a computação coordenada e trocas de *e-mail*, de modo que a interface com o usuário foi modificada (Forge, 2016). Já nos anos 2000, a internet era utilizada para comunicação, mais tarde, começou a compartilhar informações úteis, por meio do acesso aos sistemas empresariais. A partir de 2009, a IoT começou a compartilhar informações em tempo real a partir de um acesso remoto. Essa transformação impulsionou as aplicações da tecnologia na indústria e no consumo (Manavalan & Jayakrishna, 2019).

Para Tsiatsis et al. (2019), a IoT está redefinindo processos e práticas de negócios em vários setores da indústria e da sociedade, como energia, manufatura, transporte e saúde. Na indústria, esses dispositivos são usados para coleta, análise e comunicação em tempo real das informações dos processos, produtos e/ou serviços, conferindo valor ao produto. Da mesma forma, são usados na manutenção de equipamentos baseado em monitoramento automatizado da qualidade e na operação autônoma de partes de um processo, como na fabricação de componentes ou irrigação na agricultura (Tsiatsis et al., 2019). Não obstante, Boyes et al. (2018) pontuaram alguns benefícios do uso de tecnologia IoT, como: melhoria na entrega de produtos e serviços, aumento de produtividade, redução de custos com mão de obra, redução do consumo de energia e redução do ciclo de produção sob encomenda. Frederico et al. (2019) acentuam que a maioria das pesquisas

sobre IoT está concentrado nos aspectos técnicos e não gerenciais, são necessárias mais pesquisas sobre estruturas e modelos de IoT que possam fornecer orientação gerencial nas cadeias de suprimentos. Estudos estimam que o impacto econômico potencial total das soluções em IoT estaria na faixa de 3,9 a 11,1 trilhões de dólares por ano em 2025. Isso pode ser comparado ao Produto Interno Bruto (PIB) global projetado pelo Banco Mundial de 99,5 trilhões de dólares norte-americanos em 2025. Ou seja, a IoT pode ter um impacto potencial próximo a 11% da economia mundial total (Tsiatsis et al., 2019).

Por fim, dado que a IoT é umas das tecnologias que auxilia na compreensão de como a informação e a conectividade transforma a gestão de cadeia de suprimentos, no contexto da indústria 4.0, possibilita melhorar a visibilidade, rastreamento e compartilhamento de informações para facilitar o planejamento, controle e coordenação dos processos (Ben-Daya et al., 2017). Na próxima seção será discutido o impacto das tecnologias presentes na indústria 4.0 sobre cadeias de suprimentos.

2.2.3 Supply Chain 4.0

Uma cadeia de suprimentos representa um conjunto de processos e tecnologias aplicadas que suportam o fluxo de bens físicos dos fornecedores aos fabricantes e também combinam serviços de marketing, desenvolvimento de produtos, fabricação e distribuição para o cliente final (Makris et al., 2019). A cadeia de suprimentos tradicional é repleta de atritos, causados principalmente por informações incompletas. Em vista disso, a possibilidade de complicação é alta, podendo ocorrer mudanças inesperadas na demanda e/ou a falta de matérias-primas (Schrauf & Bertram, 2016). A digitalização tem como objetivo diminuir essas ineficiências, transformando a cadeia de suprimentos em um ecossistema integrado e transparente por meio do fornecimento de informações sobre processos, gargalos, interrupções e opções para otimizar os indicadores relacionados ao uso efetivo de recursos, a fim de garantir a redução de custos (Arenkov et al., 2019).

De modo a cobrir a ausência de conceitos na literatura sobre esse assunto, Frederico et al. (2019) propuseram um novo conceito de cadeia de suprimentos no contexto da indústria 4.0. Segundo os autores “*Supply chain 4.0* é uma abordagem transformacional e holística para o gerenciamento da cadeia de suprimentos que utiliza tecnologias disruptivas da Indústria 4.0 para otimizar processos, atividades e relacionamentos da cadeia de suprimentos, a fim de gerar benefícios estratégicos significativos para todos os envolvidos”. Ao mesmo tempo, além do termo “*Supply chain 4.0*”, pesquisadores usam diferentes termos para se referir ao gerenciamento da cadeia de suprimentos na era da indústria 4.0, incluindo *Digital supply network*, *E-Supply Chain*, *E-logistics*, *Logistics 4.0* (Abdirad & Krishnan, 2020), *Digital supply chain* (Büyüközkan & Göçer, 2017), e *Smart supply chain* (Wu et al., 2016).

As empresas que pretendem construir uma cadeia de suprimentos inteligente, devem desenvolver estratégias não apenas baseando-se no modelo de negócio da empresa, mas também nos novos modelos de negócio que surgiram com a digitalização. Os mercados *Business-to-Consumer* (B2C) estão exigindo mais informações sobre chegadas de remessas com atualizações em tempo real. Nas redes *Business-to-Business* (B2B), os produtores esperam informações precisas sobre o status

de seus suprimentos, e essas informações são vinculadas ao planejamento da produção (Schrauf & Bertram, 2016). Nesse cenário, Makris et al. (2019) examinaram a adequação de empresas multinacionais de diferentes setores ao estágio 4.0 de desenvolvimento das cadeia de suprimentos. Os autores identificaram que há maior concentração na introdução do *Big data*, em relação à computação em nuvem e impressão 3D, visto que, essas empresas ainda permanecem céticas em relação à aplicação universal de tecnologias disruptivas junto a seus parceiros. Esses autores complementam que o desenvolvimento da cadeia de suprimentos 4.0 envolverá uma transformação radical da estrutura de TIC, dos processos, equipamentos, bem como no treinamento dos funcionários. Ao integrar os dados em toda a cadeia de suprimentos, em tempo real e frequentemente sem intervenção humana, os prazos de entrega podem ser significativamente reduzidos e o gerenciamento de frete e níveis de estoque otimizado. Além do mais, a troca de informações pode criar melhor valor para um produto, pois os clientes terão acesso ao conhecimento compartilhado na operação (Makris et al., 2019).

Sobre o uso de tecnologias em *supply chains 4.0*, para Hofmann e Rüsç (2017), as unidades telemáticas podem ser usadas para rastrear a localização do frete, bem como analisar os dados relacionados ao estado do veículo, como pressão do ar, temperatura etc. Inclusive, durante o transporte, pode-se aconselhar o motorista com informações sobre tráfego ou clima, permitindo que ele se ajuste o percurso. As ferramentas de simulação podem ajudar a calcular o transporte adequado, de acordo com os requisitos específicos do pedido (por exemplo, tempo). Os processos de transporte podem, portanto, não ser mais planejados individualmente, mas de maneira integrada de ponta a ponta. A longo prazo, a coleta e entrega de produtos podem ser realizados por caminhões autônomos. Inclusive, para Torbacki e Kijewska (2019) também será possível realizar estimativa e monitoramento da poluição do ar a fim de diminuir o consumo de combustível e conseqüentemente as emissões de CO₂. A aplicação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) possibilitará, por exemplo, diminuir a presença de veículos pesados em áreas urbanas.

Alguns dos escopos futuros de promoção da cadeia de suprimentos inteligente diz respeito ao desenvolvimento de dispositivos vestíveis, visibilidade logística, sistemas de execução de manufatura, fábricas inteligentes, veículos autônomos e cadeia de suprimentos sustentável (Menon & Shah, 2019). O desenvolvimento de plataformas digitais é elemento fundamental para constituição de um novo paradigma no gerenciamento da cadeia de suprimento. À medida que a empresa se torna digital, ela tem o potencial de transformar suas cadeias de suprimentos (Yildiz & Parlak, 2019). Entre os obstáculos mais significativos para a cadeia de suprimentos tornar-se 4.0, estão a falta de clareza na idealização do negócios, acesso limitado à capital humano, heterogeneidade das tecnologias (obsolescência prematura, interoperabilidade limitada), barreiras organizacionais internas (silos organizacionais, aversão à experimentos), limitada infraestrutura de transporte e telecomunicação, sistemas de informação atrasados, fronteiras, sistemas tributários e regulamentos comerciais complicados (Calatayud et al., 2019).

2.2.4 Procurement 4.0

Como já abordado na seção 3.1, a função de compras é responsável por garantir a funcionalidade de todos os processos por meio do fornecimento dos bens necessários e serviços para as operações da empresa. A partir disso, as competências da função de compras ampliaram-se devido à necessidade da redução dos custos de armazenamento e de transporte, bem como o encurtamento do tempo de resposta ao mercado e aumento dos requisitos de qualidade (Zafari & Teuteberg, 2018). Em princípio, a função de compras era focada na manutenção de relacionamentos com os fornecedores. O amadurecimento da relação foi liderado pelo surgimento de sistemas de compras eletrônicas capazes de gerenciar o ciclo completo de aquisição de recursos para a empresa. Atualmente, reconhecido como o mais recente estágio de sistema de gerenciamento de compras, o *Procurement 4.0* representa a digitalização e automação aprofundada nas funções da organização e no ambiente do fornecedor (Bag et al., 2020). A necessidade de processos mais simplificados, automatizados, baseados em TIC, tem a finalidade de satisfazer as exigências modernas de compras, que englobam a necessidade de responder de maneira mais rápida e flexível a crescente demanda de produtos. O conceito de *Procurement 4.0* foi estruturado havendo como base a alavancagem do relacionamento com os fornecedores por meio da transformação digital. Essa combinação gera eficiência no processo de compras e simultaneamente melhora a experiência do cliente (Rasanjani et al., 2019). No futuro, com o uso de tecnologias digitais e a indústria 4.0, a função de compras tende a oferecer muitas opções de otimização, incluindo aumento da produtividade, alívio das atividades rotineiras, aperfeiçoamento da liquidez, previsão de demanda mais exata e gestão de pedidos mais efetiva (Zafari & Teuteberg, 2018).

As empresas podem iniciar a jornada de digitalização do gerenciamento de compras e suprimentos por meio da utilização de tecnologias básicas (como a Internet) para execução de compras eletrônicas. No segundo estágio, podem empregar tecnologias mais avançadas para gerenciar transações, reduzindo a carga administrativa e aumentando a eficiência por meio da automação e melhor interconectividade (Srai & Lorentz, 2019). Inclusive, o emprego gradativo de tecnologias disruptivas pode decorrer por meio da combinação de soluções. A empresa pode utilizar técnicas de IA combinadas com big data para dar suporte a processos complexos de tomada de decisão, analisando a enorme quantidade de dados quase em tempo real e destacando as possibilidades mais adequadas (Bienhaus & Haddud, 2018). O uso combinado de robótica e IA podem propiciar o aperfeiçoamento das máquinas, de modo a aumentar a eficiência no manuseio de materiais, automatizando o processo de recebimento, coleta, embalagem e até o envio de produtos, além de fornecer suporte as atividades diárias de negócio e administrativas para liberar tempo para atividades estratégicas (Chandra, 2019).

Ainda nesse contexto, máquinas poderão se comunicar independentemente com outras máquinas e sistemas de gestão de outras empresas e terão a liberdade de tomar decisões repetitivas e/ou complexas, por exemplo, a alteração do tamanho do lote do pedido e reagendamento de pedidos devido a conflitos de datas (Uygun & Ilie, 2018). Inclusive, o advento da impressão 3D permitirá as organizações criar protótipos de peças de reposição ou produtos inteiros. Instrumentos especialmente analíticos, como a análise preditiva, podem usar dados passados para determinar

demandas quase ideais (Klünder et al., 2019). Com o uso de tecnologia cibernética, é necessário desenvolver um sistema seguro para garantir que os dados sejam protegidos e estejam disponíveis no momento certo, no lugar certo, em apoio às atividades de compras (Nicoletti, 2018).

O emprego do *Procurement 4.0* baseia-se em uma plataforma em rede na qual todos os interessados no processo de compras gerenciam em tempo real todos os pedidos de clientes e fornecedores. O sistema de gestão reconhece automaticamente a demanda por um determinado material e geram um pedido de forma independente, de forma que o pedido é transmitido ao respectivo fornecedor sem qualquer intervenção humana (Nicoletti, 2018). As tecnologias e algoritmos inteligentes permitem a agregação, processamento e análise de grandes volumes de dados oriundas de diferentes fontes, possibilitando, entender fornecedores, mercados e clientes, além de prever tendências de mercado e observar os defeitos de máquinas e produtos. Assim, a adoção dessas tecnologias pode permitir que os gerentes tomem decisões assertivas (Nicoletti, 2018). Ademais, o fluxo de informações em tempo real requer tecnologias de sensor apropriadas para monitorar o produto e garantir um controle de fluxo de material ideal. Por meio de soluções baseadas em IoT, é possível capacitar a equipe de compras na gestão de ativos em tempo real sem atrasos no sistema. Essa capacitação auxiliará no aprimoramento da diferença do intervalo de tempo dos dados do fluxo de documentos em comparação com o fluxo de material em tempo real e na redução do número de entregas erradas (Chandra, 2019).

Da Silva e Alves (2019) apontam como potenciais benefícios da adoção de IoT: a possibilidade de analisar várias ofertas de diferentes fornecedores com facilidade e transparência de preços; de pesquisar fornecedores em todo o mundo por meio de aplicativos *e-procurement*, independentemente do idioma, moeda, regulamentos de envio, entre outros; e a liberação de tempo e recurso por meio da automatização dos processos, eficiência de custos, bem como transações concluídas em tempo real. Entretanto, esses autores também pontuaram que o perfil cultural da empresa pode ser, por si só, um entrave à adoção do *e-procurement*, visto que muitas organizações podem ter resistência à mudança.

Sobre o impacto de transformação, Bienhaus e Haddud (2018) identificaram o efeito da digitalização nas compras por meio de uma pesquisa quantitativa orientada a profissionais do departamento de compras, e constataram que as organizações precisam considerar os procedimentos, processos, ferramentas e canais de comunicação na determinação de áreas de melhoria e impactadas pela transformação digital. Tais autores também afirmam que o novo papel de compras no ecossistema da cadeia de suprimentos requer a definição de novas tarefas, papéis e responsabilidades organizacionais e para os funcionários. Além disso, identificaram que as organizações estão cientes desses requisitos, mas primeiramente precisam determinar sua estratégia digital, para depois derivar as ações. Em outra via, a conectividade entre compradores e fornecedores, organizada por meio da digitalização, também levantará questões sobre mecanismos de governança apropriados e considerações de segurança cibernética, incluindo a localização de data centers e centros de compras (Srai & Lorentz, 2019). Diante do exposto, verifica-se a importância de escolher fornecedores alinhados aos requisitos tecnológicos característicos indústria 4.0.

2.2.5 Informações para a tomada de decisão

No contexto da seleção de fornecedores, quando as informações relevantes são de natureza heterogênea, imprecisas e difíceis de processar, torna-se difícil a assertividade nas decisões. Em vista disso, Viet et al. (2018) definiram que as informações úteis às decisões em gestão de cadeia de suprimentos possuem três requisitos, devem ser: precisas, pontuais e detalhadas. Ou seja, precisam refletir a realidade subjacente, serem atualizadas constantemente para atender a demanda em um tempo específico e possuir diferentes níveis de detalhamento. De outra forma, a tomada de decisão pode ser definida como a conversão de informações em ação. Nessa situação, as pessoas não recebem informações, elas criam a partir de suas próprias leituras e relacionamento com os dados e o contexto. O uso das informações é determinado pelas demandas do trabalho, do ambiente social e pela lacuna de conhecimento do indivíduo, pela sua experiência emocional, bem como pela subjetividade. Nesse sentido, a subjetividade permeia o processo de tomada de decisão, que é afetado por aspectos individuais nem sempre de forma consciente (Ribeiro & Cerveira, 2013).

A necessidade de aumentar o volume de dados e a disponibilidade em tempo real requer novas infraestruturas e adaptações ao manuseio de informações (Tupa et al., 2017). As novas tecnologias geradas pelo advento da Indústria 4.0 fornecem aos seres humanos acesso fácil a dados, informações e conhecimento. No entanto, também trazem desafios para as organizações. Para as PME, o principal desafio é ter uma fonte central de dados, enquanto para as grandes empresas a identificação dos dados relevantes é o desafio mais comum (Li et al., 2019). Dessa forma, o investimento na coleta e no compartilhamento de informações por si só não garante um desempenho aprimorado da cadeia de suprimentos (Viet et al., 2018). Atualmente, apesar de haver elevada geração de dados, nem todos possuem a mesma qualidade, valor ou importância para suas demandas específicas. Apesar das empresas estarem investindo em recursos tecnológicos e análise de dados, ainda falta investimento em uma estrutura sistemática de avaliação da qualidade das informações produzidas em um conjunto específico de métodos e um determinado contexto de aplicação (Reis & Kenett, 2018). Inclusive, poucas pesquisas foram dedicadas ao mapeamento e exame do valor das informações extraídas do *Big data* para decisões específicas da cadeia de suprimentos (Viet et al., 2018).

As informações necessárias para monitorar e controlar o sistema de manufatura terão origem em uma infinidade de fontes de dados diferentes, a maioria das informações internas da empresa são geradas a partir de tecnologias de detecção de dados e rastreamento de objetos em armazéns e chão de fábrica (Viet et al., 2018). Exemplo de fonte de dados são as transações realizadas por ERP, dados habilitados para GPS, RFID e máquinas (Hasan et al., 2020); processo de criação do produto, documentação técnica, processo de produção operacional (Gorecky et al., 2014); previsão da demanda e nível de estoque (Viet et al., 2018). Ainda, algumas tecnologias também podem auxiliar na apresentação e coleta de informações, tais como realidade aumentada, luvas inteligentes e *smartphones*. Essas podem ser aplicada nas atividades de manutenção com objetivo de aperfeiçoar a visualização das instruções e aumento do envolvimento do trabalhador, por meio do fornecimento de informações relacionadas ao contexto (Li et al., 2019). Uma vez, caracterizados os

tópicos relacionados à indústria 4.0. Na seção a seguir, serão caracterizados os tópicos relacionados a seleção de fornecedores com o intuito de complementar a temática relacionada a seleção de fornecedores em cadeias de suprimento digitais.

2.3 Seleção de Fornecedores

O gerenciamento da cadeia de suprimentos se concentra na integração dos processos e controle de materiais, informações e tecnologia ao longo da cadeia. Todavia, a atenção central está na gestão do processo de compras. As exigências de desempenho impostas pelo aumento da oferta obrigaram as empresas a buscarem o encurtamento do período decorrido entre o recebimento do pedido do cliente e a entrega do produto (Gomes & Ribeiro, 2013). Diante disso, uma das alternativas para conquistar o aumento da vantagem competitiva é a reestruturação da base de fornecimento. Esse processo é orientado para a seleção de fornecedores de alta qualidade, no qual deseja-se realizar parcerias de longo prazo com o objetivo de melhorar a competitividade (Li et al., 2019). Para Çebi e Otay (2016), os fornecedores que auxiliam na melhoria da competitividade do fabricante incorporam vários benefícios potenciais, como o encurtamento do ciclo de vida dos pedidos, melhoria da qualidade, redução dos níveis de estoque e diminuição de custos de produção.

A seleção de fornecedores é um processo que faz parte da fase de planejamento de compras e trata de escolher o fornecedor conforme requisitos de relacionamento pré-definidos por meio de critérios de avaliação (Taherdoost & Brard, 2019). Se esses critérios forem adequados, é possível incorporar na base de suprimentos empresas fornecedoras com bom nível de competitividade. A seleção de fornecedores também implica em escolher se o suprimento será realizado por fornecedores vigentes ou por novas fontes de fornecimento (Furtado, 2005). Ainda nesse âmbito, Gören (2018) acrescenta que o fabricante pode escolher selecionar seus fornecedores por meio de estratégias de abastecimento único ou abastecimento múltiplo. No primeiro caso, contrata-se um único fornecedor que pode satisfazer todas as demandas dos clientes. No segundo, seleciona-se mais de um fornecedor, sendo necessário definir a quantidade que será fornecida por cada um. O uso de múltiplos fornecedores proporciona maior flexibilidade devido à diversificação dos requisitos totais da organização e promove a competitividade entre fornecedores alternativos (Taherdoost & Brard, 2019).

O grau de excelência dos fornecedores selecionados dependerá dos critérios e métodos utilizados na escolha, bem como do atendimento dos requisitos da organização. Alguns autores propuseram um conjunto de etapas estruturadas para identificar os melhores fornecedores, nas quais geralmente um conjunto de fornecedores são avaliados e reduzidos ao transcorrer de cada etapa utilizando diferentes critérios. Por meio de uma revisão da literatura, Zimmer et al. (2016) desenvolveram a estrutura mostrada na Figura 2, na qual a seleção de fornecedores é destacada como uma etapa inicial do gerenciamento de fornecedores, que também envolve uma série de processos de tomada de decisão independentes, porém inter-relacionados.

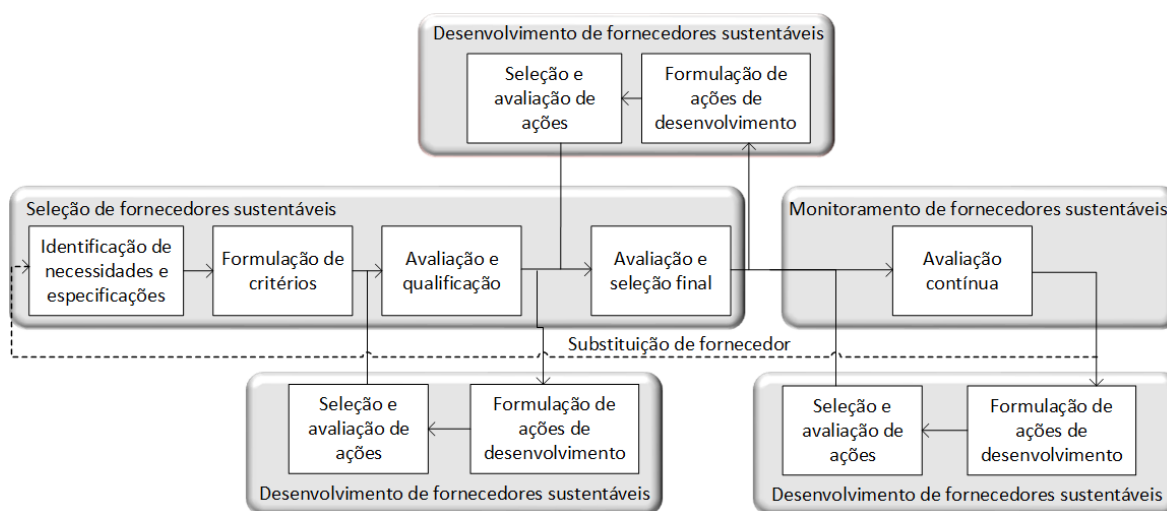


Figura 2: Etapas do gerenciamento de fornecedores

Fonte: Adaptado de Zimmer et al. (2016, p. 3).

Inicialmente, a partir da identificação das necessidades de compra, deve-se definir e ponderar os critérios utilizados para medir o desempenho dos fornecedores nas etapas posteriores. Na etapa de qualificação, as possíveis fontes de abastecimento são avaliadas a fim de verificar quais delas atendem aos requisitos de desempenho estabelecidos pela empresa compradora. Apenas os fornecedores qualificados são considerados na etapa de seleção final, na qual se escolhe quais serão contratados com base em uma avaliação mais detalhada (Zimmer et al., 2016). Após a contratação, inicia-se o monitoramento contínuo do desempenho dos fornecedores com o propósito de verificar se as obrigações contratuais estão sendo cumpridas. Tanto nessa etapa quanto na qualificação e na seleção final, caso o desempenho de um ou mais fornecedores estratégicos esteja abaixo do esperado, a empresa compradora pode optar por investir esforços visando à melhoria de resultados. Se isso ocorrer, surge a necessidade de formular, implantar e avaliar programas de desenvolvimento de fornecedores.

De outra forma, conforme ilustra a Figura 3, De Boer (2017) apresenta três formas de seleção de fornecedores em diferentes contextos. A primeira consiste do fabricante agrupar os possíveis fornecedores. Em seguida, utilizando vários critérios, alguns fornecedores são descartados antes do fabricante enviar os pedidos de propostas, sendo que apenas um pequeno conjunto de fornecedores receberá os pedidos de propostas. Logo, esses fornecedores elaboram e enviam as propostas para o fabricante e, com base na avaliação das propostas, o fornecedor será selecionado. O segundo método consiste no fabricante publicar o pedido de proposta em alguma base de dados pública. Todos os fornecedores da região caracterizada terão acesso ao pedido de proposta, de modo que os fornecedores interessados enviarão as propostas que serão analisadas pelo fabricante. Esse método permite selecionar o fornecedor em uma só vez. No terceiro método, o fabricante anuncia o interesse de compra à sua base de suprimentos. Em seguida, os fornecedores avaliam os critérios do anúncio e enviam propostas de interesse. O fabricante avalia as propostas e reduz o número de candidatos. Em seguida, utiliza de outros critérios para analisar as ofertas e o vencedor final é escolhido.

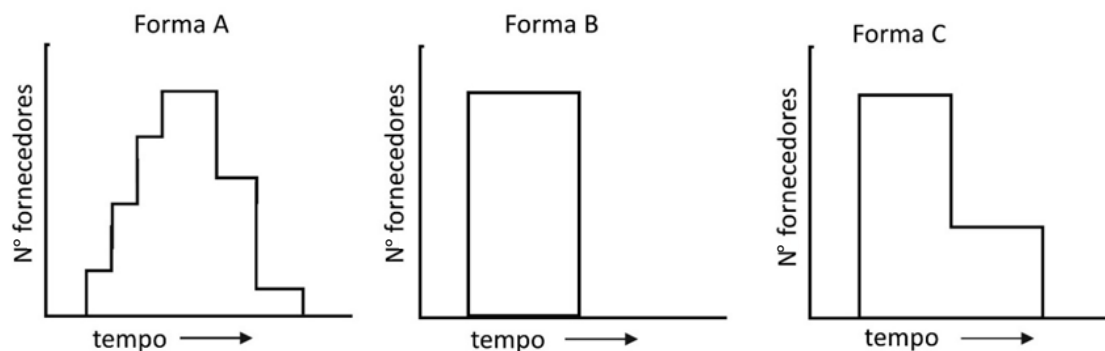


Figura 3: Formas de selecionar fornecedores
Fonte: Adaptado de De Boer. (2017, p. 34)

A seleção de fornecedores competentes é um processo fundamental porque as empresas anseiam por fornecedores confiáveis, com os quais pretende manter relacionamentos de longo prazo (Kellner & Utz, 2019). Tendo isso em vista, a identificação dos critérios, juntamente com os métodos corretos de seleção de fornecedores, são fatores que podem contribuir para o crescimento e a competitividade de uma empresa (Taherdoost & Brard, 2019). Na próxima seção, será discutida importância da escolha adequada dos critérios de apoio à seleção de fornecedores.

