

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO ANTONIO SAUGO

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO BASEADO EM INFERÊNCIA NEURO-*FUZZY*
PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES SUSTENTÁVEIS**

CURITIBA

2022

RICARDO ANTONIO SAUGO

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO BASEADO EM INFERÊNCIA NEURO-FUZZY
PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES SUSTENTÁVEIS**

**Proposal of a model based on neuro-fuzzy inference for
sustainable suppliers' segmentation**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Administração, do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rodrigues Lima Junior.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



RICARDO ANTONIO SAUGO

PROPOSIÇÃO DE UM MODELO BASEADO EM INFERÊNCIA NEURO-FUZZY PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES SUSTENTÁVEIS

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Administração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Organizações E Tecnologia.

Data de aprovação: 07 de Março de 2022

Prof Francisco Rodrigues Lima Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Jurandir Peinado, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti, Doutorado - Universidade de São Paulo (Usp)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 08/03/2022.

*Dedico este trabalho à minha Família,
em especial à minha mãe Rejane.*

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, porque sem ele nada seria possível.

Aos meus pais, por sempre incentivarem e apoiarem os meus estudos. Ao meu marido, irmã, cunhado e sobrinha por estarem juntos comigo nesse momento.

Aos meus amigos, que mesmo distante me apoiaram nessa caminhada.

Aos meus professores da graduação da PUCPR, em especial ao Maurício Bedim dos Santos e Adriana Aparecida Dambros por me incentivarem a seguir na carreira acadêmica.

Aos professores do PPGA da UTFPR e, em especial, ao Professor Jurandir Peinado e ao Professor Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti pelas valiosas contribuições dadas durante o processo de qualificação e defesa da dissertação.

Ao meu orientador Professor Dr. Francisco Rodrigues Lima Junior, por ter aceitado me orientar, pelos ensinamentos e pelas conversas que tivemos. Seu conhecimento fez grande diferença no desenvolvimento deste trabalho.

À UTFPR e CAPES (código de financiamento 001) pelo financiamento desta pesquisa.

RESUMO

Devido à globalização das cadeias de suprimentos e o conseqüente aumento da quantidade e diversidade dos fornecedores, sua segmentação tornou-se fundamental, pois auxilia as empresas compradoras na definição de estratégias específicas para fornecedores que possuem características semelhantes. Dada a necessidade da incorporação do conceito de sustentabilidade na gestão de cadeias de suprimentos, critérios de desempenho econômico, ambiental e social passam também a serem considerados no processo de avaliação dos fornecedores. Entretanto, na literatura são escassos os trabalhos que apresentam modelos para segmentação de fornecedores sustentáveis, sendo que nenhum dos trabalhos publicados utiliza técnicas de aprendizagem supervisionada. Diante disso, o objetivo deste estudo é propor um modelo de decisão para segmentação de fornecedores sustentáveis baseado em sistemas de inferência neuro-fuzzy (ANFIS). A abordagem proposta combina três modelos ANFIS em uma matriz quadrática tridimensional, baseada em diversos critérios associados às dimensões do *triple bottom line*. 108 topologias candidatas foram implementadas com o auxílio da ferramenta *Neuro-Fuzzy Designer* do software *MATLAB*®. Para o treinamento e teste dessas topologias, foram usadas amostras simuladas de 200 avaliações de fornecedores, geradas com o auxílio do método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). O erro quadrático médio (MSE) entre os valores desejados e os valores estimados por cada modelo ANFIS foi calculado a fim de selecionar as melhores topologias e verificar a acurácia dos modelos. Os resultados fornecidos pelas topologias com menor erro quadrático médio foram analisados por meio de testes estatísticos. Este estudo pode ser útil para auxiliar pesquisadores e desenvolvedores de soluções computacionais, principalmente por fornecer parâmetros topológicos adequados para obtenção de resultados precisos na aplicação em questão.

Palavras-chave: segmentação de fornecedores sustentáveis; gestão da cadeia de suprimentos; sistemas neuro-fuzzy; ANFIS.

ABSTRACT

Due to the globalization of supply chains and the consequent increase in the quantity and diversity of suppliers, their segmentation has become fundamental, because it helps purchasing companies in the definition of specific strategies for suppliers that have similar characteristics. Given the need to incorporate the concept of sustainability into supply chain management, economic, environmental and social performance criteria are also considered in the supplier assessment process. However, in the literature there are few works that present models for segmenting sustainable suppliers, and none of the published works uses supervised learning techniques. Therefore, the objective of this study is to propose a decision model for segmenting sustainable suppliers based on neuro-fuzzy inference systems (ANFIS). The proposed approach combines three ANFIS models in a three-dimensional quadratic matrix, based on several criteria associated with the dimensions of the triple bottom line. 108 candidate topologies were implemented with the help of the Neuro-Fuzzy Designer tool of the MATLAB® software. For the training and testing of these topologies, simulated samples from 200 supplier evaluations were used, generated with the help of the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method. The mean square error (MSE) between the desired values and the estimated values by each ANFIS model was calculated in order to select the best topologies and verify the accuracy of the models. The results provided by the topologies with the lowest mean squared error were analyzed using statistical tests. This study can be useful to help researchers and developers of computational solutions, mainly by providing adequate topological parameters to obtain accurate results in the application in question.

Keywords: sustainable supplier segmentation; supply chain management; neuro-fuzzy systems; ANFIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Triple Bottom Line</i>	28
Figura 2 - Proposta de SSM	30
Figura 3 - Matriz de Kraljic	35
Figura 4 - Modelo de segmentação de fornecedores	36
Figura 5 - Modelos de matriz de segmentação de fornecedores	37
Figura 6 - Classificação dos modelos quanto ao tipo de cadeia de suprimentos	42
Figura 7 - Frequência das técnicas empregadas	43
Figura 8 - Topologia ANFIS com duas entradas e uma saída	44
Figura 9 - Regras de inferência de um sistema ANFIS	45
Figura 10 - Ilustração do processo de inferência ANFIS	47
Figura 11 - Modelo proposto para segmentação de fornecedores sustentáveis	50
Figura 12 - Etapas da validação cruzada na modelagem dos sistemas ANFIS	55
Figura 13 - Regras de decisão da topologia candidata 26 antes do treinamento	69
Figura 14 - Regras de decisão da topologia candidata 26 após o treinamento	70
Figura 15 - Processo de minimização do RMSE da topologia candidata 26	71
Figura 16 - Processo de minimização do RMSE da topologia candidata 64	72
Figura 17 - Processo de minimização do RMSE da topologia candidata 103	72
Figura 18 - Comparação entre os valores desejados e os valores calculados pela topologia 26	73
Figura 19 - Comparação entre os valores desejados e os valores calculados pela topologia 64	73
Figura 20 - Comparação entre os valores desejados e os valores calculados pela topologia 103	74
Figura 21 - Gráfico de superfície do modelo ANFIS 1	75
Figura 22 - Gráfico de superfície do modelo ANFIS 2	75
Figura 23 - Gráfico de superfície do modelo ANFIS 3	76
Figura 24 - Classificação final dos fornecedores	77
Figura 25 - Regressão linear utilizando os resultados dos modelos ANFIS 1(A), 2(B) e 3(C)	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios para avaliação de fornecedores.....	32
Quadro 2 - Artigos que apresentam modelos quantitativos para segmentação consideradas.....	39
Quadro 3 - Escalas utilizadas para avaliação dos fornecedores para o ANFIS 1.....	59
Quadro 4 - Escalas utilizadas para avaliação dos fornecedores para o ANFIS 2.....	59
Quadro 5 - Escalas utilizadas para avaliação dos fornecedores para o ANFIS 3.....	59
Quadro 6 - Parâmetros a serem testados nas topologias candidatas.....	61
Quadro 7 - Alternativas avaliadas para definição da configuração topológica do ANFIS 1.....	62
Quadro 8 - Alternativas avaliadas para definição da configuração topológica do ANFIS 2.....	63
Quadro 9 - Alternativas avaliadas para definição da configuração topológica do ANFIS 3.....	63
Quadro 10 - Estratégias para o desenvolvimento dos fornecedores.....	78
Quadro 11 - Descrição do teste t pareado.....	82
Quadro 12 - Hipóteses dos testes de normalidade dos dados.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo do cálculo das saídas das avaliações dos fornecedores por meio do TOPSIS	60
Tabela 2 - Quantidade de amostras utilizadas nos modelos ANFIS	61
Tabela 3 - Resultados alcançados pelas topologias candidatas dos modelos ANFIS 1.....	65
Tabela 4 - Resultados alcançados pelas topologias candidatas dos modelos ANFIS 2.....	66
Tabela 5 - Resultados alcançados pelas topologias candidatas dos modelos ANFIS 3.....	67
Tabela 6 - Resultado das melhores topologias candidatas	79
Tabela 7 - Resultados dos testes de normalidade	83
Tabela 8 - Teste de homogeneidade de variância	84
Tabela 9 - Resultados dos testes com amostras pareadas.....	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANFIS	<i>Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System</i>
BI	<i>Business Intelligence</i>
CI	<i>Circular Economy</i>
CSCM	<i>Circular Supply Chain Management</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
SC	<i>Supply Chain</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SSM	<i>Sustainable Supplier Management</i>
SSCM	<i>Sustainable Supply Chain Management</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>
RH	Recursos humanos
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
TBL	<i>Triple bottom line</i>
TI	Tecnologia da Informação
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
1.3	JUSTIFICATIVA TEÓRICA E PRÁTICA	19
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
2.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	21
2.2	ETAPAS DA PESQUISA.....	21
2.3	PROCEDIMENTO PARA COLETA DE DADOS	23
2.4	PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE DADOS	23
3	REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1	CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	24
3.2	CADEIA DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS	26
3.2.1	Processos decisórios de gestão de fornecedores sustentáveis.....	30
3.3	SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES	33
3.4	MODELOS QUANTITATIVOS DE APOIO À SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES.....	38
3.5	SISTEMAS DE INFERÊNCIA NEURO- <i>FUZZY</i>	44
4	MODELO PROPOSTO PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES	49
4.1	DESENVOLVIMENTO E TREINAMENTO DOS MODELOS ANFIS PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES	53
5	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	57
5.1	DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DOS FORNECEDORES.....	57
5.2	IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS ANFIS.....	58
5.2.1	Organização dos subconjuntos das amostras.....	58
5.2.2	Definição das topologias candidatas aos modelos ANFIS	61
5.2.3	Resultado do treinamento e da validação dos modelos ANFIS	64
5.3	RESULTADOS DA SEGMENTAÇÃO DOS FORNECEDORES	76
5.4	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DOS MODELOS.....	79
5.4.1	Teste de regressão linear.....	80

5.4.2	Teste t pareado	82
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE 1 – MÉTODO TOPSIS	96

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, legislações ambientais mais rígidas e pressões de *stakeholders* por maior lucratividade fizeram com que as empresas e outros tipos de organizações promovessem melhorias, tanto em seu desempenho ambiental e social para cumprir as novas exigências legais quanto nas suas cadeias de suprimentos para atender a demanda por lucratividade (BÜYÜKÖZKAN, 2012). Por essa razão, as organizações incorporaram o conceito de sustentabilidade em seus processos. Pode-se definir sustentabilidade de forma ampla como sendo um equilíbrio prudente entre o desenvolvimento econômico, ambiental e social, todos com o mesmo peso de importância (SIKDAR, 2003; GÓNCZ *et al.* 2007). Nesse contexto, as cadeias de suprimentos sustentáveis propõem a integração das preocupações dos *stakeholders* em relação ao lucro, com o impacto das operações das organizações no sistema ambiental e social (PAGELL; SHEVCHENKO, 2014).

A avaliação de fornecedores é um dos elementos vitais tanto para o desempenho geral da cadeia de suprimentos quanto para o aumento da competitividade, sendo essencial para estabelecer uma relação sustentável entre os fornecedores e as necessidades dos clientes (XU *et al.*, 2019; JIN; RYAN; YUND, 2014). Com o advento das cadeias de suprimentos globais, a quantidade e a diversidade de fornecedores disponíveis aumentaram, superando a marca de centenas deles. Nesse contexto, a segmentação de fornecedores se apresenta como uma forma efetiva para o gerenciamento da base de fornecedores, pois ela limita o número de estratégias de relacionamento necessárias, pelo agrupamento dos fornecedores com características em comum (BAI; REZAEI; SARKIS, 2017). Dessa forma, a segmentação dos fornecedores pode auxiliar aos tomadores de decisão a alocarem recursos específicos de determinadas relações, por meio de um trabalho mais conjunto (ASSIS *et al.*, 2018).

Como forma de classificar os fornecedores em grupos segmentados, os estudos encontrados na literatura científica propõem o uso de modelos quantitativos de apoio à tomada de decisão (SHIRALKAR; BONGALE; KUMAR, 2021). Nos últimos anos, esse tema tem recebido maior interesse dos pesquisadores e profissionais (*practitioners*), devido a característica desses modelos que propiciam decisões racionais e de maneira automatizada (BORGES; LIMA JR., 2020). A maioria desses

modelos utiliza métodos multicritérios, técnicas estatísticas e/ou de inteligência artificial para estimar e permitir comparações entre o desempenho de cada fornecedor. Tal classificação é feita com base em um conjunto de critérios associados às dimensões individuais de desempenho do fornecedor (LIMA JR; CARPINETTI, 2016; REZAEI; LAJIMI, 2019).

Em uma revisão sistemática de literatura (RSL) sobre modelos quantitativos de apoio ao processo de segmentação de fornecedores, Borges e Lima Jr. (2020) identificaram 26 artigos científicos, sendo que 53,83% deles foram publicados a partir de 2017. Apenas um artigo encontrado abordava cadeias de suprimentos sustentáveis, o qual contemplou a aplicação de critérios econômicos, ambientais e sociais (BORGES; LIMA JR., 2020). Esses autores constataram que a técnica mais utilizada foi AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Além disso, a RSL levantou vários artigos que utilizavam mais de uma técnica de decisão, de forma combinada. Apesar de Borges e Lima Jr. (2020) identificarem o uso de 40 técnicas distintas na segmentação de fornecedores, mesmo assim, não foram encontrados estudos que utilizassem sistemas de inferência neuro-*fuzzy* no apoio à tomada de decisão para este tipo de problema.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

A RSL, realizada por Borges e Lima Junior (2020) e, posteriormente atualizada para este estudo, constatou que os modelos prévios predominantes não levam em consideração critérios econômicos, ambientais e sociais no processo de segmentação de fornecedores, salvo os modelos propostos por Torres-Ruiza e Ravindran (2018), Rius-Sorolla, Estelles-Miguel e Rueda-Armengot (2020) e Borges *et al.* (2021). A maioria dos modelos aborda apenas aspectos econômicos, como os modelos propostos por Rezaei e Ortt (2013a) e Santos, Osiro e Lima (2017), que utilizam dimensões “capacidades dos fornecedores” e “disposição para colaborar”, com critérios relacionados a preço, qualidade e entrega. Seis modelos, como os propostos por Bai, Rezaei e Sarkis (2017) e Jharkharia e Das (2019) abordam apenas aspectos ambientais, utilizando critérios como redução de emissão de carbono e *design* de produtos *green*. No entanto, aspectos sociais como: condições de trabalho, saúde e segurança, influência na comunidade local, oportunidade, diversidade e igualdade de

gênero não foram levados em conta nos modelos decisórios para segmentação de fornecedores (BORGES *et al.*, 2021).

Apesar do modelo de Torres-Ruiza e Ravindran (2018) ser voltado para segmentação dos fornecedores em cadeias de suprimentos sustentáveis, foram constatadas certas limitações em decorrência do modelo utilizar o método AHP. Embora o método AHP seja o mais utilizado na literatura para segmentação de fornecedores (BORGES; LIMA JR, 2020), ele requer diversas comparações pareadas para executar a pontuação dos fornecedores e avaliação dos pesos dados aos critérios a serem utilizados. Este fato restringe a quantidade de critérios e alternativas que podem ser adotados, devido à limitação da capacidade humana de realizar comparações de forma consistente entre grande quantidade de elementos (LIMA JR; OSIRO; CARPINETTI, 2014). A restrição do número de alternativas torna-se um problema para a segmentação de fornecedores, pois muitas indústrias chegam a ter centenas de fornecedores de insumos para a fabricação de seus produtos (REZAEI; LAJIMI, 2019). Outra limitação, quando se utiliza o método AHP, ocorre quando são inseridos novos fornecedores na base, que pode ocasionar inversões nos resultados do ranqueamento, mesmo quando a pontuação de entrada dos fornecedores previamente já existentes não for alterada. Esse efeito é indesejável pois pode causar instabilidade e inconsistência nos resultados da segmentação de fornecedores (LIMA JR; OSIRO; CARPINETTI, 2014). Ainda outra limitação do método AHP é consequência de sua característica compensatória, o que faz com que o baixo desempenho em alguns critérios de uma determinada dimensão possa ser compensado por um alto desempenho em critérios de outras dimensões (REZAEI; ORTT, 2013a). No contexto de cadeias de suprimentos sustentáveis, não se pode permitir que os aspectos ambientais e sociais sejam compensados por aspectos econômicos (SCHRAMM; CABRAL; SCHRAMM, 2020). A característica compensatória do AHP impede que o desempenho nos aspectos econômicos, ambientais e sociais sejam considerados de forma balanceada no processo de segmentação de fornecedores.

Já o modelo de decisão proposto por Rius-Sorolla, Estelles-Miguel e Rueda-Armengot (2020), apesar de considerar critérios das três dimensões da sustentabilidade, o modelo não utiliza uma técnica de decisão específica. Essa abordagem apenas pondera e agrega as avaliações dos fornecedores utilizando

equações matemáticas baseadas em números *crisp* (números reais). Dessa forma, o modelo proposto não se mostra adequado nem para lidar com critérios qualitativos, nem para modelar e processar os julgamentos subjetivos dos especialistas, sendo assim, considerado como inadequado para lidar com decisões sob incerteza (LIMA JR; CARPINETTI, 2020).

O modelo de segmentação proposto por Borges *et al.* (2021) analisou o desempenho de seis fornecedores classificando-os de acordo com 28 critérios relacionados a sustentabilidade. No entanto, para segmentação dos fornecedores, foi utilizado o método *hesitant fuzzy linguistic TOPSIS* em uma matriz subdividida em duas dimensões: “capacidades” e “disposição para colaborar”. Apesar desse método suprir algumas limitações do método AHP, tal como a limitação na quantidade de critérios e alternativas, ele não é capaz de ajustar os relacionamentos entre as variáveis de entrada e saída com base em dados históricos dos fornecedores. O modelo também não tem capacidade de identificar a necessidade de ações voltadas diretamente para a melhoria dos aspectos econômicos, ambientais e/ou sociais dos fornecedores, já que realiza uma compensação entre as três dimensões da sustentabilidade (ou seja, o alto desempenho alcançado por um fornecedor em uma dimensão pode ajudar a compensar o baixo desempenho em outra).

Em resumo, a maioria dos modelos encontrados na literatura a respeito da segmentação de fornecedores utiliza técnicas que são alimentadas com julgamentos coletados de especialistas envolvidos no problema. Além disso, de acordo com Borges e Lima Jr (2020), por envolverem também o uso de critérios qualitativos aliados à dificuldade de se obter informações completas e confiáveis sobre o desempenho do fornecedor em vários critérios, os autores levantaram que 65,4% dos estudos utilizam técnicas adequadas para lidar com decisões sob incerteza. Entretanto, apenas 11,54% dos modelos fazem uso de dados históricos no processo decisório para segmentação de fornecedores (BORGES; LIMA JR, 2020).

Apesar da diversidade de técnicas exploradas para segmentação de fornecedores, nenhum dos modelos encontrados na literatura mostrou ter capacidade de aprendizagem supervisionada a partir de dados históricos de desempenho (BORGES; LIMA JR, 2020). A aprendizagem supervisionada ocorre por meio de um algoritmo de treinamento que habilita ao modelo ajustar os parâmetros internos que determinam os relacionamentos entre as variáveis de entrada e saída do modelo,

buscando assim alcançar valores de saída mais precisos (JANG, 1993). No processo de segmentação, a aprendizagem supervisionada possibilitaria ajustar automaticamente as relações de causa e efeito entre os critérios de avaliação dos fornecedores e o seu desempenho global em cada dimensão, a partir de dados históricos de desempenho dos fornecedores (LIMA JR; CARPINETTI, 2020).

A utilização de um modelo de decisão baseado em inferência neuro-*fuzzy* pode contornar as limitações apresentadas, visto que esse método não limita o número de alternativas e não causa inversão de ranqueamento, além de possuir capacidade de aprendizagem supervisionada e ser adequado para decisões sob incerteza. Ademais, como apontado anteriormente, não foram encontradas aplicações de inferência neuro-*fuzzy* para segmentação de fornecedores na revisão da literatura, tampouco foram encontradas aplicações que combinem este método com os critérios econômicos, ambientais e sociais de forma simultânea.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste estudo é propor um modelo de apoio à segmentação de fornecedores sustentáveis baseado em sistemas de inferência neuro-*fuzzy*. Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) revisar os modelos de segmentação de fornecedores encontrados na literatura que utilizam métodos quantitativos, bem como estruturar um referencial teórico sobre gestão da cadeia de suprimentos (*Supply Chain Management*, SCM), segmentação de fornecedores e sistemas de inferência neuro-*fuzzy*;
- b) propor um modelo conceitual de apoio à tomada de decisão para segmentação de fornecedores com base em critérios econômicos, ambientais e sociais. Esse modelo teórico proposto será utilizado como base para o desenvolvimento de três modelos computacionais de inferência neuro-*fuzzy*, um modelo para cada dimensão do TBL (*triple bottom line*);
- c) desenvolver e implementar os modelos computacionais de inferência neuro-*fuzzy* utilizando dados simulados, para selecionar as configurações topológicas mais adequadas para cada modelo;

- d) realizar testes estatísticos para avaliar a qualidade e acurácia dos modelos computacionais propostos.