2.3.1 Critérios de Seleção de Fornecedores

A definição dos critérios usados na seleção de fornecedores está relacionada ao conjunto de pré-requisitos criado pelo fabricante, por exemplo, o nível de integração operacional entre as empresas, nível de investimento para concretização da relação, tipo de produto que será adquirido ou o nível de proximidade do relacionamento (Furtado, 2005). A complexidade do processo seletivo requer o uso de técnicas para facilitar o processo decisório. Assim, a definição dos critérios torna-se complexa, uma vez que estes devem refletir todas as preferências e *trade-off* entre as opiniões dos gestores envolvidos na decisão (Viana & Alencar, 2012).

Os critérios de seleção podem ser divididos em qualitativos e quantitativos. Os qualitativos, como flexibilidade, nível de serviço e cultura organizacional, são avaliados com base na percepção subjetiva dos tomadores de decisão. Nessa abordagem, além do risco inerente à falta de análise de dados concretos para apoiar a tomada de decisão, há a dificuldade de representar matematicamente os julgamentos dos decisores. Já os critérios quantitativos, como custo, entrega e conformidade do produto, em alguns casos são passíveis de medição, possibilitando assim a análise sistemática dos dados (Yang & Chen, 2006).

Por muitos anos, a abordagem tradicional da seleção de fornecedores consistiu em selecionar fornecedores apenas com base no preço. No entanto, como as empresas aprenderam que a ênfase no preço como um critério único para a seleção de fornecedores não é eficiente, passaram a adotar uma abordagem mais abrangente e pautada em múltiplos critérios. Recentemente, a escolha de critérios se tornou mais complexa, à medida que as preocupações ambientais, sociais, políticas e de satisfação do cliente foram adicionadas aos fatores tradicionais de qualidade, entrega, custo e serviço (Pal et al., 2013). Os autores Kellner e Utz (2019) complementam que os critérios mais

importantes na avaliação de problemas multicritério são considerados como metas que devem ser minimizadas (por exemplo, custo) ou maximizadas (por exemplo, sustentabilidade). Para lidar com isso, vários métodos foram desenvolvidos para resolver problemas de decisão multicritério (Taherdoost & Brard, 2019).

Os critérios de seleção podem ser classificados em três grupos: econômicos, que são relacionados à maximização de renda ao mesmo tempo que minimizam o capital que gera essa receita; sociais, que engloba as questões relevantes para problemas sociais; e ambientais, associados às questões de controle e redução dos recursos renováveis e não renováveis e à geração da poluição (Yu et al., 2019). Nesse sentido, nota-se a preocupação em tornar a cadeia de fornecimento mais verde, já que as empresas são responsáveis não apenas por suas próprias ações, mas pelos impactos ambientais adversos de seus parceiros (Haeri & Rezaei, 2019). Os esforços ambientais de uma empresa provavelmente não terão sucesso sem integrar as metas ambientais da empresa com suas atividades de compras (Igarashi et al., 2013).

Há também o surgimento de critérios relacionados à conscientização sobre segurança, risco de terrorismo, estabilidade política interna, congruência cultural com a organização compradora e confiabilidade do produto. No entanto, a avaliação desses critérios pode tornar-se complexa, uma vez que é necessário criar meios de avaliar todas essas variáveis (Thanaraksakul & Phruksaphanrat, 2009). A avaliação dos critérios pode ser executada de inúmeras formas, por exemplo, pesquisa em bases de dados, envio de *Request for Information*, visitas a fábrica, etc. Nesse âmbito, a ascensão do *e-procurement* e *e-sourcing* possibilitou o emprego de novas ferramentas de coleta de informações pelos fabricantes. Dependendo da estrutura empresarial, os tomadores de decisão serão capazes de estimar os custos de uso de diferentes fontes de informações e métodos de coleta de dados (De Boer, 2017).

Após a escolha e avaliação dos critérios, é necessário utilizar um método de decisão multicritério para apoiar a tomada de decisão visando à seleção de fornecedores.

2.4 Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Diariamente nas organizações são tomadas decisões perante situações em que um decisor deve escolher entre alternativas que podem ser avaliadas com base em um único critério. No entanto, não são todos os problemas que são passíveis de uma simples resolução. Em ambientes de decisão dinâmicos e arriscados, em que o conflito de decisão surge em vários níveis gerenciais, torna-se difícil a tomada de decisão. Nesse caso, a consideração de múltiplas variáveis pode tornar a escolha mais equilibrada e precisa (Nutt, 2011; Song & Zhu, 2019). Liang et al. (2017) ressaltam que na avaliação do desempenho das alternativas em múltiplos critérios conflitantes entre si, o decisor não pode fazer uma simples comparação, para realizar a melhor escolha, é necessário aplicar um método MCDM.

A tomada de decisão multicritério é um ramo da pesquisa operacional relevante na assistência ao decisor para a identificação da melhor solução entre um conjunto de alternativas. A possibilidade de seleção de um ou mais cursos de ações torna essa abordagem mais útil quando os objetivos e

preferências dos tomadores de decisão são conflitantes (Khodakarami et al., 2018). Para Roy e Słowiński (2013), as decisões que envolvem o contexto multicritério pode ser direcionadas por várias problemáticas, sendo elas:

- a) Escolha: reduzir a um conjunto menor o número de alternativas existentes;
- b) Ordenação: ordenar as alternativas em ordem crescente ou decrescente;
- c) Classificação: classificar as alternativas em grupos por similaridade, de forma categórica ou ordenada.

Pedrycz et al. (2010) diferenciam as abordagens de tomada de decisão multicritério em duas subclasses: multiobjetivo e multicritério. Na tomada de decisão multiobjetivo, o decisor precisa atingir vários objetivos conflitantes entre si. Um modelo de tomada de decisão multiobjetivo inclui um vetor de variáveis de decisão e funções que descrevem os objetivos e restrições. Dependendo do problema, o decisor tenta maximizar ou minimizar as funções objetivo. Exemplos de modelos multiobjetivos incluem aqueles baseados em programação linear e não linear (Park et al., 2018). Já a classe de abordagens multicritério envolve a seleção da “melhor” alternativa dentre um conjunto de alternativas pré-selecionadas, descritas em termos de seus critérios, que são as características, qualidades ou parâmetros de desempenho das alternativas. De modo geral, a tomada de decisão multicritério está relacionada com tomar uma decisão de preferência, ou seja, fazer a escolha, priorização e/ou classificação das alternativas disponíveis. Alguns dos métodos multicritério mais utilizados são AHP, ANP, TOPSIS e *Weighted Sum*, sendo que o AHP é aquele que recebeu maior interesse acadêmico ao longo das últimas décadas (Hodgett, 2016).

Uma importante característica dos métodos multicritério está relacionada à compensação que pode existir entre os critérios no modelo de agregação. Dessa forma, os métodos podem ser classificados em compensatórios e não compensatórios. Nos métodos compensatórios, têm-se a ideia de compensar um menor desempenho de uma alternativa em um dado critério por meio de um melhor desempenho em outro critério, favorecendo alternativas não balanceadas, cujo desempenho é excelente sob algum aspecto, mas é insatisfatório nos demais. Enquanto no grupo dos métodos não compensatórios, não há a ideia de compensação entre os critérios, de modo eliminar as alternativas que não atendem a um nível de desempenho mínimo requerido para cada critério (Almeida, 2013).

Em outro sentido, no processo de seleção de fornecedores, a atribuição de avaliações em escalas numéricas com valores *crisp* para os pesos dos critérios e o desempenho das alternativas, não pode efetivamente levar em consideração o risco e a incerteza na estimativa do desempenho do fornecedor (Wu & Barnes, 2011). Nesse contexto, dependendo da necessidade, pode-se optar pela integração de vários métodos com diferentes características para atender às necessidades de seleção específicas da empresa, essa combinação tem o objetivo de fortalecer o método para abordar vários problemas de decisão mais efetivamente (Tahriri et al., 2008). Melhor abordado nas próximas seções, em ambientes de decisão que há ausência de informações, uso de julgamentos subjetivos, informações imprecisas e/ou variáveis qualitativas (Alcântara, 2016), tornou-se frequente na literatura o uso da lógica *fuzzy* integrada com diferentes métodos MCDM devido à sua

capacidade de modelar os processos subjetivos de avaliação humana, convertendo essas avaliações em escalas de números *fuzzy* (Guarnieri, 2015).

Conforme abordado na seção 3.3, o processo de seleção de fornecedores é composto por várias etapas, dentre as quais, está inclusa a etapa de formulação de critérios. Dado que na literatura diversos estudos propuseram modelos quantitativos para apoiar a escolha de critérios, na seção a seguir, serão caracterizadas diferentes abordagens empregadas na literatura relacionada ao tema.

2.5 Modelos de decisão para seleção de critérios

Nesta seção, será discutido os modelos que fornecem suporte à seleção de critérios, não será contemplado modelos que suportam apenas a ponderação destes. Conforme evidenciado pelos artigos de revisão apresentados na seção 1.1, existem inúmeros modelos para apoiar a seleção de fornecedores. Contudo, o presente estudo delimita a analisar apenas os modelos orientados para apoiar a seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0. Esse assunto será discutido mais adiante, na seção 3.6.

Conforme, apresentado por Zimmer et al. (2016) na Figura 2, o processo de seleção de fornecedores consiste em várias etapas, geralmente começa com a identificação das necessidades e especificações e continua com a formulação de critérios. Nesse sentido, na revisão proposta por Igarashi et al. (2013), foram categorizados 60 estudos em diferentes etapas do processo de seleção de fornecedores, a etapa de formulação de critérios corresponde a 50% (30). No estudo proposto por Zimmer et al. (2016), ao analisarem 143 artigos categorizados nos estágios de seleção, monitoramento e desenvolvimento de fornecedores. Os modelos que auxiliam a formulação de critérios correspondem a 10% (15).

Na literatura, os estudos que contemplam o escopo de formulação de critérios possuem diferentes abordagens. Há estudos que aplicam técnicas quantitativas para definir *ranking*, hierarquia e/ou categorização de critérios. Em relação aos estudos que definem *ranking* de critérios. Jakowski et al. (2010) determinaram a ordem de classificação dos critérios de avaliação com base na comparação pareada dos pesos dos critérios e na avaliação das funções de associação que apresentam agregação de julgamentos na forma de números *fuzzy*. Em outro estágio, um modelo de programação linear é aplicado para calcular o peso geral dos critérios. Bhattacharya et al. (2013) definiram um modelo de medição de desempenho combinando a abordagem de *collaborative decision-making* (CDM) com *fuzzy ANP*, apoiado-se na estrutura do *Balanced Scorecard* (BSC). A abordagem CDM gera os pesos dos critérios para a estrutura do BSC, então os pesos de cada critério são fuzificados. Em seguida, são definidos as interdependências e o relacionamento casual entre os critérios usando o ANP. Os pesos normalizados são calculados com base no *fuzzy ANP*. Por fim, o percentual de importância de cada critério no desempenho da cadeia de suprimentos é definido, para assim apoiar a escolha final.

Banaeian et al. (2014) propuseram um modelo combinado usando o método *Delphi* e *Data Envelopment Analysis* (DEA). O método *Delphi* foi empregado para avaliar os critérios com base na opinião dos especialistas. Os critérios mais importantes são empregados no modelo DEA para

avaliar o desempenho geral dos fornecedores. Moradi e Osanloo (2015) propuseram uma nova abordagem para calcular o peso dos critérios de desenvolvimento sustentável. Essa abordagem empregou *Preference Voting System* (PVS) com base em um modelo DEA para calcular o peso dos critérios. Guarnieri e Trojan (2019) propuseram um modelo de decisão multicritério para apoiar o processo de seleção de fornecedores. A princípio, o método *Copeland* foi aplicado para comparar cada critério identificado na literatura considerando as preferências dos tomadores de decisão. Um *ranking* de critérios foi gerado e foram escolhidos os critérios com a maior pontuação. Em seguida, é definido o peso dos critérios usando AHP. Então, os fornecedores são classificados pelo método ELECTRE-TRI. Por fim, Wu et al. (2020) desenvolveram um modelo de quatro estágios baseado em *Dempster-Shafer theory*, *non-dominated sorting genetic algorithm-II* (NSGA-II) e *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL). O modelo integra metodologias quantitativas e qualitativas para identificar, agrupar, filtrar, analisar e selecionar possíveis critérios alternativos.

Similarmente, outros estudos definiram uma hierarquia e/ou categorização dos critérios visando apoiar a escolha dos mais relevantes. Huang e Keskar (2007) apresentaram um procedimento para hierarquizar em categorias. Inicialmente, uma lista de métricas é extraída da literatura, cada métrica é avaliada e categorizada com base nas suas características, tais como qualitativas ou quantitativas, estratégicas ou operacionais ou se são sujeitas a incerteza. Por fim, dentro de cada categoria, os relacionamentos entre as métricas são estabelecidos usando *Interpretive Structural Modeling* (ISM). Na etapa seguinte, são combinados os métodos AHP e *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) para calcular os pesos dos critérios e selecionar fornecedores. Wu e Barnes (2010) apresentaram um modelo para a formulação de critérios de seleção de parceiros de suprimentos. Os critérios foram extraídos a partir de uma lista geral de critérios com base em julgamentos dos tomadores de decisão. *Dempster-Shafer theory* foi empregada para modelar o viés dos tomadores de decisão, visto que, é eficaz no gerenciamento de informações incertas (Wu et al., 2020).

Sobre a representação do julgamento dos tomadores de decisão durante o processo de avaliação das métricas, enquanto os estudos de Wu e Barnes (2010) empregaram valores precisos, Wu et al. (2020), Banaeian et al. (2014) e Wu et al. (2020) utilizaram escala *likert*. Huang e Keskar (2007), Jakowski et al. (2010), Bhattacharya et al. (2013) e Guarnieri e Trojan (2019) utilizaram escala numérica baseada em julgamentos pareados. Nessa última abordagem, o tomador de decisão deve expressar sua opinião sobre o valor de uma única comparação pareada de cada vez e todos os critérios são comparados usando a escala de importância de Saaty (Triantaphyllou & Mann, 1995). Todavia, nos métodos AHP e ANP, o *ranking* de classificação das alternativas pode sofrer reversão ao adicionar ou subtrair uma alternativa (Macharis et al., 2004). Inclusive, a limitação do uso da escala de nove pontos impossibilita avaliar uma alternativa de forma consistente, por exemplo, uma alternativa que é vinte e cinco vezes mais importante que outra (Macharis et al., 2004). Além do mais, sugere-se que o número de critérios ou alternativas a serem comparadas seja limitado a nove, para não comprometer o julgamento humano e sua consistência (Lima Junior et al., 2014). Vale destacar que somente Moradi e Osanloo (2015) e Lima Junior e Carpinetti (2016) utilizaram termos linguísticos pra caracterizar o julgamento dos tomadores de decisão. Contudo, os modelos

desenvolvidos por esses autores não possibilitam empregar dois ou mais termos, nem expressões linguísticas, para representar o julgamento dos tomadores de decisão.

Em relação ao processo de seleção final dos critérios, Huang e Keskar (2007), propuseram hierarquizar em categorias os critérios com base no seu relacionamento, mas sua proposta não produz uma ordem de importância dos critérios. Os métodos propostos por Jakowski et al. (2010), Bhattacharya et al. (2013), Banaeian et al. (2014), Moradi e Osanloo (2015) e Guarnieri e Trojan (2019) geram uma classificação de importância dos critérios. Porém, em todos eles os procedimentos de classificação são baseados apenas em um único fator, que é o peso dos critérios julgados pelos tomadores de decisão. Wu et al. (2020) produziram ordem de importância dos critérios levando em consideração simultaneamente a aceitabilidade combinada das crenças, a disponibilidade de informações, custo do trabalho, tempo disponível e os recursos materiais necessários para obter as informações de cada conjunto de critérios. Já a abordagem de Wu e Barnes (2010) é a única a considerar o grau de dificuldade, como tempo, dinheiro e recursos humanos. Apesar de Wu et al. (2020) utilizarem escala *likert* para avaliar a aceitabilidade das crenças pelos tomadores de decisão. Ambos os autores empregaram valores precisos para avaliar suas respectivas medidas remanescentes.

Nesse enquadramento, diferentemente dos estudos citados, no presente estudo, a avaliação dos critérios é baseada em um procedimento de classificação em uma matriz considerando o peso dos critérios e o grau de dificuldade associado à coleta de dados. O peso dos critérios é estabelecido calculando a intensidade de relacionamento entre requisitos e critérios. Já o grau de dificuldade de coleta de dados, é relacionada à disponibilidade de informações, recursos humanos e tempo necessário e recursos adicionais (Lima Junior & Carpinetti, 2016).

2.6 Modelos de decisão para seleção de fornecedores na indústria 4.0

Os estudos apresentados na Tabela 1 (seção 1.1) permitiram caracterizar os modelos de decisão para seleção de fornecedores em relação a diferentes fatores, incluindo, o apoio a tomada de decisão em grupo, tipo de aplicação, a abordagem de validação dos resultados e as técnicas quantitativas empregadas.

Na revisão proposta por Wetzstein et al. (2016), 26% (57) dos modelos de decisão, consideraram o julgamento de apenas um único tomador de decisão, enquanto outros 32% (71) consideraram a tomada de decisão em grupo. Em relação ao tipo de aplicação, Wetzstein et al. (2016) também identificaram que 41% (91) dos modelos de decisão propostos são testados em exemplos ilustrativos. No estudo de Zimmer et al. (2016) os exemplos ilustrativos equivalem a 46% (67). Os mesmos autores também caracterizaram a forma de validação dos resultados, e identificaram que 19% (28) realizaram análise de sensibilidade. Isso revela por parte dos estudos preocupação em reduzir os níveis de incerteza nos julgamentos e garantir estabilidade dos resultados por meio de alterações nos parâmetros de entrada específicos (Chen et al., 2010).

Sobre as técnicas quantitativas mais empregadas, o uso de técnicas aplicadas isoladamente nos modelos foi caracterizado por Chai e Ngai (2020), sendo que esses autores destacaram elevado emprego dos métodos de decisão multicritério AHP, ANP e TOPSIS assim como métodos de programação linear e de programação estocástica. Já na revisão proposta por Zhang et al. (2020) as técnicas TOPSIS e DEA são amplamente utilizadas. No estudo de Yıldız e Yayla (2015), as técnicas AHP e ANP representam 39% (36) do total mapeado. Inclusive, em estudos menos recentes, como Genovese et al. (2013) e Chai et al. (2013) os autores destacaram a elevada aplicação das técnicas AHP e ANP.

Em respeito a aplicação de técnicas combinadas nos modelos de decisão, em um primeiro momento, Ho et al. (2010) e Genovese et al. (2013) evidenciam maior número de aplicação de modelos individuais em comparação aos modelos integrados, ou seja, que combinam duas ou mais técnicas distintas. Contudo, estudos recentes como Yıldız e Yayla (2015), Ocampo et al. (2018) e Chai e Ngai (2020), indicaram predominância das aplicações de modelos integrados. Nesse cenário, Ocampo et al. (2018) identificaram que a lógica *fuzzy* combinada com outras técnicas representa 51% (124) das aplicações. De encontro a isso, entre os 54 modelos revisados por Simić et al. (2017), 48 empregaram *fuzzy* combinada com outras técnicas. Yıldız e Yayla (2015) revelaram que as técnicas *fuzzy* AHP, *fuzzy* TOPSIS e *fuzzy* ANP foram as mais empregadas nos modelos de decisão.

Apesar desses estudos de revisão da literatura, caracterizarem a aplicação de métodos quantitativos para apoiar a tomada de decisão no processo de seleção de fornecedores em diferentes contextos, os mesmos não identificaram a proposição de modelos de decisão que consideram as características do ambiente da indústria 4.0.

A partir disso, com objetivo de identificar e mapear modelos quantitativos de apoio ao processo de seleção de fornecedores voltados para cadeias de suprimentos digitais, isto é, modelos que incorporem as características advindas do ambiente da indústria 4.0, elaborou-se uma revisão sistemática seguindo os procedimentos sugeridos em Lima Junior e Carpinetti (2017). Os procedimentos de seleção e análise de artigos, bem como os resultados dessa revisão, são discutidos a seguir.

2.6.1 Procedimentos de Busca e Seleção de Artigos

A revisão sistemática é uma forma de reunir toda pesquisa disponível sobre um conteúdo amplo e para uma questão específica, uma vez que ela sintetiza conteúdo existente de um tema específico de maneira justa (Kitchenham, 2004).

Para desenvolver a revisão sistemática, pesquisas por artigos foram realizadas utilizando a *string* “(supplier OR vendor OR partner) AND (selection OR evaluation) AND (“supply chain 4.0” OR “industry 4.0” OR “digital supply chain” OR “smart supply chain”)”. Os artigos foram coletados nas bases Science Direct, Emerald Insight, IEEE Xplore®, Scopus, Springer Nature e Taylor & Francis. Também, foi realizada uma busca adicional utilizando a ferramenta Google Scholar. Com base em Lima Junior e Carpinetti (2017), a pesquisa bibliográfica seguiu os seguintes procedimentos:

- 1) inserção da string *supplier* OR *vendor* OR *partner* AND *selection* OR *evaluation* AND "*supply chain 4.0*" OR "*industry 4.0*" OR "*digital supply chain*" OR "*smart supply chain*" nos campos de busca de cada uma das bases;
- 2) utilização de um filtro para selecionar somente artigos publicados de 2011 em diante. A busca por artigos será realizada a partir dessa data porque conforme visto na seção 3.2, o termo "indústria 4.0" surgiu pela primeira vez em 2011.
- 3) utilização de outro filtro para selecionar somente artigos publicados em periódicos científicos, livros, capítulos de livros e estudos publicados em congresso. No caso da ferramenta Google Scholar e da base Taylor & Francis, por não possuírem esse filtro, a etapa 3 foi realizada manualmente;
- 4) ordenação dos resultados por relevância a partir de uma funcionalidade contida nas bases (com exceção ao Google Scholar);
- 5) seleção dos 300 primeiros resultados listados;
- 6) análise do título, do resumo, das palavras-chave e às vezes do conteúdo dos artigos para eliminar aqueles que não contemplavam modelos quantitativos de apoio a tomada de decisão no processo de seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0;
- 7) eliminação das cópias dos artigos repetidos, ou seja, aqueles que foram listados e selecionados em mais de um portal.

Ao final, conforme mostra a Tabela 2, foram selecionados e analisados 14 artigos.

Tabela 2: Resultado das buscas e seleção de artigos nas bases de dados
Etapas

	1	2	3	4	5	6	7
Emerald Insight	31,938	18,784	16,467	16,467	300	0	0
IEEE Xplore®	18,769	10,703	10,100	10,100	300	2	1
Science Direct	584,679	282,338	235,276	235,276	300	3	3
Scopus	65	65	65	65	65	9	4
Springer Nature	37,263	27,001	12,177	12,177	300	1	1
Scholar Google	14,700	14,200	14,200	14,200	300	14	5
Taylor & Francis	1,149,988	380,904	380,904	380,904	300	0	0
Total							14

Fonte: Elaborado pelo autor

2.6.2 Fatores de análise dos artigos

Os artigos selecionados foram analisados de maneira holística a partir de algumas dimensões estruturais. Inicialmente, foram recolhidos dados relacionados ao ano de publicação. Na sequência, seguindo Brandenburg et al. (2014), Lima Junior e Carpinetti (2017) e Zimmer et al. (2016) a caracterização dos estudos foi baseada em um conjunto de fatores, os quais são expostos a seguir:

- a) **Técnicas de decisão:** reconhece a(s) técnica(s) quantitativa(s) de decisão usada(s) por cada modelo. Também classifica em método único (composto por apenas uma técnica de

- decisão) ou método combinado (que aplica duas ou mais técnicas sequencialmente) (Brandenburg et al., 2014; Zimmer et al., 2016);
- b) **Tipo de modelo:** agrupa os modelos de acordo com a natureza das técnicas de decisão utilizadas, como métodos de decisão multicritério (MCDM), programação matemática, e técnicas de inteligência artificial (Lima Junior & Carpinetti, 2017);
 - c) **Crítérios de desempenho:** identifica os critérios mais comuns usadas por modelos para avaliar o desempenho de fornecedores (Zimmer et al., 2016);
 - d) **Estratégia da cadeia de suprimentos:** identifica a estratégia competitiva adotada pela cadeia de suprimentos na qual o comprador e seu(s) fornecedor(es) estão inseridos. Alguns tipos de estratégia da cadeia de suprimentos discutidos na literatura são verde, sustentável, resiliente, enxuta e ágil (Lima Junior & Carpinetti, 2017);
 - e) **Setor de aplicação:** identifica o setor em que atua a empresa analisada, levando em consideração apenas as aplicações baseadas em dados reais (Brandenburg et al., 2014);
 - f) **Tipo de aplicação:** considera se a aplicação foi feita com base em dados reais ou exemplos numéricos simulados (Zimmer et al., 2016);
 - g) **Formato dos dados de entrada:** identifica o formato dos dados de entrada suportado pelos modelos de decisão para caracterizar as avaliações dos tomadores de decisão, considera-se valores linguísticos (*crisp*), termos linguísticos, expressões linguísticas etc. (Rodriguez et al., 2012).
 - h) **Suporte à tomada de decisão em grupo:** verifica se o modelo de decisão considerou a opinião de dois ou mais decisores para apoiar os processos de tomada de decisão em grupo (Wetzstein et al., 2016). Analisa também a capacidade do modelo de decisão de ponderar as opiniões dos especialistas;

2.6.3 Resultados da Caracterização dos Estudos

A Figura 4 apresenta a distribuição dos estudos ao longo dos anos. Entre os estudos analisados, 85% (12) foram publicados nos últimos 2 anos. Isso evidencia que o interesse o tema de pesquisa em estudo é recente e está em ascensão.

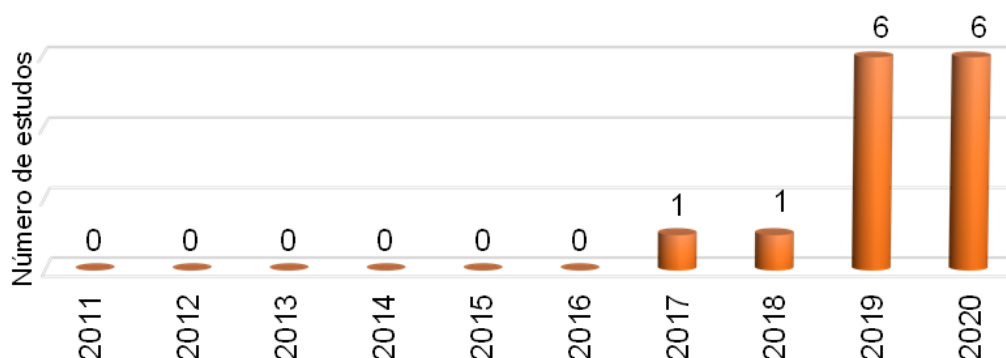


Figura 4: Distribuição dos estudos por ano de publicação
Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 3 sintetiza as técnicas de decisão empregadas e a classificação quanto aos tipos de modelos de acordo com a natureza das técnicas. Verifica-se elevado uso da combinação de técnicas nos modelos de decisão, pois 64% (9) dos modelos foram desenvolvidos combinando MCDM com IA. Entre esses, a lógica fuzzy e suas extensões foram essencialmente empregadas como componente de combinação com outras técnicas, por exemplo, AHP e BWM.

Tabela 3: Técnicas empregadas nos modelos de decisão

	Proposto por	Técnicas	Tipo de modelo
Técnicas únicas (5)	Büyüközkan e Göçer (2017)	Interval Valued Intuitionistic Fuzzy MOORA	MCDM combinado com IA
	Ghadimi et al. (2019)	Sistemas Multi-Agente	IA
	Tozanli et al. (2019)	Goal Programming	Programação matemática
	Özek e Yildiz (2020)	Interval Type-2 Fuzzy TOPSIS	MCDM combinado com IA
	Zekhnini et al. (2020)	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System	IA
Técnicas combinadas (9)	Büyüközkan e Göçer (2018)	Interval Valued Intuitionistic Fuzzy, AHP e ARAS	MCDM combinado com IA
	Büyüközkan e Göçer (2019)	Pythagorean Fuzzy Sets, AHP e COPRAS	MCDM combinado com IA
	Hasan et al. (2020)	Fuzzy TOPSIS e Multi-choice Goal Programming	MCDM combinado com IA e programação matemática
	Kusi-Sarpong et al. (2019)	BWM e VIKOR	MCDM
	Liao et al. (2019)	BWM, ARAS e Hesitant Fuzzy Sets	MCDM combinado com IA
	Sachdeva et al. (2019)	Intuitionistic Fuzzy Set e TOPSIS	MCDM combinado com IA
	Çalık (2020)	Pythagorean Fuzzy Sets, AHP e TOPSIS	MCDM combinado com IA
	Kaur e Singh (2020)	Fuzzy AHP e DEA	MCDM combinado com IA e programação matemática
Torkayesh et al. (2020),	BWM e WASPAS	MCDM	

Fonte: Elaborado pelo autor

As técnicas apresentadas na Tabela 3 possuem características bastante distintas entre si. Desenvolvido por Hwang e Yoon (1981), o TOPSIS baseia-se na proximidade das alternativas em relação à solução ideal positiva e à solução ideal negativa. A solução ideal positiva é formada pelos melhores valores de desempenho das alternativas para cada atributo e a solução ideal negativa é composta dos piores valores de desempenho. A proximidade de cada um desses polos de desempenho é medida no sentido euclidiano (Kahraman, 2008). Algumas limitações do TOPSIS são apresentadas por Lima Junior e Carpinetti (2015), o fato da técnica utilizar números *crisp* para modelar os pesos dos atributos à torna inadequada para avaliar situações de decisão sob incerteza. Além disso, também ocorre a inversão do *ranking*, uma vez que os valores das soluções ideais variam de acordo com as pontuações das alternativas.

Proposto por Rezaei (2015), o método BWM realiza comparações pareadas em relação a todos os critérios. As comparações são realizadas entre o melhor e o pior critério, enquanto as comparações entre os outros critérios ocorre à parte. Para Aboutorab et al. (2018), a principal contribuição que o BWM forneceu à literatura foi a redução do número de comparações pareadas, conseqüentemente, um menor nível de inconsistência. Do outro lado, desenvolvido por Opricovic (1998), o método VIKOR baseia-se no estabelecimento de soluções de compromisso. A solução de compromisso, é uma solução viável que está mais próxima da solução ideal, e se concentra na classificação e seleção de alternativas na presença de critérios conflitantes (Mardani et al., 2016).

O método MOORA foi concebido por Brauers e Zavadskas (2006), e busca selecionar a melhor alternativa considerando um conjunto de critérios de benefícios (preferíveis valores máximos) e de não benefícios (preferíveis valores mínimos) para classificar ou selecionar uma ou mais alternativas de um conjunto de opções disponíveis (Karande & Chakraborty, 2012). Uma das características é a simplicidade, o baixo tempo de modelagem computacional para solucionar um problema (Akkaya et al., 2015).

Desenvolvido por Zavadskas et al. (1994), o método COPRAS possibilita selecionar as melhores alternativas, considerando as soluções ideais positivas e negativas e classificá-las com base em vários critérios e seus pesos associados (Stefano et al., 2015). Entretanto, na aplicação da técnica deve-se prestar atenção à variação dos dados porque pode ser menos estável que os métodos SAW ou TOPSIS (Podvezko, 2011). Proposto por Zavadskas et al. (2012), no WASPAS a importância relativa de cada atributo é determinada e, em seguida, as alternativas são avaliadas e priorizadas. Além disso, é um método cada vez mais utilizado por ser um método compensatório e pela necessidade de converter os atributos qualitativos em atributos quantitativos pelos especialistas. Introduzida por Zavadskas e Turskis (2010), a técnica ARAS visa selecionar a melhor alternativa com base em vários critérios, a classificação final das alternativas é feita por meio da determinação do grau de utilidade de cada alternativa (Alinezhad & Khalili, 2019). Algumas das características desse método dizem respeito à facilidade de extensão para diferentes ambientes *fuzzy*, relação direta e proporcional com os pesos dos critérios (Büyüközkan & Güler, 2019). Além de possibilitar a conversão de atributos qualitativos em quantitativos, também é um método compensatório (Alinezhad & Khalili, 2019).

Em relação às técnicas baseadas em programação matemática, *Goal Programming* foi desenvolvido por Charnes et al. (1955), para lidar com problemas de tomada de decisão de múltiplos objetivos. Essa técnica permite considerar simultaneamente vários objetivos sob um conjunto de restrições viáveis (Aouni & Kettani, 2001). Em contrapartida, o método também possui deficiências. Além da técnica apoiar a tomada de decisão por apenas um indivíduo, pode haver muita subjetividade na determinação dos objetivos e seus níveis de aspiração, com isso a decisão pode estar sujeita a erros (Khorramshahgol & Hooshiari, 1991).

Outra abordagem de programação matemática é conhecida como DEA, proposta inicialmente por Charnes et al. (1978), É uma técnica de programação linear desenvolvida para avaliar a eficiência relativa de entidades comparáveis *Decision Making Units* (DMUs) de acordo com os atributos de

entrada e saída (Vörösmarty & Dobos, 2020). Algumas das limitações da técnica estão relacionadas a não lidar com dados imprecisos, além de supor que todas as medidas de saída e entrada sejam conhecidas. (Kraujalienė, 2019). Além disso, a técnica DEA calcula as pontuações de eficiência sob diferentes conjuntos de pesos, de modo que a classificação é criticada por não ter sido construída sobre uma base comum (Wang, 2020).

Em outro âmbito, por conta da possibilidade de gerenciar informações imprecisas e vagas por meio do grau de pertinência, a lógica *fuzzy* foi inicialmente introduzida por Zadeh (1965) e amplamente aplicada em muitas áreas diferentes para lidar com esse tipo de incerteza. No entanto, apresenta limitações quando diferentes fontes de imprecisão aparecem simultaneamente. Devido a esse fato, diferentes extensões dos conjuntos *fuzzy* foram introduzidos na literatura.

O *intuitionistic fuzzy set* foi introduzido por Atanassov (1986) com o propósito de preencher a limitação do método proposto por Zadeh (1965), de considerar apenas o grau de pertinência e ignorar a hesitação e a indeterminação constantemente envolvidas na tomada de decisão (Guo, Deng, & Wang, 2019). Para aprimorar o método, Atanassov (1986) considerou também o grau de não pertencimento, e introduziu o grau de indeterminação das informações (hesitação ou índice de Atanassov) (Krawczak & Szkatuł, 2019). Já a técnica *interval valued intuitionistic fuzzy* é uma versão estendida dos conjuntos *intuitionistic fuzzy*. Considerando que em problemas reais de tomada de decisão é difícil expressar os valores da função de pertinência e da função de não pertinência no *intuitionistic fuzzy* usando valores *crisp*, a técnica *interval valued intuitionistic fuzzy* usa uma faixa dos valores ao invés de seus valores precisos (Büyükoçkan & Göçer, 2018). Para lidar com as deficiências dos *intuitionistic fuzzy set*, Yager e Abbasov (2013) introduziram o *pythagorean fuzzy set*. Esse método permite que os tomadores de decisão usem uma gama mais ampla de valores de pertinência e não pertinência, mas ainda com uma restrição de que a soma quadrada desses valores deve ser no máximo igual a 1 (Bolturk, 2018). Já a teoria *hesitant fuzzy sets* foi introduzida por Torra (2010) para resolver as dificuldades em determinar o grau de pertinência de um elemento. No entanto, a dificuldade no estabelecimento não é por causa de uma margem de erro (*intuitionistic fuzzy set*) ou devido a alguma distribuição de possibilidades (*type-2 fuzzy sets*), mas sim porque em algumas situações de decisão com alto grau de incerteza, há hesitação na escolha de diferentes termos linguísticos (Rodríguez et al., 2014).

Por fim, baseada na incorporação das características de aprendizado dos modelos de redes neurais artificiais com o desempenho dos sistemas de inferência *fuzzy*, o método ANFIS foi desenvolvido por Jang (1993), e pode ser considerado uma estrutura matemática capaz de estimar uma grande classe de sistemas não lineares complexos com um grau desejado de precisão no nível computacional (Rezaei et al., 2012). Embora os sistemas ANFIS apresentem vantagens procedentes tanto das redes neurais quanto dos sistemas de inferência *fuzzy*, tais sistemas também agregaram algumas deficiências. Uma das principais é evidenciada na aplicação do sistema em um caso real, uma vez que é difícil realizar a coleta de dados suficientes para realizar o processo de aprendizagem dos modelos ANFIS (Lima Junior & Carpinetti, 2019).

Entre os métodos híbridos caracterizados, está o *fuzzy* AHP, que foi desenvolvido por Chang (1996) como uma técnica eficiente para lidar com a imprecisão dos dados envolvidos na escolha das diferentes variáveis de decisão. O nível linguístico das comparações produzidas pelos clientes e especialistas para cada comparação é derivado na forma de números triangulares *fuzzy* para construir matrizes de comparação pareadas (Simić et al., 2017). Uma das limitações da técnica diz respeito a utilização de um procedimento matemático que pode levar a valores nulos para os pesos dos critérios, dessa forma, não contribuirá para a avaliação global das alternativas, prejudicando o processo de decisão (Lima Junior & Carpinetti, 2020). Outro método híbrido identificado é o *fuzzy* TOPSIS, desenvolvido por Chen (2000) para resolver as limitações do TOPSIS de lidar com problemas de tomada de decisão sob incerteza ao utilizar variáveis linguísticas para definir os pesos dos atributos. Contudo, Lima Junior et al. (2014) ao realizarem uma análise comparativa de métodos multicritério, identificaram que o *fuzzy* TOPSIS não permite realizar a ponderação dos julgamentos dos tomadores de decisão.

Proposto por Chen and Lee (2010) afim de lidar com a imprecisão e ambiguidade em problemas MCDM, o método *interval type-2 fuzzy* TOPSIS fornece graus adicionais de liberdade para representar a incerteza no processo de tomada de decisão. Os conjuntos *interval type-2 fuzzy* foram aplicados para representar os valores de avaliação e os pesos dos atributos. Todavia, o método possui desvantagens, como obter uma ordem de preferências das alternativas incorreta em algumas situações. A ordem preferencial das alternativas também pode mudar se alternativas adicionais forem incluídas (Chen & Hong, 2014).

Sobre os critérios de avaliação de fornecedores visando à seleção, na Tabela 4 foram levantados os critérios utilizados pelos estudos. Os critérios utilizados por apenas um estudo foram eliminados, e as restrições utilizadas pelos modelos de programação matemática não foram contabilizadas. A partir disso, percebe-se a ampla variedade de critérios relacionados às características da indústria 4.0. Os critérios mais usados foram compartilhamento de informação e custo, respectivamente.

Tabela 4: Critérios utilizados pelos modelos e sua frequência de uso

Critérios	Proposto por	Frequência
Compartilhamento de informação	Büyüközkan e Göçer (2017), Büyüközkan e Göçer (2018), Torkayesh et al. (2020), Liao et al. (2019), Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020)	6
Custo	Sachdeva et al. (2019), Büyüközkan e Göçer (2019), Hasan et al. (2020), Ghadimi et al. (2019), Zekhnini et al. (2020)	5
Capacidade tecnológica	Sachdeva et al. (2019), Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Zekhnini et al. (2020)	4
Colaboração digital	Büyüközkan e Göçer (2019), Torkayesh et al. (2020), Liao et al. (2019), Büyüközkan e Göçer (2018)	4
Engajamento digital	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Torkayesh et al. (2020), Liao et al. (2019)	4
Flexibilidade	Büyüközkan e Göçer (2018), Torkayesh et al. (2020), Liao et al. (2019), Hasan et al. (2020)	4
Qualidade de serviço	Çalık (2020), Torkayesh et al. (2020), Liao et al. (2019), Ghadimi et al. (2019)	4
Sustentabilidade do fornecedor	Zekhnini et al. (2020), Çalık (2020), Ghadimi et al. (2019), Büyüközkan e Göçer (2019)	4
Uso de ferramentas analíticas	Büyüközkan e Göçer (2017), Büyüközkan e Göçer (2018), Kaur e Singh (2020), Çalık (2020)	4
Qualidade	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Çalık (2020), Ghadimi et al. (2019), Zekhnini et al. (2020)	4
Computação em nuvem	Çalık (2020), Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020)	3
Entrega	Sachdeva et al. (2019), Ghadimi et al. (2019), Zekhnini et al. (2020)	3
Estabilidade financeira	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Torkayesh et al. (2020)	3
Respeito pela privacidade	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Torkayesh et al. (2020)	3
Segurança cibernética	Hasan et al. (2020), Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020)	3
Visibilidade em tempo real	Büyüközkan e Göçer (2017), Büyüközkan e Göçer (2018), Özek e Yildiz (2020)	3
Automação	Özek e Yildiz (2020), Hasan et al. (2020)	2
Customização e personalização digital	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019)	2
Eficiência de financiamento	Liao et al. (2019), Torkayesh et al. (2020)	2
Integração tecnológica	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019)	2
Impressão 3D e realidade aumentada	Çalık (2020), Özek e Yildiz (2020),	2
Infraestrutura IoT	Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020), Çalık (2020)	2
Logística inteligente	Özek e Yildiz (2020), Kaur e Singh (2020)	2
Manufatura Aditiva	Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020)	2
Nível de colaboração	Büyüközkan e Göçer (2017), Hasan et al. (2020)	2
Tecnologias da informação e comunicação	Özek e Yildiz (2020), Hasan et al. (2020)	2
Reputação	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019)	2
Robótica	Özek e Yildiz (2020), Çalık (2020)	2
Segurança	Büyüközkan e Göçer (2019), Torkayesh et al. (2020)	2
Serviço de suporte	Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019)	2

Fonte: Elaborado pelo autor

As métricas escolhidas também estão relacionadas com as estratégias competitivas de cadeia de suprimentos. Embora, todos os estudos contemplados pela revisão sistemática caracterizam-se em cadeias de suprimentos digitais, na Figura 5 também foram identificadas a associação de outros tipos de estratégias. Apesar da maioria dos estudos focarem apenas na estratégia de cadeia de suprimentos digital, 3 estudos Kusi-Sarpong et al. (2019), Ghadimi et al. (2019) e Zekhnini et al. (2020) também focaram no desenvolvimento da cadeia de suprimentos sustentável. Hasan et al. (2020) propuseram um modelo voltado para cadeias de suprimentos resiliente. Çalık (2020) focaram em cadeias de suprimentos verde. Por fim, Tozanli et al. (2019) focaram nas cadeias de suprimentos resiliente e sustentável.

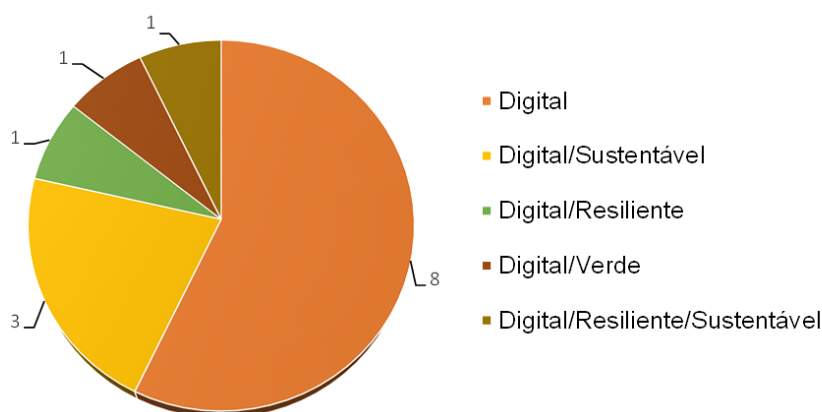


Figura 5: Estratégia da cadeia de suprimentos

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao tipo de aplicação, 72% (10) efetuaram a aplicação em casos reais. Em contrapartida, 21% (3) aplicaram o modelo em casos ilustrativos. Em outro sentido, o modelo proposto por Zekhnini et al. (2020) foi o único não validado por meio da aplicação de um caso real ou ilustrativo. Em relação aos casos reais, a Figura 6 revela o setor de aplicação dos modelos. Sobressai-se aplicação nos setores automotivo, aviação e têxtil.

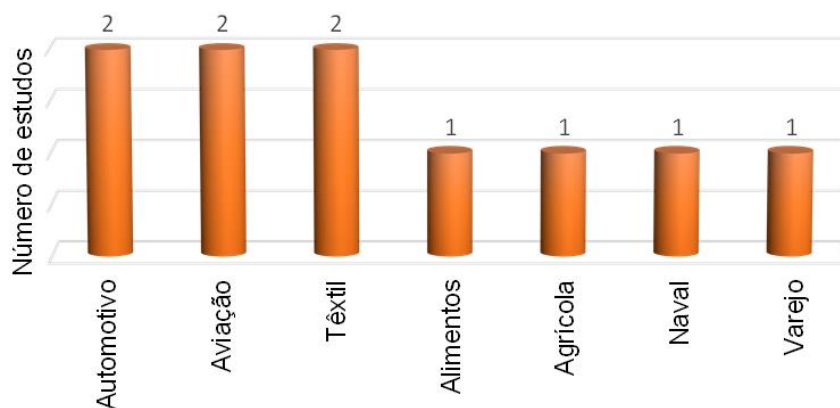


Figura 6: Setor de atuação da empresa

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente, na Tabela 5 foram sintetizadas algumas características dos modelos. 57% (8) dos modelos apoiam a tomada de decisão em grupo. Destes, 35% (5) possibilita ponderar os diferentes julgamentos dos decisores. Em relação ao formato dos dados de entrada, 57% (8) dos estudos empregam termos linguísticos e 43% (6) empregaram valores linguísticos (*crisp*) para caracterizar as variáveis. Os estudos de Büyüközkan e Göçer (2017), Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Liao et al. (2019) e Sachdeva et al. (2019) foram os únicos a utilizarem termos linguísticos, suportarem a tomada de decisão em grupo, bem como ponderar os julgamentos dos especialistas. Nenhum dos modelos referidos permitem que os tomadores de decisão usem expressões linguísticas para representar os julgamentos dos decisores. Teoricamente, o modelo proposto por Liao et al. (2019) é o capaz de permitir o uso de expressões linguísticas, devido à técnica utilizada. Porém, na aplicação de um caso prático, os autores utilizaram apenas termos linguísticos, e não demonstraram o emprego de expressões linguísticas.

Tabela 5: Algumas características dos modelos de decisão analisados

Proposto por	Suporte à tomada de decisão em grupo	Permite ponderar as opiniões dos tomadores de decisão	Formato dos dados de entrada
Büyüközkan e Göçer (2017)	Sim	Sim	Termos linguísticos
Ghadimi et al. (2019)	Não	Não	valores linguísticos (<i>crisp</i>)
Tozanli et al. (2019)	Não	Não	valores linguísticos (<i>crisp</i>)
Özek e Yildiz (2020)	Não	Não	Termos linguísticos
Zekhnini et al. (2020)	Não	Não	valores linguísticos (<i>crisp</i>)
Büyüközkan e Göçer (2018)	Sim	Sim	Termos linguísticos
Büyüközkan e Göçer (2019)	Sim	Sim	Termos linguísticos
Hasan et al. (2020)	Sim	Não	Termos linguísticos
Kusi-Sarpong et al. (2019)	Sim	Não	valores linguísticos (<i>crisp</i>)
Liao et al. (2019)	Sim	Sim	Termos linguísticos
Sachdeva et al. (2019)	Sim	Sim	Termos linguísticos
Çalık (2020)	Sim	Não	Termos linguísticos
Kaur e Singh (2020)	Não	Não	valores linguísticos (<i>crisp</i>)
Torkayesh et al. (2020)	Não	Não	valores linguísticos (<i>crisp</i>)

Fonte: Elaborado pelo autor

2.6.4 Análise e Oportunidades de Pesquisa

A realização da revisão sistemática possibilitou caracterizar os modelos quantitativos de seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0 de acordo com os seguintes fatores: técnicas de decisão

aplicadas e sua natureza, critérios de avaliação de fornecedores, estratégias competitiva de cadeias de suprimentos, tipo de aplicação, setor de aplicação, suporte à tomada de decisão em grupo, ponderação das opiniões dos especialistas, formato dos dados de entrada. Os resultados mostram que é um tema de pesquisa recente e com crescente interesse acadêmico desde 2019. Mais da metade dos modelos foram desenvolvidos combinando MCDM com IA. Parte dos estudos optaram pelas estratégias de cadeias de suprimentos sustentável, resiliente ou verde. Mais da metade dos estudos são baseados em casos reais, entre esses, destacam-se as aplicações nos setores automotivo, aviação e têxtil. Por fim, poucos estudos utilizarem termos linguísticos, além de, suportarem a tomada de decisão em grupo e a ponderação dos julgamentos dos especialistas. A partir dessas considerações, foram identificadas algumas lacunas sobre o tema:

- a) Há carência na aplicação de técnicas de IA com capacidade de aprendizagem. Não foram identificadas aplicações utilizando redes neurais artificiais do tipo *multilayer perceptron*, *Kohonen* e *fuzzy ART*;
- b) Não há aplicações de modelos estocásticos, os quais podem ser necessários para lidar com incertezas probabilísticas;
- c) Há ausência de modelos baseados nas técnicas *fuzzy c-means*, *fuzzy cognitive maps*, *fuzzy neutrosophic sets*, *hesitant fuzzy VIKOR*, *pythagorean fuzzy VIKOR*, *fuzzy ANP*, *fuzzy cognitive maps*, *fuzzy DEMATEL*, *fuzzy neutrosophic sets*, *fuzzy NGT*, *ANP*, *ELECTRE*, *TODIM*, *MACBETH*, *ORESTE*, *PROMETHEE* e *SMART*;
- d) Não há modelos de decisão apropriados para apoiar a tomada de decisão na seleção de fornecedores em cadeia de suprimentos que mesclam a estratégia digital com *lean* e *agile*;
- e) Não foram encontrados estudos voltados aos setores de construção civil, químico, energia, metal mecânico, farmacêutico, calçadista e moveleiro;
- f) É escassa na literatura a proposição de modelos que permitem aos tomadores de decisão utilizar dois ou mais termos linguísticos, bem como expressões linguísticas, para expressar seus julgamentos;
- g) Há carência de estudos que apoiem o processo de escolha de critérios de avaliação de fornecedores considerando suas inter relações com requisitos da indústria 4.0;
- h) Além disso, nenhum dos modelos apresenta procedimento voltado para a escolha de critérios de avaliação de fornecedores que considere não só o peso, mas também a dificuldade de coleta de dados para avaliação de fornecedores em cada critério.

2.7 Fundamentos da Teoria Hesitant Fuzzy

A teoria de conjuntos *fuzzy* foi introduzida por Zadeh (1965), como uma teoria matemática aplicada a conceitos subjetivos. A partir daí, houve crescimento de pesquisas e aplicações dessa teoria em sistemas de informação. Uma área de aplicação da teoria *fuzzy* é o chamado raciocínio aproximado, que procura imitar a forma do pensamento humano. Nesses casos, termos linguísticos são representados por conjuntos *fuzzy*. Termo linguístico é uma forma de caracterizar uma variável linguística, cujos os valores não são números precisos, mas palavras ou sentenças em uma

linguagem natural como “alto, médio” ou baixo” que está mais próxima dos processos cognitivos dos seres humanos (Zadeh, 1965). Em diversos problemas de decisão, ao estimar o grau de uma alternativa para satisfazer um atributo, há casos em que os tomadores de decisão não têm certeza sobre um valor, mas tem hesitação entre vários valores possíveis (Xu, 2014). Nesse sentido, a utilização dos conjuntos *hesitant fuzzy* é muito útil para modelar esses problemas. A teoria dos conjuntos *hesitant fuzzy* foi introduzida por Torra (2010) como uma extensão dos conjuntos *fuzzy* tradicionais. Esse método é preferível para resolver as dificuldades em determinar o grau de pertinência de um elemento a um conjunto causada por incerteza entre os diferentes valores (Dinçer et al., 2018).

2.7.1 Definição de Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set (HFLTS)

A abordagem *Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set* (HFLTS) desenvolvida por Rodriguez et al. (2012), é uma derivação mais recente da teoria *hesitant fuzzy*, onde é possível integrar as várias avaliações linguísticas designadas por especialistas como um intervalo linguístico (Rodriguez et al., 2012). Dessa forma, o uso de HFLTS é adequado para casos em que os especialistas não conseguem fornecer um julgamento com base em um único termo linguístico, sendo desejável a possibilidade de adoção de dois ou mais termos para representar seus julgamentos. Além do mais, possibilita também a utilização de expressões linguísticas como “entre alto e baixo”, “no mínimo médio” e “no máximo alto” para representar os julgamentos dos decisores quanto ao peso dos critérios e ao desempenho das alternativas (Rodriguez et al., 2012).