1.3 JUSTIFICATIVA TEÓRICA E PRÁTICA

O modelo proposto de apoio à segmentação de fornecedores sustentáveis proporcionará aos gestores uma forma de separar os seus parceiros comerciais em grupos de fornecedores que possuem determinadas características em comum. Essa classificação possibilitará que empresas elaborem planos de ação para melhoria dos índices de desempenho econômico, ambiental e social e, desta forma, potencializem o desempenho da cadeia de suprimentos. Além disso, uma vez que o modelo de segmentação proposto considere as três dimensões da sustentabilidade, evita-se o problema do efeito de compensação, assegurando que as três dimensões possuam importâncias equivalentes nas ações que visem à melhoria de desempenho dos fornecedores.

O modelo de segmentação de fornecedores sustentáveis proposto utiliza sistemas de inferência neuro-*fuzzy*. Essa técnica multicritério se diferencia das demais por possuir um mecanismo de aprendizagem supervisionado, possibilitando a adaptação do modelo ao ambiente que está sendo aplicado. A possibilidade de lidar com decisões sob incerteza se dá a partir de representações *fuzzy* das variáveis de entrada e do uso de regras de decisão. Explorar o uso desta técnica e sua adequabilidade ao problema também é relevante porque na RSL não foram encontrados estudos prévios que tivessem aplicado sistemas de inferência neuro-*fuzzy* no apoio à segmentação dos fornecedores.

Como contribuição teórica deste trabalho é possível destacar:

- a) a construção e avaliação da adequabilidade de modelos de inferência neuro-*fuzzy* aplicados à segmentação de fornecedores sustentáveis;
- b) o apoio aos pesquisadores e desenvolvedores de soluções de TI na gestão de cadeias de suprimentos, por realizar a identificação de parâmetros topológicos mais adequados para cada modelo de inferência neuro-*fuzzy*, incluindo a investigação dos parâmetros adequados para o número de termos linguísticos das variáveis de entrada, o tipo de função de pertinência e o tipo de consequente das regras de inferência;

- c) uma discussão sobre o processo de modelagem de sistemas de inferência neuro-*fuzzy*, verificando seus benefícios e limitações no contexto de segmentação de fornecedores.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este estudo está dividido em 6 capítulos. O primeiro capítulo, do qual essa seção faz parte, apresenta uma introdução ao tema da dissertação, o problema de pesquisa, objetivo geral e específicos e justificativa teórica e prática. O segundo capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a realização desta pesquisa.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão teórica sobre o tema e está dividido em cinco seções: cadeia de suprimentos, cadeia de suprimentos sustentáveis, segmentação de fornecedores, modelos quantitativos de apoio à segmentação de fornecedores e sistemas de inferência neuro-*fuzzy*. No quarto capítulo é apresentado o modelo conceitual proposto para segmentação de fornecedores sustentáveis. O quinto capítulo discute os resultados da implementação dos modelos computacionais e dos testes estatísticos feitos para verificar a acurácia destes modelos. Por último, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões, limitações e oportunidades de estudos futuros.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo aborda os procedimentos metodológicos utilizados nesta dissertação. A primeira seção aborda a caracterização da pesquisa, seguida das etapas da elaboração da pesquisa, procedimentos para coleta de dados e os procedimentos para análise dos dados.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo pode ser classificado como uma pesquisa axiomática normativa, por propor modelos de inferência neuro-*fuzzy* para segmentação de fornecedores sustentáveis, visando classificá-los em grupos e definir estratégias de gestão adequadas para cada grupo, além de suprir limitações dos modelos prévios no que tange à habilidade de aprendizagem supervisionada. Segundo Bertrand e Fansoo (2002), uma pesquisa axiomática normativa quantitativa envolve a construção de um modelo quantitativo, baseado nas relações de causa e efeito entre as variáveis, que busca obter soluções a partir do modelo. Segundo esses autores este tipo de pesquisa tem seu foco no desenvolvimento de estratégias e ações para melhorar os resultados disponíveis na literatura ou encontrar uma solução ótima para um problema.

2.2 ETAPAS DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos apresentados na seção 1.2, foram definidas as seguintes etapas da pesquisa:

- a) revisão bibliográfica da literatura: visando compor o referencial teórico, delimitar a lacuna de pesquisa e subsidiar o desenvolvimento do projeto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas bases *Science Direct*, *Scopus* e *Google Scholar*, utilizando as palavras-chave *supplier segmentation*, *sustainable supplier segmentation*, *ANFIS*, *supply chain management*, *sustainable supply chain management*, dentre outras. Para isso, foram considerados artigos científicos nacionais e internacionais, dissertações de mestrado, teses de doutorado e livros acadêmicos. Esse material foi utilizado para a construção das seções 3.1 a 3.5, que engloba temas de SCM,

segmentação de fornecedores e modelos quantitativos de apoio às formas de segmentação de fornecedores;

- b) proposição do modelo de segmentação: a partir do levantamento bibliográfico realizado, foi possível propor um modelo conceitual de segmentação de fornecedores sustentáveis, que envolve a utilização de um conjunto de três modelos de inferência neuro-*fuzzy*, sendo um para cada dimensão do TBL. Dentre os diferentes tipos de sistemas de inferência neuro-*fuzzy* existentes na literatura, foi escolhido o sistema ANFIS (*Adaptive- Network-based Fuzzy Inference System*) para aplicação neste trabalho. O modelo conceitual para segmentação de fornecedores foi baseado nos estudos Rezaei e Ortt (2012), Lima Jr. e Carpinetti (2016) e Lajimi (2021). Para aplicação computacional dos modelos ANFIS, utilizou-se como base os estudos de Jang (1993), Özkan e Inal (2014) e Lima Jr. e Carpinetti (2020);
- c) implementação do modelo: para implementação dos modelos computacionais foi utilizada a ferramenta *Neuro-Fuzzy Designer* do *software MATLAB – MathWorks®*. Esse *software* foi escolhido pela ampla utilização e pela facilidade de aplicação do método. Cada modelo ANFIS foi treinado utilizando dados simulados. Diferentes topologias foram testadas por meio do método de validação cruzada, a fim de selecionar as topologias com melhor acurácia para cada modelo ANFIS;
- d) validação do modelo: com as melhores topologias definidas para cada modelo ANFIS, foram realizados testes estatísticos para avaliação da sua acurácia. Nessa etapa, para verificar se existe diferença significativa entre os valores produzidos pelos modelos ANFIS e os valores de saída dos conjuntos de teste (dados simulados), foram realizados testes *t* de amostras pareadas, testes de normalidade e homogeneidade das variâncias dos dados. Além disso, foram realizados testes de regressão linear e foram calculados os valores do índice de correlação linear *R* para avaliar a acurácia do modelo proposto.
- e) discussão dos resultados e conclusões: por último, foram discutidos os resultados da pesquisa, como também as vantagens e limitações do modelo proposto para resolver problemas de segmentação de fornecedores sustentáveis.

2.3 PROCEDIMENTO PARA COLETA DE DADOS

Os dados utilizados nas etapas de treinamento e teste dos modelos ANFIS foram gerados de forma simulada. Isso inclui as pontuações dos fornecedores em cada critério e os valores de desempenho global destes fornecedores em relação a cada dimensão do TBL. As pontuações dos fornecedores em cada critério foram obtidas a partir da função *random* em uma planilha eletrônica do Microsoft Excel®. Por sua vez, os valores de saída (desempenho global dos fornecedores em cada dimensão) foram calculados usando o método de tomada de decisão multicritério denominado TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), que prioriza as alternativas que estejam mais próximas da solução ideal positiva e mais distantes da solução ideal negativa. O procedimento para aplicação desse método está disposto no Apêndice 1. A escolha por dados simulados se deu pela dificuldade em encontrar empresas que possuam um amplo histórico de avaliação de fornecedores baseado em critérios relacionados às três dimensões do TBL, uma vez que para o treinamento de ANFIS é necessário dezenas ou centenas de amostras destes indicadores de desempenho. Segundo Borges e Lima Jr (2020), apenas 11,54% dos modelos quantitativos para segmentação de fornecedores encontrados na literatura utilizaram dados históricos.

2.4 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE DADOS

A análise dos dados foi realizada por meio de técnicas estatísticas. Foram calculados o erro quadrático médio (*Mean Square Error*, MSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (*R*), para verificar a acurácia dos modelos ANFIS testados e relação entre os valores esperados e os valores gerados por cada modelo. Para verificar se há diferenças estatisticamente significativas entre os valores estimados pelos três modelos ANFIS e os valores de saída do conjunto de dados de teste, foram conduzidos testes de distribuição normal, homogeneidade das variâncias e testes de hipóteses *t* com amostras pareadas (MONTGOMERY; RUNGER, 2018). Os testes foram realizados por meio do *software Microsoft Excel* e *SPSS Statistics*.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão de literatura que compõe este trabalho está dividida em cinco seções. A seção 3.1 apresenta definições, conceitos, objetivos e estratégias utilizadas em SCM. A seção 3.2 aborda a SCM do tipo sustentável, também são exploradas as definições desse tipo de cadeia, suas características e estratégias de gestão de SSM, bem como critérios e formas para desenvolvimento de fornecedores sustentáveis. A seção 3.3 explora a segmentação de fornecedores, seus objetivos e procedimentos para aplicação. Na seção seguinte (3.4) são discutidos os modelos prévios de tomada de decisão para segmentação de fornecedores. Por último a seção 3.5 deste referencial apresenta o método de inferência neuro-*fuzzy* que foi utilizado para propor o modelo de segmentação de fornecedores sustentáveis.

3.1 CADEIA DE SUPRIMENTOS

Segundo Bowersox *et al* (2006) a SCM compreende as empresas desta cadeia que colaboram entre si para alavancar posicionamento estratégico e para melhorar a eficiência das operações. Segundo Pires (2017) uma cadeia de suprimentos é uma rede de empresas autônomas ou semiautônomas, que são efetivamente responsáveis pela obtenção, produção e liberação de um determinado produto e/ou serviço ao cliente final. Chopra e Meindl (2004) defendem que uma cadeia de suprimentos engloba todos os estágios envolvidos de forma direta ou indireta, no atendimento do pedido de um cliente, isto inclui desde os fabricantes, fornecedores, transportadores, depósitos, varejistas e até os próprios clientes.

Na cadeia de suprimentos, existe o fluxo do produto acabado, partindo das manufaturas levando o material ao cliente final. No entanto, fluxos reversos também podem ser vistos, como informações de demanda (PIRES, 2017) e produtos no final do ciclo de vida, retornando ao sistema por meio da reciclagem, reutilização ou remanufatura (NASIR *et al.*, 2017).

A SCM tem como objetivo principal produzir e distribuir os materiais na quantidade certa, no lugar certo e na hora certa, minimizando o custo geral sem prejudicar o nível de satisfação do cliente (KO; TIWARI; MEHNEN, 2010). Em uma

pesquisa e análise de 173 definições de SCM, Stock e Boyer (2009, p. 706) propuseram a seguinte definição:

A gestão de uma rede de relacionamento dentro de uma empresa e entre organizações interdependentes e unidades de negócios compostas por fornecedores de materiais, compras, instalações de produções, logística, marketing e sistemas relacionados que facilitam o fluxo direto e reverso de materiais, serviços, finanças e informações do produtor original para o cliente final com os benefícios de agregar valor, maximizar a rentabilidade por meio de eficiências e alcançando a satisfação do cliente.

As cadeias de suprimentos utilizam estratégias competitivas alinhadas com o que é exigido pelo meio em que atuam, podendo ser flexível, *lean*, ágil, verde, sustentável, resiliente, humanitária e cadeias de suprimentos 4.0 (RESENDE; GERALDES; LIMA JR, 2021). Gattorna (2010) conceituou as estratégias competitivas das cadeias de suprimentos em flexível, *lean* e ágil. As cadeias de suprimentos flexíveis estão preocupadas com o atendimento de problemas não planejados, de uma forma criativa. As cadeias de suprimentos *lean* são caracterizadas pelo alto volume, baixa variedade, baixo custo, demanda e prazos de entrega previsíveis, alta confiabilidade e baixo risco. As cadeias de suprimentos ágeis caracterizam-se pela rapidez no lançamento de novos produtos no mercado, além de tomar decisões rápidas e possibilidade de realizar ações imediatas para acontecimentos inesperados (GATTORNA, 2010). As cadeias de suprimentos verdes utilizam conceitos como redução, reuso e reciclagem em seus processos, integrando questões ambientais, transformando-as em vantagens competitivas (SRIVASTAVA, 2007). As cadeias de suprimentos sustentáveis englobam aspectos ambientais, econômicos e sociais (FARAHANI *et al.*, 2014).

As cadeias de suprimentos resilientes operam gerenciando riscos associados às interrupções, operando com eficiência tanto em situações normais quanto em situações de interrupções (CHRISTOPHER; PECK, 2004). Já as cadeias de suprimentos humanitárias operam em situações de desastres para aliviar o sofrimento de pessoas vulneráveis (GOVINDAN; FATTAHI; KEYVANSHOKOOH, 2017). Por fim, as cadeias de suprimentos 4.0 que podem ser definidas como:

Abordagem transformacional e holística que utiliza tecnologias disruptivas da Indústria 4.0 para agilizar os processos, atividades e relacionamentos para

gerar benefícios significativos estratégicos para todas as partes interessadas da cadeia de suprimentos (FREDERICO *et al.*, 2019, p.275).

Nas últimas décadas, legislações ambientais mais rígidas e pressões de *stakeholders* fizeram com que as empresas e outros tipos de organizações promovessem melhorias, tanto em seu desempenho ambiental e social para cumprir as novas exigências legais quanto nas suas cadeias de suprimentos para atender a demanda por lucratividade (BÜYÜKÖZKAN, 2012).

Legislações ambientais, como a Lei nº 6.938/81 (Política Nacional do Meio Ambiente), de 31 de agosto de 1981, que estabelece diretrizes e instrumentos para preservação, fiscalização, proteção, recuperação da qualidade ambiental e exige a obtenção prévia de licenciamento ambiental para atividades que utilizem recursos ambientais ou que sejam potencialmente poluidoras (BRASIL, 1981). A Lei 12.305/10 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) de 2 de agosto de 2010, define princípios e diretrizes para as empresas quanto ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010), e a Lei 12.651/12 (Novo Código Florestal Brasileiro) de 25 de maio de 2012, que responsabiliza os proprietários de espaços protegidos entre a Área de Preservação Permanente e a Reserva Legal (BRASIL, 2012), são exemplos de mudanças nas legislações que ajudaram a acelerar o desenvolvimento dessa temática.

3.2 CADEIA DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS

A literatura, apresenta diversas definições de cadeia de suprimentos sustentável (*Sustainable Supply Chain Management, SSCM*) (DUBEY *et al.*, 2017). Uma das primeiras definições, proposta por Carter e Rogers (2008, p. 368), considera SSCM como sendo:

a integração estratégica e transparente e a realização dos objetivos sociais, ambientais e econômicas de uma organização na coordenação sistêmica dos principais processos de negócios interorganizacionais para melhorar o desempenho econômico de longo prazo da empresa individual e de suas cadeias de suprimentos.

Com base em uma análise comparativa das definições de SSCM encontradas na literatura, Ahi e Searcy (2013, p. 339) propuseram SSCM como sendo:

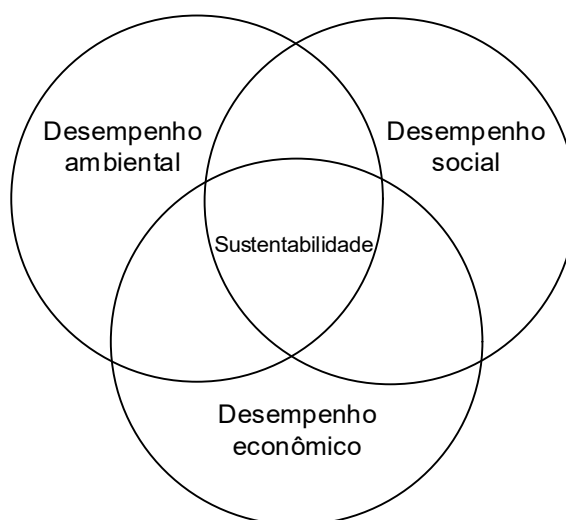
cadeias de suprimentos coordenadas através da integração voluntária de considerações econômicas, ambientais e sociais com os principais sistemas de negócios intraorganizacionais projetados para gerenciar de forma eficiente e eficaz os fluxos de materiais, informações e capitais associados à aquisição, produção e distribuição de produtos ou serviços a fim de atender aos requisitos das partes interessadas e melhorar a lucratividade, a competitividade e a resiliência da organização a curto e longo.

Para melhor entendimento da SSCM, é necessário conhecer os conceitos de desenvolvimento sustentável e *triple bottom line (TBL)*. Segundo a *World Commission on Environment And Development* (Comissão Mundial Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p. 46), “desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades”. Essa definição destaca as noções de “necessidades” *versus* “limitações”, no qual os resultados econômicos (necessidades), são limitados, ou pelo menos deveriam levar em consideração os aspectos ambientais (limitações) (MARTINS; PATO, 2019). A integração de pensamentos ambientais com os processos que ocorrem ao longo das cadeias de suprimentos (como por exemplo o desenvolvimento de produtos, seleção de materiais, processos de fabricação, entre outros), criou as chamadas cadeias de suprimentos verdes (SRIVASTAVA, 2007). Devido às pressões governamentais e preocupações competitivas, o conceito de cadeias de suprimentos verde se expandiu, incorporando as preocupações sociais, e passaram a ser denominadas por cadeias de suprimentos sustentáveis (MARTINS; PATO, 2019; HENDIANI; MAHMOUDI; LIAO, 2020).

O modelo de gestão empresarial que integra os aspectos da sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável mais conhecido é o TBL, desenvolvido por John Elkington na década de 1990 (GOH *et al.*, 2020). O TBL utiliza o modelo dos “3 P’s – *Profit, People e Planet*” (lucro, pessoas e planeta), para representar a parte econômica, social e ambiental. Um sistema econômico sustentável trabalha com a produção e com fornecimento de bens no decorrer do tempo. Já a sustentabilidade ambiental se esforça para preservar os recursos primários, evitando interferir no meio ambiente. Por fim, a sustentabilidade social ressalta a importância da distribuição equitativa dos direitos sociais, saúde, educação e estabilidade política (HENDIANI; MAHMOUDI; LIAO, 2020).

Carter e Rogers (2008) argumentam que o TBL é um meio potencialmente poderoso para representar o conceito de sustentabilidade dentro de uma organização. Conforme a Figura 1, a sustentabilidade pode ser representada por meio da junção dos três componentes do TBL de forma balanceada (CARTER; ROGERS, 2008). No primeiro círculo, o nível do desempenho ambiental é medido por meio do registro do impacto ambiental das suas operações. No segundo círculo o desempenho do nível de responsabilidade social da organização é mensurado e no último círculo, o desempenho econômico é abordado (MARTINS; PATO, 2019).

Figura 1 - Triple Bottom Line



Fonte: Adaptado de Carter e Rogers (2008, p.365).

Houve um aumento significativo da quantidade de publicações sobre o tema SSCM nas últimas décadas (MARTINS; PATO, 2019; ANSARI; KANT, 2017; BATISTA *et al.*, 2018). Esse aumento se deve às crescentes preocupações sociais, ambientais (ANSARI; KANT, 2017), políticas, bem como as preocupações de cunho científico devido às mudanças climáticas (BATISTA *et al.*, 2018). O compromisso econômico, social e ambiental entre os *stakeholders* das organizações vem demandando um posicionamento padrão das organizações, transformando a sustentabilidade em quesito obrigatório para fazer negócios no século XXI (CARTER; EASTON, 2011).

Carter e Rogers (2008) identificaram quatro características de suporte que podem fortalecer o TBL das SSCM:

- a) estratégia – identificar as ideias e iniciativas individuais dos colaboradores que se conectam e apoiam as estratégias globais de sustentabilidade da organização;
- b) gerenciamento de riscos – planejamento de contingência das cadeias de suprimentos em ambos os sentidos (*upstream* e *downstream*);
- c) cultura organizacional – que englobe responsabilidade social, dentro e fora da organização, com altos padrões éticos, incluindo respeito pela sociedade e o meio ambiente;
- d) transparência – característica que em termos de engajamento e comunicação deve ser clara entre os principais *stakeholders* e ter visibilidade e rastreabilidade dentro dos processos das cadeias de suprimentos.

Como forma de avanço da SSCM, outros conceitos foram sendo introduzidos ao tema, como o conceito de economia circular (*circular economy*, CE), que originou as cadeias de suprimentos circulares (*Circular Supply Chain Management*, CSCM) (FAROOQUE *et al.*, 2019). Apesar da combinação de SCM e CE aparecer em alguns estudos na literatura, como Canning (2006), Du *et al.* (2010), Genovese *et al.* (2017), Nasir *et al.* (2017), a definição própria do termo de CSCM apareceu somente em 2018 com Batista *et al.* (FAROOQUE *et al.*, 2019), sendo como

cadeias de suprimentos coordenadas para frente e para trás via integração do ecossistema de negócios para a criação de valor de produtos/serviços, subprodutos e fluxos de resíduos úteis através de ciclos de vida prolongados que melhoram a sustentabilidade econômica, social e ambiental das organizações (BATISTA *et al.*, 2018, p. 446).

O conceito proposto por Batista *et al.* (2018) engloba os três pilares da sustentabilidade (econômico, social e ambiental). Já Farooque *et al.* (2019, p. 884), a partir de uma pesquisa sobre o atual estado da arte, definem cadeia de suprimentos circular sem mencionar os três pilares básicos da SSCM:

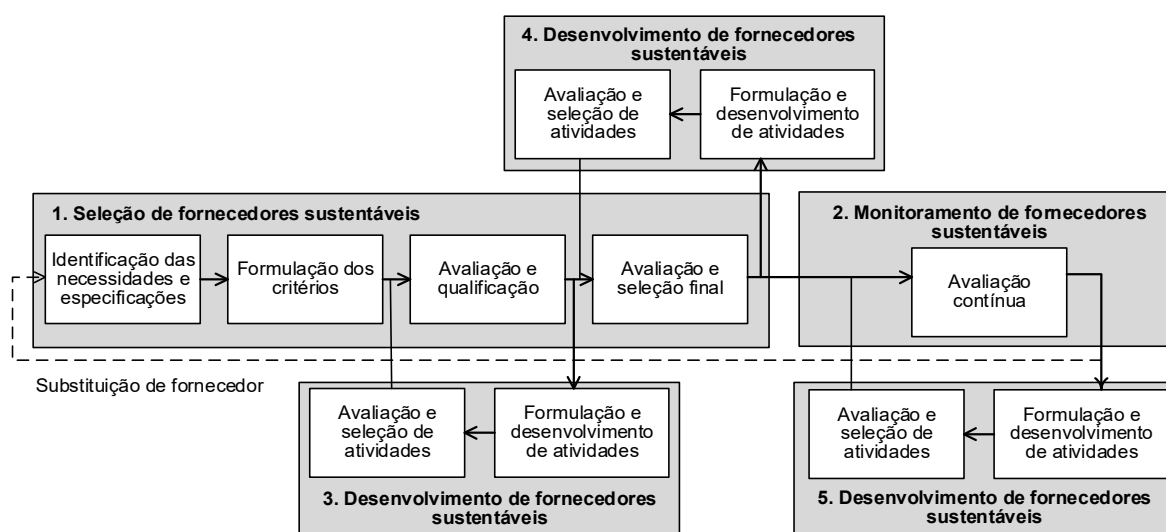
SC circular é a integração do pensamento circular na SCM e nos ecossistemas industriais e naturais circundantes. Ele restaura sistematicamente materiais técnicos e regenera materiais biológicos em direção a uma visão de desperdício zero por meio da inovação em todo o sistema em modelos de negócios e funções da cadeia de suprimentos, desde o projeto do produto/serviço até o fim da vida e gerenciamento de resíduos, envolvendo todas as partes interessadas em um produto/serviço ciclo de vida incluindo peças/fabricantes de produtos, provedores de serviços, consumidores e usuários.

A economia circular, considera o planeta como um sistema fechado, dessa forma os recursos naturais esgotados equivalem a mesma quantidade de resíduos gerados no mesmo período (GENOVESE *et al.*, 2017). Em outras palavras, a junção de economia circular com SCM orienta para produção de “lixo zero”, utilizando inovações em toda a cadeia de suprimentos para recuperar todo o tipo de resíduo (FAROOQUE *et al.*, 2019).

3.2.1 Processos decisórios de gestão de fornecedores sustentáveis

A SSCM também envolve uma série de processos de tomada de decisão relacionados à gestão de fornecimento (ZIMMER; FRÖHLING; SCHULTMANN, 2016). De acordo com Zimmer, Fröhling e Schultmann (2016), a gestão de fornecedores sustentáveis (*Sustainable Supplier Management, SSM*) abrange os processos de seleção, desenvolvimento e monitoramento de fornecedores sustentáveis. Apesar desses processos serem independentes, eles são inter-relacionados, uma vez que os resultados de um processo influenciam os demais processos de decisão (ZIMMER; FRÖHLING; SCHULTMANN, 2016). A Figura 2 apresenta um *framework* para a SSM proposto por Zimmer, Fröhling e Schultmann (2016).

Figura 2 - Proposta de SSM



Fonte: Adaptado de Zimmer, Fröhling, Schultmann (2016, p.1415).

Conforme exposto na Figura 2, o (1) processo de seleção de fornecedores inicia com a identificação das necessidades e das especificações de compra, e segue com a formulação dos critérios que serão utilizados tanto para seleção, como para o monitoramento e desenvolvimento dos fornecedores (ZIMMER; FRÖHLING; SCHULTMANN, 2016). Os critérios selecionados devem estar de acordo com os objetivos do comprador e as necessidades dos clientes (LAJIMI, 2021). Alguns dos critérios mais utilizados para a seleção, avaliação e desenvolvimento de fornecedores, considerando as três dimensões da sustentabilidade (TBL), estão apresentados no Quadro 1, adaptado de Lajimi (2021). Posteriormente há a etapa de avaliação e qualificação de acordo com as informações disponibilizadas pelos fornecedores. Para finalizar essa etapa, são feitas a avaliação detalhada e a seleção final dos melhores fornecedores qualificados (ZIMMER; FRÖHLING; SCHULTMANN, 2016).

Quadro 1 - Critérios para avaliação de fornecedores

Critérios econômicos	Critérios ambientais	Critérios sociais
<p>Custo Preço inicial baixo Atividades de redução de custo Conformidade com o comportamento de preços</p> <p>Qualidade Qualidade de conformidade Consistência de entrega Filosofia de qualidade Resposta rápida</p> <p>Tempo Velocidade de entrega Tempo de desenvolvimento de produto Tempo de formação da parceria</p> <p>Flexibilidade Mudanças de volume dos produtos Curto tempo de <i>set-up</i> Resolução de conflitos</p> <p>Inovação Lançamento de novos produtos Uso de novas tecnologias</p> <p>Cultura Estratégias apropriadas Sentimento de Confiança</p> <p>Tecnologia Compatibilidade tecnológica Capacidade técnica Instalações da fabricação Capacidade de design dos fornecedores</p> <p>Relacionamento Relacionamento a longo prazo Comunicação aberta Reputação pela integridade Proximidade de relacionamento</p>	<p>Controle de poluição Remediação Controles de fim de linha</p> <p>Prevenção de poluição Adaptação do produto Adaptação do processo</p> <p>Gestão do sistema ambiental Estabelecimento de compromisso e política ambiental Identificação de aspectos ambientais Planejamento de objetivos ambientais Atribuição de responsabilidade ambiental Verificação e avaliação de atividades ambientais</p> <p>Consumo de recursos Consumo de água Consumo de matéria-prima Consumo de energia</p> <p>Produção de poluição Produção de agentes poluentes Produção de produtos tóxicos Produção de resíduos</p>	<p>Práticas de recursos humanos Práticas disciplinares e de segurança Contratos de trabalho Igualdade nas fontes de trabalho Diversidade Discriminação Oportunidades de trabalho Arranjos de trabalhos flexíveis Compensação de emprego Pesquisa e desenvolvimento Desenvolvimento de carreira Trabalho Infantil</p> <p>Saúde e segurança Incidentes de saúde e segurança Práticas de saúde e segurança Condições de trabalho</p> <p>Influência na comunidade local Saúde Educação Habitação Infraestrutura de serviços Infraestrutura de mobilidade Serviços públicos e regulatórios Apoio a instituições educacionais Segurança Crescimento de bem-estar econômico Coesão social Apoio a projetos comunitários</p> <p>Influência dos stakeholders Educação dos consumidores Audiências coletivas Engajamento dos <i>stakeholders</i> Potencial de influência de decisão</p>

Fonte: Adaptado de Lajimi (2021, p.125).

Já o (2) processo de monitoramento de fornecedores se inicia na sequência do processo de seleção. Esse processo inclui análises e avaliações contínuas das informações dos fornecedores e da cadeia de suprimentos, desde o cumprimento dos requisitos mínimos pré-estabelecidos até a melhoria do desempenho, levando em consideração os três pilares da sustentabilidade. Além de acompanhar o desempenho dos fornecedores no decorrer do tempo, o monitoramento dos fornecedores pode servir como estímulo para substituição e desenvolvimento de novos parceiros (ZIMMER; FRÖHLING; SCHULTMANN, 2016).

O processo de desenvolvimento de fornecedores (3, 4 e 5) na Figura 2 pode ser iniciado em três diferentes etapas, duas dentro do processo de seleção (3 e 4), e uma durante o processo de monitoramento (5). Quando o processo está na etapa de qualificação, o foco consiste em alcançar os requisitos mínimos. Já quando o desenvolvimento do processo de seleção está na parte final, na etapa de escolha ou durante o processo de monitoramento, o foco está na melhoria de desempenho, na busca de um desempenho maior do que os requisitos mínimos exigidos (ZIMMER; FRÖHLING; SCHULTMANN, 2016).

Apesar do modelo proposto por Zimmer, Fröhling e Schultmann (2016) englobar grande parte das decisões de SSM relativas ao gerenciamento da cadeia de suprimentos sustentável, ele não contempla o processo de segmentação de fornecedores. As organizações, muitas vezes, chegam a trabalhar com dezenas ou até centenas de fornecedores que possuem características diferentes, tais como: localização, valores oferecidos, tipo de produto, qualidade e recursos. Para gerenciar essas diferenças, principalmente no que tange com a gestão do relacionamento, é praticamente impossível desenvolver estratégias individuais para cada parceiro comercial. Dessa forma, a segmentação de fornecedores torna-se uma forma bastante utilizada para o gerenciamento do elevado número de fornecedores (REZAEI; LAJIMI, 2019).

3.3 SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES

A segmentação de fornecedores pode ser definida como um processo que separa o rol de fornecedores em grupos distintos com diferentes necessidades, características ou comportamentos, os quais demandam diferentes tipos de estruturas

de relacionamentos (DAY; MAGNAN; MOELLER, 2010). Segundo Dyer *et al.* (1998), as organizações devem pensar no gerenciamento de fornecedores de forma mais ampla e não possuir apenas uma estratégia única, do tipo “*one-size-fits-all*”. O fenômeno da globalização, permitiu o aumento de possíveis fornecedores, fazendo com que as empresas chegassem a alcançar centenas deles, tornando inviável trabalhar com estratégias individuais. Dessa forma, a segmentação de fornecedores se apresenta como uma prática efetiva para gerenciar a base de fornecedores, agrupando fornecedores com características em comum, mitigando a necessidade de estratégias exclusivas e individuais (BAI; REZAEI; SARKIS, 2017).

O modelo pioneiro de segmentação de fornecedores foi proposto por Kraljic (1983). Nessa abordagem, baseada no tipo de item fornecido, os materiais comprados são classificados em duas dimensões: importância da compra e complexidade de fornecimento. Para cada dimensão em que os materiais são enquadrados, são criadas estratégias específicas de gerenciamento (REZAEI; LAJIMI, 2019). A Figura 3 ilustra a Matriz de Kraljic, os fornecedores são classificados em quatro categorias, definidas de acordo com o tipo de item fornecido:

- a) itens não-críticos – risco de fornecimento e impacto no lucro baixos. Nesse grupo há uma grande diversidade de fornecedores e o valor de compra dos produtos é baixo (KRALJIC, 1983);
- b) itens de alavancagem – risco de fornecimento baixo e impacto no lucro alto. Estão classificados nesse grupo itens que possuem alta quantidade de fornecedores e que representam um alto valor financeiro dos produtos (KRALJIC, 1983);
- c) itens gargalos – risco de fornecimento alto e impacto no lucro baixo. Nesse grupo estão enquadrados os itens que possuem um valor de compra baixo e possuem uma baixa variedade de fornecedores (KRALJIC, 1983);
- d) itens estratégicos – risco de fornecimento e impacto no lucro alto. Estão separados nesse grupo os itens que possuem poucos fornecedores e produtos que geram grande impacto financeiro no produto final (KRALJIC, 1983).

Para cada uma das quatro dimensões em que os fornecedores são enquadrados, sugerem-se estratégias específicas de gerenciamento adequadas a cada grupo (REZAEI; LAJIMI, 2019).

Figura 3 - Matriz de Kraljic



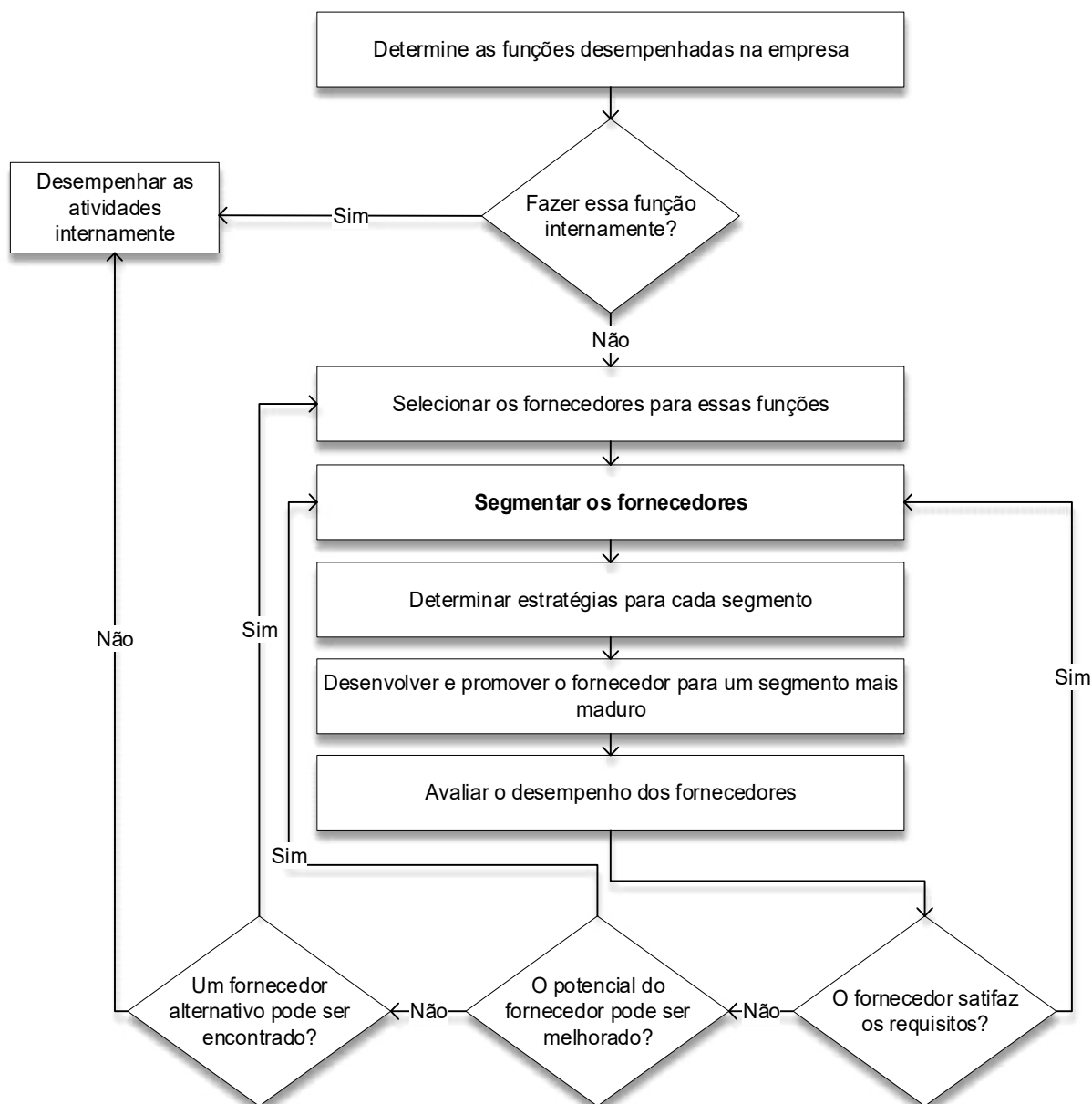
Fonte: Adaptado de Kraljic (1983).

Ao passar do tempo, novos estudos abordando a segmentação de fornecedores foram propostos, como o modelo de Rezaei e Ortt (2012), que propõe a segmentação de fornecedores, conforme ilustrado na Figura 4. O modelo leva em conta as atividades e funções da empresa, tais como a produção, finanças, logística, *marketing*, vendas e P&D. Nesse modelo, o processo de segmentação de fornecedores é realizado da seguinte forma:

- a) *make or buy* - determinar se as funções e atividades que a organização está trabalhando serão realizadas internamente (*make*) ou terceirizadas externamente (*buy*). Nessa etapa, caso o comprador da organização decida realizar internamente, o processo de segmentação precisa ser executado e assim se encerra o fluxograma, caso contrário, segue-se o fluxo para próxima etapa;
- b) selecionar os fornecedores adequados para as diferentes funções e atividades – etapa de seleção de fornecedores;
- c) segmentar os fornecedores de acordo com suas capacidades e disposição para colaborar para cada função;
- d) determinar e implementar estratégias para cada segmento;

- e) determinar e implementar estratégias para desenvolver o relacionamento com os fornecedores ao longo do tempo;
- f) avaliar o desempenho dos fornecedores. Dependendo do resultado encontrado, pode-se voltar às etapas 1, 2 ou 3.

Figura 4 - Modelo de segmentação de fornecedores



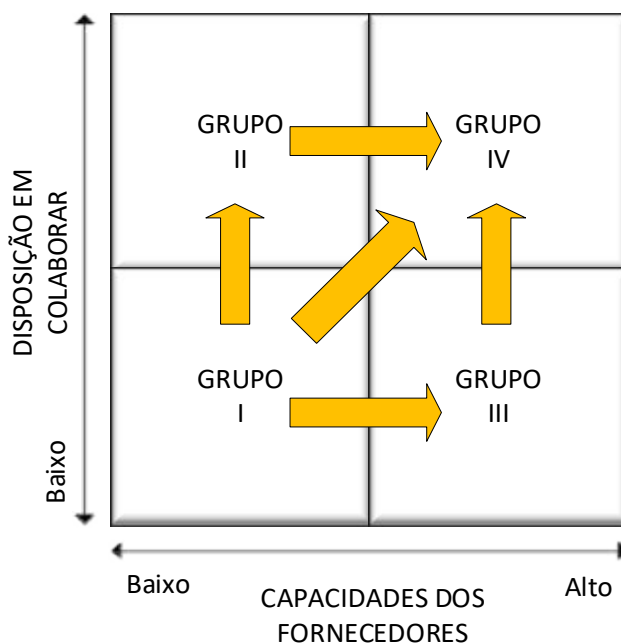
Fonte: Adaptado de Rezaei e Ortt (2012, p.4605).

Durante o processo de avaliação, caso o fornecedor melhore seu desempenho, sua posição na matriz de segmentação pode ser modificada, enquadrando-se assim

em um grupo de relacionamento e estratégia diferente. Por outro lado, se o fornecedor não conseguir melhorar seu desempenho, o comprador da organização deverá buscar novos fornecedores. No entanto, caso não haja mais opções, as atividades deverão ser feitas internamente (REZAEI e ORTT, 2012)

A Figura 5, exemplifica os possíveis efeitos do desenvolvimento de fornecedores no processo de segmentação de fornecedores baseado em Rezaei e Ortt (2012). Os fornecedores são avaliados nas dimensões de capacidades e disposição para colaborar e são classificados em um dos quatro grupos. Com a aplicação de estratégias relacionadas às capacidades dos fornecedores, eles podem ser movidos do grupo I para III ou do grupo II para IV. Após a aplicação de estratégias relacionadas à disposição para colaborar, os fornecedores passam do grupo I para o II ou do grupo III para o IV. Para Rezaei e Ortt (2012), o desenvolvimento dos fornecedores significa aplicar esforços por parte do comprador (ou mesmo do comprador e fornecedor em conjunto) para mover os fornecedores do grupo I para II ou III, ou mesmo para IV e do grupo II ou III para IV.

Figura 5 - Modelos de matriz de segmentação de fornecedores



Fonte: Adaptado de Rezaei e Ortt (2012, p.4603).

Para classificar os fornecedores em cada dimensão é necessário utilizar um método quantitativo de tomada de decisão que considere os múltiplos critérios de

segmentação bem como os pesos de cada um deles (REZAEI; ORTT, 2012). Essas pontuações geralmente são baseadas em dados históricos ou julgamentos subjetivos coletados da opinião de especialistas, o que requer o uso de um método adequado para apoiar o processo de decisão com tais valores incertos.

3.4 MODELOS QUANTITATIVOS DE APOIO À SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES

Os modelos quantitativos de apoio à segmentação de fornecedores são utilizados para auxiliar os tomadores de decisão no processo de avaliação e agrupamento dos fornecedores de acordo com seu desempenho individual (REZAEI; ORTT, 2013a). Esses modelos utilizam as avaliações dos fornecedores como variáveis de entrada e geram valores de desempenho global para o fornecedor com base em múltiplos critérios (SHIRALKAR; BONGALE; KUMAR, 2021). A maioria dos modelos é formada por matrizes de categorização que realizam o agrupamento dos fornecedores de acordo com o desempenho global (BORGES; LIMA JR, 2020). Os propósitos de aplicação dos modelos de segmentação existentes na literatura, incluem identificar fornecedores para implantar programas de desenvolvimento, definir tipos de relacionamento que deve ser desenvolvido com o fornecedor, identificar tipos de relacionamento existentes com fornecedores, agrupamento de fornecedores de acordo com critérios de desempenho específicos, dentre outros (BORGES; LIMA JR, 2020).

Em uma revisão sistemática da literatura sobre modelos quantitativos de decisão para apoiar a segmentação de fornecedores, Borges e Lima Jr. (2020) analisaram 26 artigos publicados em revistas científicas até o ano de 2019. Para complementar e atualizar os estudos obtidos por Borges e Lima Jr. (2020), foi realizada uma nova pesquisa, seguindo o mesmo protocolo e acrescentando artigos publicados nos anos de 2020 e 2021. Com a nova pesquisa, a quantidade passou de 26 para 33 na revisão sistemática. O Quadro 2 apresenta as características dos modelos analisados por Borges e Lima Jr. (2020) e daqueles incluídos pelo presente estudo. Apesar da inclusão de novos estudos, as dimensões de segmentação mais utilizadas permaneceram as mesmas, sendo “capacidades dos fornecedores” (*capabilities*) e “disposição para colaborar” (*willingness*).