Rodriguez et al. (2012) exemplifica um conjunto de sete termos linguísticos, mostrados na equação 1 e na Figura 9.

$$S = \{s_{-\tau}, \dots, s_0, \dots, s_{\tau}\} = \{\text{nenhum, muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto, absoluto}\} \quad (1)$$

Um HFLTS, definido como $HS(\vartheta)$, é um subconjunto finito ordenado dos termos linguísticos consecutivos de S . Por exemplo, um HFLTS pode ser representado como $HS(\vartheta) = \{\text{nada, muito baixo, baixo}\}$ ou $HS(\vartheta) = \{\text{muito baixo, baixo, médio, alto}\}$. Frequentemente, os tomadores de decisão preferem utilizar as expressões linguísticas para avaliar as alternativas (Rodriguez et al., 2012)

2.7.2 Transformação de expressões linguísticas em HFLTS

A função $E_{GH}: ll \rightarrow H_S$ transforma as expressões linguísticas em HFLTS de acordo com seu significado, do seguinte modo (Rodriguez et al., 2012):

- 1) $E_{GH}(s_i) = \{s_i / s_i \in S\}$;
- 2) $E_{GH}(\text{no máximo } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j \leq s_i\}$;
- 3) $E_{GH}(\text{menor que } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j < s_i\}$;
- 4) $E_{GH}(\text{pelo menos } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j \geq s_i\}$;
- 5) $E_{GH}(\text{maior que } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j > s_i\}$;

6) $E_{GH}(entre\ s_i\ e\ s_j) = \{s_k / s_k \in S\ e\ s_i \leq s_k \leq s_j\}$;

Usando o conjunto de termos linguísticos da equação 1 e as expressões linguísticas utilizadas por ll , são exemplos de HFLTS:

$H_S = E_{GH}(ll1 = \text{muito alto}) = \{\text{muito alto}\}$

$H_S = E_{GH}(ll2 = \text{maior que baixo}) = \{\text{médio, alto, muito alto, absoluto}\}$

$H_S = E_{GH}(ll3 = \text{entre muito baixo e médio}) = \{\text{muito baixo, baixo, médio}\}$

2.7.3 Distância entre dois HFLTS

O cálculo das medidas de distâncias são a base de alguns métodos MCDM, por exemplo TOPSIS e VIKOR. Para utilizar os HFLTS em problemas MCDM com maior eficácia, Liao et al. (2014) apresentaram uma família de medidas de distância entre duas coleções de HFLTS. Em um problema MCDM, a pontuação de cada alternativa i é dada por uma coleção de HFLTS, uma para cada critério. Por exemplo, considere $\mathbb{H}_S^i = \{H_S^{i1}, H_S^{i2}, \dots, H_S^{im}\}$, onde \mathbb{H}_S^i é uma coleção de HFLTS e H_S^{ij} representa a avaliação da alternativa i em relação ao critério j . Em situações em que os critérios possuem pesos diferentes, Liao et al. (2014) definem a medida de distância ponderada generalizada entre \mathbb{H}_S^1 e \mathbb{H}_S^2 de acordo com a equação (2).

$$d_{\text{gwd}}(\mathbb{H}_S^1, \mathbb{H}_S^2) = \left(\sum_{j=1}^m \frac{w_j}{L} \sum_{l=1}^L \left(\frac{|\delta_1^{1j} - \delta_1^{2j}|}{2\tau + 1} \right)^\lambda \right)^{1/\lambda} \quad (2)$$

Onde:

λ é um parâmetro para determinar diferentes medidas de distância. Este estudo utiliza distância euclidiana, sendo $\lambda = 2$.

L é o número de termos linguísticos em H_S^{1j} ou H_S^{2j} .

δ_1^{1j} é l th termo de H_S^{1j} .

δ_1^{2j} é l th termo de H_S^{2j} .

$2\tau + 1$ é o número de termos linguísticos em S .

$W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^t$ é o vetor de ponderação que satisfaz $0 \leq w_j \leq 1$ e $\sum_{j=1}^m w_j = 1$.

2.7.4 Soluções ideais positivas e negativas

Liao et al. (2014) propuseram um procedimento para obter as soluções ideais positivas e negativas com base no limite inferior H_S^{ij-} e no limite superior H_S^{ij+} de um HFLTS. Supondo a necessidade de avaliar um conjunto de alternativas $X = \{x_i \mid i = 1, \dots, n\}$ com relação ao conjunto de critérios $C = \{c_j \mid j = 1, \dots, m\}$, usando HFLTS, a matriz de julgamento é dada pela equação (3), onde H_S^{ij} é um HFLTS que representa o desempenho da alternativa i em relação ao critério j .

$$\begin{bmatrix} H_S^{11} & H_S^{12} & \dots & H_S^{1m} \\ H_S^{21} & H_S^{22} & \dots & H_S^{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_S^{n1} & H_S^{n2} & \dots & H_S^{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Considerando que H_S^{ij} é um conjunto de termos linguísticos, seu limite superior é dado por $H_S^{ij+} = \max\{s_{ij} | s_{ij} \in H_S^{ij}\}$ e seu limite inferior é $H_S^{ij-} = \min\{s_{ij} | s_{ij} \in H_S^{ij}\}$. Então, a solução linguística ideal positiva x^+ é obtida pela equação (4) e a solução linguística ideal negativa x^- é dada pela equação (5).

$$x^+ = \{H_S^{j+} | j = 1, \dots, m\} \quad (4)$$

$$x^- = \{H_S^{j-} | j = 1, \dots, m\} \quad (5)$$

Onde

$$H_S^{j+} = \begin{cases} \max\{s_{ij} | i = 1, \dots, n\} \text{ para critério de benefício } c_j \\ \min\{s_{ij} | i = 1, \dots, n\} \text{ para critério de custo } c_j \end{cases}$$

$$H_S^{j-} = \begin{cases} \min\{s_{ij} | i = 1, \dots, n\} \text{ para critério de benefício } c_j \\ \max\{s_{ij} | i = 1, \dots, n\} \text{ para critério de custo } c_j \end{cases}$$

A distância entre cada alternativa x_i e suas soluções ideais (x^+ e x^-) pode ser usada para escolher a melhor alternativa considerando um conjunto de critérios. Sendo assim, a melhor alternativa terá a menor distância $d(x_i, x^+)$ ou a maior distância $d(x_i, x^-)$.

2.7.5 Grau de satisfação de uma alternativa

Liao et al. (2014) propuseram o uso simultaneamente, e não separadamente das medidas de distância apresentadas na seção 3.5.4. Assim, o desempenho global de uma alternativa x_i , que considera a contribuição individual de todos os critérios, é representado pelo grau de satisfação $\eta(x_i)$. O grau de satisfação é calculado pela equação (6), na qual θ é um parâmetro de risco. Esse parâmetro é ajustável de acordo com a visão dos decisores envolvidos no problema, sendo que $\theta > 0,5$ representa uma visão pessimista do decisor enquanto $\theta < 0,5$ implica uma visão otimista.

$$\eta(x_i) = \frac{(1 - \theta)d(x_i, x^-)}{\theta d(x_i, x^+) + (1 - \theta)d(x_i, x^-)} \quad (6)$$

2.8 Quality Function Deployment

A ferramenta sistemática de apoio à tomada de decisões, *Quality Function Deployment* (QFD) foi desenvolvida para integrar tecnologia e políticas organizacionais, permitindo a organização incluir e integrar os requisitos dos clientes nos estágios de planejamento e *design* de produto com os requisitos técnicos do produto (Mehrjerdi, 2010). Quando aplicado no projeto de produtos, os benefícios do QFD englobam a melhoria da qualidade do produto, redução do tempo de mudança técnica do produto e menor quantidade de problemas produtivos, além de reduzir os custos com *marketing* (Garver, 2012).

Embora o QFD tenha sido originalmente desenvolvido para aplicações no planejamento de desenvolvimento de produtos, as funções do QFD foram expandidas para outras áreas, como design, tomada de decisão, engenharia, trabalho em equipe, tempo e custo (Chan e Wu, 2002).

Tradicionalmente, o QFD é composto de 4 matrizes que correspondem a diferentes estágios do ciclo de desenvolvimento de um produto (Kontio & Conradi, 2002).

- Planejamento do produto (Casa da Qualidade);
- Projeto do produto;
- Planejamento do processo;
- Planejamento de produção;

Embora o QFD seja composto por muitas matrizes, a matriz Casa da Qualidade é frequentemente mais empregada, pois, utilizá-la sozinha pode ter um efeito significativo no processo de desenvolvimento do produto (Kontio & Conradi, 2002). Na Casa da Qualidade, os desejos dos clientes, são determinados e traduzidos em descrição técnica ou características de desempenho propostas do produto. Normalmente, é constituída pelos requisitos dos clientes “*what*” e as características técnicas do produto “*how*”. A importância dos requisitos é julgada com base em uma escala de números reais variando de 1 (muito pouco importante) a 5 (muito importante). As relações entre “*what*” e “*how*” é apresentada na matriz de relacionamento. O cálculo da matriz requer que a equipe responsável avalie quais características técnicas têm impacto sobre os requisitos do cliente e qual é o grau desse impacto (Dursun & Karsak, 2013).

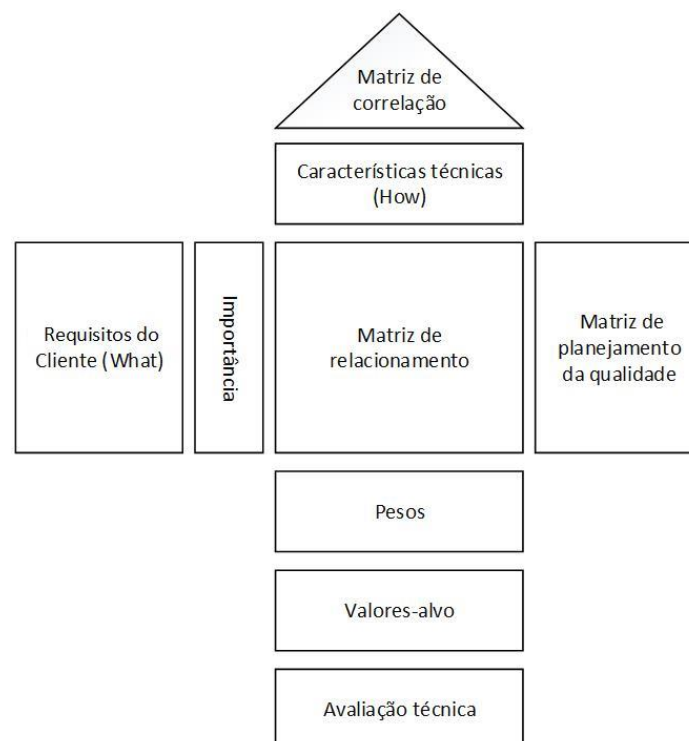


Figura 7: Casa da Qualidade

Fonte: adaptado por Yang et al. (2015, p. 232).

As diferentes partes da Casa da Qualidade, são mostradas na Figura 7. A descrição de seu processo foi desenvolvida seguindo (Temponi et al., 1999).

- I. Primeira fase, identificar os requisitos do cliente “*what*” e atribuir prioridades aos atributos designados. Ao priorizar, a equipe equilibra esforços para atender as necessidades que agregam valor ao cliente;
- II. Em seguida, são determinadas as características técnicas do produto “*how*” por meio de uma equipe multidisciplinar;
- III. Na terceira fase, preparação da matriz de relacionamento, a equipe avalia quais características técnicas do produto “*how*” afetam quais requisitos dos clientes “*what*” e até que grau. Os relacionamentos podem ser positivos ou negativos, fortes ou fracos;
- IV. Na quarta etapa, elabora-se a matriz de correlação. As relações físicas entre os requisitos técnicos são identificadas. Os membros da equipe as características do produto que exigem melhorias. Bem como, as correlações positivas e negativas e as forças de relacionamento;
- V. Na última fase, cria-se o plano de ação. Os pesos das características do produto são colocados na base da matriz. Esses pesos são uma das principais saídas da Casa da Qualidade.

Deve ser notado que o QFD não está isento de limitações, uma vez que é um processo complexo e demorado, exigindo comprometimento gerencial. As escalas de avaliação de importância 1 (muito pouco importante) a 5 (muito importante) são utilizadas por muitos profissionais. Entretanto, essa escala é muito simples e subjetiva na captura da imprecisão das percepções dos clientes (Chan et al., 1999). Pode haver ambiguidade na interpretação dos requisitos do cliente. Além disso, a entrada manual de pesquisa com os clientes na Casa da Qualidade consome tempo e é laboroso (Bauchereau & Rowlands, 2000). Para permitir o uso de avaliações qualitativas, representadas por meio de termos linguísticos como “baixo”, “médio” ou “alto”, o QFD vem sendo aperfeiçoado por meio da combinação com a teoria dos conjuntos *fuzzy* e suas extensões, gerando novas versões deste método (Juan et al., 2009; Lima Junior & Carpinetti, 2016). A seção a seguir detalha o método HFLTS-QFD, que é utilizado no presente estudo.

2.9 Método HFLTS-QFD

Conforme exposto anteriormente, o método QFD tradicional é criticado por suas deficiências na representação de opiniões de especialistas, dado que permite apenas o uso de valores numéricos para avaliar o peso dos requisitos e a intensidade de relacionamento com os critérios (Chan et al., 1999). Alguns autores propuseram adaptações ao método QFD, uma delas é baseada na combinação com a teoria dos conjuntos *fuzzy*, sendo adequada para modelar dados imprecisos e lidar com a incerteza em problemas de tomada de decisão. Diferentes abordagens *fuzzy* QFD são apresentadas na literatura por Karsak (2004), Bevilacqua et al. (2006), Amin e Razmi (2009) e Juan et al. (2009). Porém, uma das críticas ao método *fuzzy* QFD se refere ao uso de apenas um termo linguístico para avaliar os elementos do problema de decisão. Diante dessas limitações, surgiram

na literatura novas abordagens que combinam as matrizes do QFD com o uso de expressões linguísticas modeladas por conjuntos HFLTS. A partir do levantamento bibliográfico realizado neste estudo, foram encontradas 3 versões do método *hesitant fuzzy-QFD*.

A primeira versão foi proposta por Onar et al. (2016) emprega o QFD para determinar requisitos dos clientes e as características técnicas. Os pesos dos requisitos dos clientes são determinados por meio de comparação pareada *fuzzy AHP*, enquanto as alternativas são classificadas usando um método *fuzzy TOPSIS*. Os HFLTS são aplicados nas comparações pareadas entre os requisitos do cliente, relações entre requisitos do cliente e as características técnicas, correlações entre características técnicas e avaliação de alternativas. Outra versão foi proposta por Huang et al. (2019) e utilizou o QFD para determinar requisitos dos clientes e as características técnicas. Os termos linguísticos generalizados (consecutivos ou não consecutivos) são atribuídos pelos *proportional hesitant fuzzy linguistic term sets* (PHFLTS) e utilizados para avaliar as inter-relações entre requisitos dos clientes e requisitos técnicos do produto. Em seguida, o método BWM é empregado para derivar o peso de cada requisito do cliente através de comparações de pares. Por último, aplica-se a teoria da perspectiva para determinar o ranqueamento das características técnicas e identificar as preferências dos tomadores de decisão retratando seus comportamentos reais de decisão sob incerteza. Por fim, a terceira versão, proposta por Osiro et al. (2018) se baseia na combinação do HFLTS com o método QFD. A priorização de requisitos e critérios é baseada no método de medidas de distância entre HFLTS. O julgamento dos decisores quanto ao peso dos critérios, grau de dificuldade da coleta de dados e o desempenho das alternativas é estimado com base em julgamentos usando termos e expressões linguísticas.

Neste estudo, foi aplicada a abordagem proposta por Osiro et al. (2018), já que, diferente das versões proposta por Onar et al. (2016) e Huang et al. (2019), o número de requisitos, critérios e/ou alternativas que podem ser utilizados não é limitado pela capacidade humana de realizar comparações pareadas. Inclusive, diferentemente da versão de Huang et al. (2019), é possível considerar pesos diferentes para os julgamentos dos decisores, conforme seu nível de conhecimento técnico e experiência. Outra vantagem é a possibilidade de considerar o grau de dificuldade associado à coleta de dados como um fator de decisão para escolha dos critérios. Na abordagem proposta por Osiro et al. (2018), o grau de dificuldade da coleta de dados é avaliado com base em julgamentos linguísticos relacionados à disponibilidade de informações, recursos humanos e tempo necessário e recursos adicionais.

Os passos para implementação da versão do HFLTS-QFD proposta por Osiro et al. (2018) são estruturados da seguinte forma. Na primeira etapa, os tomadores de decisão devem selecionar o conjunto de requisitos na matriz "*what*", depois devem avaliar a importância dos requisitos utilizando termos e expressões linguísticas. Esses termos são transformados em HFLTS. O cálculo do peso de cada um dos requisitos é feito utilizando as equações 2, 4, 5 e 6. Na segunda etapa, na matriz "*how*", os tomadores de decisão definem um conjunto de critérios relacionados aos requisitos selecionados na etapa anterior. Em seguida, individualmente, avaliam a intensidade de relacionamento entre os critérios e requisitos, utilizando termos linguísticos e expressões em seus

juízos. Para calcular o peso dos critérios, utilizam-se as equações 2,4,5 e 6. Na terceira etapa avalia-se o grau de dificuldade dos tomadores de decisão em coletar os dados para avaliar as alternativas em relação a cada uma das métricas. Para esse fim, são considerados: disponibilidade de informações, número de pessoas e tempo necessário para a avaliação e a possível utilização de qualquer outro recurso como a contratação de serviços de terceiros. Nessa etapa, novamente será necessário o julgamento dos tomadores de decisão e o emprego dos HFLTS. Novamente, são usadas as equações 2,4,5 e 6. Por fim, na quarta etapa, realiza-se a categorização e a seleção final do conjunto de métricas na matriz considerando as saídas das etapas II e III, para então escolher aquelas que serão usadas na avaliação de fornecedores. Na seção a seguir, será apresentado o modelo conceitual do HFLTS-QFD para apoiar a seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0.

3. Modelo Proposto Para Seleção de Fornecedores

O modelo proposto para apoiar a seleção de critérios e fornecedores no ambiente da indústria 4.0 é apresentado na Figura 8. O modelo é composto de quatro etapas fundamentadas nos estudos de Juan et al. (2009), Pfohl et al. (2015), Lima Junior e Carpinetti (2016), Osiro et al. (2018), Siqueira Júnior (2019) e Manavalan e Jauakrishna (2019). O objetivo da primeira etapa é selecionar e

ponderar os requisitos de compra, com base nos julgamentos de especialistas envolvidos na decisão. Os requisitos se referem às necessidades, expectativas e desejos da empresa contratante. Na segunda etapa, o objetivo é determinar o conjunto de critérios de acordo com os requisitos selecionados anteriormente e ponderá-los com base na intensidade de seu relacionamento com cada requisito. Os critérios são características técnicas mensuráveis do fornecedor. Em ambas as etapas, os tomadores de decisão deverão considerar características do ambiente da indústria 4.0. Na terceira etapa o objetivo é a avaliação do grau de dificuldade para reunir as informações necessárias para avaliar as pontuações do fornecedor em cada critério previamente selecionado. Por fim, na quarta e última etapa são definidas as alternativas de fornecimento existentes, sendo feita então a avaliação dessas alternativas, o que irá culminar com a pontuação final e com o ranqueamento dos fornecedores potenciais.

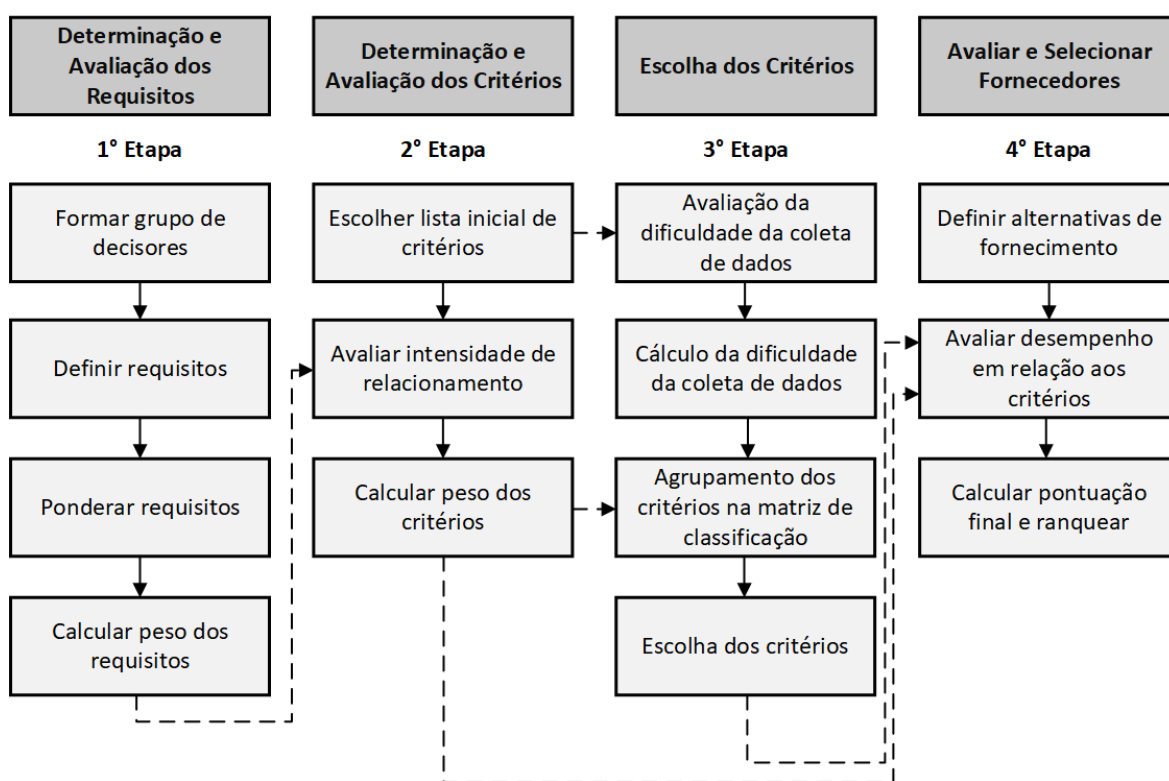


Figura 8: Modelo proposto para a seleção de critérios e fornecedores

Fonte: Elaborado pelo autor

A etapa 1 se inicia com a escolha dos tomadores de decisão. É de grande importância considerar o envolvimento de especialistas de diferentes áreas funcionais envolvidas no processo de seleção de fornecedores em razão da existência de muitas vantagens e desvantagens entre as métricas. Com base no resultado do monitoramento de desempenho de fornecedores e nas lacunas de desempenho identificadas, os tomadores de decisão devem escolher um conjunto de requisitos relacionados com suas necessidades de tecnologias e sistemas característicos do ambiente da indústria 4.0, bem como elementos amplos de gestão. Os julgamentos dos tomadores de decisão são ponderados, a soma dos valores deve resultar 1.

Uma lista inicial de requisitos foi extraída a partir de conceitos e tecnologias utilizados para definir o termo “indústria 4.0”, apresentados por (Pfohl et al., 2015). Também foi baseada na lista de tecnologias digitais disruptivas que formam a base da indústria 4.0, definidas por Manavalan e Jauakrishna (2019). Em seguida, outros requisitos complementares foram definidos por meio da análise de artigos relacionados ao tema. A lista de requisitos é ilustrada na Tabela 6. Como a lista não é exaustiva, os tomadores de decisão também podem identificar novos requisitos por meio de *brainstorming* entre eles.