Quadro 2 - Artigos que apresentam modelos quantitativos para segmentação consideradas

Autor(es)	Título do artigo	Dimensões de segmentação
Akman (2015)	<i>Evaluating suppliers to include green supplier development programs via fuzzy c-means and VIKOR methods</i>	Não utiliza matriz de segmentação
Aloini et al. (2019)	<i>Leveraging procurement-related knowledge through a fuzzy-based DSS: a refinement of purchasing portfolio models</i>	Atratividade do fornecedor e força do relacionamento
Bai, Rezaei e Sarkis (2017)	<i>Multicriteria Green Supplier Segmentation</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Bianchini et al. (2019)	<i>Supply chain redesign for lead-time reduction through Kraljic purchasing portfolio and AHP integration</i>	Risco de fornecimento e impacto no lucro
Borges et al. (2021)	<i>Proposal of a Hesitant Fuzzy-TOPSIS model to support supplier segmentation</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Boujelben (2017)	<i>A unicriterion analysis based on the PROMETHEE principles for multicriteria ordered clustering</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Che (2011)	<i>Clustering and selecting suppliers based on simulated annealing algorithms</i>	Não utiliza matriz de segmentação
Demir et al. (2018)	<i>A green supplier evaluation system based on a new multi-criteria sorting method: VIKORSORT</i>	Não utiliza matriz de segmentação
Duc et al. (2021)	<i>A dynamic generalized fuzzy multi-criteria group decision making approach for green supplier segmentation</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Haghighi, Morad e Salahi (2014)	<i>Supplier Segmentation using Fuzzy Linguistic Preference Relations and Fuzzy Clustering</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Jharkharia e Das (2019)	<i>Low carbon supplier development: A fuzzy cmeans and fuzzy formal concept analysis based analytical model</i>	Decisões de investimento do fornecedor e decisões de colaboração do fornecedor
Kaur e Singh (2020)	<i>Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies</i>	Não utiliza matriz de segmentação
Keskin e Kaymaz (2021)	<i>Machine learning in supply chain management: a risk based supplier segmentation application</i>	Não utiliza matriz de segmentação

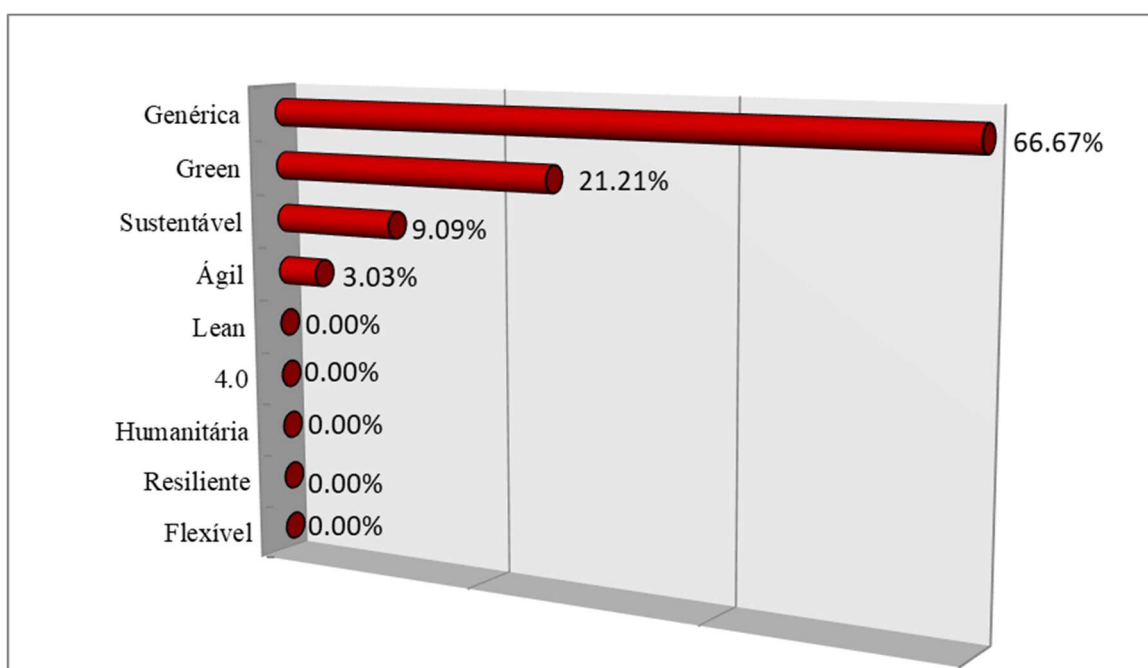
Lima-Junior e Carpinetti (2016)	<i>Combining SCOR® model and fuzzy TOPSIS for supplier evaluation and management</i>	Custo e desempenho de entrega
Lo e Sudjatmika (2016)	<i>Solving multi-criteria supplier segmentation based on the modified FAHP for supply chain management: a case study</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Matshabaphala e Grobler (2021)	<i>Supplier segmentation: a case study of Mozambican cassava farmers</i>	Não utiliza matriz de segmentação
Medeiros e Ferreira (2018)	<i>Development of a purchasing portfolio model: an empirical study in a Brazilian hospital</i>	Risco de fornecimento e impacto no lucro
Osiro, Lima-Junior e Carpinetti -2014	<i>A fuzzy logic approach to supplier evaluation for development</i>	Potencial de parceria e desempenho de entrega
Park <i>et al.</i> (2010)	<i>An integrative framework for supplier relationship management</i>	Importância estratégica e atratividade do relacionamento
Parkouhi, Ghadikolaei e Lajimi (2019)	<i>Resilient supplier selection and segmentation in grey environment</i>	Intensificador de resiliência e redutor de resiliência.
Rajesh e Raju (2021)	<i>A fuzzy inference approach to supplier segmentation for strategic development</i>	Agilidade e excelência nos negócios
Restrepo e Villegas (2019)	<i>Supplier evaluation and classification in a Colombian motorcycle assembly company using data envelopment analysis</i>	Eficiência da diversidade e eficiência cruzada
Rezaei e Lajimi (2019)	<i>Segmenting supplies and suppliers: bringing together the purchasing portfolio matrix and the supplier potential matrix</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Rezaei e Ortt (2013a)	<i>Supplier segmentation using fuzzy logic</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Rezaei, e Ortt (2013b)	<i>Multi-criteria supplier segmentation using a fuzzy preference relations based AHP</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Rezaei <i>et al.</i> (2017)	<i>Embedding carbon impact assessment in multicriteria supplier segmentation using ELECTRE TRI-rC</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Rezaei, Wang e Tavasszy (2015)	<i>Linking supplier development to supplier segmentation using Best Worst Method</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Rius-Sorolla, Estelles-Miguel e Rueda-Armengot (2020)	<i>Multivariable Supplier Segmentation in Sustainable Supply Chain Management</i>	Risco de fornecimento e impacto no lucro

Santos, Osiro e Lima (2017)	<i>A model based on 2-tuple fuzzy linguistic representation and Analytic Hierarchy Process for supplier segmentation using qualitative and quantitative criteria</i>	Capacidades dos fornecedores e disposição para colaborar
Segura e Maroto (2017)	<i>A multiple criteria supplier segmentation using outranking and value function methods</i>	Desempenho crítico de fornecedores e desempenho estratégico de fornecedores
Svensson (2004)	<i>Supplier segmentation in the automotive industry: A dyadic approach of a managerial model</i>	Comprometimento do fornecedor e importância do produto
Torres-Ruiza e Ravindranb (2018)	<i>Multiple Criteria Framework for the Sustainability Risk Assessment of a Supplier Portfolio</i>	País; desempenho do negócio do fornecedor; equipamento e suprimento do fornecedor
Wasti, Kozan e Kuman (2006)	<i>Buyer-supplier relationships in the Turkish automotive industry</i>	Investimentos específicos do fornecedor e investimentos específicos do comprador

Fonte: Adaptado de Borges e Lima Jr. (2020, p. 4).

A Figura 6 mostra a quantidade de modelos encontrados para cada tipo de estratégia utilizada pela cadeia de suprimentos. 66,67% dos artigos não apresentam uma estratégia específica, sendo classificados como estratégica genérica. 21,21% dos estudos são sobre cadeias *green* e 9,09% em cadeias sustentáveis. Com a atualização da RSL foram encontrados dois novos estudos dedicados a SSCM. Por último, 3,03% são voltados para cadeia de suprimentos ágil. A RSL de Borges e Lima Jr. (2020) não encontrou nenhum estudo voltado para cadeias de suprimentos *lean*, flexível, humanitária, resiliente e 4.0.

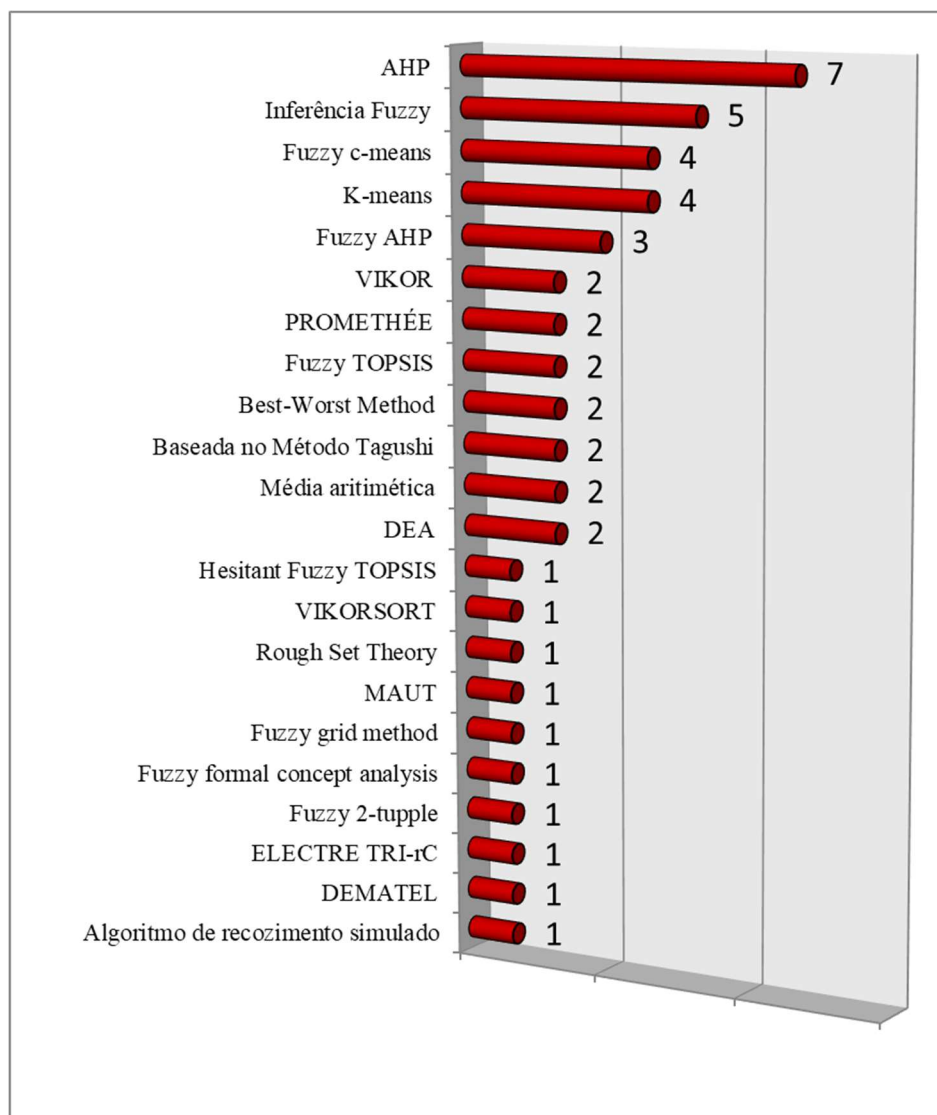
Figura 6 - Classificação dos modelos quanto ao tipo de cadeia de suprimentos



Fonte: Adaptado de Borges e Lima Jr. (2020, p. 9).

A Figura 7 mostra as técnicas de decisão para segmentação de fornecedores que foram encontradas. A técnica mais utilizada foi AHP, com sete aplicações, seguida da Inferência *Fuzzy* com cinco aplicações, *Fuzzy c-means* e *K-means* com quatro aplicações cada. Além disso, vários artigos combinavam mais de uma técnica de decisão. Em relação a fonte de dados utilizada para a aplicação de cada modelo, 79% provém da opinião de especialistas, 9% de uma combinação de dados históricos com opinião de especialista, 9% de somente dados históricos e 3% de dados de outros estudos.

Figura 7 - Frequência das técnicas empregadas



Fonte: Adaptado de Borges e Lima Jr. (2020, p. 9).

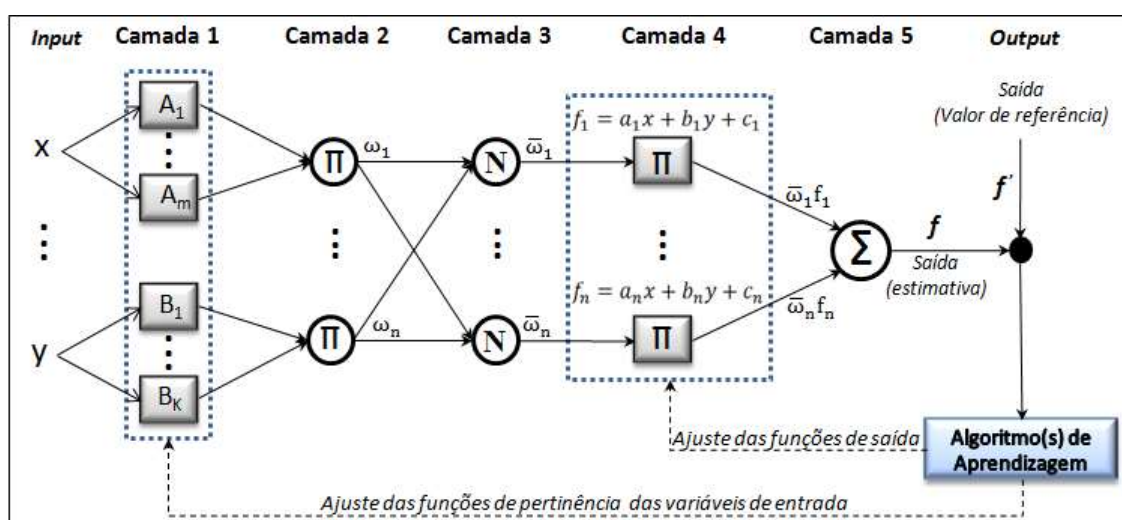
Ainda que os modelos de segmentação de fornecedores apresentados tragam várias contribuições para a literatura, nenhum deles apresenta habilidade de aprendizagem supervisionada (BORGES; LIMA JR., 2020). Isto significa que tais modelos, não são capazes de ajustar automaticamente as relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e saída por meio de amostras dos valores destas variáveis, o que traria como vantagem permitir a adaptação do modelo ao ambiente de uso. Essa limitação pode ser contornada por meio da aplicação de sistemas de inferência neuro-*fuzzy*.

3.5 SISTEMAS DE INFERÊNCIA NEURO-FUZZY

Na literatura é possível encontrar diferentes tipos de sistemas híbridos que combinam a lógica *fuzzy* com redes neurais artificiais, sendo esses chamados de sistemas de inferência neuro-*fuzzy* (LIMA JR.; CARPINETTI, 2020). Proposto por Jang (1993), o sistema ANFIS (*Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*) é o mais conhecido. A aplicação da lógica *fuzzy* separadamente, demanda um esforço considerável para se definir as funções e as regras de inferência dos sistemas. Já as redes neurais, quando são utilizadas de maneira isolada, além de não proverem transparência nos cálculos também não são adequadas para lidar com decisões sob incerteza, como as que envolvam variáveis qualitativas e julgamentos subjetivos de especialistas. Tais limitações podem ser contornadas por meio da combinação dessas duas técnicas gerando um modelo com capacidade preditiva superior e maior transparência nos resultados (ÖZKANA; INAL, 2014).

A Figura 8 apresenta a topologia de um modelo ANFIS que possui cinco camadas e dentro de cada uma delas encontram-se os “nós” que desempenham funções do mesmo tipo. Os nós podem ser fixos, representados por círculos, ou adaptativos, representados por quadrados. Os nós adaptativos são ajustados na etapa de treinamento do sistema por meio de parâmetros modificáveis dentro de cada nó. O funcionamento de cada camada é descrito a seguir (JANG, 1993; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2020):

Figura 8 - Topologia ANFIS com duas entradas e uma saída



Fonte: Jang (1993, p. 673) e Lima Jr e Carpinetti (2020).

a) camada 1 (camada de fuzzificação): nesta etapa os valores de entrada (x e y) são convertidos em conjuntos *fuzzy* equivalentes. Sua função é dada como:

$$O_i^1 = \mu_{Ai}(x) \quad (1)$$

onde x é a entrada do nó e Ai é a variável linguística associada à função do nó. A saída O_i^1 é grau de pertencimento do valor x aos conjuntos *fuzzy* definidos para a variável Ai . A função de pertencimento é definida em um intervalo real $[0,1]$, em que 1 significa que x apresenta um pertencimento total ao conjunto, e 0 representa que x não pertence ao conjunto;

b) camada 2 (camada de combinação): nesta etapa há a combinação de todos os nós da camada anterior, com o objetivo de compor os relacionamentos lógicos entre as funções de pertinência ativada. Essa camada representa a parte antecedente das regras de decisão, realizando as operações dos tipos “AND” ou “OR”, por meio de operadores como mínimo ou produto algébrico. Conforme apresenta a Figura 11, as regras de inferência dos sistemas ANFIS assemelham-se com às regras de inferência de Takagi e Sugeno (1985) de primeira ordem. A Figura 9 (a) e (b) descreve a primeira e última regra de um sistema ANFIS, respectivamente (JANG, 1993).

Figura 9 - Regras de inferência de um sistema ANFIS

$$\text{IF } x = A_1 \text{ AND } y = B_1 \text{ THEN } f_1 = a_1x + b_1y + c_1 \quad (a)$$

$$\text{IF } x = A_m \text{ AND } y = B_k \text{ THEN } f_n = a_nx + b_ny + c_n \quad (b)$$

Fonte: Jang (1993) e Lima Jr e Carpinetti (2020).

A equação que representa a operação realizada pela camada de combinação é dada por:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots n \quad (2)$$

A saída dessa camada é composta a partir do relacionamento entre todos os termos linguísticos de entrada, resultando em um valor de grau de pertinência w_i definido entre $[0, 1]$, determinando desta forma o peso de cada regra de decisão ativada;

- c) camada 3 (camada de normalização): realiza a normalização dos pesos das regras ativadas. A equação 3 descreve o procedimento;

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}, \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots n \quad (3)$$

- d) camada 4 (camada de desfuzzificação): essa é uma camada de nós adaptativos que representam os consequentes das regras de inferência, responsáveis por gerar as saídas de cada regra ativada. Os consequentes das regras podem ser constituídos por uma função linear, conforme um sistema de Takagi-Sugeno de ordem 1, ou por uma constante, conforme o sistema Takagi-Sugeno de ordem 0. Sua função pode ser dada pela equação 4.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i, \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots n \quad (4)$$

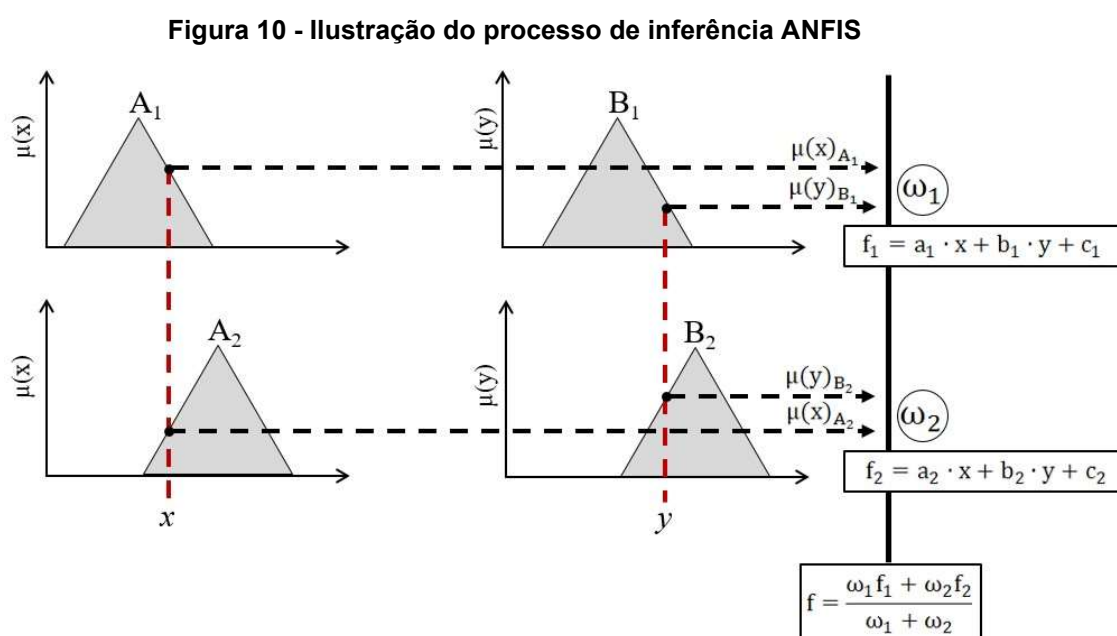
A saída desta camada é calculada pelo produto simples entre o consequente de cada regra (neste caso, um polinômio f_i de primeira ordem) e o peso da regra ativada na terceira camada;

- e) camada 5 (camada de soma): essa camada é composta por um nó fixo que realiza a soma ponderada das saídas da camada anterior, conforme representa a equação 5.

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5)$$

A Figura 10 ilustra os procedimentos de inferência ANFIS que são realizados em um conjunto de duas variáveis x e y , particionadas por funções de pertinência

triangulares. Primeiramente, na etapa de fuzzificação, o valor de entrada correspondente a x ativa os conjuntos A_1 e A_2 , enquanto o valor y ativa os conjuntos B_1 e B_2 , com diferentes graus de pertinência. Posteriormente, de acordo com a camada dois, é feita a combinação dos conjuntos *fuzzy*. Nessa etapa, os pesos ω_1 e ω_2 são calculados por meio dos operadores de produto mínimo ou algébrico de acordo com $\mu(x)_{A_1}$, $\mu(y)_{B_1}$, $\mu(x)_{A_2}$ e $\mu(y)_{B_2}$. Na sequência, as funções f_1 e f_2 são calculadas, ponderadas e agregadas, produzindo assim a saída final f (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2020).



Fonte: Lima Jr e Carpinetti (2020).

Nos sistemas de inferência ANFIS, o tipo da função de pertinência, o número de funções de pertinência das variáveis de entrada, o tipo de consequente e os operadores lógicos são parâmetros que afetam diretamente a precisão do modelo. Por isso, é necessário realizar diversos testes computacionais com o objetivo de escolher a melhor topologia de rede para cada modelo (LIMA JR.; CARPINETTI, 2020).

Para o conduzir o processo de aprendizagem de um ANFIS, é requerido um conjunto de amostras com dados de entrada e saída, que são divididas em dois grupos: 60 a 90% das amostras para o conjunto de treinamento e 10 a 40% para o conjunto de teste. O primeiro conjunto é utilizado no ajuste dos parâmetros

adaptativos e o segundo é utilizado para verificar a acurácia do modelo (ÖZKAN; INAL, 2014; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2020; BAMAKAN; FAREGH; RAVASAN, 2021).

Um dos métodos mais utilizados para o treinamento de modelos ANFIS é um algoritmo híbrido proposto por Jang (1993). Nele é utilizado o método dos mínimos quadrados para ajustar os parâmetros adaptativos das entradas, e o método do gradiente descendente, para ajustar os consequentes das regras, com o intuito da minimização do erro entre os valores produzidos pelo modelo e o valor de saída de cada amostra de treinamento. A quantidade de vezes que o conjunto de amostras de treinamento é processado pelo modelo é chamado de número de épocas, que serve como um parâmetro para finalização do processo. Com a finalização do treinamento, a validação do modelo pode ser realizada com base nas medidas do erro quadrático médio (*Mean Square Error*, MSE) ou erro médio absoluto (*Mean Absolute Error*, MAE). O MSE e o MAE podem ser calculados conforme as equações 6 e 7, respectivamente.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (6)$$

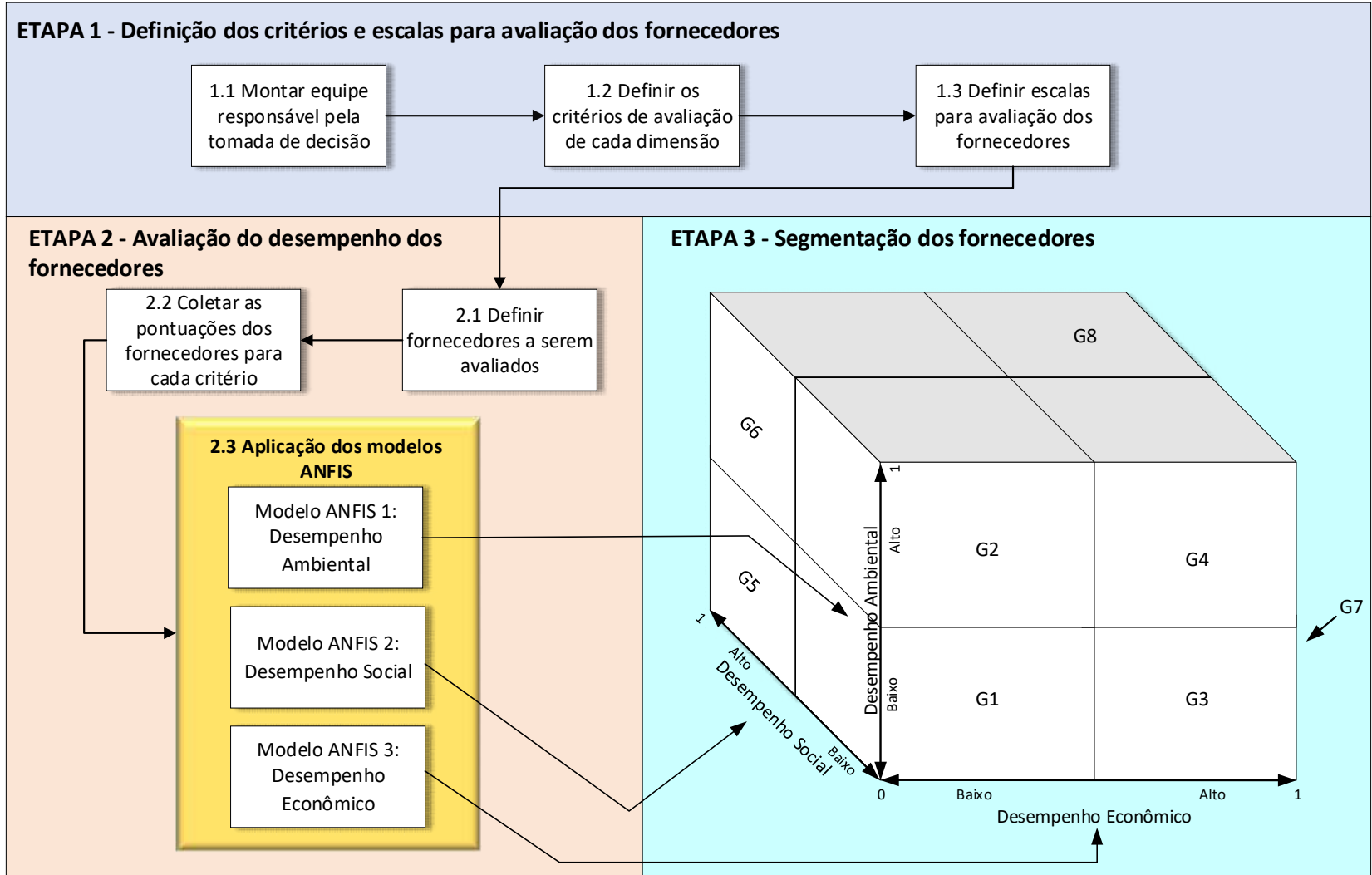
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (7)$$

Os motivos da utilização dos sistemas ANFIS neste estudo aplicado para a segmentação de fornecedores foram: (1) a capacidade adaptativa que propicia ao modelo o ajuste das relações de causa e efeito entre as variáveis, a partir de dados históricos de avaliação dos fornecedores; (2) não limita o número de fornecedores que podem ser considerados na avaliação; (3) é adequado para lidar com variáveis qualitativas e quantitativas e apoiar decisões sob incerteza, o que é possível por meio do uso de conjuntos *fuzzy* nas variáveis de entrada e de regras de decisão *fuzzy* e (4) fornece melhor interpretabilidade dos dados aos gestores, sendo possível identificar quais regras de decisão justificam determinados resultados. O próximo capítulo apresentará o modelo proposto para a segmentação de fornecedores sustentáveis utilizando o ANFIS, bem como suas etapas de aplicação.

4 MODELO PROPOSTO PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES

O modelo de segmentação de fornecedores proposto por este estudo está apresentado na Figura 11 e foi desenvolvido com base nos trabalhos de Jang (1993), Rezaei e Ortt (2012), Lima Jr. e Carpinetti (2016), Lima Jr. e Carpinetti (2020) e Lajimi (2021). Este modelo está dividido em três etapas. Na etapa 1, subdividida em três fases, ocorre a escolha dos critérios e escalas que serão utilizados para avaliar os fornecedores. Na etapa 2, acontece a avaliação dos fornecedores considerando múltiplos critérios e a aplicação do método ANFIS para segmentar os fornecedores. Na etapa 3, os fornecedores são segmentados em 8 possíveis grupos distribuídos em uma matriz quadrática tridimensional. Essa forma de distribuição da matriz permite relacionar cada eixo com cada dimensão do TBL.

Figura 11 - Modelo proposto para segmentação de fornecedores sustentáveis



Fonte: Proposto pelo autor (2022).

A etapa 1 tem início com a montagem da equipe responsável pela tomada de decisão (1.1). Essa equipe deve ser formada por profissionais do setor de compras e desenvolvimento de fornecedores e outros colaboradores ligados à cadeia de suprimentos. Posteriormente, essa equipe selecionará os critérios mais importantes a serem analisados para cada dimensão do TBL e que precisam estar alinhados com as metas da empresa (1.2). Alguns exemplos dos possíveis critérios para cada dimensão estão apresentados no Quadro 1. Em seguida, a equipe responsável pela tomada de decisão deverá definir o tipo de escala que será utilizada para avaliar os fornecedores (1.3).

A etapa 2, denominada avaliação de desempenho dos fornecedores, tem início com a seleção dos fornecedores que serão avaliados pela empresa compradora, com base nos fornecedores já qualificados e contratados (2.1). A seguir, é feita a avaliação dos fornecedores em relação aos critérios de todas as dimensões da matriz de segmentação (2.2). As avaliações podem ser feitas com o uso de dados históricos da empresa compradora, obtidos por meio de indicadores de desempenho, sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*), BI (*Business Intelligence*), dentre outros. Na ausência de dados históricos ou quando esses forem insuficientes, é possível compor um comitê de tomadores de decisão das áreas relacionadas a cadeia de suprimentos, para coletar a opinião desses especialistas nos julgamentos dos fornecedores em relação a cada critério.

Após a obtenção dos dados de desempenho dos fornecedores, inicia-se a aplicação da metodologia ANFIS para cada uma das três dimensões (2.3). Utilizando os dados de desempenho dos fornecedores em cada critério como entrada, cada modelo ANFIS estimará uma medida de desempenho global para cada fornecedor em uma dimensão específica. Enquanto o modelo ANFIS 1 está incumbido de calcular os valores de desempenho global em relação à dimensão ambiental, os modelos ANFIS 2 e 3 focam nas dimensões social e econômica, respectivamente.

Na última etapa, com a aplicação do ANFIS finalizada, cada fornecedor é classificado em um dos oito grupos definidos na Figura 11. Essa classificação auxilia os compradores a definir ações apropriadas para o gerenciamento da base de suprimentos e para a melhoria do desempenho desses fornecedores. De acordo com Lajimi (2021) os grupos possuem as seguintes características:

- a) grupo 1 (G1) – nesse grupo estão classificados os fornecedores com os piores desempenhos nas avaliações. Eles, ao mesmo tempo, possuem baixo desempenho econômico, ambiental e social. Sugere-se que, caso haja possibilidade, os fornecedores desse grupo sejam substituídos;
- b) grupo 2 (G2 - ambiental) – nesse grupo os fornecedores possuem alto desempenho ambiental e baixo desempenho econômico e social. Os fornecedores desse segmento geralmente focam no uso eficiente dos recursos naturais, no controle e prevenção de poluição. Esses fornecedores possuem programas de gestão ambiental, priorizam ainda a utilização de recursos renováveis, eliminação de substâncias tóxicas e redução do consumo de energia;
- c) grupo 3 (G3 - econômico) – os fornecedores classificados nesse grupo possuem alto desempenho econômico e baixo desempenho social e ambiental. Eles operam suas cadeias orientadas no lucro e não demonstram preocupação ambiental e social. Esses fornecedores trabalham com foco para o aumento do *market share*, criação de novos mercados, novos produtos, aumento da qualidade, redução de custos por meio da eficiência e redução de matéria-prima;
- d) grupo 4 (G4 - econômico-ambiental) – os fornecedores classificados nesse grupo possuem alto desempenho econômico e ambiental, mas possuem baixo desempenho social. Eles atuam com a redução de custos por meio da eficiência do uso da energia e dos recursos naturais. Também investem parte dos seus lucros na criação de soluções ambientais criativas;
- e) grupo 5 (G5 - social) – nesse grupo, os fornecedores possuem alto desempenho social e baixo desempenho econômico e ambiental. Eles focam suas ações na promoção de justiça social. Esses fornecedores atuam com ênfase na diversidade da mão-de-obra, direitos humanos, redução das desigualdades. Atuam contra discriminação étnica, sexual, de gênero, religião e operam pensando na saúde e qualidade de vida dos colaboradores;
- f) grupo 6 (G6 - social-ambiental) – os fornecedores classificados nesse grupo possuem baixo desempenho econômico e alto desempenho social e ambiental. Esses fornecedores trabalham com ênfase em utilizar uma parte

justa dos recursos naturais nos níveis nacionais e internacionais. Realizam também programas sociais que beneficiam a comunidade;

- g) grupo 7 (G7 - social-econômico) – nesse grupo, os fornecedores possuem alto desempenho social e econômico e baixo desempenho ambiental. Esses fornecedores trabalham visando redução de custos, considerando as necessidades sociais da sociedade. Eles atuam com padrões éticos, garantindo negócios justos e assegurando os direitos humanos dos colaboradores;
- h) grupo 8 (G8 - sustentável) – os fornecedores classificados nesse grupo possuem alto desempenho social, econômico e social. Esses fornecedores trabalham com foco na melhoria dos produtos e da qualidade de vida das pessoas, priorizam atividades ambientais e trabalham com a maximização dos recursos naturais renováveis com o menor custo possível.

A separação dos fornecedores em grupos obtida em função da matriz de segmentação proposta, torna possível propor estratégias específicas, diferenciadas para cada grupo de fornecedores a fim de melhorar a eficiência e eficácia de seu gerenciamento, na busca de mover os fornecedores em direção ao grupo 8 (fornecedores sustentáveis). Para fornecedores classificados no grupo 1, caso não seja possível a sua substituição, é recomendada a aplicação de estratégias, tanto para o desenvolvimento econômico, como para o ambiental e social. Já para os fornecedores classificados no grupo 2, sugere-se a aplicação de estratégias de desenvolvimento econômico e social. Para o grupo 3, aconselha-se o uso de estratégias para o desenvolvimento das dimensões social e ambiental. Para o grupo 4, recomenda-se estratégias para o desenvolvimento da parte social dos fornecedores. Já para o grupo 5, sugere-se a aplicação de estratégias do campo econômico e ambiental. Para o grupo 6, estratégias econômicas e para o grupo 7 estratégias ambientais.

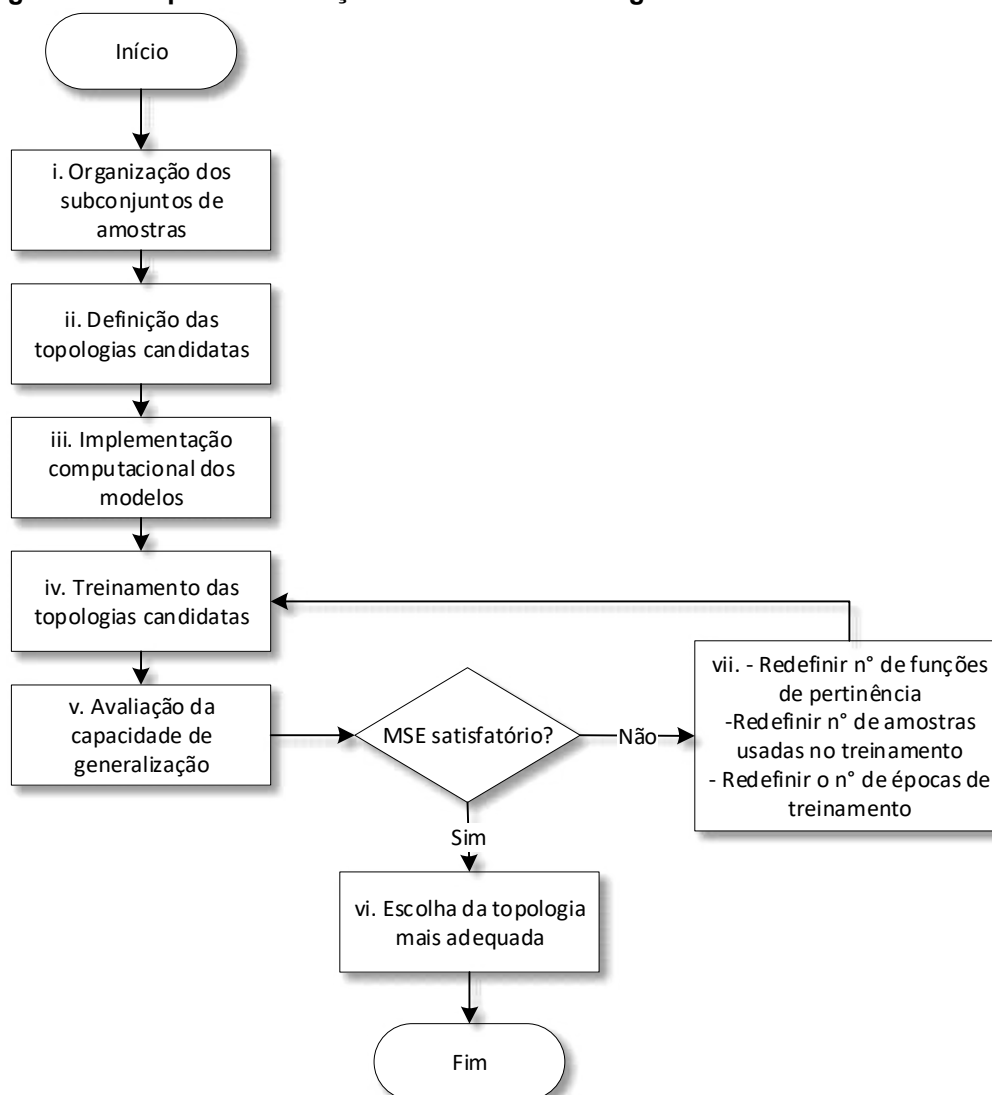
4.1 DESENVOLVIMENTO E TREINAMENTO DOS MODELOS ANFIS PARA SEGMENTAÇÃO DE FORNECEDORES

No processo de desenvolvimento dos sistemas ANFIS, os modelos devem ser treinados para ajustar os seus parâmetros internos. Uma das técnicas mais utilizadas

para selecionar a melhor topologia candidata para cada modelo ANFIS é a validação cruzada (*cross-validation*). Essa técnica avalia a habilidade de cada topologia quando aplicada em um conjunto de dados diferente do conjunto utilizado para ajustar os parâmetros internos (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016). Em outras palavras, o objetivo dessa técnica é verificar a possibilidade de generalização da topologia quando utilizada em amostras diferentes daquelas usadas no treinamento.

A Figura 12 apresenta as várias etapas de um procedimento de aplicação da técnica de validação cruzada para sistemas ANFIS. Na primeira etapa deve-se organizar o conjunto de amostras em dois subconjuntos: um para validação e outro para teste (i). O primeiro conjunto, cerca de 60 a 90% da amostra, é utilizado no ajuste dos parâmetros adaptativos, enquanto o segundo, aproximadamente 10 a 40% do conjunto, é utilizado para verificar a acurácia do modelo (ÖZKAN; INAL, 2014; BAMAKAN; FAREGH; RAVASAN, 2021).

Figura 12 - Etapas da validação cruzada na modelagem dos sistemas ANFIS



Fonte: Adaptado de Lima Jr. e Carpinetti (2020) e Silva, Spatti e Flauzinho (2016, p.150).

Na sequência, são definidas as topologias candidatas a serem treinadas e testadas pelo sistema (ii). As topologias candidatas devem ser definidas de modo a variar os seus parâmetros internos, como o tipo da função de pertinência das variáveis de entrada, o número de funções de pertinência, o tipo de consequente e os operadores lógicos. Os valores de cada parâmetro devem ser definidos com base na literatura ou por meio de testes computacionais empíricos (LIMA JR; CARPINETTI, 2020).

Após definir as topologias candidatas, as próximas etapas incluem a implementação computacional dos modelos (iii) e o treinamento das topologias candidatas (iv). Para a implementação computacional, as amostras das variáveis de entrada (desempenho dos fornecedores em cada critério) e saída (desempenho global

em cada dimensão do TBL) são dispostas conforme os padrões do *software* usado para o treinamento. Para este estudo, foi definido como *software* de treinamento o *MATLAB MathWorks®*. A quantidade de vezes que o conjunto de dados de treinamento é processado pelo modelo é chamado de número de épocas e ele serve como um parâmetro para finalização do processo de aprendizagem do modelo. Segundo os resultados obtidos por Lima Jr. e Carpinetti (2020), o número de épocas definidas para o treinamento de modelos ANFIS pode ser definido em 30, pois após essa quantidade o erro já estará estabilizado.

Na próxima etapa ocorre a avaliação da capacidade de generalização de cada topologia candidata por meio do MSE (v). O MSE é calculado conforme a equação (6), a partir da comparação entre o valor estimado pelo modelo computacional e o valor de saída desejado para cada amostra do subconjunto de validação. O MSE máximo para aceitação foi definido em 5×10^{-3} , baseado no estudo de Fan *et al.* (2013). Caso uma, ou mais topologias atinjam um nível de MSE aceitável pré-definido, deve-se escolher a topologia com o menor MSE (vi). Caso contrário, é sugerido testar diferentes números de pertinência e/ou aumentar o número de amostra e voltar para a etapa de treinamento das topologias (vii).

5 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

5.1 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DOS FORNECEDORES

Para realizar o treinamento e a validação das diversas topologias candidatas, é necessária uma quantidade superior a uma centena de amostras de valores de desempenho dos fornecedores. Diante da dificuldade de se encontrar empresas que venham realizando o monitoramento dos fornecedores em critérios econômicos, ambientais e sociais, com uma janela de tempo suficiente para propiciar tal quantidade de amostras necessárias, optou-se por realizar a aplicação do modelo de forma simulada. Ainda que o modelo possa ser alimentado com julgamentos de especialistas, a pandemia do COVID-19 dificultou o acesso às empresas.

Para avaliar o desempenho dos fornecedores foram selecionados 12 critérios frequentemente utilizados na literatura para as três dimensões do TBL, de acordo com Rashidi *et al.* (2020). Convém ressaltar que esses critérios foram escolhidos apenas para essa aplicação, sendo que aplicações futuras poderão utilizar outros critérios, que estejam alinhados à realidade particular de cada empresa. Para a dimensão ambiental foram selecionados os critérios: controle de poluição (C1), gestão do sistema ambiental (C2), consumo de recursos (C3) e produção de poluição (C4). Para a dimensão social, os critérios selecionados foram: práticas de RH (recursos humanos) (C5), saúde e segurança (C6) e influência na comunidade local (C7). Por último, para a dimensão econômica, foram selecionados os critérios custo (C8), qualidade (C9), tempo (C10), flexibilidade (C11) e tecnologia (C12). Definiu-se para este estudo que todos os critérios possuíssem o mesmo peso dentro de cada dimensão.