Tabela 6: Lista de possíveis requisitos para seleção de fornecedores no ambiente da indústria 4.0

Requisitos (Proposto por)	Definição
Automação (Pfohl et al., 2015)	É uma tecnologia pela qual um processo ou procedimento é executado sem assistência humana. Os seres humanos podem estar presentes como observadores ou até participantes, mas o processo em si opera sob sua própria direção (Groover, 2007). A tomada de decisão e aprendizado autônomos são baseadas em algoritmos feitos pelo homem e permite que fábricas e instalações de manufatura inteiras trabalhem com a mínima interação máquina humana (Angelov, 2013).
Transparência (Pfohl et al., 2015)	Refere-se à clareza com que informações relacionados com as operações da cadeia de suprimentos são disponibilizadas. Os dados oriundos do mundo virtual/físico são agregados às informações de contexto de maior valor e interpretados. Os resultados da análise serão incorporados em sistemas de assistência acessíveis a todos os elementos da cadeia de suprimentos (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).
Mobilidade (Pfohl et al., 2015)	Refere-se à utilização de dispositivos móveis como ferramenta de automação industrial fornecendo acesso temporal e espacialmente independente aos processos e serviços dos sistemas automatizados (Jazdi, 2014). Alguns exemplos são smartphones, tablets, comunicadores, veículos guiados automaticamente, robôs móveis, veículos aéreos não tripulados (li et al. 2015).
Colaboração em rede (Pfohl et al., 2015)	Os processos das empresas serão definidos e as atividades serão decididas através da interação de máquinas e seres humanos em redes específicas dentro e fora das organizações da empresa (Bauer et al., 2014). Com o aumento da inteligência e da autonomia dos sistemas empresariais, a rede de sistemas inteligentes precisa colaborar para dar suporte a processos ágeis (Camarinha-Matos et al., 2017).
Descentralização (Manavalan & Jauakrishna, 2019)	A descentralização é a capacidade dos SCF das fábricas de tomarem decisões autônomas e executar ações apropriadas (Gilchrist, 2016). A tomada de decisão descentralizada, interconectada e em tempo real contribui para aumentar a produtividade geral da cadeia de suprimentos (Ghadimi et al., 2019).
Interoperabilidade (Manavalan & Jauakrishna, 2019)	A capacidade de dois sistemas se entenderem e usar a funcionalidade um do outro. Representa a capacidade de dois sistemas trocarem dados e compartilharem informações e conhecimentos (Chen et al., 2008). Os SCF,

	e humanos estão conectados pela IoT e pela IoS. Dentro de uma planta, são capazes de se comunicar "através de redes abertas e descrições semânticas" (Wang & Wang, 2016).
Capacidade em tempo real (Manavalan & Jauakrishna, 2019)	É a capacidade do sistema de transmitir as informações em tempo real para tomar decisões rápidas e assertivas. Por exemplo, reação rápida à falha de uma máquina a tempo e redirecionar um trabalho em processo ou produtos para outra máquina (Wang & Wang, 2016). Não obstante, os esforços do setor 4.0 também se concentram em tornar tudo em tempo real, o que exige que o processo de produção, a coleta de dados e o <i>feedback</i> e o monitoramento dos processos também sejam realizados em tempo real (Gilchrist, 2016).
Orientação ao serviço (Manavalan & Jauakrishna, 2019)	É a capacidade do sistema de servir organizações e seres humanos como um serviço por meio da Internet. Como também, por outras partes interessadas, tanto interna quanto externamente (Wang & Wang, 2016). A planta da SmartFactory ^{KL} é baseada em uma arquitetura orientada a serviços. Todos os SCF oferecem suas funcionalidades como um serviço da Web. Como resultado, a operação do processo específico do produto pode ser composta com base nos requisitos específicos do cliente fornecidos por meio da etiqueta RFID (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).
Digitalização (Pfohl et al., 2015; Manavalan & Jayakrishna, 2019)	É o monitoramento e criação de dados dos processos físicos pelos SCF. Esses dados estão vinculados a modelos de plantas virtuais e modelos de simulação. Assim, uma cópia virtual do mundo físico é criada (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).
Modularidade (Pfohl et al., 2015; Manavalan & Jayakrishna, 2019)	Um sistema que adere a modificações dinâmicas nos requisitos adicionando ou substituindo vários módulos. Os sistemas modulares podem ser facilmente ajustados em caso de flutuações sazonais ou alterações nas características do produto. Portanto, ao projetar e construir produtos, sistemas de produção e até as correias transportadoras modulares e ágeis, a fábrica inteligente é flexível e pode mudar na produção. Os produtores podem garantir que as linhas de produtos individuais possam ser substituídas, expandidas ou aprimoradas com o mínimo de interrupção em outros produtos ou processos de produção (Gilchrist, 2016).
Agilidade (Hasan et al. 2020)	Retrata a capacidade de ter visibilidade da demanda, resposta flexível e rápida, bem como operações sincronizadas. A velocidade com que a cadeia de suprimentos interna de uma empresa funciona pode se adaptar

	às mudanças do mercado resultantes de interrupções e, assim, pode responder melhor a eventos imprevistos. (Aitken et al., 2002).
Capacidade tecnológica (Taherdoost & Brard, 2019)	Representa a capacidade de adquirir novas tecnologias e recursos técnicos para práticas e processos de pesquisa e desenvolvimento (Taherdoost & Brard, 2019).
Escalabilidade (Baranwal et al., 2019)	Escalabilidade é a capacidade de um sistema para lidar com mais solicitações / dispositivos, aumentando os recursos de maneira econômica (Baranwal et al., 2019). A escalabilidade é um grande desafio em um ambiente 4.0. Pois, à medida que maior quantidade de objetos físicos são conectados à rede de fabricação, surgem problemas de escalabilidade. (Xu, Xu, & Li, 2018).
Gestão e organização (Thanaraksakul & Phruksaphanrat, 2009)	O processo de organização, planejamento, liderança e controle de recursos dentro de uma entidade com o objetivo geral de atingir seus objetivos (Maximiano, 2000).
Preço competitivo (Lima Junior & Carpinetti, 2016)	Refere-se a soma de todos os custos financeiros descontados para o cliente envolvido no pedido, recebimento, uso e descarte do produto. Preço competitivo refere-se à capacidade de atender a desejos do mercado a preço baixo (Katsikeas et al., 2004).
Sistema de gestão ambiental (certificação ISO 14001) (Genovese et al., 2013)	Sistema de gestão ambiental é um conjunto de diretrizes pelas quais uma empresa pode estabelecer ou fortalecer sua política ambiental. Também fornece um padrão harmonizado para gerenciar os impactos ambientais de uma empresa (Morrow & Rondinelli, 2002).
Disponibilidade e uso de tecnologias limpas (Genovese et al., 2013)	Representa o uso de tecnologias com objetivo de tornar os processos produtivos mais sustentáveis, reduzindo a emissão de carbono por meio do uso eficiente de energia e controle de poluentes (Shi et al., 2019).

Fonte: Elaborado pelo autor

Depois que um conjunto de requisitos for selecionado, cada tomador de decisão avaliará a importância dos requisitos selecionados usando os julgamentos linguísticos mostrados na Figura 9 (Rodríguez et al. 2012).

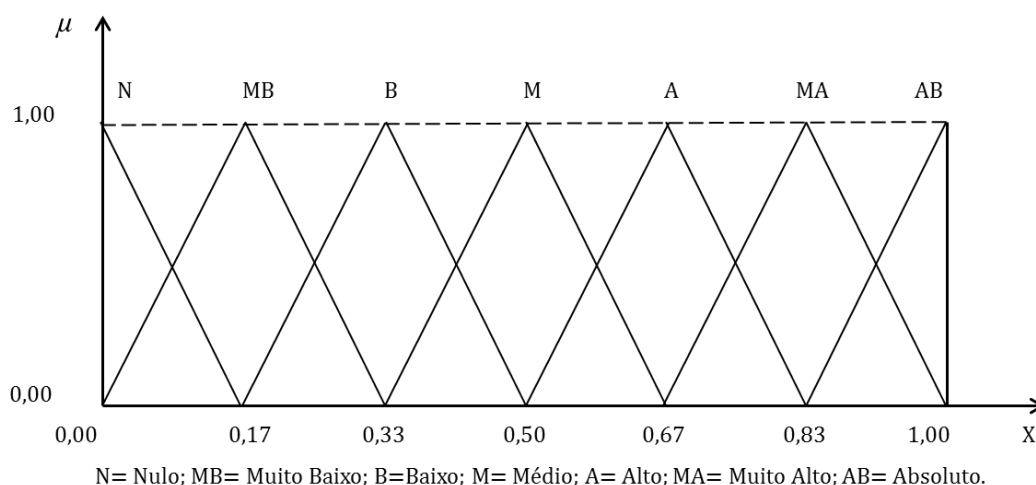


Figura 9: Conjunto básico de termos linguísticos definidos com sete termos
 Fonte: Adaptado de Rodríguez et al. (2012, p.110).

Esses julgamentos poderão ser representados na forma de expressões linguísticas, conforme exemplifica a Tabela 7. Para cada item avaliado, poderá ser escolhido um ou mais termos linguísticos, ou ainda uma expressão linguística. Em seguida, as distâncias da avaliação de cada requisito da equação da solução ideal positiva (4) e da equação da solução ideal negativa (5) são determinadas usando a equação (2). Para determinar o peso de cada requisito, seu grau de satisfação é calculado com a equação (6) e normalizados pela equação (7). A normalização proporcionará que a soma dos resultados obtidos seja igual, garantindo uma melhor percepção da classificação final.

$$v_i = \eta(x_i) / \sum \eta(x_i) \tag{7}$$

Sendo:

v_i – grau de satisfação normalizado

η – grau de satisfação para o critério x_i

Tabela 7: Expressões linguísticas usadas para avaliação dos requisitos, critérios e fornecedores

Expressão	Transformação da função E_{GH} (Rodríguez et al., 2012)	Exemplo de uso	Termos linguísticos ativados
“No máximo...”	$E_{GH}(\text{no máximo } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j \leq s_i\}$;	No máximo alto	[MB, B, M, A]
“Menor que...”	$E_{GH}(\text{menor que } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j < s_i\}$;	Menor que alto	[MB, B, M]
“Pelo menos...”	$E_{GH}(\text{pelo menos } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j \geq s_i\}$;	Pelo menos baixo	[B, M, A, MA, AB]
“Maior que...”	$E_{GH}(\text{maior que } s_i) = \{s_j / s_j \in S \text{ e } s_j > s_i\}$;	Maior que médio	[A, MA, AB]
“Entre... e ...”	$E_{GH}(\text{entre } s_i \text{ e } s_j) = \{s_k / s_k \in S \text{ e } s_i \leq s_k \leq s_j\}$;	Entre baixo e alto	[B, M, A]

Fonte: Adaptado de Siqueira Júnior (2019, p. 112).

Na etapa 2, os decisores devem definir um conjunto de critérios relacionados aos requisitos selecionados na etapa anterior, com base em uma lista de critérios apoiada na literatura. Essa lista, foi desenvolvida por meio de pesquisa e análise a estudos relacionados ao ambiente da indústria 4.0, como também, a elementos amplos de gestão. Os artigos que apoiaram a listagem dos critérios possuem diferentes abordagens temáticas. A maioria dos estudos examinados sumarizaram os critérios mais empregados na literatura (Ha & Krishnan, 2008; Thanaraksakul & Phruksaphanrat, 2009; Yildiz & Yayla, 2015; Lima Junior & Carpinetti, 2016; Taherdoost & Brard, 2019). Alguns, discutiram as perspectivas futuras da Indústria 4.0 no contexto do gerenciamento logístico (Hofmann & Rüsçh, 2017; Manavalan & Jauakrishna, 2019) e na academia (Liao et al., 2017). Outros estudos, proporam a análise das interrelações entre a Indústria 4.0 e os princípios dos sistemas de produção *lean* (Dombrowski et al., 2017; Mrugalska & Wyrwicka, 2017; Duarte & Cruz-Machado, 2018). Da mesma forma, extraiu-se critérios de estudos que avaliaram a qualidade dos serviços de componentes IoT (Baranwal et al., 2019; Singla et al., 2017), utilizaram técnicas quantitativas para selecionar fornecedores no contexto da indústria 4.0 (Sachdeva et al., 2019; Hasan et al., 2020), realizaram a análise da influência da digitalização no setor de compras (Zafari & Teuteberg, 2018), e que avaliaram os riscos do processo de transição para a indústria 4.0 (Colak et al., 2019). Por fim, a lista de critérios também foi baseada em estudos que investigaram um conjunto de parâmetros logísticos relacionados aos processos de produção levando em consideração os princípios da Indústria 4.0 (Torbacki & Kijewska, 2019). Os critérios são detalhados na Tabela 8.

Tabela 8: Lista de possíveis critérios para seleção de fornecedores

Critérios (Proposto por)	
1	Capacidade do banco de dados (Singla et al., 2017)
2	Compartilhamento de informações em tempo real (Ghadimi et al., 2019)
3	Disponibilidade (Colak et al., 2019)
4	Estrutura telemática (Hofmann & Rüsçh, 2017)
5	Gerenciamento de informações (Hasan et al., 2020)
6	Gerenciamento da segurança cibernética (Hasan et al., 2020)
7	Integração vertical e horizontal (Liao et al., 2017)
8	Integridade (Colak et al., 2019)
9	Monitoramento remoto (Duarte & Cruz-Machado, 2018)
10	Padrão de arquitetura (Saturno et al., 2017)
11	Desempenho dos sistemas (Baranwal et al., 2019)
12	Plataforma de <i>software</i> (Saturno et al., 2017)
13	Rastreabilidade (Hasan et al., 2020)
14	Reconfigurabilidade da fábrica (Torbacki & Kijewska, 2019)
15	Medidas para recuperação de interrupções/desastres (Baranwal et al., 2019)
16	Capacidade de reengenharia (Hasan et al., 2020)
17	Suporte à tecnologia <i>blockchain</i> (Torbacki & Kijewska, 2019)
18	Suporte técnico (Taherdoost & Brard, 2019)
19	Tecnologia de modelagem de dados (Liao et al., 2017)
20	Tecnologia de realidade aumentada (Liao et al., 2017)
21	Tecnologia de realidade virtual (Liao et al., 2017)
22	Tecnologia relacionada ao aprendizado da máquina (Liao et al., 2017)
23	Atualização tecnológica (Saturno et al., 2017)
24	Utilização de veículos autônomos (Torbacki & Kijewska, 2019)
25	Atraso na entrega (Sachdeva et al., 2019)
26	Colaboração (Hasan et al., 2020)
27	Confiabilidade do fornecedor (Hasan et al., 2020)
28	Custo (Hasan et al., 2020)
29	Customização em massa (Duarte & Cruz-Machado, 2018)
30	Densidade da cadeia de suprimentos (Hasan et al., 2020)
31	Histórico de desempenho (Ha & Krishnan, 2008)
32	Inovação e P&D (Taherdoost & Brard, 2019)

-
- 33 Manutenção preventiva (Mrugalska & Wyrwicka, 2017)
 - 34 Nível do estoque baixo (Zafari & Teuteberg, 2018)
 - 35 Preço (Yildiz & Yayla, 2015)
 - 36 Previsão de demanda (Zafari & Teuteberg, 2018)
 - 37 Processos padronizados (Dombrowski et al., 2017)
 - 38 Programa de melhoria contínua (Dombrowski et al., 2017)
 - 39 Programa de prevenção de desperdícios (Dombrowski et al., 2017)
 - 40 Qualidade do produto (Thanaraksakul & Phruksaphanrat, 2009)
 - 41 Relacionamento (Sachdeva et al., 2019)
 - 42 Rerouting tradução “reencaminhamento” (Hasan et al., 2020)
 - 43 Status financeiro (Taherdoost & Brard, 2019)
 - 44 Taxa de rejeição (Sachdeva et al., 2019)
 - 45 Velocidade de resolução de problemas (Lima Junior & Carpinetti, 2016)
 - 46 Visibilidade da cadeia de suprimentos (Hasan et al., 2020)
 - 47 Controle de poluição (Yildiz & Yayla, 2015)
-

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a seleção inicial dos critérios, cada participante avalia a intensidade de relacionamento entre cada critério e cada requisito fazendo uso de julgamentos linguísticos como mostrado na Figura 9 e na Tabela 7. Similarmente à etapa 1, o peso de cada critério é determinado calculando a distância da solução ideal positiva e da sua solução ideal negativa de acordo com as equações (2), (4) e (5). Os pesos dos requisitos usados na equação (2) foram determinados na primeira etapa. Em seguida o grau de satisfação é calculado de acordo com a equação (6) para definir a importância relativa de cada critério, sendo então o resultado normalizado pela equação (8), que considera uma função sigmoide a fim de garantir um melhor ajustamento dos resultados frente às dimensões dos quadrantes da Figura 9.

$$w_i = \frac{1}{1 + e^{-\frac{v - \bar{v}}{\sigma_v}}} \quad (8)$$

Sendo:

w_i - valor resultante da normalização

v - valor a ser normalizado

\bar{v} - Média simples dos valores a serem normalizados

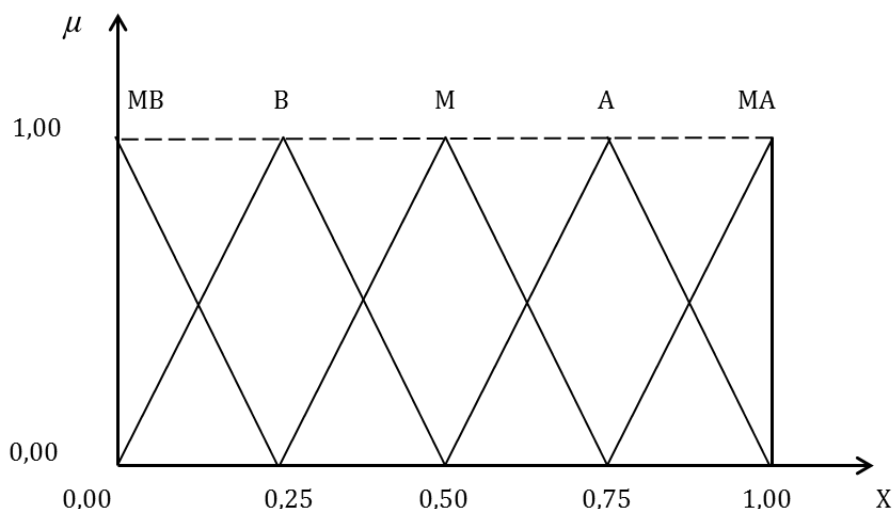
σ_v - Desvio padrão dos valores a serem normalizados

Já a etapa 3 tem por objetivo realizar a escolha dos critérios levantados na etapa 2, considerando o peso e também o grau de dificuldade da coleta de dados para avaliar os fornecedores em tais critérios. No contexto da seleção de fornecedores, quando as informações relevantes são de

natureza heterogênea, imprecisas e difíceis de processar, torna-se difícil a assertividade nas decisões. Nesse contexto, com base em Wu e Barnes (2010), Lima Junior e Carpinetti (2016), Osiro et al. (2018) e Abdel-Basset et al. (2019), a avaliação da dificuldade de coleta de dados pelos tomadores de decisão é baseada na consideração dos seguintes parâmetros:

- a) Disponibilidade de informações dos fornecedores: Uma das características da indústria 4.0 é proporcionar a expansão do fluxo e disponibilidade de informações (Arenkov et al., 2019). Tendo isso em vista, este fator considera todas as informações disponíveis, registros históricos ou conhecimento tácito dos tomadores de decisão que podem ser aplicados para avaliar o desempenho dos fornecedores.
- b) Recursos humanos e tempo necessário: Esse parâmetro é relacionado com o número de pessoas envolvidas e o tempo necessário de avaliação dos fornecedores. Porém, também deve-se atentar às qualificações e habilidades dos funcionários. Visto que, no ambiente 4.0 as qualificações e habilidades requeridas dos funcionários são maiores, porque as empresas utilizam novas tecnologias e mídias inteligentes (Benešová & Tupa, 2017). Os funcionários precisam possuir ampla habilidade técnica para realizar tarefas operacionais e estratégicas, compreensão do processo e habilidade com mídias (Hecklau et al., 2016).
- c) Recursos adicionais: leva em conta qualquer outro recurso necessário, como a contratação de serviços de terceiros para fornecer assessoria acerca de alguma tecnologia.

Novamente, a avaliação desses parâmetros é de natureza qualitativa e exige julgamento dos tomadores de decisão. Esse julgamento ocorre de forma similar às etapas anteriores, ou seja, as expressões linguísticas apresentadas na Tabela 7 e os cinco termos linguísticos mostrados na Figura 10 são utilizados para julgar cada critério em relação aos três parâmetros descritos.



MB= Muito Baixo; B=Baixo; M= Médio; A= Alto; MA= Muito Alto.

Figura 10: Conjunto básico de termos linguísticos definidos com cinco termos
Fonte: Adaptado de Rodriguez et al. (2012, p.110).

Para determinar a pontuação de cada critério na etapa 3, considera-se que a “disponibilidade das informações” é um fator de custo em razão da dificuldade de coleta de dados diminuir com o aumento da disponibilidade de informações. Assim, a disponibilidade de informações utiliza o limite inferior para definir a solução ideal positiva equação (4) e o limite superior para definir a solução ideal negativa equação (5). Por outro lado, “recursos humanos e tempo necessário” e “recursos adicionais” são considerados critérios de benefício. Logo, utiliza-se o limite superior para definir sua solução ideal positiva equação (4) e o limite inferior para definir sua solução ideal negativa equação (5). A distância de cada critérios a partir das soluções ideais positiva e negativa é determinada pela equação (2). A equação (6) produz o grau de satisfação dos critérios e normalizada por meio da equação (8) para obtenção da classificação final.

Após a normalização, são agrupados os critérios na matriz de classificação mostrada na Figura 11. Essa matriz é baseada no modelo proposto por Lima Junior e Carpinetti (2016), a qual subdivide os critérios em quatro grupos:

- a) critérios prioritários: este grupo inclui os critérios com maior peso, que estão relacionados aos requisitos prioritários. Apresentam baixa dificuldade de coleta de dados, tornando-se os preferidos, o que contribui para a agilidade e eficiência do processo de seleção de fornecedores;
- b) critérios críticos: os critérios deste grupo também estão altamente relacionados aos requisitos de prioridade e, portanto, devem ser considerados na seleção de fornecedores processo. Entretanto, como a avaliação dos fornecedores sobre esses critérios críticos exige um esforço relativamente alto de coleta de dados, sugere-se escolher apenas os vitais;

- c) critérios complementares: embora os critérios deste grupo não sejam os preferidos, pois têm uma importância relativamente baixa, alguns deles podem ser incluídos no processo de seleção de fornecedores, dependendo do número de critérios já selecionados, pois apresentam uma dificuldade relativamente baixa de coleta de dados e possibilitam uma avaliação mais detalhada do fornecedor;
- d) critérios custosos: os critérios deste grupo não devem ser selecionados, já que são os menos importantes e exigem um esforço relativamente alto de coleta de dados.

Seguindo as recomendações de Lima Junior e Carpinetti (2016), deve-se selecionar todos os critérios prioritários, descartar os critérios custosos e analisar quais dos critérios críticos e complementares devem ser incluídos.

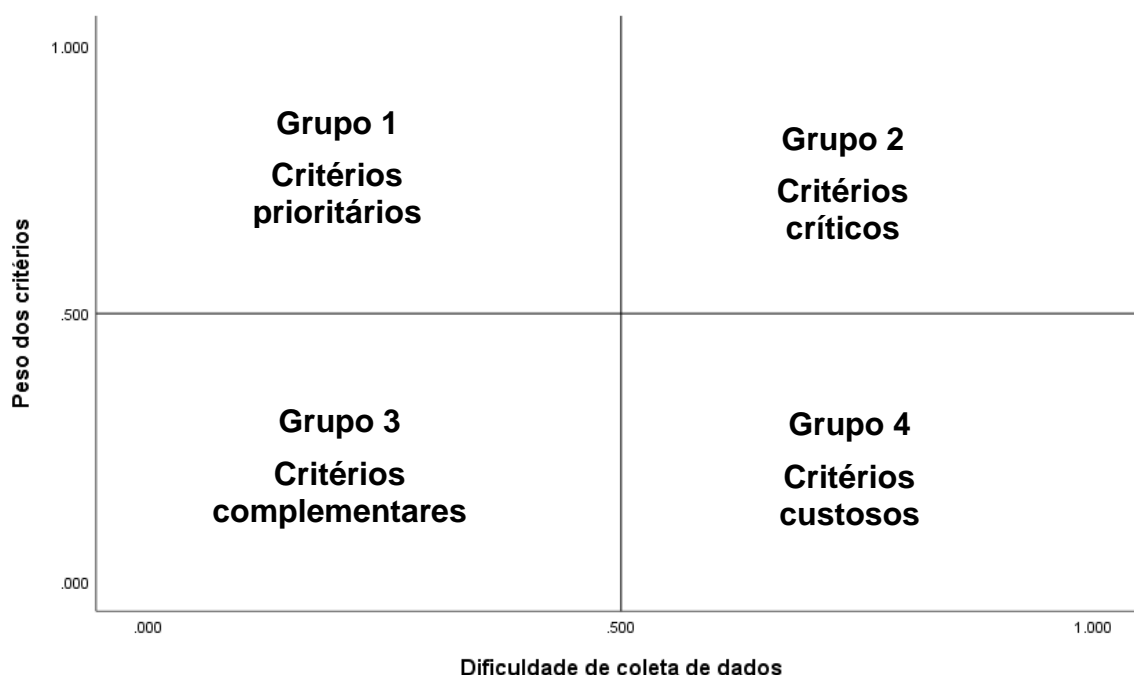


Figura 11: Matriz para classificação de critérios de seleção de fornecedores
 Fonte: Adaptado de Lima Junior e Carpinetti (2016, p.279).

Por fim, a etapa 4 tem por objetivo a definição, avaliação e escolha dos fornecedores. Inicialmente os decisores devem apontar quais são as alternativas de fornecimento consideradas. Na sequência, avalia-se o desempenho de cada alternativa considerando os critérios escolhidos e seus respectivos pesos (saídas das etapas 3 e 2). As equações (2), (4), (5) e (6) são aplicadas para obter os valores do grau de satisfação do desempenho global do fornecedor, sendo então normalizados por meio da equação (7). Os valores normalizados são usados para ranquear os fornecedores em ordem decrescente, de modo direcionar as aquisições que serão realizadas. Dessa forma, o(s) fornecedor(es) com maior pontuação deve ser escolhido. A seção a seguir detalha a aplicação ilustrativa das quatro etapas descritas.

4. Aplicação Ilustrativa

Nesta seção, para demonstrar o uso do modelo proposto, foi desenvolvido um caso ilustrativo baseado em dados simulados. A validação de modelos quantitativos por meio da aplicação ilustrativa é amplamente utilizado na literatura. Nas revisões sobre seleção de fornecedores, Genovese et al. (2013) identificaram que 46%(13) estudos validaram o modelo por meio de aplicação ilustrativa. Wetzstein et al. (2016) identificaram que em 41% (91) os modelos para seleção de fornecedores são testados em exemplos ilustrativos. Na revisão proposta por Zimmer et al. (2016), apesar do escopo compreender os estágios de seleção, monitoramento e desenvolvimento de fornecedores, as aplicações ilustrativa correspondem a 46%(67).

4.1 Determinação e Avaliação dos Requisitos

Suponha uma empresa fictícia que precisa selecionar um fornecedor para aquisição de bens de capital considerando os fatores relacionados ao desempenho operacional, sustentabilidade e alguns requisitos da indústria 4.0. Para esse fim, inicialmente três decisores das áreas de compras e tecnologia da informação foram selecionados e solicitados a indicarem um conjunto de requisitos

apresentados na Tabela 6. Após uma série de reuniões, de maneira concensual selecionaram seis requisitos. Os mesmos são exibidos na Tabela 9

Tabela 9: Requisitos selecionados pelos tomadores de decisão

ID	Requisitos
R ₁	Automação
R ₂	Descentralização
R ₃	Digitalização
R ₄	Gestão e organização
R ₅	Interoperabilidade
R ₆	Modularidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Posteriormente, avaliaram o grau de importância de cada requisito usando os termos linguísticos e expressões linguísticas definidos na Figura 9 e na Tabela 7, respectivamente. A avaliação dos requisitos é apresentada na Tabela 10, e a conversão desses em formato HFLTS na Tabela 11.

Tabela 10: Avaliação do grau de importância dos requisitos usando expressões linguísticas

	D ₁	D ₂	D ₃
R ₁	Pelo menos alto	Entre médio e alto	Entre alto e muito alto
R ₂	Pelo menos muito alto	Entre alto e muito alto	No mínimo muito alto
R ₃	Absoluto	Entre médio e muito alto	No mínimo alto
R ₄	Pelo menos muito alto	Entre médio e alto	Entre baixo e médio
R ₅	Alto	No mínimo muito alto	Alto
R ₆	Pelo menos muito alto	Alto	Entre alto e muito alto

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11: Conversão da avaliação dos requisitos para o formato de HFLTS

	D ₁	D ₂	D ₃
R ₁	[A, MA, AB]	[M, A]	[A, MA]
R ₂	[MA, AB]	[A, MA]	[MA, AB]
R ₃	[AB]	[M, A, MA]	[A, MA, AB]
R ₄	[MA, AB]	[M, A]	[B, M]
R ₅	[A]	[MA, AB]	[A]
R ₆	[MA, AB]	[A]	[A, MA]

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, foi realizada uma sucessão de cálculos para obter o peso dos requisitos. Primeiramente, foi identificada a solução ideal positiva (x^+) usando a equação 4, resultando em $x^+=[AB] [AB] [AB]$. O mesmo procedimento foi adotado para a solução ideal negativa (x^-) por meio da equação 5, resultando em $x^-=[A] [M] [B]$. Na sequência, considerando que a opinião dos três decisores têm o mesmo peso (1/3), os julgamentos foram agregados e as distâncias da solução ideal positiva ($d(x_i, x^+)$) e da solução ideal negativa ($d(x_i, x^-)$) foram determinadas pela equação 2.