Os critérios selecionados para a aplicação da simulação são descritos a seguir de acordo com Lajimi (2020) e Rezaei (2018):

- a) controle de poluição (C1): considera tecnologias utilizadas para o tratamento e controle de resíduos no final do processo produtivo e ações de remediação aplicadas após a identificação de poluição;
- b) gestão do sistema ambiental (C2): estabelecimento de compromisso e política ambiental, identificação dos aspectos ambientais, planejamento de

- objetivos ambientais, atribuição de responsabilidade ambiental, verificação e avaliação de atividades ambientais;
- c) consumo de recursos (C3): consumo de água e matéria-prima;
 - d) produção de poluição (C4): produção de agentes poluentes, tóxicos e resíduos;
 - e) práticas de RH (C5): práticas disciplinares e de segurança, contratos de trabalho, igualdade nas fontes de trabalho, diversidade, discriminação, trabalho infantil, oportunidades de trabalho e desenvolvimento de carreira;
 - f) saúde e segurança (C6): incidentes de saúde e segurança, práticas de saúde e segurança e condições de trabalho;
 - g) influência na comunidade local (C7): crescimento de bem-estar econômico, apoio em projetos comunitários, saúde, educação, habitação, infraestrutura de serviços e mobilidade e apoio à instituições educacionais;
 - h) custo (C8): preço inicial baixo, atividades de redução de custo e conformidade com o comportamento de preços;
 - i) qualidade (C9): qualidade e conformidade, consistência de entrega e filosofia de qualidade;
 - j) tempo (C10): velocidade de entrega, tempo para desenvolvimento de novos produtos e tempo de formação da parceria;
 - k) flexibilidade (C11): possibilidade de mudanças de volumes dos produtos e flexibilidade para resolução de conflitos;
 - l) tecnologia (C12): capacidade técnica, instalações fabris e compatibilidade tecnológica.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS ANFIS

5.2.1 Organização dos subconjuntos das amostras

Para este estudo, foram geradas amostras contendo a avaliação de 200 fornecedores. As avaliações dos fornecedores nos critérios escolhidos (variáveis de entrada) foram geradas de forma aleatória, utilizando o *software Microsoft Excel*. Os Quadros 3, 4 e 5 detalham os universos de discurso (ou domínio de definição) utilizados para a avaliação dos fornecedores. Para os critérios C1, C3, C4 e C9 as

avaliações variaram entre 0 e 100, sendo dadas em percentual, já para os critérios C2, C5, C6, C7, C8, C10, C11 e C12 as notas variaram entre 0 e 10, podendo ser notas resultantes de auditorias ou atribuídas por especialistas.

Quadro 3 - Escalas utilizadas para avaliação dos fornecedores para o ANFIS 1

Critério	Descrição	Universo	Unidade
C1	Controle de poluição durante e após o processo produtivo (RAO, 2014)	[0,100]	Percentual
C2	Avaliação do sistema de gestão ambiental (WANG 2013).	[0,10]	Adimensional
C3	Eficiência no uso dos recursos - proporção de matéria-prima (entrada) em relação produção total do produto (saída) (RAO, 2014)	[0,100]	Percentual
C4	Produção de resíduos em relação a quantidade de material produzido (RAO, 2014)	[0,100]	Percentual

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Quadro 4 - Escalas utilizadas para avaliação dos fornecedores para o ANFIS 2

Critério	Descrição	Universo	Unidade
C5	Avaliação das rotinas de RH (AMINDOUST <i>et al.</i> , 2012)	[0,10]	Adimensional
C6	Avaliação do sistema de saúde e segurança (BÜYÜKOZKAN; KARABULUT, 2017).	[0,10]	Adimensional
C7	Avaliação da influência do fornecedor na comunidade local (BAI; SARKIS,2010).	[0,10]	Adimensional

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Quadro 5 - Escalas utilizadas para avaliação dos fornecedores para o ANFIS 3

Critério	Descrição	Universo	Unidade
C8	Avaliação do custo oferecido pelo fornecedor (LIN; TSENG, 2016).	[0,10]	Adimensional
C9	Qualidade - proporção de entregas conformes em relação às entregas totais	[0,100]	Percentual

	do fornecedor (DAI; BLACKHURST, 2012).		
C10	Tempo – avaliação dos prazos de entrega (GLOCK, 2012).	[0,10]	Adimensional
C11	Flexibilidade – avaliação da capacidade de adaptação do fornecedor (LIN; TSENG, 2016).	[0,10]	Adimensional
C12	Avaliação da capacidade tecnológica (AMINDOUST <i>et al.</i> , 2012).	[0,10]	Adimensional

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

As variáveis de saída (desempenho global do fornecedor para cada dimensão) foram calculadas utilizando a técnica TOPSIS. A Tabela 1 exemplifica as saídas calculadas pelo TOPSIS por meio das entradas (avaliações de alguns fornecedores para dimensão ambiental) geradas aleatoriamente para o modelo ANFIS 1.

Tabela 1 - Exemplo do cálculo das saídas das avaliações dos fornecedores por meio do TOPSIS

Fornecedores	Desempenho dos fornecedores				Saída TOPSIS
	C1	C2	C3	C4	
F1	100	6	48	62	0,5845
F2	93	9	8	51	0,5453
F3	69	2	69	62	0,5024
F4	90	9	59	70	0,6215
F5	76	5	11	94	0,3797
...
F200	68	6	35	59	0,4987

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Para o processo de aprendizagem supervisionada de cada um dos modelos ANFIS, as amostras foram separadas em dois subconjuntos. O primeiro subconjunto, correspondendo a 70% das amostras, é utilizado na fase de treinamento dos modelos ANFIS e o segundo subconjunto, com 30% das amostras, é reservado para a etapa de validação dos sistemas ANFIS. A Tabela 2 resume a quantidade de amostras separadas para cada subconjunto.

Tabela 2 - Quantidade de amostras utilizadas nos modelos ANFIS

Modelo ANFIS	Conjunto total	Subconjunto de treinamento	Subconjunto de validação
1 (ambiental)	200	140	60
2 (social)	200	140	60
3 (econômico)	200	140	60

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

5.2.2 Definição das topologias candidatas aos modelos ANFIS

Na modelagem dos sistemas de ANFIS é necessário encontrar as topologias mais adequadas dentre um conjunto de topologias candidatas. Essas topologias se distinguem entre si por apresentarem variações em diferentes parâmetros. O Quadro 6 apresenta os parâmetros que serão modificados e os valores que irão assumir durante o processo de validação cruzada.

Quadro 6 - Parâmetros a serem testados nas topologias candidatas

Parâmetros	Função	Valores testados
Conjuntos <i>fuzzy</i> utilizados nas variáveis de entrada	Determina a representação quantitativa e o comportamento das variáveis de entrada	Funções triangular, trapezoidal e gaussiana (JANG, 1993; MAVI; MAVI; GOH, 2017; BAMAKAN; FAREGH; ZARERAVASAN, 2021)
Tipo de consequente	Responsável por produzir o tipo de saída de cada regra ativada	Função linear e valor constante (JANG 1993; KHOSHNEVISAN; RAFIEE; MOUSAZADEH, 2014)
Número de partições de entrada	Determina a granularidade das variáveis <i>fuzzy</i> de entrada	3, 4 e 5 partições (BILGEHAN, 2011; AKKOÇ, 2012; MAVI; MAVI; GOH, 2017)
Operadores lógicos	Responsável pelo tipo de operação de agregação entre os graus de pertinência das partições ativadas na etapa de fuzzificação	Operadores mínimo e produto algébrico (JANG 1993; GÜNERI; ERTAY; YÜCEL, 2011)

Fonte: Adaptado de Lima Jr. e Carpinetti (2020).

De acordo com o Quadro 6, no particionamento das variáveis de entrada, serão testadas as funções triangulares, trapezoidais e gaussianas. Para o tipo de

consequente das regras de inferência, serão testadas funções lineares e valores constantes. Quanto ao número de partições de entrada, serão testadas 3, 4 e 5 partições. Por último, sobre os operadores lógicos, serão testados os operadores mínimo e produto algébrico.

Os Quadros 7 a 9 apresentam as configurações topológicas que foram geradas para serem testadas nos 3 modelos ANFIS. Serão testadas 108 topologias (36 para cada modelo), variando o tipo de função de pertinência das variáveis de entrada utilizadas, o tipo de consequente, o número de partições das funções de pertinência e o operador lógico.

Quadro 7 - Alternativas avaliadas para definição da configuração topológica do ANFIS 1

Topologia candidata	Tipo de função de pertinência	Tipo de consequente	Número de partições	Operador lógico
1	Triangular	Constante	3	Mínimo
2	Triangular	Constante	3	Produto
3	Triangular	Constante	4	Mínimo
4	Triangular	Constante	4	Produto
5	Triangular	Constante	5	Mínimo
6	Triangular	Constante	5	Produto
7	Triangular	Linear	3	Mínimo
8	Triangular	Linear	3	Produto
9	Triangular	Linear	4	Mínimo
10	Triangular	Linear	4	Produto
11	Triangular	Linear	5	Mínimo
12	Triangular	Linear	5	Produto
13	Trapezoidal	Constante	3	Mínimo
14	Trapezoidal	Constante	3	Produto
15	Trapezoidal	Constante	4	Mínimo
16	Trapezoidal	Constante	4	Produto
17	Trapezoidal	Constante	5	Mínimo
18	Trapezoidal	Constante	5	Produto
19	Trapezoidal	Linear	3	Mínimo
20	Trapezoidal	Linear	3	Produto
21	Trapezoidal	Linear	4	Mínimo
22	Trapezoidal	Linear	4	Produto
23	Trapezoidal	Linear	5	Mínimo
24	Trapezoidal	Linear	5	Produto
25	Gaussiana	Constante	3	Mínimo
26	Gaussiana	Constante	3	Produto
27	Gaussiana	Constante	4	Mínimo
28	Gaussiana	Constante	4	Produto
29	Gaussiana	Constante	5	Mínimo
30	Gaussiana	Constante	5	Produto
31	Gaussiana	Linear	3	Mínimo
32	Gaussiana	Linear	3	Produto
33	Gaussiana	Linear	4	Mínimo

34	Gaussiana	Linear	4	Produto
35	Gaussiana	Linear	5	Mínimo
36	Gaussiana	Linear	5	Produto

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Quadro 8 - Alternativas avaliadas para definição da configuração topológica do ANFIS 2

Topologia candidata	Tipo de função de pertinência	Tipo de consequente	Número de partições	Operador lógico
37	Triangular	Constante	3	Mínimo
38	Triangular	Constante	3	Produto
39	Triangular	Constante	4	Mínimo
40	Triangular	Constante	4	Produto
41	Triangular	Constante	5	Mínimo
42	Triangular	Constante	5	Produto
43	Triangular	Linear	3	Mínimo
44	Triangular	Linear	3	Produto
45	Triangular	Linear	4	Mínimo
46	Triangular	Linear	4	Produto
47	Triangular	Linear	5	Mínimo
48	Triangular	Linear	5	Produto
49	Trapezoidal	Constante	3	Mínimo
50	Trapezoidal	Constante	3	Produto
51	Trapezoidal	Constante	4	Mínimo
52	Trapezoidal	Constante	4	Produto
53	Trapezoidal	Constante	5	Mínimo
54	Trapezoidal	Constante	5	Produto
55	Trapezoidal	Linear	3	Mínimo
56	Trapezoidal	Linear	3	Produto
57	Trapezoidal	Linear	4	Mínimo
58	Trapezoidal	Linear	4	Produto
59	Trapezoidal	Linear	5	Mínimo
60	Trapezoidal	Linear	5	Produto
61	Gaussiana	Constante	3	Mínimo
62	Gaussiana	Constante	3	Produto
63	Gaussiana	Constante	4	Mínimo
64	Gaussiana	Constante	4	Produto
65	Gaussiana	Constante	5	Mínimo
66	Gaussiana	Constante	5	Produto
67	Gaussiana	Linear	3	Mínimo
68	Gaussiana	Linear	3	Produto
69	Gaussiana	Linear	4	Mínimo
70	Gaussiana	Linear	4	Produto
71	Gaussiana	Linear	5	Mínimo
72	Gaussiana	Linear	5	Produto

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Quadro 9 - Alternativas avaliadas para definição da configuração topológica do ANFIS 3

Topologia candidata	Tipo de função de pertinência	Tipo de consequente	Número de partições	Operador lógico
---------------------	-------------------------------	---------------------	---------------------	-----------------

73	Triangular	Constante	3	Mínimo
74	Triangular	Constante	3	Producto
75	Triangular	Constante	4	Mínimo
76	Triangular	Constante	4	Producto
77	Triangular	Constante	5	Mínimo
78	Triangular	Constante	5	Producto
79	Triangular	Linear	3	Mínimo
80	Triangular	Linear	3	Producto
81	Triangular	Linear	4	Mínimo
82	Triangular	Linear	4	Producto
83	Triangular	Linear	5	Mínimo
84	Triangular	Linear	5	Producto
85	Trapezoidal	Constante	3	Mínimo
86	Trapezoidal	Constante	3	Producto
87	Trapezoidal	Constante	4	Mínimo
88	Trapezoidal	Constante	4	Producto
89	Trapezoidal	Constante	5	Mínimo
90	Trapezoidal	Constante	5	Producto
91	Trapezoidal	Linear	3	Mínimo
92	Trapezoidal	Linear	3	Producto
93	Trapezoidal	Linear	4	Mínimo
94	Trapezoidal	Linear	4	Producto
95	Trapezoidal	Linear	5	Mínimo
96	Trapezoidal	Linear	5	Producto
97	Gaussiana	Constante	3	Mínimo
98	Gaussiana	Constante	3	Producto
99	Gaussiana	Constante	4	Mínimo
100	Gaussiana	Constante	4	Producto
101	Gaussiana	Constante	5	Mínimo
102	Gaussiana	Constante	5	Producto
103	Gaussiana	Linear	3	Mínimo
104	Gaussiana	Linear	3	Producto
105	Gaussiana	Linear	4	Mínimo
106	Gaussiana	Linear	4	Producto
107	Gaussiana	Linear	5	Mínimo
108	Gaussiana	Linear	5	Producto

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

5.2.3 Resultado do treinamento e da validação dos modelos ANFIS

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os resultados alcançados durante a implementação computacional das 108 topologias candidatas dos modelos ANFIS 1, 2 e 3. Durante o treinamento e validação das topologias candidatas, foram calculados os valores do erro quadrático médio (MSE) conforme a equação 6. No decorrer da implementação computacional, verificou-se que o MSE não havia sido estabilizado até a época 30. Por isso, optou-se por aumentar o número de épocas de treinamento gradativamente, de forma que esse valor fosse alterado para 500, conforme proposto

por Akkoç (2012). As topologias candidatas que obtiveram os melhores desempenhos, ou seja, que alcançaram os menores MSE entre os valores desejados e os valores alcançados na etapa de validação para cada modelo, estão destacadas em negrito.

De acordo com a Tabela 3, sobre os resultados do modelo ANFIS 1, a topologia que alcançou o menor MSE foi a de número 26, com erro na etapa de validação sendo $2,380 \times 10^{-04}$. Para o modelo ANFIS 2, conforme a Tabela 4, a melhor topologia foi a de número 64, alcançando o MSE $9,769 \times 10^{-06}$. A Tabela 5 mostra que para o modelo ANFIS 3 a melhor topologia foi a de número 103, com erro na etapa de validação, sendo $2,958 \times 10^{-03}$. A maioria das topologias que apresentaram um melhor desempenho foram as do modelo ANFIS 2. Isso se explica pela menor quantidade de variáveis de entrada utilizadas pelos modelos. Exemplificando, o modelo ANFIS 3 utiliza 5 variáveis de entrada e sua melhor topologia obteve um MSE na magnitude de 10^{-3} , já o modelo ANFIS 2, com apenas 3 variáveis de entrada, sua melhor topologia alcançou um erro na magnitude de 10^{-6} .

Tabela 3 - Resultados alcançados pelas topologias candidatas dos modelos ANFIS 1

Topologia candidata	Número de regras	MSE Treinamento	MSE Validação
1	81	$2,738 \times 10^{-04}$	$3,518 \times 10^{-03}$
2	81	$4,277 \times 10^{-06}$	$3,820 \times 10^{-04}$
3	256	$2,719 \times 10^{-11}$	$2,885 \times 10^{-03}$
4	256	$5,659 \times 10^{-12}$	$1,056 \times 10^{-02}$
5	625	$8,425 \times 10^{-12}$	$2,641 \times 10^{-02}$
6	625	$3,557 \times 10^{-12}$	$6,540 \times 10^{-02}$
7	81	$2,597 \times 10^{-15}$	$1,073 \times 10^{-02}$
8	81	$5,239 \times 10^{-15}$	$2,269 \times 10^{-03}$
9	256	$2,606 \times 10^{-15}$	$4,776 \times 10^{-03}$
10	256	$6,729 \times 10^{-15}$	$1,058 \times 10^{-02}$
11	625	$5,544 \times 10^{-15}$	$2,667 \times 10^{-02}$
12	625	$8,285 \times 10^{-15}$	$4,669 \times 10^{-02}$
13	81	$6,117 \times 10^{-04}$	$4,336 \times 10^{-02}$
14	81	$5,414 \times 10^{-04}$	$1,340 \times 10^{-01}$
15	256	$8,607 \times 10^{-06}$	$8,072 \times 10^{-02}$
16	256	$1,028 \times 10^{-09}$	$1,270 \times 10^{-01}$
17	625	$1,285 \times 10^{-11}$	$9,416 \times 10^{-02}$
18	625	$6,073 \times 10^{-12}$	$1,321 \times 10^{-01}$
19	81	$9,499 \times 10^{-15}$	$2,353 \times 10^{-02}$
20	81	$1,224 \times 10^{-14}$	$2,769 \times 10^{-02}$
21	256	$7,910 \times 10^{-14}$	$4,623 \times 10^{-02}$
22	256	$6,299 \times 10^{-14}$	$5,915 \times 10^{-02}$
23	625	$4,237 \times 10^{-14}$	$9,806 \times 10^{-02}$

24	625	$4,415 \times 10^{-14}$	$1,183 \times 10^{-01}$
25	81	$8,543 \times 10^{-05}$	$1,428 \times 10^{-03}$
26	81	$2,381 \times 10^{-05}$	$2,380 \times 10^{-04}$
27	256	$1,626 \times 10^{-11}$	$1,565 \times 10^{-03}$
28	256	$1,594 \times 10^{-11}$	$1,032 \times 10^{-02}$
29	625	$8,993 \times 10^{-12}$	$1,198 \times 10^{-02}$
30	625	$2,690 \times 10^{-12}$	$7,195 \times 10^{-02}$
31	81	$1,535 \times 10^{-15}$	$4,037 \times 10^{-03}$
32	81	$1,376 \times 10^{-14}$	$7,782 \times 10^{-03}$
33	256	$1,833 \times 10^{-15}$	$3,658 \times 10^{-03}$
34	256	$1,235 \times 10^{-14}$	$1,351 \times 10^{-02}$
35	625	$3,656 \times 10^{-15}$	$1,296 \times 10^{-02}$
36	625	$2,567 \times 10^{-14}$	$4,822 \times 10^{-02}$

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Tabela 4 - Resultados alcançados pelas topologias candidatas dos modelos ANFIS 2

Topologia candidata	Número de regras	MSE Treinamento	MSE Validação
37	27	$3,075 \times 10^{-04}$	$5,539 \times 10^{-04}$
38	27	$7,921 \times 10^{-06}$	$1,349 \times 10^{-05}$
39	64	$1,063 \times 10^{-04}$	$3,618 \times 10^{-04}$
40	64	$1,697 \times 10^{-06}$	$2,178 \times 10^{-05}$
41	125	$8,705 \times 10^{-06}$	$2,077 \times 10^{-02}$
42	125	$2,850 \times 10^{-10}$	$8,717 \times 10^{-03}$
43	27	$8,052 \times 10^{-07}$	$1,389 \times 10^{-04}$
44	27	$9,466 \times 10^{-08}$	$5,206 \times 10^{-05}$
45	64	$3,210 \times 10^{-14}$	$1,606 \times 10^{-04}$
46	64	$4,448 \times 10^{-15}$	$9,201 \times 10^{-05}$
47	125	$6,219 \times 10^{-16}$	$7,544 \times 10^{-03}$
48	125	$1,308 \times 10^{-15}$	$1,153 \times 10^{-02}$
49	27	$7,520 \times 10^{-05}$	$1,167 \times 10^{-04}$
50	27	$7,542 \times 10^{-05}$	$1,171 \times 10^{-04}$
51	64	$2,845 \times 10^{-04}$	$5,836 \times 10^{-02}$
52	64	$1,105 \times 10^{-04}$	$4,418 \times 10^{-04}$
53	125	$1,218 \times 10^{-04}$	$2,826 \times 10^{-01}$
54	125	$1,076 \times 10^{-04}$	$6,911 \times 10^{-02}$
55	27	$9,025 \times 10^{-07}$	$1,946 \times 10^{-03}$
56	27	$1,542 \times 10^{-07}$	$5,054 \times 10^{-04}$
57	64	$1,836 \times 10^{-13}$	$1,012 \times 10^{-03}$
58	64	$7,792 \times 10^{-14}$	$1,052 \times 10^{-03}$
59	125	$8,016 \times 10^{-08}$	$4,529 \times 10^{-02}$
60	125	$8,016 \times 10^{-08}$	$4,978 \times 10^{-02}$
61	27	$7,841 \times 10^{-05}$	$1,242 \times 10^{-04}$
62	27	$6,943 \times 10^{-06}$	$1,125 \times 10^{-05}$
63	64	$2,093 \times 10^{-05}$	$5,461 \times 10^{-05}$
64	64	$7,844 \times 10^{-07}$	$9,769 \times 10^{-06}$
65	125	$5,196 \times 10^{-07}$	$1,142 \times 10^{-01}$

66	125	$1,194 \times 10^{-09}$	$3,517 \times 10^{-03}$
67	27	$7,606 \times 10^{-07}$	$2,097 \times 10^{-04}$
68	27	$1,781 \times 10^{-08}$	$1,088 \times 10^{-04}$
69	64	$3,571 \times 10^{-14}$	$5,159 \times 10^{-05}$
70	64	$2,344 \times 10^{-14}$	$8,415 \times 10^{-05}$
71	125	$1,448 \times 10^{-15}$	$1,921 \times 10^{-03}$
72	125	$4,698 \times 10^{-15}$	$1,287 \times 10^{-02}$

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Tabela 5 - Resultados alcançados pelas topologias candidatas dos modelos ANFIS 3

Topologia candidata	Número de regras	MSE	
		Treinamento	MSE Validação
73	243	$1,385 \times 10^{-09}$	$9,198 \times 10^{-03}$
74	243	$1,065 \times 10^{-11}$	$8,355 \times 10^{-03}$
75	1024	$1,542 \times 10^{-11}$	$3,852 \times 10^{-02}$
76	1024	$2,761 \times 10^{-12}$	$1,358 \times 10^{-01}$
77	3125	$3,018 \times 10^{-11}$	$1,183 \times 10^{-01}$
78	3125	$3,212 \times 10^{-12}$	$2,199 \times 10^{-01}$
79	243	$6,159 \times 10^{-16}$	$1,215 \times 10^{-02}$
80	243	$5,302 \times 10^{-16}$	$1,175 \times 10^{-02}$
81	1024	$9,885 \times 10^{-16}$	$4,131 \times 10^{-02}$
82	1024	$6,336 \times 10^{-15}$	$6,981 \times 10^{-02}$
83	3125	$2,984 \times 10^{-15}$	$1,165 \times 10^{-01}$
84	3125	$2,704 \times 10^{-15}$	$1,551 \times 10^{-01}$
85	243	$2,777 \times 10^{-05}$	$8,711 \times 10^{-02}$
86	243	$1,101 \times 10^{-05}$	$6,174 \times 10^{-02}$
87	1024	$4,329 \times 10^{-12}$	$1,829 \times 10^{-01}$
88	1024	$1,545 \times 10^{-12}$	$2,093 \times 10^{-01}$
89	3125	$2,511 \times 10^{-07}$	$2,033 \times 10^{-01}$
90	3125	$2,510 \times 10^{-07}$	$2,398 \times 10^{-01}$
91	243	$9,025 \times 10^{-15}$	$5,713 \times 10^{-02}$
92	243	$8,604 \times 10^{-15}$	$6,371 \times 10^{-02}$
93	1024	$1,327 \times 10^{-14}$	$1,783 \times 10^{-01}$
94	1024	$2,253 \times 10^{-14}$	$1,936 \times 10^{-01}$
95	3125	$1,427 \times 10^{-14}$	$2,023 \times 10^{-01}$
96	3125	$8,294 \times 10^{-15}$	$2,257 \times 10^{-01}$
97	243	$5,132 \times 10^{-10}$	$4,202 \times 10^{-03}$
98	243	$1,453 \times 10^{-11}$	$1,680 \times 10^{-02}$
99	1024	$2,169 \times 10^{-11}$	$1,340 \times 10^{-02}$
100	1024	$1,657 \times 10^{-12}$	$1,482 \times 10^{-01}$
101	3125	$3,195 \times 10^{-11}$	$6,921 \times 10^{-02}$
102	3125	$1,295 \times 10^{-12}$	$2,443 \times 10^{-01}$
103	243	$2,978 \times 10^{-16}$	$2,958 \times 10^{-03}$
104	243	$1,556 \times 10^{-14}$	$1,383 \times 10^{-02}$
105	1024	$9,274 \times 10^{-16}$	$1,391 \times 10^{-02}$
106	1024	$1,584 \times 10^{-14}$	$6,808 \times 10^{-02}$

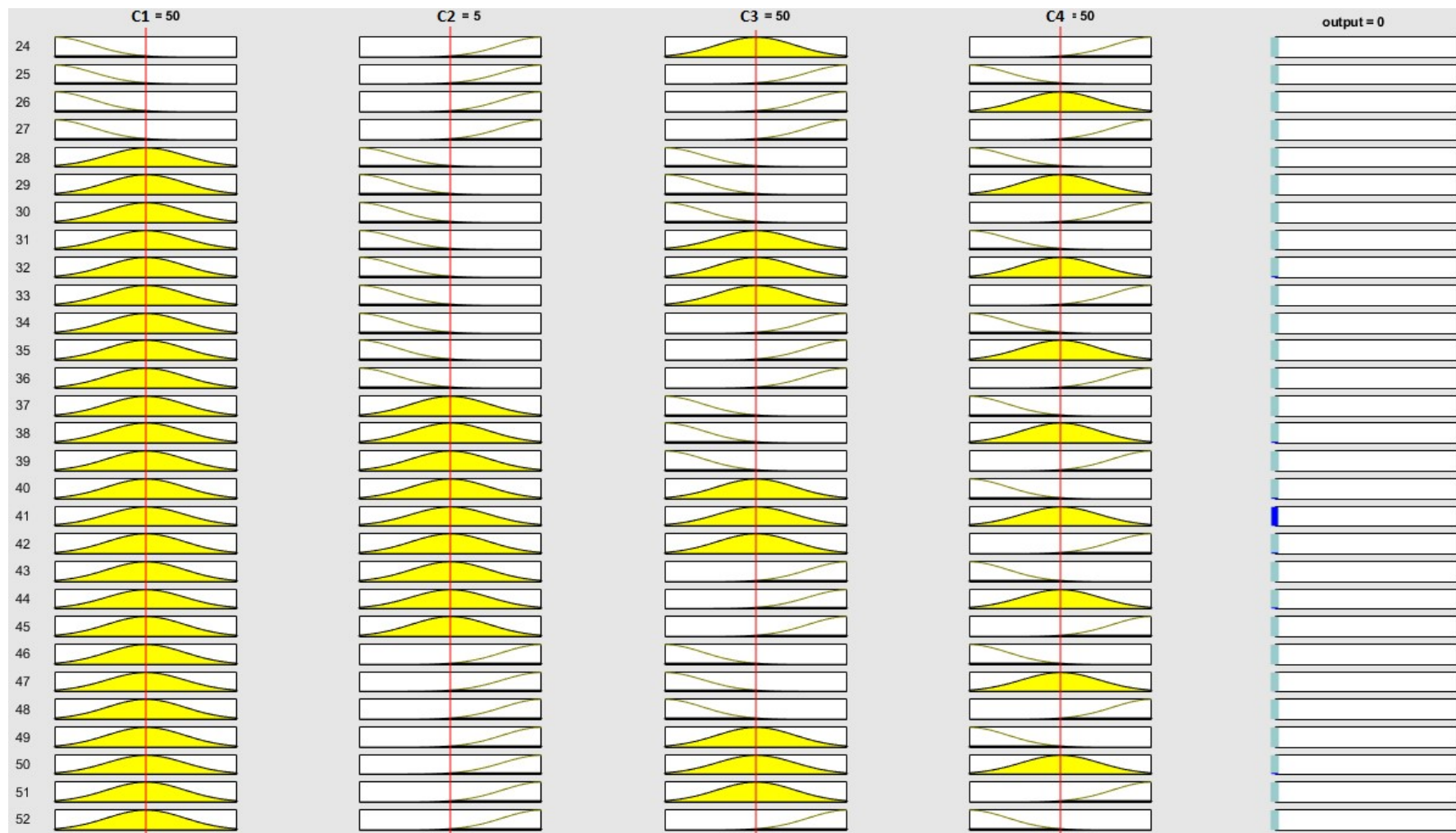
107	3125	$2,448 \times 10^{-15}$	$4,646 \times 10^{-02}$
108	3125	$1,723 \times 10^{-14}$	$1,536 \times 10^{-01}$

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Durante o processo de treinamento também foi calculada a quantidade de regras de decisão gerada por cada topologia candidata. A quantidade de regras de inferência influencia diretamente na complexidade e no tempo de treinamento das topologias candidatas (GOKTEPE; AGAR; LAV, 2004). A quantidade de regras de decisão é calculada pelo número de partições de entrada elevando-a pela quantidade de variáveis de entrada. Para o modelo ANFIS 1, foram selecionadas 4 variáveis de entrada e foram testados os números de partições 3, 4 e 5, gerando assim 81, 256 e 625 regras de decisão, respectivamente. Para o modelo ANFIS 2, com 3 variáveis de entrada e testando as partições 3, 4 e 5, gerou 27, 64 e 125 regras de decisão, respectivamente. Por fim, o modelo ANFIS 3, com 5 variáveis de entrada, testando as mesmas quantidades de partições, foram produzidas 343, 1024 e 3125 regras de decisão, respectivamente.

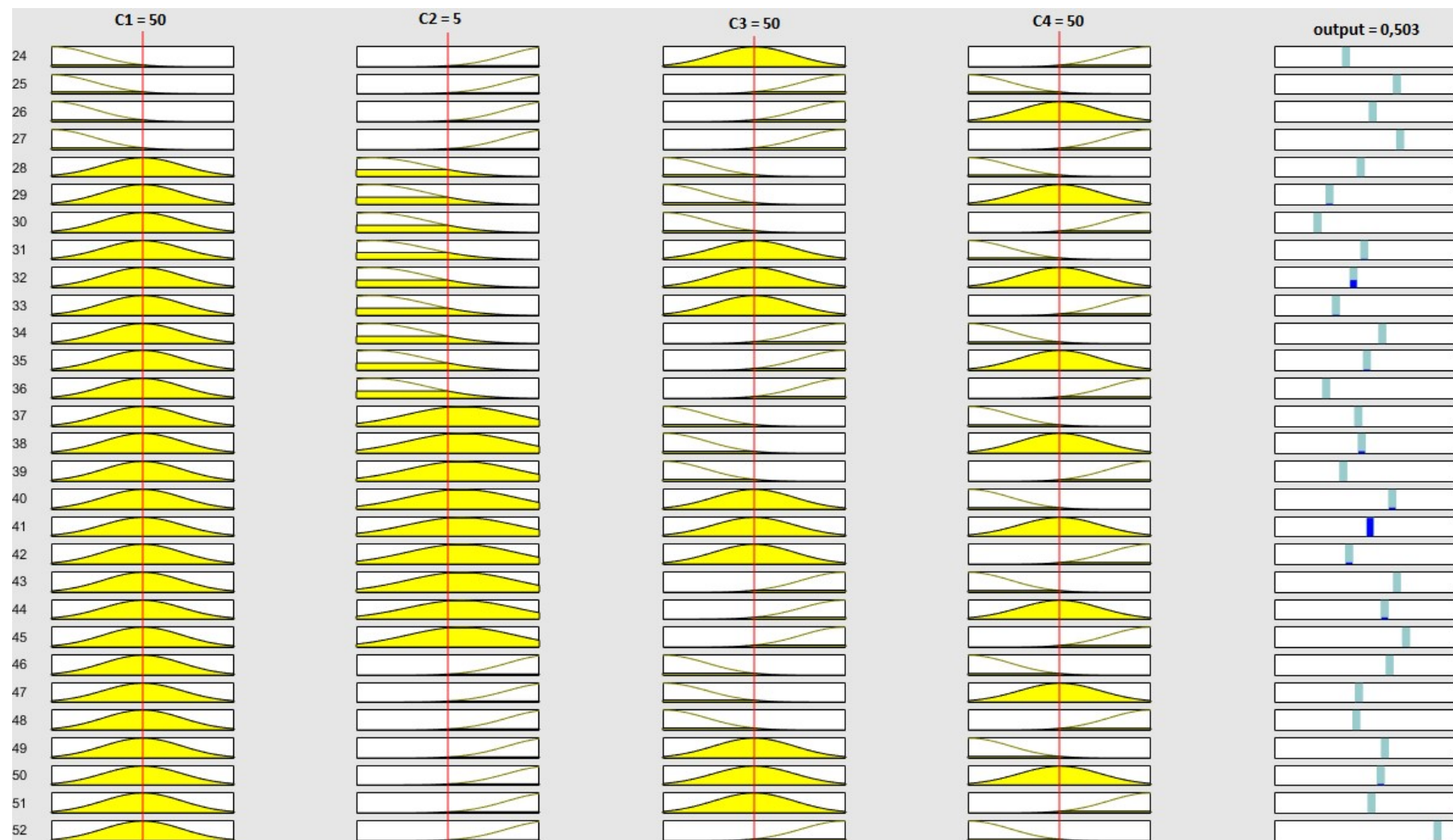
Com o intuito de ilustrar o efeito do treinamento e processo de inferência dos modelos ANFIS, as Figuras 13 e 14 apresentam parte das 81 regras de decisão da topologia candidata 26, do modelo ANFIS 1 antes e depois do treinamento. Nelas, as quatro primeiras colunas representam as variáveis de entrada e a última a variável de saída. As linhas verticais em vermelho representam os valores de entrada e as partes em amarelo as regras ativadas. A contribuição de cada regra ativada é representada pela cor azul marinho na última coluna. Para exemplificar, foram adicionados como entrada os valores $C1=50$, $C2=5$, $C3=50$ e $C4=50$. Conforme a Figura 13, antes do treinamento foram ativadas 8 regras, sendo elas as de número 14, 32, 38, 41, 42, 44, 50 e 68, gerando o valor de saída 0 (zero). Após o treinamento de 500 épocas, com o ajuste das regras de decisão, foram ativadas 14 regras, sendo elas as de número 5, 14, 29, 31, 32, 33, 38, 40, 41, 4, 44, 50, 59 e 68, alcançando o valor de saída de 0,503.

Figura 13 - Regras de decisão da topologia candidata 26 antes do treinamento



Fonte: Proposto pelo autor (2022).

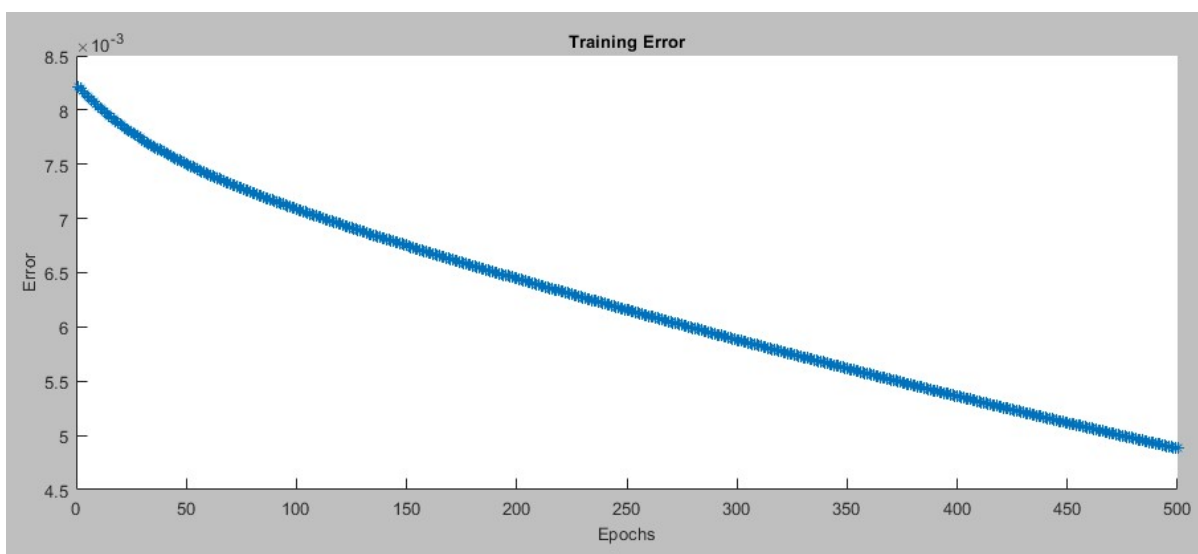
Figura 14 - Regras de decisão da topologia candidata 26 após o treinamento



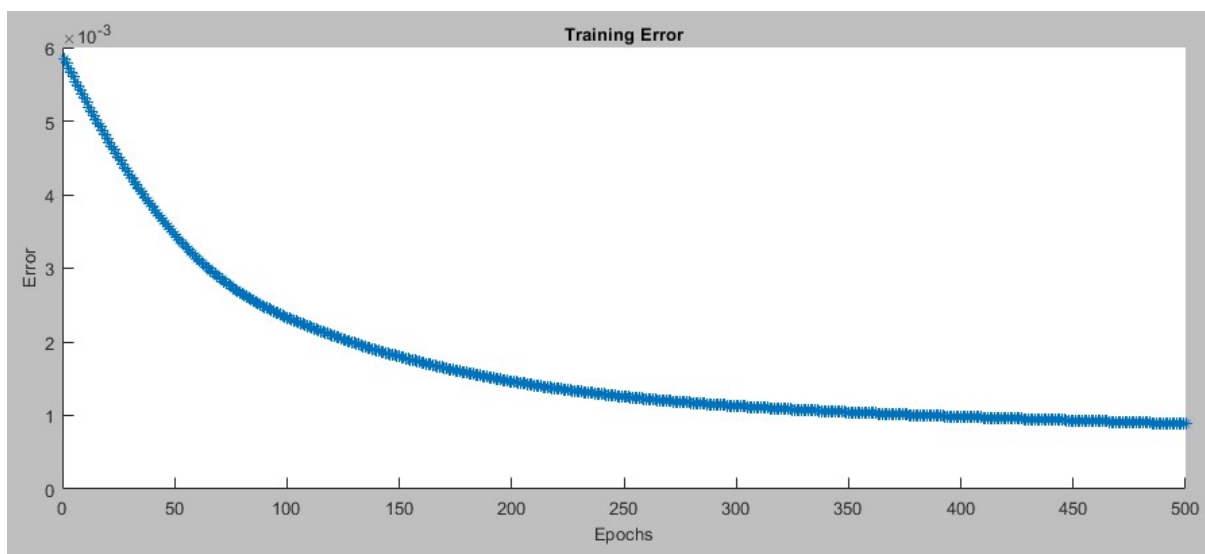
Fonte: Proposto pelo autor (2022).

As Figuras 15, 16 e 17 apresentam o processo de minimização do erro ao longo do treinamento das topologias candidatas 26, 64 e 103, respectivamente. O gráfico gerado apresenta o erro calculado (eixo y) em função da quantidade de épocas de treinamento (eixo x). O software *MATLAB – MathWorks®* gera apenas o gráfico de minimização a partir do RMSE (*Root Mean Square Error*), por isso essas figuras apresentam o RMSE e não o MSE. Conforme as Figuras 15 e 16, o processo de minimização do erro das topologias candidatas 26 e 64 ocorreu ao longo das 500 épocas de treinamento de forma gradativa. Já a Figura 17 mostra a minimização do erro da topologia candidata 103, no qual a estabilização ocorreu logo no início do processo, na segunda época de treinamento.

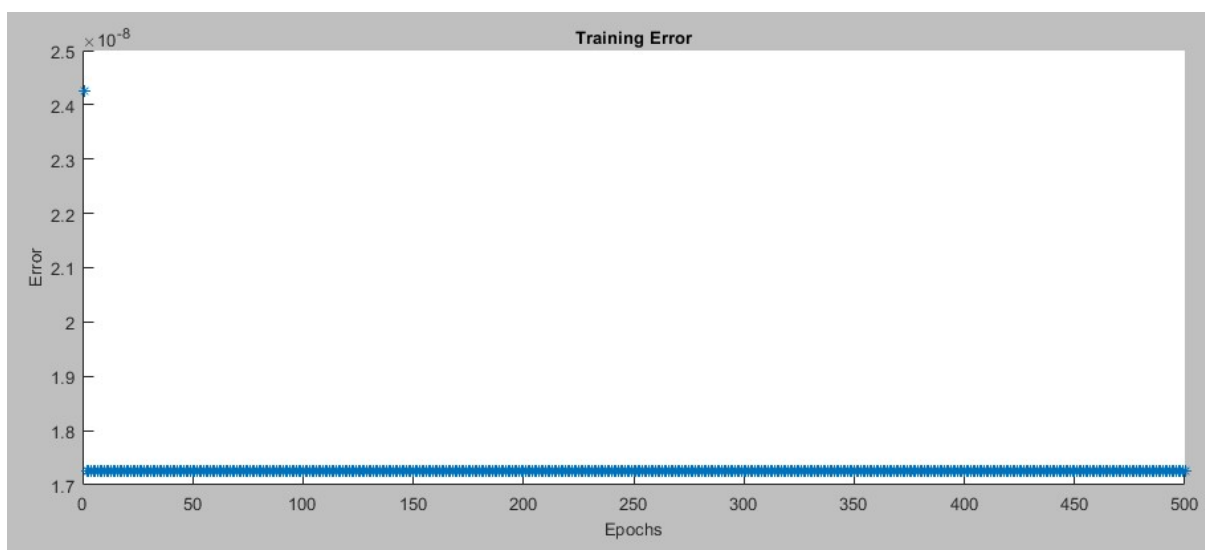
Figura 15 - Processo de minimização do RMSE da topologia candidata 26



Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Figura 16 - Processo de minimização do RMSE da topologia candidata 64

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

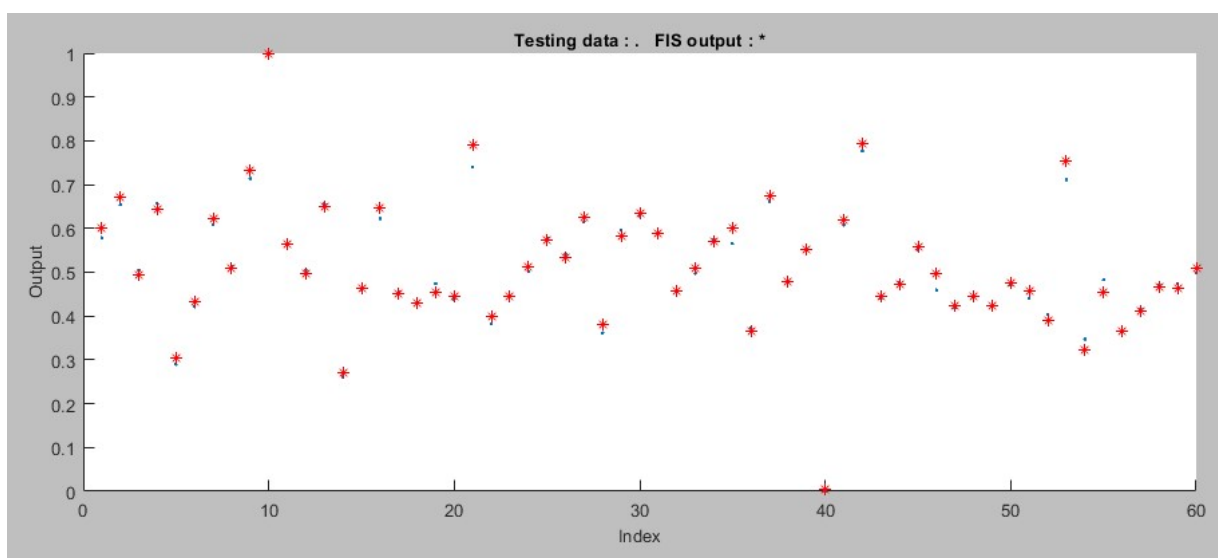
Figura 17 - Processo de minimização do RMSE da topologia candidata 103