Logo após, a aplicação da equação 6 produziu o grau de satisfação dos requisitos ($\eta(x_i)$), tomando como base as soluções ideais positivas ($d(x_i, x^+)$) e negativas ($d(x_i, x^-)$) e usando $\theta=0.5$, o parâmetro θ corresponde às preferências de risco do tomador de decisão, sendo que $\theta=0.5$ representa a visão neutra. Por fim a aplicação da equação 7 determinou o peso normalizado dos requisitos (v_i). Os resultados desses cálculos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Resultado do cálculo dos pesos dos requisitos

ID	Distância da solução ideal positiva $d(x_i, x^+)$	Distância da solução ideal negativa $d(x_i, x^-)$	Grau de satisfação $\eta(x_i)$	Peso normalizado (v_i)	Classificação
R ₂	0.154	0.345	0.691	0.220	1°
R ₃	0.208	0.323	0.609	0.194	2°
R ₆	0.218	0.261	0.544	0.173	3°
R ₅	0.240	0.267	0.526	0.168	4°
R ₁	0.269	0.243	0.474	0.151	5°
R ₄	0.364	0.154	0.298	0.095	6°

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se, após os cálculos, que os requisitos de maior importância segundo os tomadores de decisão são descentralização (R₂), digitalização (R₃), modularidade (R₆), interoperabilidade (R₅), automação (R₁) e gestão e organização (R₄), respectivamente.

4.2 Determinação e Avaliação dos Critérios

Na segunda etapa, os tomadores de decisão definiram um conjunto de critérios relacionados com os requisitos selecionados na etapa anterior. Com base na lista apresentada na Tabela 8, nesse exemplo ilustrativo, os tomadores de decisão selecionaram quinze critérios. Os mesmos são exibidos na Tabela 13.

Tabela 13: Critérios selecionados pelos decisores

ID	Critérios
C ₁	Status financeiro
C ₂	Compartilhamento de informações em tempo real
C ₃	Customização em massa
C ₄	Estrutura telemática
C ₅	Gerenciamento da segurança cibernética
C ₆	Velocidade na resolução de problemas
C ₇	Inovação e P&D
C ₈	Integração vertical e horizontal
C ₉	Monitoramento remoto
C ₁₀	Suporte técnico
C ₁₁	Qualidade do produto
C ₁₂	Rastreabilidade

C ₁₃	Reconfigurabilidade da fábrica
C ₁₄	Visibilidade da cadeia de suprimentos
C ₁₅	Tecnologia relacionada ao aprendizado da máquina

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a escolha dos critérios, os tomadores de decisão avaliaram a intensidade de relacionamento entre esses critérios e os requisitos escolhidos na primeira etapa utilizando os termos e expressões linguísticas. O resultado é exibido na Tabela 14 e a conversão desses em formato HFLTS na Tabela 15.

Tabela 14:Avaliação da intensidade de relacionamento entre critérios e requisitos

ID	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
C ₁	Alto	Médio	Entre alto e muito alto	Entre muito baixo e baixo	Médio	Baixo
C ₂	Entre médio e alto	Entre muito baixo e baixo	Entre alto e muito alto	Entre médio e alto	Entre médio e alto	Entre médio e alto
C ₃	Entre médio e alto	Entre médio e alto	Baixo	Entre médio e alto	Baixo	No mínimo muito alto
C ₄	Entre médio e muito alto	Alto	Entre médio e alto	Médio	Entre médio e alto	Médio
C ₅	Alto	Entre alto e muito alto	Entre alto e muito alto	Entre baixo e médio	Entre baixo e médio	Entre baixo e médio
C ₆	No mínimo alto	Médio	Muito baixo	Entre alto e muito alto	Entre muito baixo e baixo	Entre baixo e médio
C ₇	Entre alto e muito alto	Entre médio e alto	Entre baixo e médio	Entre alto e muito alto	Entre baixo e médio	No mínimo muito alto
C ₈	Médio	Entre médio e alto	Entre médio e muito alto	Entre médio e alto	No mínimo muito alto	Médio
C ₉	Entre alto e muito alto	No mínimo muito alto	Entre alto e muito alto	Entre baixo e médio	Médio	Entre alto e muito alto
C ₁₀	Entre médio e muito alto	Entre baixo e médio	Entre alto e muito ato	Entre muito baixo e baixo	Entre alto e muito alto	Entre alto e muito alto
C ₁₁	No mínimo muito alto	Entre alto e muito alto	Baixo	Entre alto e muito alto	Médio	Entre médio e alto
C ₁₂	Absoluto	Baixo	Entre baixo e médio	Médio	Entre baixo e muito baixo	Entre alto e médio
C ₁₃	Muito alto	Entre médio e muito alto	Entre baixo e médio	Entre muito baixo e baixo	Entre alto e muito alto	No mínimo alto
C ₁₄	Médio	Muito baixo	Baixo	Absoluto	Baixo	Baixo
C ₁₅	Entre alto e muito alto	Entre alto e muito alto	Médio	Entre baixo e médio	No mínimo alto	Entre alto e muito alto

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15: Conversão da avaliação de intensidade de relacionamento para o formato de HFLTS

ID	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
C ₁	[A]	[M]	[A, MA]	[MB, B]	[M]	[B]
C ₂	[M, A]	[MB, B]	[A, MA]	[M, A]	[M, A]	[M, A]
C ₃	[M, A]	[M, A]	[B]	[M, A]	[B]	[MA, AB]
C ₄	[M, A, MA]	[A]	[M, A]	[M]	[M, A]	[M]
C ₅	[A]	[A, MA]	[A, MA]	[B, M]	[B, M]	[B, M]
C ₆	[A, MA, AB]	[M]	[MB]	[A, MA]	[MB, B]	[B, M]
C ₇	[A, MA]	[M, A]	[B, M]	[A, MA]	[B, M]	[MA, AB]
C ₈	[M]	[M, A]	[M, A, MA]	[M, A]	[MA, AB]	[M]
C ₉	[A, MA]	[A, MA, AB]	[A, MA]	[B, M]	[M]	[A, MA]
C ₁₀	[M, A, MA]	[B, M]	[A, MA]	[MB, B]	[A, MA]	[A, MA]
C ₁₁	[MA, AB]	[A, MA]	[B]	[A, MA]	[M]	[M, A]
C ₁₂	[AB]	[B]	[B, M]	[M]	[B, M]	[B, M]
C ₁₃	[MA]	[M, A]	[B, M]	[MB, B]	[A, MA]	[A, MA, AB]
C ₁₄	[M]	[MB]	[B]	[AB]	[B]	[B]
C ₁₅	[A, MA]	[A, MA, AB]	[M]	[B, M]	[MA, AB]	[A, MA]

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalizando a segunda etapa de aplicação do modelo, foram realizados os cálculos para obter os pesos dos critérios. Identificou-se a solução ideal positiva (x^+) por meio da equação 4, o resultado foi $x^+=[[AB] [AB] [MA] [AB] [AB] [AB]]$. O mesmo procedimento foi adotado para a solução ideal negativa (x^-) por meio da equação 5, resultando em $x^-=[[M] [MB] [MB] [MB] [MB] [B]]$. Na sequência, considerando o peso dos requisitos obtidos na primeira etapa, as distâncias da solução ideal positiva ($d(x_i, x^+)$) e da solução ideal negativa ($d(x_i, x^-)$) foram determinadas pela equação 2. Logo após, o grau de satisfação dos critérios foi revelado com a aplicação da equação 6 ($\eta(x_i)$) usando $\theta= 0.5$. Por fim a aplicação da equação 8 determinou o peso normalizado de cada critério (w_i). Os resultados desses cálculos são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Resultado do cálculo do peso dos critérios

ID		Distância da solução ideal positiva	Distância da solução ideal negativa	Grau de satisfação	Peso normalizado	Classificação
		$d(x_i, x^+)$	$d(x_i, x^-)$	$\eta(x_i)$	(w_i)	
C ₁₅	Tecnologia relacionada ao aprendizado da máquina	0.264	0.421	0.615	0.824	1°
C ₉	Monitoramento remoto	0.284	0.416	0.594	0.788	2°
C ₈	Integração vertical e horizontal	0.331	0.392	0.542	0.677	3°
C ₁₁	Qualidade do produto	0.327	0.356	0.521	0.624	4°
C ₁₃	Reconfigurabilidade da fábrica	0.335	0.360	0.518	0.616	5°
C ₇	Inovação e P&D	0.335	0.352	0.512	0.601	6°
C ₃	Customização em massa	0.356	0.369	0.509	0.592	7°
C ₁₀	Suporte técnico	0.360	0.364	0.503	0.576	8°
C ₄	Estrutura telemática	0.337	0.324	0.490	0.540	9°
C ₅	Gerenciamento da segurança cibernética	0.370	0.352	0.488	0.534	10°
C ₂	Compartilhamento de informações em tempo real	0.414	0.311	0.429	0.375	11°
C ₁	Status financeiro	0.426	0.292	0.406	0.319	12°
C ₁₂	Rastreabilidade	0.449	0.245	0.353	0.206	13°
C ₆	Velocidade na resolução de problemas	0.477	0.245	0.339	0.182	14°
C ₁₄	Visibilidade da cadeia de suprimentos	0.536	0.236	0.306	0.133	15°

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Avaliação da dificuldade de coleta de dados e escolha dos critérios

Nessa etapa, o objetivo é avaliar o grau de dificuldade de coleta dados relacionados os desempenho dos fornecedores nos critérios definidos na segunda etapa. Para tanto, são considerados pelos tomadores de decisão três parâmetros: disponibilidade de informações, recursos humanos e tempo necessário, e recursos adicionais. Uma vez que a avaliação desses parâmetros é imprecisa, foram utilizados os termos linguísticos apresentados na Figura 10 e as expressões linguísticas da Tabela 7. Os julgamentos dos critérios são exibidos na Tabela 17, e o resultado da conversão em formato HFLTS na Tabela 18.

Conforme esclarecido na seção 4, nessa etapa, o valor do parâmetro “disponibilidade de informações” é calculado para cada critério utilizando a equação 5 para definir a solução ideal positiva e a equação 4 para definir a solução ideal negativa. Essa inversão é necessária uma vez que “disponibilidade de informações” é entendido como um fator de custo, em razão da dificuldade da coleta de dados diminuir com o aumento da disponibilidade de informações. O cálculo dos parâmetros “recursos humanos e tempo necessário” e “recursos adicionais” utilizou a equação 4 para definir a solução ideal positiva e a equação 5 para gerar a solução ideal negativa, visto que são critérios de benefícios, pois a necessidade de acrescentar especialistas e requerer mais tempo implica em aumento da dificuldade de coleta de dados. O mesmo se aplica ao fator “recursos adicionais”. Portanto, com essas considerações, obteve-se os resultados $x^+=[[MB] [MA] [MA]]$ e $x^-=[[MA] [MB] [MB]]$.

Em seguida, foi determinada a distância de cada critério a partir das soluções ideais positiva ($d(x_i, x^+)$) e negativa ($d(x_i, x^-)$) usando a equação 2. Logo após, a aplicação da equação 6 produziu o grau de satisfação dos critérios ($\eta(x_i)$) usando $\theta= 0.5$. Por fim, a aplicação da equação 8 determinou o grau de dificuldade de coleta de dados para cada critério (w_i). Os resultados desses cálculos são apresentados na Tabela 19. Analisando esses resultados, percebe-se que os critérios performance dos sistemas (C_{10}), integração vertical e horizontal (C_8), visibilidade da cadeia de suprimentos (C_{14}), monitoramento remoto (C_9), tecnologia relacionada ao aprendizado da máquina (C_{15}) possuem maior dificuldade de coleta de dados.

Tabela 17: Avaliação dos critérios em relação ao grau de dificuldade de coleta de dados

ID	Disponibilidade de informações	Recursos humanos e tempo necessário	Recursos adicionais
C ₁	Entre médio e alto	Baixo	No máximo baixo
C ₂	No mínimo alto	No máximo baixo	Baixo
C ₃	Entre baixo e médio	Entre baixo e médio	Entre baixo e médio
C ₄	No máximo médio	Entre médio e alto	Médio
C ₅	No máximo baixo	Entre baixo e médio	Entre médio e alto
C ₆	No mínimo alto	Entre baixo e médio	No máximo baixo
C ₇	No máximo baixo	Entre baixo e médio	Entre médio e alto
C ₈	No máximo baixo	Entre médio e alto	No mínimo alto
C ₉	Entre baixo e médio	Alto	Alto
C ₁₀	No máximo baixo	No mínimo alto	No mínimo alto
C ₁₁	No mínimo alto	Entre baixo e médio	Baixo
C ₁₂	Entre médio e alto	No mínimo alto	Baixo
C ₁₃	Entre baixo e médio	Entre baixo e médio	Alto
C ₁₄	No máximo baixo	Alto	Entre médio e alto
C ₁₅	Entre baixo e médio	Entre médio e alto	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 18: Conversão dos julgamentos da dificuldade de coleta de dados em HFLTS

ID	Disponibilidade de informações	Recursos humanos e tempo necessário	Recursos adicionais
C ₁	[M, A]	[B]	[MB, B]
C ₂	[A, MA]	[MB, B]	[B]
C ₃	[B, M]	[B, M]	[B, M]
C ₄	[MB, B, M]	[M, A]	[M]
C ₅	[MB, B]	[B, M]	[M, A]
C ₆	[A, MA]	[B, M]	[MB, B]
C ₇	[MB, B]	[B, M]	[M, A]
C ₈	[MB, B]	[M, A]	[A, MA]
C ₉	[B, M]	[A]	[A]
C ₁₀	[MB, B]	[A, MA]	[A, MA]
C ₁₁	[A, MA]	[B, M]	[B]
C ₁₂	[M, A]	[A, MA]	[B]
C ₁₃	[B, M]	[B, M]	[A]
C ₁₄	[MB, B]	[A]	[M, A]
C ₁₅	[B, M]	[M, A]	[A]

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19: Resultado do cálculo do grau de dificuldade da coleta de dados

ID		Distância da solução ideal positiva	Distância da solução ideal negativa	Grau de satisfação	Peso normalizado	Classificação
		$d(x_i, x^+)$	$d(x_i, x^-)$	$\eta(x_i)$	(w_i)	
C ₁₀	Suporte técnico	0.245	1.225	0.833	0.815	1°
C ₈	Integração vertical e horizontal	0.374	1.122	0.750	0.745	2°
C ₁₄	Visibilidade da cadeia de suprimentos	0.400	1.058	0.726	0.722	3°
C ₉	Monitoramento remoto	0.424	0.990	0.700	0.695	4°
C ₁₅	Tecnologia relacionada ao aprendizado da máquina	0.490	0.938	0.657	0.648	5°
C ₄	Estrutura telemática	0.572	0.898	0.611	0.595	6°
C ₅	Gerenciamento da segurança cibernética	0.616	0.927	0.601	0.582	7°
C ₇	Inovação e P&D	0.616	0.927	0.601	0.582	8°
C ₁₃	Reconfigurabilidade da fábrica	0.632	0.849	0.573	0.548	9°
C ₁₂	Rastreabilidade	0.800	0.800	0.500	0.458	10°
C ₃	Customização em massa	0.787	0.678	0.463	0.413	11°
C ₁	Status financeiro	1.058	0.400	0.274	0.216	12°
C ₁₁	Qualidade do produto	1.058	0.400	0.274	0.216	13°
C ₆	Velocidade na resolução de problemas	1.122	0.374	0.250	0.196	14°
C ₂	Compartilhamento de informações em tempo real	1.166	0.283	0.195	0.157	15°

Fonte: Elaborado pelo autor

Após o cálculo da dificuldade de coleta dos dados, os critérios foram agrupados na matriz de classificação em função de seus pesos (etapa 2) e dificuldade de coleta de dados (etapa 3), conforme mostrado na Figura 12. O limiar de classificação entre os quadrantes foi definido como 0.5. Assim, se o valor do peso normalizado for igual ou maior que 0.501, o critério será classificado no quadrante alto ou à direita. Os critérios, qualidade (C₁₁) e customização em massa (C₃) foram classificados tendo um alto grau de importância e baixa dificuldade para coleta de dados, o que significa que devem ser utilizados no processo de seleção de fornecedores. Os critérios estrutura telemática (C₄), gerenciamento de segurança cibernética (C₅), inovação e P&D (C₇), integração vertical e horizontal (C₈), monitoramento remoto (C₉), performance dos sistemas (C₁₀), reconfigurabilidade da fábrica (C₁₃) e tecnologia relacionada ao aprendizado da máquina (C₁₅), foram classificados com alto grau de importância e elevado esforço para coletar de dados. Os tomadores de decisão discutiram a relevância dos critérios, porém, não houve exclusões devido à importância dos mesmos no contexto da indústria 4.0. No terceiro quadrante, os critérios classificados com baixa dificuldade de coleta de dados e baixa importância foram Compartilhamento de informações em tempo real (C₂), Capacidade do banco de dados (C₁), Histórico de desempenho (C₆) e Rastreabilidade (C₁₂). Nesse contexto ilustrativo, os tomadores de decisão decidiram excluir o critério Histórico de desempenho (C₆), uma vez que esse não possui elevada relação com os requisitos. Por fim, o critério Visibilidade da cadeia de suprimentos (C₁₄) foi classificado como critério custoso. Conforme sugerido no modelo proposto, os critérios classificados nesse grupo não devem ser selecionados, pois foram avaliados como de baixa importância e um esforço alto de coleta de dados.

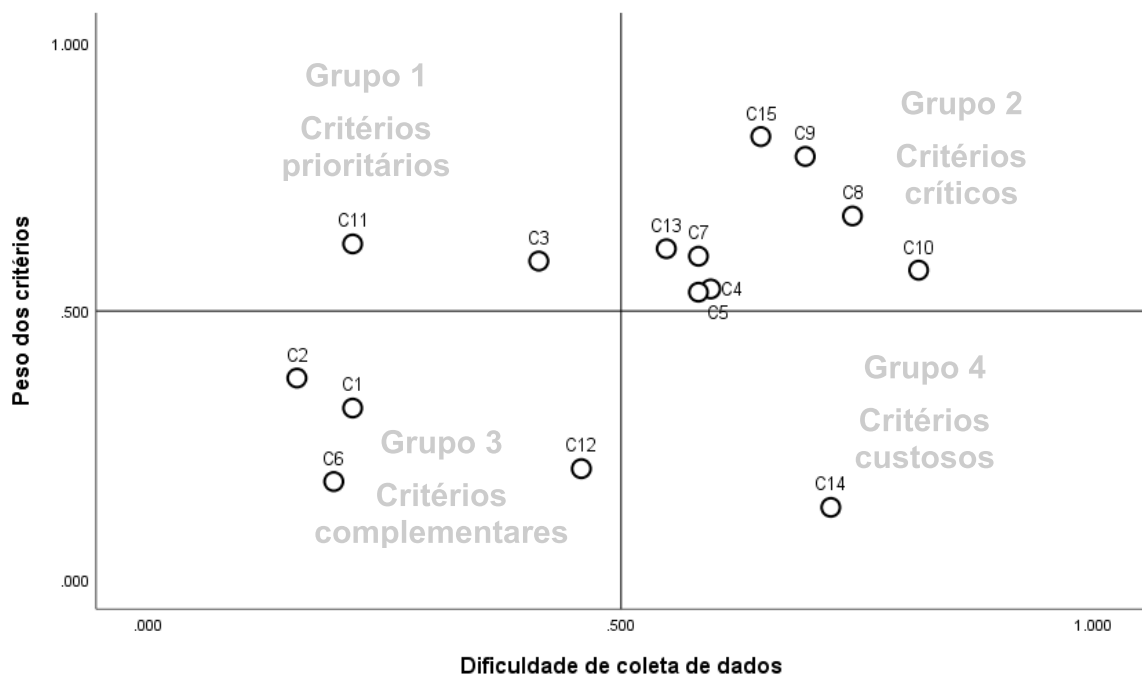


Figura 12: Matriz de classificação dos critérios
 Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Avaliação e Seleção dos Fornecedores

Na última etapa, os decisores realizaram a avaliação das alternativas de fornecimento analisando o desempenho das mesmas em relação aos critérios selecionados na etapa anterior. Essa aplicação ilustrativa considerou a avaliação de três fornecedores. Identicamente às outras etapas, a avaliação foi feita pelos tomadores de decisão, com o uso de termos e expressões linguísticas. O resultado consensual dessa avaliação é exibido na Tabela 20 e a conversão em termos linguísticos na Tabela 21.

Tabela 20: Avaliação das alternativas de fornecimento

ID	A ₁	A ₂	A ₃
C ₁	Entre médio e alto	Entre alto e muito alto	Alto
C ₂	Entre baixo e médio	Entre médio e alto	Entre médio e alto
C ₃	Entre alto e muito alto	Entre médio e alto	Entre alto e muito alto
C ₄	No mínimo muito alto	Entre médio e alto	Entre médio e muito alto
C ₅	Entre muito baixo e baixo	Entre médio e alto	Entre baixo e médio
C ₇	Entre médio e alto	No mínimo muito alto	Entre alto e muito alto
C ₈	Entre alto e muito alto	Médio	Entre médio e alto
C ₉	Entre médio e alto	Entre alto e muito alto	Entre baixo e médio
C ₁₀	Entre baixo e médio	Médio	Entre baixo e médio
C ₁₁	Entre médio e alto	Médio	Entre alto e muito alto
C ₁₂	Entre médio e alto	Entre médio e alto	No mínimo muito alto
C ₁₃	Entre baixo e médio	Médio	Entre alto e muito alto
C ₁₅	Entre médio e alto	Entre alto e muito alto	Entre médio e alto

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 21: Conversão das avaliações das alternativas de fornecimento em HFLTS

ID	A ₁	A ₂	A ₃
C ₁	[M, A]	[A, MA]	[A]
C ₂	[B, M]	[M, A]	[M, A]
C ₃	[A, MA]	[M, A]	[A, MA]
C ₄	[MA, AB]	[M, A]	[M, A, MA]
C ₅	[MB, B]	[M, A]	[B, M]
C ₇	[M, A]	[MA, AB]	[A, MA]
C ₈	[A, MA]	[M]	[M, A]
C ₉	[M, A]	[A, MA]	[B, M]
C ₁₀	[B, M]	[M]	[B, M]
C ₁₁	[M, A]	[M]	[A, MA]
C ₁₂	[M, A]	[M, A]	[MA, AB]
C ₁₃	[B, M]	[M]	[A, MA]
C ₁₅	[M, A]	[A, MA]	[M, A]

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, obteve-se a solução ideal positiva (x^+) usando a equação 4, e a solução ideal negativa (x^-) por meio da equação 5, resultando em $x^+=[[MA] [A] [MA] [AB] [A] [AB] [MA] [MA] [M] [MA] [AB] [MA] [MA]]$ e $x^-=[[M] [B] [M] [M] [MB] [M] [M] [B] [B] [M] [M] [B] [M]]$. Na sequência, valendo-se dos pesos dos critérios definidos na segunda etapa, as distâncias da solução ideal positiva ($d(x_i, x^+)$) e da solução ideal negativa ($d(x_i, x^-)$) foram determinadas pela equação 2. Logo após, a aplicação da equação 6 produziu o grau de satisfação dos fornecedores ($\eta(x_i)$) usando $\theta=0.5$. Por fim, a aplicação da equação 7 determinou o pontuação normalizada dos fornecedores (v_i). Os resultados da avaliação das alternativas são apresentados desses cálculos são apresentados na Tabela 22 como resultado final da aplicação do modelo.

Tabela 22: Classificação das alternativas de fornecimento

ID	Distância da solução ideal positiva $d(x_i, x^+)$	Distância da solução ideal negativa $d(x_i, x^-)$	Grau de satisfação $\eta(x_i)$	Peso normalizado (v_i)	Classificação
A ₂	0.607	0.609	0.501	0.3538	1°
A ₃	0.593	0.571	0.491	0.3466	2°
A ₁	0.676	0.498	0.424	0.2995	3°

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a aplicação de todas as etapas, verificou-se que a alternativa (A₂) é a melhor opção de fornecimento. Esse resultado decorreu devido a algumas condições. Por exemplo, a alternativa (A₂) não obteve avaliação inferior a Médio [M] em nenhum critério. Além do mais, obteve boa avaliação em critérios de maior peso, principalmente os critérios (C₁₅) e (C₉). Na próxima seção, a fim de verificar como as saídas do modelo se comportam em diferentes cenários de decisão, será realizado testes de análise de sensibilidade.

5. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é um processo sistemático usado pra explorar o grau de sensibilidade da melhor solução para mudanças nos elementos do modelo que estão sujeitos à incerteza. Baseia-se no pressuposto de que a otimização é o estágio principal e a incerteza é considerada um fator prejudicial (Muñoz et al., 2016). Na tomada de decisão multicritério, a análise de sensibilidade ajuda a reduzir a incerteza e garantir estabilidade nos resultados, ilustrando o impacto da introdução de pequenas alterações nos parâmetros de entrada específicos nos resultados da avaliação (Chen et al., 2010). Neste estudo, a análise de sensibilidade foi realizada por meio da alteração dos valores empregados ao parâmetro θ . Conforme visto na seção 3.6.5, o parâmetro θ denota as preferências de risco do tomador de decisão, sendo que $\theta=0.5$ (usado na aplicação ilustrativa) representa uma visão neutra. De outra forma, $\theta>0.5$ representa uma visão pessimista e $\theta<0.5$ representa uma visão otimista (Liao et al., 2014). Portanto, a partir desse princípio, foram testados os seguintes cenários otimista e pessimista:

- **Cenário otimista:** o parâmetro $\theta=0.1$ foi usado para o cálculo do peso dos critérios (segunda etapa), e $\theta=0.9$ para o cálculo da dificuldade de coleta de dados (terceira etapa). Essa inversão nos valores de θ para o cálculo de dificuldade de coleta de dados foi feita considerando que uma alta pontuação nessa dimensão impacta negativamente o critério avaliado;
- **Cenário pessimista:** $\theta=0.9$ foi adotado para o cálculo do peso dos critérios, e $\theta=0.1$ para o cálculo da dificuldade de coleta de dados.

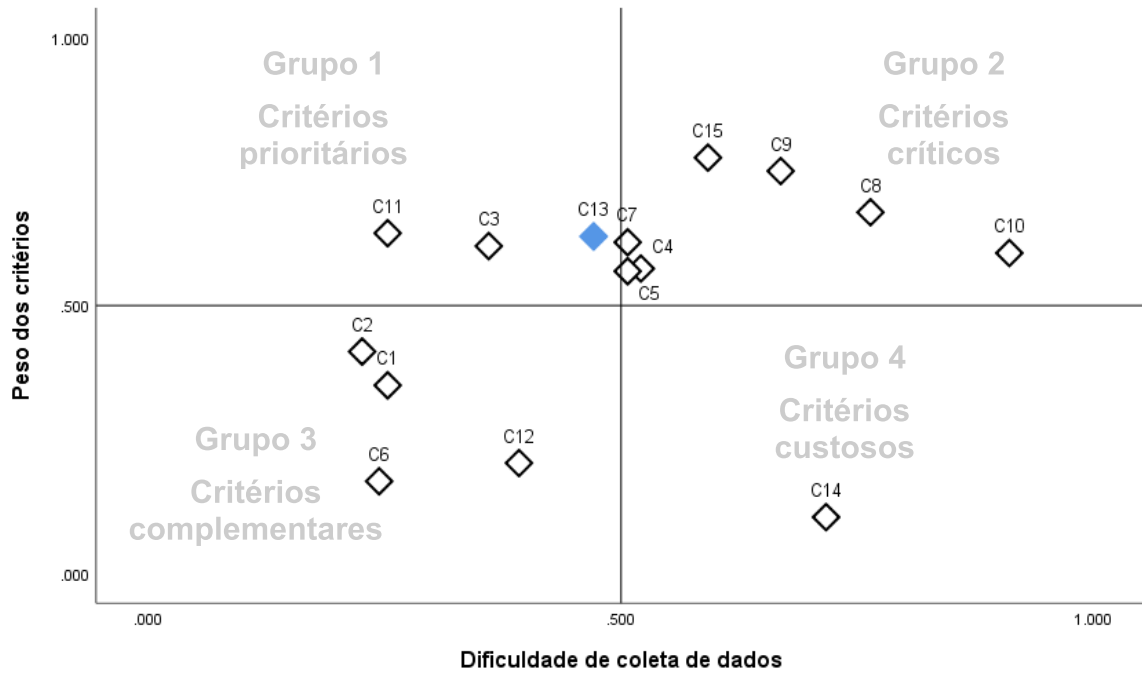
Portanto, a partir dessas alterações, buscou-se identificar se os resultados da categorização dos critérios na matriz de classificação iriam sofrer mudanças. Os julgamentos dos especialistas não foram modificados em nenhuma etapa. Os resultados das pontuações dos critérios nos dois cenários considerados são apresentados na Tabela 23. As matrizes de classificação dos cenários são apresentadas nas Figuras 13 e 14. As matrizes foram desenvolvidas com objetivo de proporcionar melhor percepção gráfica. A diferenciação dos cenários é identificada pelos seguintes formatos geométricos:

- a) Quadrado: classificação no cenário pessimista;
- b) Losango: classificação no cenário otimista;
- c) Elementos destacados (cor azul): critérios que mudaram de grupo em relação à classificação obtida na aplicação.

Tabela 23: Resultado da análise de sensibilidade para os cenários (pessimista, neutro e otimista)

Critérios	Cenário Pessimista			Aplicação			Cenário Otimista		
	Peso dos critérios	Dificuldade de coleta de dados	Classificação	Peso dos critérios	Dificuldade de coleta de dados	Classificação	Peso dos critérios	Dificuldade de coleta de dados	Classificação
C ₁	0.305	0.228	Complementares	0.319	0.216	Complementares	0.351	0.253	Complementares
C ₂	0.352	0.104	Complementares	0.375	0.157	Complementares	0.414	0.226	Complementares
C ₃	0.567	0.499	Prioritários	0.593	0.413	Prioritários	0.611	0.360	Prioritários
C ₄	0.510	0.627	Críticos	0.541	0.595	Críticos	0.569	0.521	Críticos
C ₅	0.504	0.620	Críticos	0.535	0.582	Críticos	0.564	0.507	Críticos
C ₆	0.200	0.188	Complementares	0.182	0.196	Complementares	0.172	0.244	Complementares
C ₇	0.578	0.620	Críticos	0.602	0.582	Críticos	0.618	0.507	Críticos
C ₈	0.670	0.699	Críticos	0.677	0.745	Críticos	0.674	0.764	Críticos
C ₉	0.817	0.677	Críticos	0.788	0.695	Críticos	0.751	0.669	Críticos
C ₁₀	0.549	0.730	Críticos	0.576	0.815	Críticos	0.598	0.911	Críticos
C ₁₁	0.605	0.228	Prioritários	0.625	0.216	Prioritários	0.635	0.253	Prioritários
C ₁₂	0.218	0.538	Custosos	0.206	0.458	Complementares	0.206	0.392	Complementares
C ₁₃	0.595	0.600	Críticos	0.616	0.548	Críticos	0.629	0.471	Prioritários
C ₁₄	0.164	0.689	Custosos	0.134	0.722	Custosos	0.105	0.717	Custosos
C ₁₅	0.866	0.654	Críticos	0.825	0.648	Críticos	0.776	0.592	Críticos

Fonte: Elaborado pelo autor



Legenda

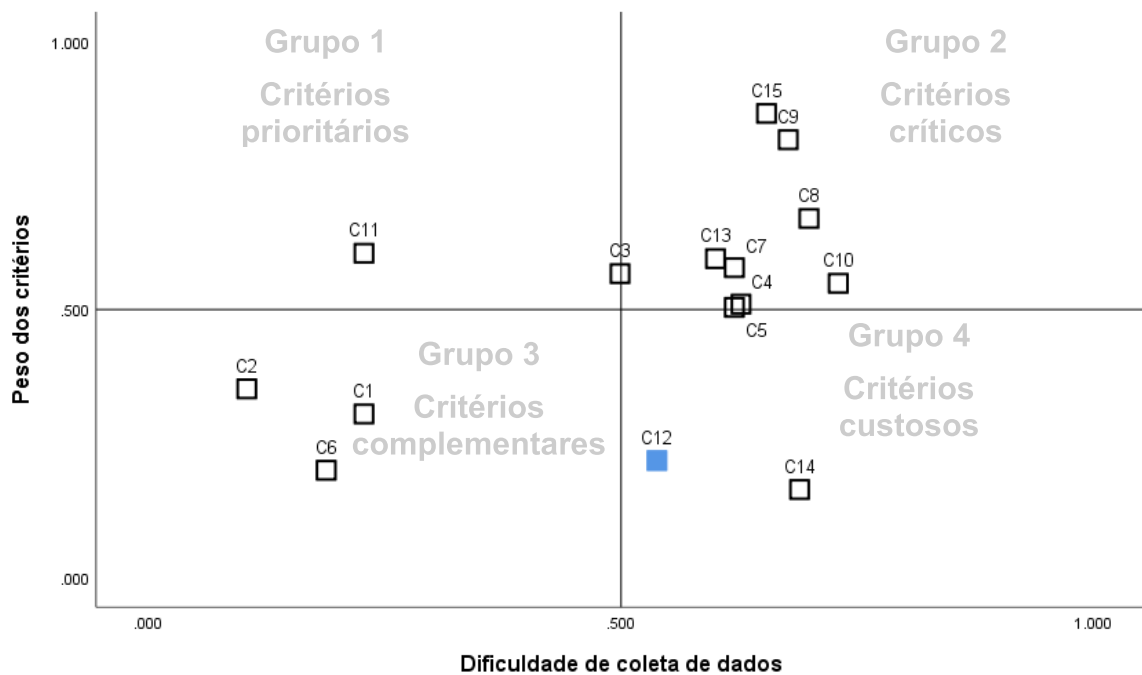


Cenário otimista



Critério classificado em outro grupo no cenário otimista

Figura 13: Matriz de classificação dos critérios no ambiente otimista
Fonte: Elaborado pelo autor



Legenda



Cenário pessimista



Critério classificado em outro grupo no cenário pessimista

Figura 14: Matriz de classificação dos critérios no ambiente pessimista
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os resultados, percebe-se que foi alterada a classificação de dois critérios. Na aplicação o critério C_{13} foi classificado como critério crítico, entretanto, no ambiente com decisores otimistas, o critério foi classificado como prioritário. Já o critério C_{12} , na aplicação foi classificado como critério complementar, mas em um cenário com os decisores pessimistas é categorizado como critério custoso. Percebe-se também que apesar de alguns critérios não mudarem de grupo, houve tendência de mudança. Na análise do ambiente otimista, os critérios C_2 , C_7 , C_4 e C_5 ficaram próximos de avançarem para o grupo de critérios prioritários (grupo 1). De outra forma, no ambiente pessimista, os critérios C_4 , C_5 e C_{10} ficaram próximos ao grupo de critérios custosos (grupo 4). Portanto, diante desses resultados, constata-se que há sensibilidade no modelo às variações nos valores do parâmetro θ , principalmente nos casos em que os critérios estão classificados próximos ao limiar que divide os grupos.

Conclusões

Este estudo, propôs um modelo de decisão para apoiar a seleção de critérios e fornecedores por meio da combinação do HFLTS com o método QFD, considerando os critérios e requisitos advindos da indústria 4.0. Para alcançar os objetivos apresentados, a análise da literatura relacionada à seleção de fornecedores, indústria 4.0 e *supply chain 4.0* forneceu uma visão geral do estado da

arte relacionado ao tema e serviu para extrair os requisitos e critérios que serviram de base para a construção do modelo conceitual. A pesquisa bibliográfica sistemática caracterizou os modelos de decisão empregados para selecionar fornecedores no ambiente da indústria 4.0. Esse processo permitiu identificar limitações nos modelos existentes e apontar lacunas de pesquisa relacionada ao tema. Além disso, por meio de uma aplicação ilustrativa, foi desenvolvido um modelo utilizando o software Microsoft Excel considerando os julgamentos de 3 tomadores de decisão. Adicionalmente, foi realizada a análise de sensibilidade para explorar o grau de sensibilidade incorporando uma visão pessimista ou otimista da melhor solução por meio de variações no parâmetro θ .

A partir do enquadramento apresentado, destaca-se algumas contribuições deste estudo para a literatura e prática:

- Apoio à escolha de critérios para avaliação de fornecedores: Diferentemente dos modelos de seleção de fornecedores no contexto da indústria 4.0 desenvolvidos por Sachdeva, Shrivastava e Chauhan (2019), Büyüközkan e Göçer (2017), Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Çalık (2020), Torkayesh et al. (2020), Kusi-Sarpong et al. (2019), Liao et al. (2019), Hasan et al. (2020), Kaur e Singh (2020), Özek e Yildiz (2020) e Ghadimi et al. (2019), no modelo proposto a seleção dos critérios é baseada em um procedimento de classificação em uma matriz considerando os pesos destes critérios e o grau de dificuldade associado à coleta de dados sobre o desempenho dos fornecedores; O modelo também fornece suporte à avaliação de fornecedores considerando múltiplos critérios. O desenvolvimento do modelo no Excel favorece sua replicação para auxiliar gestores a tomarem decisões relacionadas à seleção de fornecedores;
- Quantidade não limitada de variáveis de entrada: Ao contrário dos modelos prévios baseados em AHP, Büyüközkan e Göçer (2018), Büyüközkan e Göçer (2019), Çalık (2020) e Kaur e Singh (2020). BMW, Liao et al. (2019), Kusi-Sarpong et al. (2019) e Torkayesh et al. (2020), no modelo proposto, o número de alternativas, requisitos ou critérios, que podem ser utilizados não é limitado pela capacidade humana de realizar comparações pareada. No modelo proposto por Kaur e Singh (2020), a seleção das entradas e saídas do modelo DEA também é limitado, visto que, quanto maior o número de entradas e saídas, menos discriminatório o modelo se torna (Boussofiane et al., 1991);
- Suporte à tomada de decisão em grupo: Distintamente dos modelos apresentados por Özek e Yildiz (2020), Kaur e Singh (2020) e Torkayesh et al. (2020). O modelo proposto fornece suporte para a tomada de decisão em grupo, de modo a considerar opinião de vários decisores, o que é uma necessidade recorrente no processo de seleção de fornecedores (Chai & Ngai, 2020);
- Ponderação da opinião dos decisores: O modelo proposto permite considerar pesos diferentes para os julgamentos dos decisores, conforme seu nível de conhecimento técnico e experiência, ao contrário dos modelos prévios desenvolvidos por Kusi-Sarpong et al. (2019), Çalık (2020) e Hasan et al. (2020);

- Suporte à decisões sob incerteza e hesitação: o modelo proposto é adequado para casos em que os decisores não conseguem fornecer julgamento com base em um único termo linguístico, sendo desejável a possibilidade de adoção de dois ou mais termos. Além do mais, possibilita também a utilização de expressões linguísticas como “entre alto e baixo”, “no mínimo médio” e “no máximo alto” para representar os julgamentos dos decisores.

Ainda assim, o modelo desenvolvido apresenta algumas limitações. Visto que o modelo foi concebido para tomada de decisões em ambientes de incerteza, torna-se inapropriada sua aplicação para apoiar a seleção de fornecedores utilizando valores numéricos precisos. Além disso, o uso de uma aplicação ilustrativa pode apresentar limitações quanto à captura das nuances das percepções dos tomadores de decisão em relação aos requisitos e critérios analisados. A aplicação por meio de um caso real em uma empresa que dispõe de estrutura procedente do ambiente da indústria 4.0 seria ideal para validar o modelo. Outra limitação está relacionada ao fato de que os requisitos e critérios utilizados no presente estudo não foram extraídos por meio de etapas de revisão sistemática. Os parâmetros foram determinados selecionando as palavras-chave, conceitos e tecnologias que definem a indústria 4.0 em artigos acadêmicos. A dificuldade na definição dos critérios e requisitos também está relacionada com a incipiente literatura relacionada *supply chain 4.0*. Uma vez que há poucos modelos quantitativos para apoiar a tomada de decisão na seleção de fornecedores no ambiente da indústria 4.0.

Em relação às oportunidades de pesquisa, as aplicações do método não se limitam à seleção de fornecedores, mas também podem ser estendidas para outras áreas que apresentem problemas de decisão multicritério relacionados à seleção, ordenação e categorização de alternativas em ambientes de incerteza, tais como seleção de equipamentos ou *software*, recursos humanos (recrutamento e seleção), marketing, gestão de riscos, entre outras. Além do mais, devido aos vários novos aspectos que podem emergir na gestão de cadeias de suprimentos 4.0, é desejável futuramente rever os critérios propostos do modelo e considerar a introdução de critérios adicionais. Outras sugestões de pesquisa identificadas a partir da revisão sistemática estão descritas na seção 3.6.2.

Referências bibliográficas

- Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Zaid, A. E. N. H., & Smarandache, F. (2019). A Hybrid Plithogenic Decision Making Approach with Quality Function Deployment for Selecting Supply Chain Sustainability Metrics. *Symmetry*, 11,7, 903.
- Abdirad, M., & Krishnan, K. (2020). Industry 4.0 in Logistics and Supply Chain Management: A Systematic Literature Review. *Engineering Management Journal*, 1–15.
- Aboutorab, H., Saberi, M., Asadabadi, M. R., Hussain, O., & Chang, E. (2018). ZBWM: The Z-number extension of Best Worst Method and its application for supplier development. *Expert Systems with Applications*, 107, 115–125.
- Aissaoui, N., Haouari, M., & Hassini, E. (2006). Supplier selection and order lot sizing modeling: a review. *Computers & Operations Research*, 34, 12, 3516–3540.
- Aitken, J., Christopher, M., & Towill, D. (2002). Understanding, Implementing and Exploiting Agility and Leanness. *International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management*, 5,1, 59-74.
- Akkaya, G., Turanoğlu, B., & Öztaş, S. (2015). An integrated fuzzy AHP and fuzzy MOORA approach to the problem of industrial engineering sector choosing. *Expert Systems with Applications*, 42,24, 9565–9573.
- Alcântara, D. A. (2017). *Sistema fuzzy para estimativa do comportamento de pintinhos submetidos a diferentes intensidades e durações de exposição térmica na segunda semana de vida*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas de Automação, Universidade Federal de Lavras).
- Alinezhad A., Khalili J. (2019). ARAS Method. In: *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. *International Series in Operations Research & Management Science*, 277. Springer.
- Almeida, A. T. *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério* (1th ed.) São Paulo: Editora Atlas, 2013.
- Amin, S.H. & Razmi, J. (2009). An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation. *Expert Systems with Applications*, 36, 8639-8648.
- Angelov, P., 2013. *Autonomous Learning Systems: From Data Streams to Knowledge in Real-time*. John Wiley & Sons.
- Aouni, B., & Kettani, O. (2001). Goal programming model: A glorious history and a promising future. *European Journal of Operational Research*, 133,2, 225–231.
- Araújo, M. C., Alencar, L. H., & Mota, C. M. (2017). Project procurement management: a structured literature review. *International Journal of Project Management*, 35, 3, 353-377.

- Arenkov, I., Tsenzharik, M., & Vetrova, M. (2019). Digital technologies in supply chain management. International Conference on Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019), Atlantis Press, 448-453.
- Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20,1, 87–96.
- Bäckstrand, J., R., Suurmond, E., van Raaij, & C. Chen. (2019) Nodes and debates on purchasing process models: Inspiration for teaching purchasing and supply management. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 25,5, 100577.
- Bag, S., Wood, L. C., Mangla, S. K., & Luthra, S. (2020). Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy. *Resources, Conservation & Recycling*, 152, 104502.
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.A., Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in Industry 4.0 environment. *IFAC-PapersOnLine*, 48, 1622-1627.
- Banaeian, N., Nielsen, I. E., Mobli, H., & Omid, M. (2014). Green Supplier Selection in Edible oil Production by a Hybrid Model Using Delphi Method and Green Data Envelopment Analysis (GDEA). *Management and Production Engineering Review*, 5, 4, 3–8.
- Baranwal, G., Singh, M., & Vidyarthi, D. (2019). A framework for IoT service selection, *The Journal of Supercomputing*, 76, 2777–2814.
- Barbosa-Povoa, A. P., & Pinto, J. M. (2018). Challenges and Perspectives of Process Systems Engineering in Supply Chain Management. *Computer Aided Chemical Engineering*, 44, 87-96.
- Bauer, W., Schlund, S., Marrenbach, D., & Ganschar, O. (2014): Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Studie des Bundesverbands Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. und des Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Berlin.
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2017). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57, 15-15, 1–24.
- Benešová, A., & Tupa, J. (2017). Requirements for education and qualification of people in industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195–2202.
- Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, 22, 2, 241-264.
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J.P., & Grebner, D.L. (2017). *Forest Management and Planning* (2th ed.). Academic Press, New York, NY. 349 p.
- Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E. & Giaccheta, G. (2006). A fuzzy-QFD approach to supplier selection. *Journal of Purchasing & Supply Management*, 12, 14-27.

- Bhattacharya, A., Mohapatra, P., Kumar, V., Dey, P. K., Brady, M., Tiwari, M. K., & Nudurupati, S. S. (2013). Production Planning & Control (2013): Green supply chain performance measurement using fuzzy ANP-based balanced scorecard: a collaborative decision-making approach. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 25, 8, 698-714.
- Bienhaus, F., & Haddud, A. (2018). Procurement 4.0: factors influencing the digitisation of procurement and supply chains. *Business Process Management Journal*, 24, 4, 965-984.
- Bolturk, E. (2018). Pythagorean fuzzy CODAS and its application to supplier selection in a manufacturing firm. *Journal of Enterprise Information Management*, 31,4, 550–564.
- Bouchereau, V., & Rowlands, H. (2000). Methods and techniques to help quality function deployment (QFD). *Benchmarking: An International Journal*, 7,1, 8–20.
- Boussofiane, A., Dyson, R. G., & Thanassoulis, E. (1991). Applied data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 52,1, 1–15.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): an analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1-12.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for managing supply chain risks. *European J. of Operational Research*, 233, 299–312.
- Brauers, W. K., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*, 35, 445–469.
- Brown, A. M. (2000). Simulation of axonal excitability using a Spreadsheet template created in Microsoft Excel. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 63, 1, 47–54.
- Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2017). An extension of MOORA approach for group decision making based on interval valued intuitionistic fuzzy numbers in digital supply chain. Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS), Otsu, Japan, 1-6.
- Büyüközkan, G., & F. Göçer, F. (2019). A Novel Approach Integrating AHP and COPRAS Under Pythagorean Fuzzy Sets for Digital Supply Chain Partner Selection. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1 – 18
- Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital Supply Chain: Literature Review and a Proposed Framework for Future Research. *Computers in Industry*, 97, 157–177.
- Büyüközkan, G., & Güler, M. (2019). Smart Watch Evaluation with Integrated Hesitant Fuzzy Linguistic SAW-ARAS Technique. *Measurement*, 107353.
- Calatayud, A., Katz, R., Betti, F., & Lehmaher, W. (2019). Supply Chain 4.0: Global Practices and Lessons Learned for Latin America and the Caribbean: <https://www.weforum.org/whitepapers/supply-chain-4-0-global-practices-and-lessons->

learned-for-latin-america-and-the-caribbean-c4ffe6b1-b2f0-44f1-8b1d-c740cc11ca6f, acessado em 28 de Agosto de 2020.

- Çalik, A. (2020). A novel Pythagorean fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodology for green supplier selection in the Industry 4.0 era. *Soft Computing*, 9.
- Camarinha-Matos, L.M., Fornasiero, R., Afsarmanesh, H. (2017). Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0. In: *Collaboration in a DataRich World*, Springer, v. 506. pp 3-17.
- Çebi, F., & Otay, İ. (2016). A two-stage fuzzy approach for supplier evaluation and order allocation problem with quantity discounts and lead time. *Information Sciences*, 339, 143-157.
- Chai, J., & Ngai E. W. T. (2020). Decision-making techniques in supplier selection: Recent accomplishments and what lies ahead. *Expert Systems with Applications*, 140, 112903.
- Chai, J., Liu, J. N. K., & Ngai, E. W. T. (2013) Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications*, 40, 3872-3885.
- Chan, L. K., Kao, H. P., & Wu, M. L. (1999). Rating the importance of customer needs in quality function deployment by fuzzy and entropy methods. *International Journal of Production Research*, 37, 11, 2499–2518.
- Chan, L.-K., Wu, M.-L. (2002). Quality function deployment: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 143, 3, 463-497.
- Chandra, A. (2019). A Paradigm Shift : Supply Chain Management 4.0 Triple “A” Method Agile, Anytime Anywhere, Always Visible. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8, 5S3, 338-343.
- Chang D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649–55.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Ferguson, R. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management Science*, 1, 138–151.
- Charnes, V., Cooper, W.W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Chen, C.T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, 1–9.
- Chen, D., Doumeingts, G., Vernadat, F. (2008). Architectures for enterprise integration and interoperability: past, present and future. *Computers in Industry*, 59, 7, 647-659.
- Chen, S. M., & Lee, L. W. (2010). Fuzzy multiple attributes group decision making based on the interval type-2 TOPSIS method, *Expert Syst. Appl.*, 37, 4, 2790–2798.

- Chen, S.-M., & Hong, J.-A. (2014). Fuzzy Multiple Attributes Group Decision-Making Based on Ranking Interval Type-2 Fuzzy Sets and the TOPSIS Method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 44(12), 1665–1673.
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental modelling and software*, 25, 1582–1591.
- Cho, M., Bonn, M. A., Giunipero, L., & Divers, J. (2019). Restaurant purchasing skills and the impacts upon strategic purchasing and performance: The roles of supplier integration. *International Journal of Hospitality Management*, 78, 293-303.
- Colak M., Kaya I., & Erdogan M. (2019). A Fuzzy Based Risk Evaluation Model for Industry 4.0 Transition Process. In: Calisir F., Cevikcan E., Camgoz Akdag H. (eds), *Industrial Engineering in the Big Data Era. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*. Springer, Cham.
- Da Silva, R. S. T., & Alves, R. A. F. S. (2019). *A próxima geração do procurement: Como atingir um crescimento sustentável através da automatização?*. (Dissertação de mestrado, Universidade de Porto).
- Dalenogare, L. S., Benitez G. B., Ayala N. F., & Alejandro G. F. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394.
- Dallasega, P., Rauch, E., & Linder. C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 99, 205-225.
- De Boer, L. (2017). Procedural rationality in supplier selection: Outlining three heuristics for choosing selection criteria. *Management Decision*, 55, 1, 32-56.
- De Boer, L., Labro, E., & Morlacchi, P. (2001). A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing and Supply Management*, 7, 2, 75–89.
- Dinçer, H., Yüksel, S., & Martínez, L. (2019). Balanced scorecard-based Analysis about European Energy Investment Policies: A hybrid hesitant fuzzy decision-making approach with Quality Function Deployment. *Expert Systems with Applications*, 115, 152–171.
- Dombrowski, U., Richter, T., & Krenkel, P. (2017). Interdependencies of industrie 4.0 & lean production systems: A use cases analysis. *Procedia Manufacturing*, 11, 1061–1068.
- Duarte S., Cruz-Machado V. (2018) Exploring Linkages Between Lean and Green Supply Chain and the Industry 4.0. In: Xu J., Gen M., Hajiyev A., Cooke F. (eds) *Proceedings of the Eleventh International Conference on Management Science and Engineering Management. ICMSEM 2017. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*. Springer, Cham.
- Dursun, M., & Karsak, E. E. (2013). A QFD-based fuzzy MCDM approach for supplier selection. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 8, 5864–5875.

- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production, 6th CLF - 6th CIRP Conference on Learning Factories, *Procedia CIRP*, 54, 13–18.
- Fávero, L. P., & Belfiore, P. (2019). Simulation and Risk Analysis. *Data Science for Business and Decision Making*. Elsevier Science 919–931.
- Filho, M. G., Neto, A. S. (2006). *Evolução da Gestão de Compras: Aspectos Teóricos e Estudo de Caso*. XIII SIMPEP. São Paulo.
- Forge, S. (2016). Radio spectrum for the internet of things, *INFO*, 18, 1, 67-84.
- Frederico, G.F., Garza-Reyes, J.A., Anosike, A.I., Kumar, V. (2019). Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, 1-21.
- Fuchs, C., Beck, D., Lienland, B., & Kellner, F. (2018). The role of IT in automotive supplier supply chains. *Journal of Enterprise Information Management*, 31, 1, 64-88.
- Furtado, G. A. P. (2005) *Critérios de seleção de fornecedores para relacionamentos de parceria: um estudo em empresas de grande porte*. (Dissertação Mestrado, Universidade de São Paulo).
- Gadde, L., & Wynstra, F. (2018). Purchasing management and the role of uncertainty. *IMP Journal*, 12, 1, 127–147.
- Garver, M. S. (2012). Improving the house of quality with maximum difference scaling. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 29, 5, 576 – 594.
- Genovese, A., Koh, S.C. L., Bruno, G. & Esposito, E. (2013). Greener supplier selection: state of the art and some empirical evidence. *International Journal of Production Research*, 51, 10, 2868-2886.
- Ghadimi, P., Wang C., Lim, M. K., & Heavy, C. (2019). Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 588-600.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Apress.
- Glas, A.H., & Kleemann, F.C. (2016). The impact of industry 4.0 on procurement and supply management: A conceptual and qualitative analysis. *Int. J. Bus. Manag. Invent*, 5, 55-66.
- Gomes, C. F. S., & Ribeiro, P. C. C. (2013). *Gestão da cadeia de suprimento integrada à tecnologia da informação* (2th ed.). São Paulo Cengage Learning, Editora Senac Rio de Janeiro.
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., & Zühlke, D. (2014). Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era, 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). pp. 289-294
- Gören, H. G. (2018). A decision framework for sustainable supplier selection and order allocation with lost sales. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1156-1169.

- Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., & Murugesan, P. (2013). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, 66-83.
- Groover, M. P., 1939-. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems* (4th ed.). Hoboken, NJ, J. Wiley & Sons.
- Guarnieri, P. (2015). Síntese dos Principais Critérios, Métodos e Subproblemas da Seleção de Fornecedores Multicritério. *Revista de administração contemporânea*, 19, 1, 1-25.
- Guarnieri, P., & Trojan, F. (2019). *Decision making on supplier selection based on social, ethical, and environmental criteria: A study in the textile industry. Resources, Conservation and Recycling*, 141, 347–361.
- Guo, J., Deng, J., & Wang, Y. (2019). An intuitionistic fuzzy set based hybrid similarity model for recommender system. *Expert Systems with Applications*, 135, 153–163.
- Ha, S.H., & Krishnan, R. (2008). A hybrid approach to supplier selection for the maintenance of a competitive supply chain. *Expert Systems with Applications*, 34, 2, 1303–1311.
- Haeri, S. A. S., & Rezaei, J. (2019). A grey-based green supplier selection model for uncertain environments. *Journal of Cleaner Production*, 221, 768–784.
- Hasan, M. M., Jiang D., Ullanh, A.M.M. S., & Noor-E-Alam, Md. (2020). Resilient supplier selection in logistics 4.0 with heterogeneous information. *Expert Systems With Applications*, 139, 112799.
- Hecklau F., Galeitzke M., Flachs S., & Kohl H. (2016). Holistic Approach for Human Resource Management in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1–6.
- Ho, W., Xu, X., & Dey P. K. (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 202, 1, 16-24.
- Hodgett, R. E. (2016). Comparison of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Equipment Selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1145-1157.
- Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34.
- Huang, J., You, X.-Y. Liu, H.-C. & Si, S.-L. (2019). New approach for quality function deployment based on proportional hesitant fuzzy linguistic term sets and prospect theory, *International Journal of Production Research*, 57, 5, 1283-1299.
- Huang, S. H., & Keskar, H. (2007). Comprehensive and configurable metrics for supplier selection. *International Journal of Production Economics*, 105, 2, 510–523.

- Hwang C. L., Yoon K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 186. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Igarashi, M., de Boer, L., & Fet, A.M. (2013). What is required for greener supplier selection? A literature review and conceptual model development. *J. Purch. Supply Manag*, 19, 247–263.
- International Telecommunication Union (ITU), work on Internet of things, (2015). ICTP workshop: http://wireless.ictp.it/school_2015/presentations/secondweek/ITU-WORK-ON-IOT.pdf acessado em 30 de julho de 2020.
- Jakowski, P., Biruk, S., & Bucon, R. (2010). Assessing contractor selection criteria weights with fuzzy AHP method application in group decision environment. *Automation in Construction*, 19, 120-126.
- Jang, J.-S. R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23,3), 665–685.
- Jazdi, N. (2014). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 1–4.
- Jia, F., & Liu P. (2018). A novel three-way decision model under multiple-criteria environment. *Information Sciences*, 471, 29-51.
- Jiang, C., Ma, Y., Chen, H., Zheng, Y., Gao, S., & Cheng, S. (2018), Cyber physics system: a review. *Library Hi Tech*, 38, 1, 105-116.
- Kagermann, H., Wittenstein, M., Russwurm, S., Ficher, S., Wahlster, W., & Derenbach H. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kahraman, C. (Ed.). (2008). Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. (1th ed.). Springer US.
- Kamble, S., Gunasekaran, A., Dhone, N.C. (2019). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 58, 5, 1319-1337.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2012). Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection. *Materials & Design*, 37, 317–324.
- Karsak, E.E. (2004). Fuzzy multiple objective programming framework to prioritize design requirements in quality function deployment. *Computer and Industrial Engineering*, 47, 149–163.
- Katsikeas, C. C., Paparoidamis, N. G., & Katsikea, E. (2004). Supply source selection criteria: The impact of supplier performance on distributor performance. *Industrial Marketing Management*, 33, 755–764.

- Kaur, H., & Singh, S. P. (2020). Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. *International Journal of Production Economics*, 231, 107830.
- Kellner, F., & Utz, S. (2019). Sustainability in supplier selection and order allocation: combining integer variables with Markowitz portfolio theory. *Journal of Cleaner Production*, 214, 462-474.
- Khodakarami, N., Dirani, K., Rezaei, F. (2018). Employee engagement: finding a generally accepted measurement scale. *Industrial and Commercial Training*. 50, 6, 305-311.
- Khorramshahgol, R., & Hooshiari, A. (1991). Three Shortcomings of Goal Programming and their Solutions. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 12,3, 459–466.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews, Technical Report TR/SE-0401, Department of Computer Science, Keele University, UK, 33 pages (2004).
- Klünder, T., Dörseln, J. N., & Steven, M. (2019). Procurement 4.0: How the digital disruption supports cost-reduction in Procurement. *Production*, 28, e20180104.
- Kontio, J., & Conradi, R. (2002). Software Quality — ECSQ 2002 (1th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kraujalienė, L. (2019). Comparative analysis of multicriteria decision-making methods evaluating the efficiency of technology transfer. *Business, Management and Education*, 17,1), 72-93.
- Krawczak, M., & Szkatuł, G. (2019). On matching of intuitionistic fuzzy sets. *Information Sciences*, 517, 254-274.
- Kusi-Sarpong, S., Gupta, H., Khan, S., Jabbour, C., Rehman, T., & Kusi-Sarpong, H. (2019). Sustainable supplier selection based on industry 4.0 initiatives within the context of circular economy implementation in supply chain operations. *Production Planning and Control*, 1-49.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- Li, D., Landström, A., Fast-Berglund, Å, & Almström, P. (2019). Human-Centred Dissemination of Data, Information and Knowledge in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 84, 380-386.
- Li, J., Fang, H., & Song, W. (2019). Sustainable supplier selection based on SSCM practices: A rough cloud TOPSIS approach. *J. Cleaner Prod.* 222, 606–621.
- Li, X., Li, D., Wan, J., Vasilakos, A. V., Lai, C. F., & Wang, S. (2015). A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, 23, 1, 1–19.
- Liang, H., Ren, J., Gao, S., Dong, L., Gao, Z. (2017). Comparison of different multicriteria decision-making methodologies for sustainability decision making. *Hydrogen Economy*, 189-224.

- Liao, H., Wen, Z., & Liu, L. (2019). Integrating BWM and ARAS under hesitant linguistic environment for digital supply chain finance supplier section. *Technological and Economic Development of Economy*, 25,6, 1188-1212.
- Liao, H., Xu, Z., Zeng, X. (2014). Distance and similarity measures for hesitant fuzzy linguistic term sets and their application in multi-criteria decision making. *Information Sciences*, 271, 125–142.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal, *International Journal of Production Research*, 55, 12, 3609-3629.
- Lima junior, F. R., & Carpinetti, L. C. (2015). Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. *Gestão e Produção*, 22, 1, 17-34.
- Lima Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. (2016). A multi-criteria approach based on fuzzy QFD for choosing criteria for supplier selection. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 269-285.
- Lima Junior, F. R., Osiro, L., & Carpinetti, L. C. R. (2014). A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, 194–209.
- Lima Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. R. (2017). Quantitative models for supply chain performance evaluation: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 333–346.
- Lima Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. R. (2019). An adaptive network-based fuzzy inference system to supply chain performance evaluation based on SCOR® metrics. *Computers & Industrial Engineering*, 106191.
- Lima Junior, F. R., & Carpinetti, L. C. R. (2020). Dealing with the problem of null weights and scores in Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Soft Computing*, 24, 9557–9573.
- Luthra, S., & Mangla, S. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Saf. Environ. Protect*, 117, 168–179.
- M. Hermann, T. Pentek, & B. Otto (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Koloa, HI, pp. 3928-3937.
- Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., & Verbeke, A. (2004). PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. *European Journal of Operational Research*, 153,2, 307–317.
- Makris, D., Hansen, Z. N. L., & Khan, O. (2019). Adapting to supply chain 4.0: an explorative study of multinational companies. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 20, 2, 116-131.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925-953.

- Mardani, A., Zavadskas, E., Govindan, K., Amat Senin, A., & Jusoh, A. (2016). VIKOR Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. *Sustainability*, 8,1, 37.
- Maximiano, A. C. A. (2000). *Introdução à Administração* (5th ed.). Atlas.
- Mehrjerdi, Y. Z. (2010). Quality function deployment and its extensions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27, 6, 616 – 640.
- Menon, S., & Shah, S. (2019). An Overview of Digitalisation in Conventional Supply Chain Management. *MATEC Web of Conferences*, 292, 2019.
- Mitchell, R., & Chen, I.-R. (2014). A survey of intrusion detection techniques for cyber-physical systems. *ACM Computing Surveys*, 46, 4, 55.
- Mogre, R., Lindgreen, A., & Hingley, M. (2017). Tracing the evolution of purchasing research: future trends and directions for purchasing practices. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 32, 2, 251-257.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, Wi., Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 621-641.
- Moradi, G., & Osanloo, M. (2015). Prioritizing Sustainable Development Criteria Affecting Open Pit Mine Design: A Mathematical Model. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 813–820.
- Morrow, D., & Rondinelli, D. (2002). Adopting Corporate Environmental Management Systems: *European Management Journal*, 20(2), 159–171.
- Mrugalska, B., & Wyrwicka, M. K. (2017). Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*, 182, 466–473.
- Müller, J.M., Buliga, O., & Voigt, K.-I. (2018). Fortune favors the prepared. How SMEs are approaching business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2-17.
- Muñoz, B., Romana, M. G., & Ordóñez, J. (2016). Sensitivity Analysis of Multicriteria Decision Making Methodology Developed for Selection of Typologies of Earth-retaining Walls in an Urban Highway. *Transportation Research Procedia*, 18, 135-139.
- Nallusamy, D., Satheesh, S., Chakraborty, P., & Balakannan, K. (2015). A review on supplier selection problem in regular area of application. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 128-132.
- Narula, S., Talwar, V., Dwivedy, M., Prakash, S., & Singh, S. (2019). Investigate the relationship between Lean and Industry 4.0 Technologies. *IEEE India Info*, 14, 1, 103-108.
- Negri, E. E., Fumagalli, L., Cimino, C., & Macchi, M. (2018). FMU-supported simulation for SCF digital twin. *Int. Conf. Chang. Agil. Reconfigurable Virtual Prod*, Nantes.

- Nicoletti, B. (2018). The Future: Procurement 4.0. In *Agile Procurement* (pp. 189–230). Cham: Palgrave Macmillan.
- Nutt, P. C. (2011). Making decision-making research matter: some issues and remedies, *Management Research Review*, 34, 1, 5-16.
- Ocampo, L. A., Abad, G. K. M., Cabusas, K. G. L., Padon, M. L. A., & Sevilla, N. C. (2018). Recent approaches to supplier selection: A review of literature within 2006–2016. *International Journal of Integrated Supply Management*, 12, 1–2, 22-68.
- Onar, S. C., Büyüközkan, G., Öztayşi, B., Kahraman, C. (2016). A new hesitant fuzzy QFD approach: An application to computer workstation selection. *Applied Soft Computing*, 46, 1–16.
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade., p. 302.
- Osiro, L., Lima Junior, F. F., & Carpinetti, L. C. (2018). A group decision model based on quality function deployment and hesitant fuzzy for selecting supply chain sustainability metrics. *Journal of Cleaner Production*, 183, 964-978.
- Özek, A., & Yıldız, A. (2020). Digital Supplier Selection for a Garment Business Using Interval Type-2 Fuzzy TOPSIS. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 30, 1, 61-72.
- Paesbrugge, B., Rangarajan, D., Sharma, A., Syam, N., & Jha, S. (2017). Purchasing driven sales: Matching sales strategies to the evolution of the purchasing function. *Industrial Marketing Management*, 62, 4, 171–184.
- Pal, O., Gupta, A.K., & Garg, R.K. (2013). Supplier selection criteria and methods in supply chains: a review. *Int. J. Soc. Behav. Educ. Econ. Bus. Ind. Eng.* 7, 10, 2667–2773.
- Park, K., Kremer, G. E. O., & Ma, J. (2018). A regional information-based multi-attribute and multi-objective decision-making approach for sustainable supplier selection and order allocation, *Journal of Cleaner Production*, 187, 590-604.
- Pedrycz, W., Ekel, P., & Parreiras, R. (2010). *Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications*, Chichester, U.K.: Wiley.
- Pfohl, H.-C., Yahsi, B., & Kurnaz, T. (2015). The Impact of Industry 4.0 on the Supply Chain, Chapters from the Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), in: Kersten, Wolfgang & Blecker, Thorsten & Ringle, Christian M. (eds.), *Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chains: Technologies, Business Models and Risk Management*. Proceedings of the Hamburg International, 20, 31-58.
- Pires, S. (2016). *Gestão da Cadeia de Suprimentos: conceitos, estratégias, práticas e casos* (3th ed.). Atlas.
- Podvezko, V. (2011). The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS. *Engineering Economics*, 22,2, 134-146.

- Poissonnier, H. (2017). How purchasing became a strategic function: from purchasing to external resources management. *Strategic Direction*, 33, 2, 1 – 3.
- Pooler, V. H., Pooler, D. J., & Farney, S. D. (2014). *Global Purchasing and Supply Management* (2th ed.). Springer US.
- Prest, G., & Sopher, S. (2016). The 2016 MHI Annual Industry Report Accelerating change: How innovation is driving digital, always-on supply chains, MHI Annual Industry Report.
- Rasanjani, P. M. D., Sachini, W. W. N., Sandamali, G. A. S., & Weerabahu, W. M. S. K. (2019). A Strategic Relationship Building through Procurement 4.0: An Analysis from the Apparel Industry. Conference: International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bangkok, Thailand, 1843- 1855.
- Ray, P.P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 30, 3, 291-319.
- Reis, M. S., & Kenett, R. (2018). Assessing the Value of Information of Data-Centric Activities in the Chemical Processing Industry 4.0. *AIChE Journal*, 64, 3868–81.
- Rezaei E, Karami A, Yousefi T, Mahmoudinezhad S. (2012). Modeling the free convection heat transfer in a partitioned cavity using ANFIS. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39,3, 470-475.
- Rezaei J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Ribeiro, F., & Cerveira, M. E. (2013). Informação e/ou Conhecimento: as duas faces de Jano. Congresso ISKO Espanha e Portugal / XI Congresso ISKO España, Faculdade de Letras da Universidade do Porto - CETAC.MEDIA.
- Rodríguez, R. M., Martínez, L., & Herrera, F. (2012). Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20,1,109–119.
- Rodríguez, R. M., Martínez, L., Torra, V., Xu, Z. S., & Herrera, F. (2014). Hesitant Fuzzy Sets: State of the Art and Future Directions. *International Journal of Intelligent Systems*, 29,6, 495–524.
- Roy, B., & Slowinski, R. (2013). Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. *EURO Journal on Decision Processes*, 1, 69–97.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, p. 287. New York: McGraw-Hill.
- Sachdeva, N., Shrivastava, A. K., & Chauhan, A. (2019). Modeling supplier selection in the era of Industry 4.0. *Benchmarking: An International Journal*, ahead-of-print. doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0441
- Sancha, C., Longoni, A., & Giménez, C. (2015). Sustainable supplier development practices: Drivers and enablers in a global context. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 21, 2, 95-102.

- Saturno, M., Ramos, L. F. P., Polato, F., Deschamps, F., & Loures, E. F. R. (2017). Evaluation of interoperability between automation systems using multicriteria methods, *Procedia Manufacturing.*, 11, 1837–1845.
- Schrauf S., & Bertram F. (2016). Industry 4.0: How digitization makes the supply chain more efficient, agile, and customer-focused: www.strategyand.pwc.com/gx/en/reports/industry4.0, acessado em 30 de Agosto de 2020.
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., & Weber, A. R. (2014). Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. Robust Manufacturing Conference (RoMaC 2014), *Procedia CIRP*, 19, 51 – 56.
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E., & Toro, C. (2015). Virtual Engineering Object/Virtual Engineering Process: A specialized form of Cyber Physical System for Industrie 4.0. *Procedia Computer Science*, 60, 1, 1146–1155.
- Shi, X., Dong, C., Zhang, C., & Zhang, X. (2019). Who should invest in clean technologies in a supply chain with competition?. *Journal of Cleaner Production*, 215, 689-700.
- Shokri, A., Nabhani, F., & Hodgson. S. (2010). Supplier Development Practice: Arising the Problems of Upstream Delivery for a Food Distribution SME in the UK. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26, 6, 639–646.
- Sierra, L.A., Yepes, V., & Pellicer, E. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 187, 496-513.
- Simić, D., Kovačević, I., Svirčević, V., Simić, S. (2017). 50 years of fuzzy set theory and models for supplier assessment and selection: a literature review. *journal of Applied Logic*, 24, 85-96.
- Singla, C., Mahajan, N., Kaushal, S., Verma, A., & Sangaiah, A.K. (2018). Modelling and analysis of multi-objective service selection scheme in IoT-cloud environment. In: Sangaiah, A.K. (ed.), *Cognitive Computing for Big Data Systems Over IoT*, pp. 63–77. Springer.
- Siqueira Jr, J. A. (2018). *Proposição de um Modelo Hesitant Fuzzy QFD para Seleção de Fornecedores em Projetos*. (Dissertação Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba).
- Song W, & Zhu J. (2019). A multistage risk decision making method for normal cloud model considering behavior characteristics. *Applied Soft Computing*, 78, 393–406.
- Srai, J. S., Lorentz, H. (2019). Developing design principles for the digitalisation of purchasing and supply management. *J. Purch. Supply Manag.*, 25, 1, 78-98.
- Stefano, N., Filho, N., Vergara, L., & Rocha, R. (2015). COPRAS (Complex Proportional Assessment): State of the Art Research and its Applications. *IEEE Latin America Transactions*, 13, 3899-3906.
- Su, J., & Gargeya, V. B. (2016). Supplier selection in small- and medium-sized firms: the case of the US textile and apparel industry. *American Journal of Business*, 31, 4, 166-186.

- Taherdoost, H., & Brard, A. (2019). Analyzing the process of supplier selection criteria and methods. *Procedia Manufacturing*, 32, 1024–1034.
- Tahriri, F., Osman, M.R., Ali, A., Yusuff, R., & Esfandiary, A. (2008). AHP approach for supplier evaluation and selection in a steel manufacturing company. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 1, 54–76.
- Tatsis, V., Mena, C., Van Wassenhove, L. N., & Whicker, L. (2006). E-procurement in the Greek food and drink industry: Drivers and impediments. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 12,2, 63–74.
- Temponi, C., Yen, J., & Amos Tiao, W. (1999). House of quality: A fuzzy logic-based requirements analysis. *European Journal of Operational Research*, 117(2), 340–354.
- Thanaraksakul, W., & Phruksaphanrat, B., (2009). Supplier evaluation framework based on balanced scorecard with integrated corporate social responsibility perspective. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2, 5-10.
- Thrugachantar, P., & Zailani, S. (2011). The influence of purchasing strategies on manufacturing performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 22, 5, 641–663.
- Torbacki, W., & Kijewska, K. (2019). Identifying Key Performance Indicators to be used in Logistics 4.0 and Industry 4.0 for the needs of sustainable municipal logistics by means of the DEMATEL method. *Transportation Research Procedia*, 39, 534-543.
- Torkayesh, S. E., Iranizad, A., Torkayesh, A. E., & Basit, M. N. (2020). Application of BWM-WASPAS model for digital supplier selection problem: a case study in online retail shopping. *Journal of Industrial Engineering and Decision Making*, 1, 1, 12-23.
- Torra, V. (2010). Hesitant Fuzzy Sets. *International Journal of Intelligent Systems*, 25, 529-539.
- Tozanli, O., Kongar, E., & Gupta, S. M. (2019). Supplier Selection Model for End-of-Life Product Recovery: An Industry 4.0 Perspective. In A. Y. Alqahtani, E. Kongar, K. K. Pochampally, S. M. Gupta (Eds), *Responsible Manufacturing: Issues Pertaining to Sustainability*, (Chapter 14, pp.323-344).
- Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1995). Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges. *The International Journal of Industrial Engineering*, 2, 1, 35-44.
- Tsiatsis, V., Karnouskos, S., Höller, J., Boyle, D., & Mulligan, C. (2019). Chapter 1 - Why the Internet of Things?. *Internet of Things*, 2, 3-7.
- Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1223–1230.
- Uygun, Y., & Ilie, M. (2018). Autonomous Manufacturing-related Procurement in the Era of Industry 4.0. In: Schupp, F & Woehner, H. (eds), *Digitalisierung im Einkauf*. (pp. 81-97).Springer, Wiesbaden.

- Viana, J. C., & Alencar, L. H. (2012). Metodologias para seleção de fornecedores: uma revisão da literatura. *Produção*, 22, 4, 625-636.
- Viet, N.Q., Behdani, B., Bloemhof, J. (2018). The value of information in supply chain decisions: a review of the literature and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 68–82.
- Vörösmarty, G., & Dobos, I. (2020). A literature review of sustainable supplier evaluation with Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 121672.
- Wang, D. D. (2020). Ranking Multiple-input and Multiple-output Units: A Comparative Study of Data Envelopment Analysis and Rank Aggregation. *Expert Systems with Applications*, 113687.
- Wang, Y., & Wang, B. (2016). Multidimensional poverty measure and analysis: A case study from Hechi city, China. SpringerPlus.
- Wetzstein, A., Hartmann, E., Benton, W. C., jr., & Hohenstein, N.-O. (2016). A systematic assessment of supplier selection literature—State-of-the-art and future scope. *International Journal of Production Economics*, 182, 304–323.
- Wu, C., & Barnes, D. (2011). A literature review of decision-making models and approaches for partner selection in agile supply chains. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 17, 256–274.
- Wu, C., Barnes, D. (2010). Formulating partner selection criteria for agile supply chains: A Dempster–Shafer belief acceptability optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 125, 2, 284-293.
- Wu, C., Zhang, Y., Pun, H., & Lin, C. (2020). Construction of partner selection criteria in sustainable supply chains: A systematic optimization model. *Expert Systems with Applications*, 113643.
- Wu, L., Yue, X., Jin, A., & Yen, D. C. (2016). Smart supply chain management: a review and implications for future research. *The International Journal of Logistics Management*, 27, 2, 395–417.
- Xia F., Yang L.T., Wang L., (2012). Vinel A. Internet of Things. *Int J Commun Syst*, 25, 9, 1101-1102
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56, 8, 2941-2962.
- Xu, Z. (2014). *Hesitant Fuzzy Sets Theory*. Springer.
- Y.-K. Juan, Y.-H., Perng, D., & Castro-Lacouture, K.-S. Lu. (2009). Housing refurbishment contractors selection based on a hybrid fuzzy-QFD approach, *Automation in Construction*, 18, 139–144.
- Yager, R.R. & Abbasov, A.M. (2013). Pythagorean membership grades, complex numbers, and decision making. *International Journal of Intelligent Systems*, 28, 5, 436-452.

- Yang Q, Yang S, Qian Y, & Kraslawski A. (2015). Application of house of quality in evaluation of low rank coal pyrolysis polygeneration technologies. *Energy Convers Manag*, 99, 231-41.
- Yang, C.-C., & Chen, B.-S. (2006). Supplier selection using combined analytical hierarchy process and grey relational analysis. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17, 7, 926-941.
- Yildiz, A., & Parlak, I. (2019). Use of industrial 4.0 technologies in supply chain management. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 8, 2, 1190-1196.
- Yıldız, A., & Yayla, A.Y. (2015). Multi-criteria decision-making methods for supplier selection: a literature review. *South African Journal of Industrial Engineering August*, 26, 2, 158-177.
- Yu, C., Shao, Y., Wang, K., & Zhang, L. (2019). A group decision making sustainable supplier selection approach using extended TOPSIS under interval-valued Pythagorean fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 121, 1-17.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- Zafari, F., & Teuteberg, F. (2018). Der Weg zum Einkauf 4.0: Herausforderungen bei der Automatisierung und Digitalisierung im Einkauf. Eine multi-methodische Analyse am Beispiel der Logistikbranche. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, 2069-2080.
- Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and Economic Development of Economy*, 16, 2, 159-172.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., & Zakarevicius, A. (2012). Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 122, 6, 3–6.
- Zavadskas, E., Kaklauskas, A., & Sarka, V. (1994). The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 1, 131–139.
- Zekhnini, K., Cherrafi, A., Bouhaddou, I., Benghabrit, Y., & Garza-Reyes, J.A. (2020). Supplier selection for smart supply chain: An adaptive fuzzy-neuro approach. 5th North America International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), Detroit, MI, US, pp. 1-9.
- Zhang, L., Liu, R., Liu, H., & Shi, H. (2020). Green Supplier Evaluation and Selections: A State-of-the-Art Literature Review of Models, Methods, and Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-25.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). *Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges, 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, Zhangjiajie, 2147-2152.

- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K.-H. (2018). Regulatory Policy Awareness and Environmental Supply Chain Cooperation in China: A Regulatory-Exchange-Theoretic Perspective. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 65, 1, 46–58.
- Zimmer, K., Fröhling, M., & Schultmann, F. (2016). Sustainable supplier management – a review of models supporting sustainable supplier selection, monitoring and development. *International Journal of Production Research*, 54, 5, 1412–1442.