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

A capacidade de generalização das topologias 26, 64 e 103 podem ser representadas a partir das Figuras 18, 19 e 20. Elas apresentam uma comparação entre os valores desejados (vermelho) e os valores estimados (azul) do subconjunto de validação (60 amostras). Por conta da alta precisão do modelo, parte dos dados estão sobrepostos no gráfico, não sendo possível visualizar todos os desvios. As melhores topologias dos três modelos ANFIS alcançaram MSE menores do que o valor limite definido na seção 4.1 (5×10^{-3}), concluindo assim que os três modelos

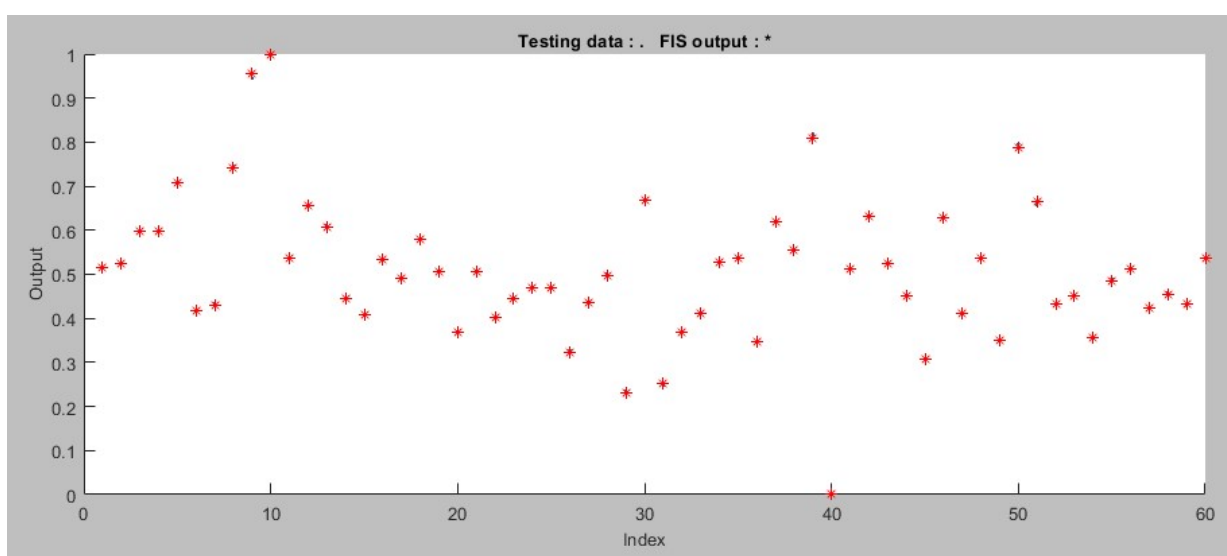
ANFIS possuem capacidade de generalização dos resultados adequados para a segmentação dos fornecedores. Em relação a outros estudos com aplicação de modelos ANFIS voltadas para SCM, os resultados encontrados por esta pesquisa encontram-se na média, por exemplo, Ozkan e Inal (2014), alcançaram MSE maiores, de magnitude de 10^{-2} , por outro lado, Lima Jr e Carpinetti alcançaram erros menores, com o MSE chegando à magnitude de 10^{-16} .

Figura 18 - Comparação entre os valores desejados e os valores calculados pela topologia 26



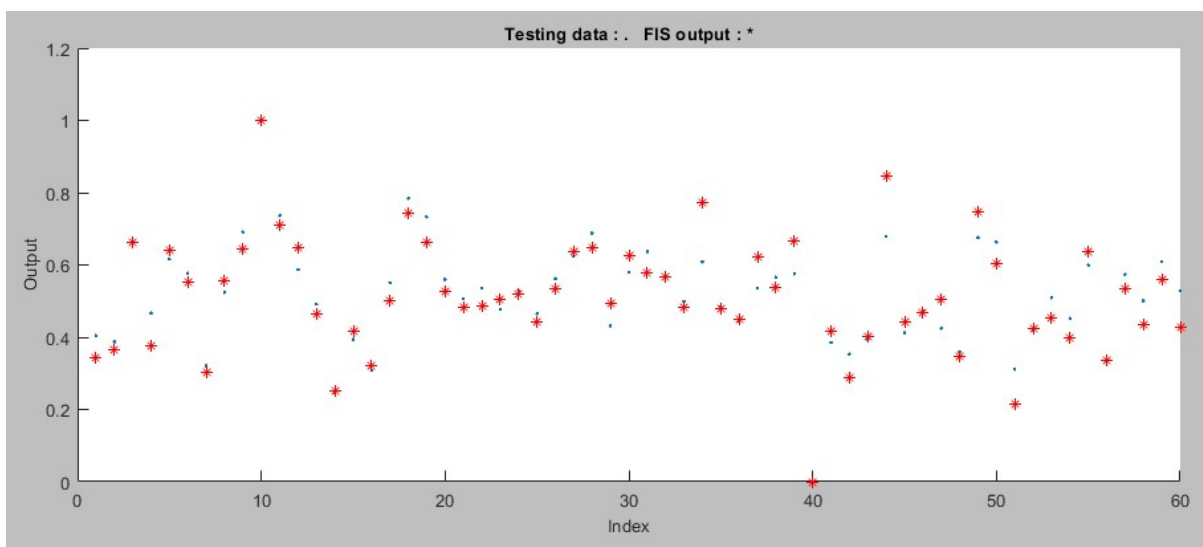
Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Figura 19 - Comparação entre os valores desejados e os valores calculados pela topologia 64



Fonte: Proposto pelo autor (2022).

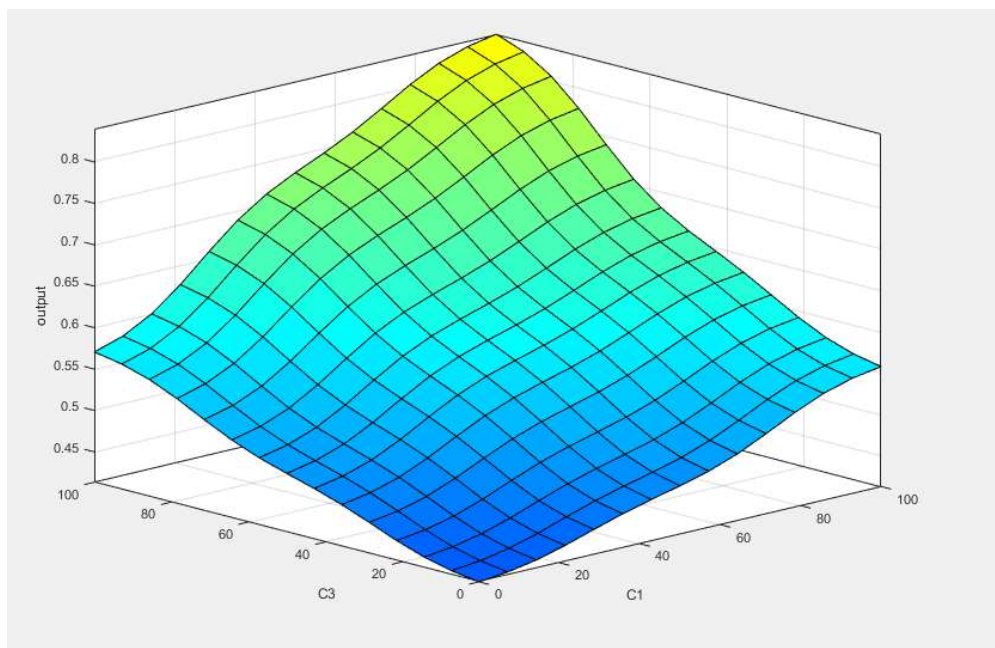
Figura 20 - Comparação entre os valores desejados e os valores calculados pela topologia 103



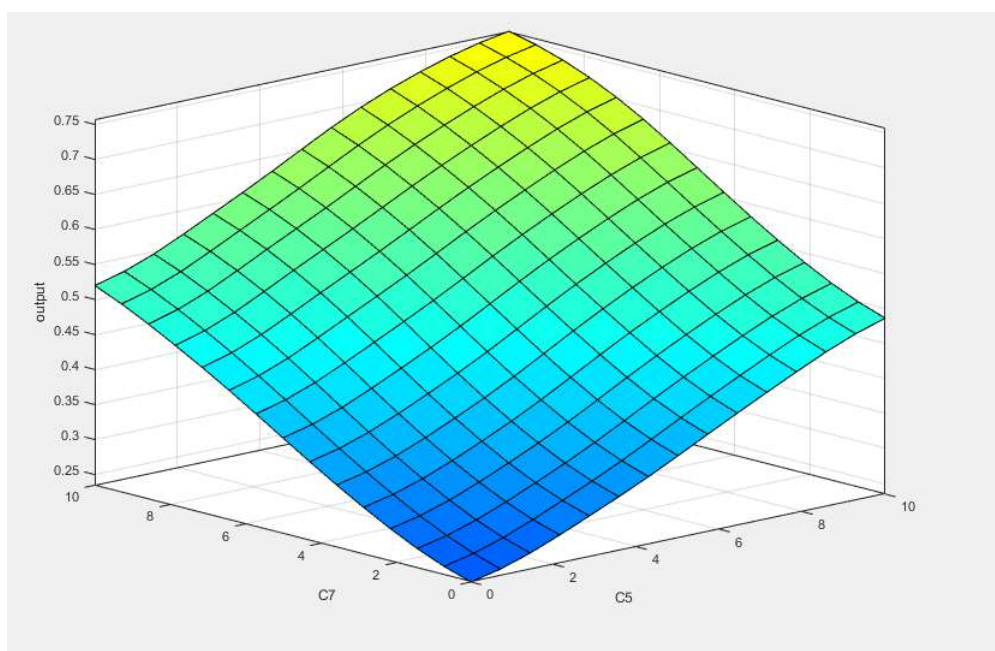
Fonte: Proposto pelo autor (2022).

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam os gráficos de superfície gerados pelo *software MATLAB – MathWorks®* para os modelos ANFIS 1, 2 e 3, respectivamente. Neles é possível verificar a interação de duas variáveis de entrada para a composição do valor de saída de cada modelo, ou seja, para o desempenho dos fornecedores em cada dimensão. A Figura 21 apresenta o comportamento das variáveis C1 e C3 para a geração do desempenho ambiental. A Figura 22 apresenta o comportamento das variáveis C5 e C7 para o desempenho social, e a Figura 23 mostra a interação das variáveis C8 e C9 para a geração do desempenho econômico. Para os três casos apresentados, verifica-se que o aumento dos valores obtidos em cada variável eleva o desempenho dos fornecedores.

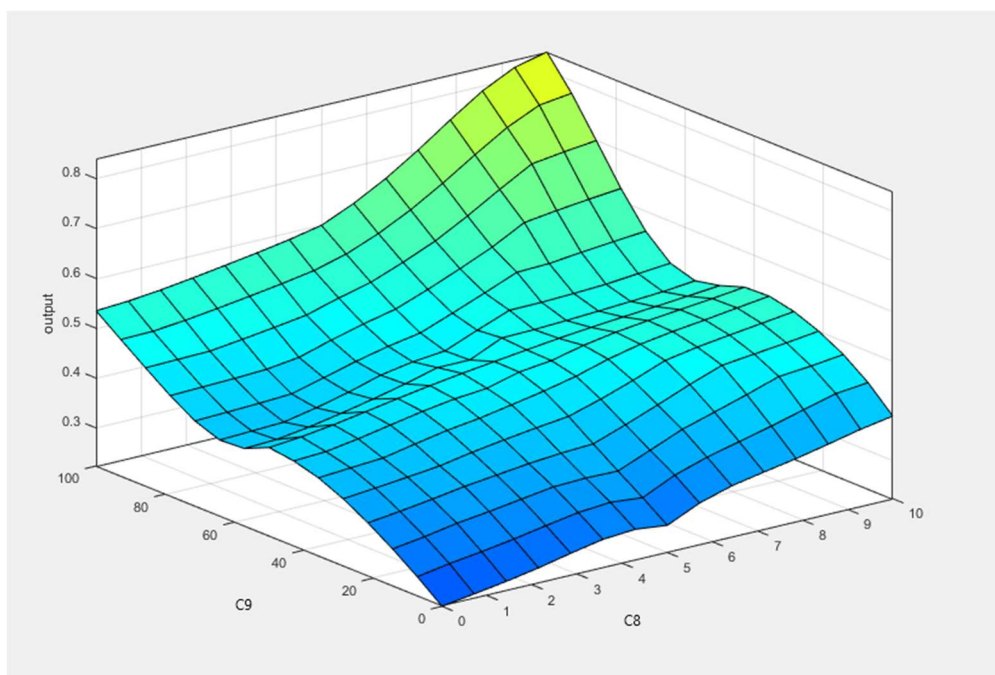
Com a interação entre as variáveis apresentadas nos gráficos de superfície, é possível verificar que quanto menor o número de variáveis nos modelos, como na Figura 22 representando o modelo ANFIS 2, a superfície se aproxima mais de um modelo linear. Já quando há mais variáveis nos modelos ANFIS, como na Figura 23, representando o modelo ANFIS 3, a superfície se aproxima mais de uma forma não-linear.

Figura 21 - Gráfico de superfície do modelo ANFIS 1

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Figura 22 - Gráfico de superfície do modelo ANFIS 2

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

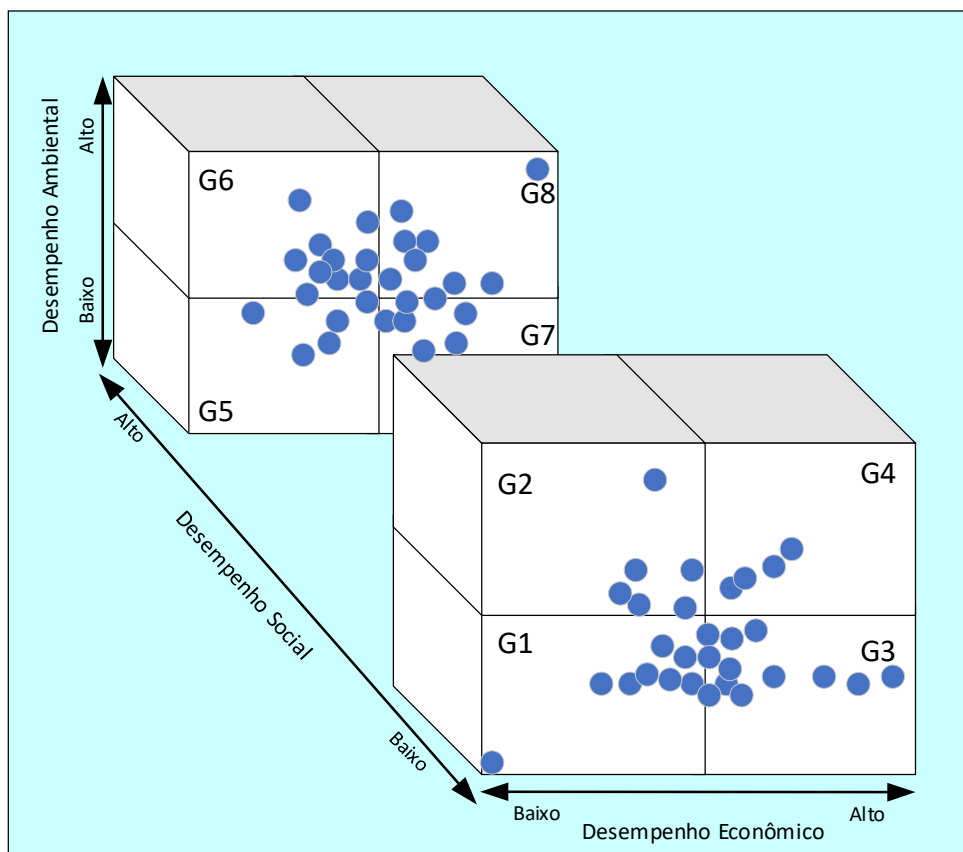
Figura 23 - Gráfico de superfície do modelo ANFIS 3

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

5.3 RESULTADOS DA SEGMENTAÇÃO DOS FORNECEDORES

A última etapa da aplicação do modelo proposto consiste na segmentação dos fornecedores a partir dos valores de desempenho obtidos por cada modelo ANFIS. A Figura 24 apresenta a classificação final dos fornecedores segundo os valores estimados pelos melhores modelos ANFIS (topologias 26, 64 e 103). Para melhor visualização dos fornecedores em cada quadrante, a matriz foi separada em duas partes. 8 fornecedores que apresentaram baixo desempenho em todas as dimensões foram classificados no grupo 1. Caso não seja possível a substituição dos fornecedores classificados nesse grupo, é recomendada a aplicação de estratégias tanto para o desenvolvimento econômico, como para o ambiental e social.

Figura 24 - Classificação final dos fornecedores



Fonte: Proposto pelo autor (2022).

No grupo 2, 6 fornecedores foram classificados e sugere-se a aplicação de estratégias de desenvolvimento econômico e social. No grupo 3, um total de 12 fornecedores foram classificados e aconselha-se o uso de estratégias para o desenvolvimento das dimensões social e ambiental. Para o grupo 4, com 4 fornecedores, recomenda-se a aplicação de estratégias para o desenvolvimento da parte social dos fornecedores. Para o grupo 5, com 5 fornecedores, sugere-se a aplicação de estratégias do campo econômico e ambiental. Para o grupo 6, com 10 fornecedores estratégias econômicas e para o grupo 7, com 7 fornecedores, estratégias ambientais. Por fim, 8 fornecedores foram classificados no grupo 8, contemplando integralmente os requisitos ambientais, sociais e econômicos.

Vale ressaltar que existem diversas estratégias na literatura que podem ser aplicadas para o desenvolvimento dos fornecedores. Lajimi (2021) e Pedroso et. al. (2021) identificaram as principais estratégias para o desenvolvimento de fornecedores sustentáveis, apresentadas no Quadro 10 separadas por dimensão do TBL. A partir

da classificação mostrada na Figura 24, é possível escolher estratégias direcionadas para cada grupo de fornecedores, sendo que essas devem estar alinhadas com os objetivos e metas da empresa. Essa escolha pode ser feita a partir de *brainstorming* entre os decisores, considerando também as necessidades específicas de cada fornecedor.

Quadro 10 - Estratégias para o desenvolvimento dos fornecedores

Dimensão	Estratégias de desenvolvimento	Grupos de fornecedores
Ambiental	<p>Auxiliar e informar os fornecedores sobre tecnologia e produção verde.</p> <p>Estabelecer metas aos fornecedores para manter e melhorar o meio ambiente.</p> <p>Resolver problemas ambientais técnicos dos fornecedores.</p> <p>Transferir funcionários com experiência técnica ambiental aos fornecedores.</p> <p>Premiar e incentivar os fornecedores pelo desempenho ambiental.</p> <p>Auxiliar os fornecedores a obter a certificação ISO 14000.</p> <p>Colocar as considerações ambientais nos contratos de longo prazo.</p> <p>Envolvimento dos fornecedores na concepção de produtos ambientalmente amigos.</p> <p>Realizar auditorias nos fornecedores.</p> <p>Treinar fornecedores nas questões ambientais.</p>	G1, G3, G5 e G7.
Social	<p>Avaliar a performance ética dos fornecedores e providenciar <i>feedback</i>.</p> <p>Providenciar <i>feedback</i> das avaliações aos fornecedores.</p> <p>Visitar as instalações dos fornecedores para melhorar o desempenho.</p> <p>Treinar os fornecedores sobre as questões de sustentabilidade.</p> <p>Construir confiança mútua.</p> <p>Treinar os funcionários dos fornecedores para aumentar a produtividade.</p> <p>Transferir conhecimento, informação e experiências nas questões da sustentabilidade.</p> <p>Solicitar aos fornecedores a adotarem certificações sociais.</p>	G1, G2, G3 e G4.

Econômica	<p>Realizar empreendimentos em conjunto.</p> <p>Comprar de diferentes fornecedores para criar uma competitividade entre os fornecedores.</p> <p>Avaliação financeira e estabelecer metas aos fornecedores.</p> <p>Avaliar os produtos de linha dos fornecedores para aumentar a produtividade.</p> <p>Criar e desenvolver produtos e materiais em conjuntos com os fornecedores.</p> <p>Visitação das instalações dos fornecedores.</p> <p>Certificação dos fornecedores.</p> <p>Compartilhamento de informações.</p> <p>Suporte tecnológico e operacional.</p> <p>Suporte financeiro.</p>	G1, G2, G5 e G6.
-----------	--	------------------

Fonte: Adaptado de Lajimi (2021, p. 131) e Pedroso *et al.* (2021).

5.4 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DOS MODELOS

As topologias candidatas que obtiveram os melhores desempenhos, ou seja, que alcançaram os menores MSE para cada um dos modelos ANFIS estão descritas com os seus respectivos resultados na Tabela 6. Nos três casos o tipo de função de pertinência Gaussiana foi a que obteve o melhor desempenho. Para o modelo ANFIS 1 e ANFIS 2 o tipo de consequente constante e o operador lógico produto foram os que alcançaram os menores MSE. Já para o modelo ANFIS 3, o tipo de consequente de função linear e o operador lógico mínimo foram os que obtiveram os melhores resultados. O número de partições com melhor desempenho entre os modelos ANFIS variou entre 3 e 4. Para avaliar melhor a capacidade de acurácia dos modelos computacionais propostos, foram realizados testes de regressão linear e testes *t* de amostras pareadas.

Tabela 6 - Resultado das melhores topologias candidatas

	ANFIS 1	ANFIS 2	ANFIS 3
Topologia candidata	26	64	103
Quantidade de variáveis de entrada	4	3	5
Número de partições	3	4	3
Número de regras de inferência	81	64	243
Tipo de função de pertinência	Gaussiana	Gaussiana	Gaussiana

Tipo de consequente	Constante	Constante	Função Linear
Operador lógico	Produto	Produto	Mínimo
MSE validação	$2,380 \times 10^{-04}$	$9,769 \times 10^{-06}$	$2,958 \times 10^{-03}$

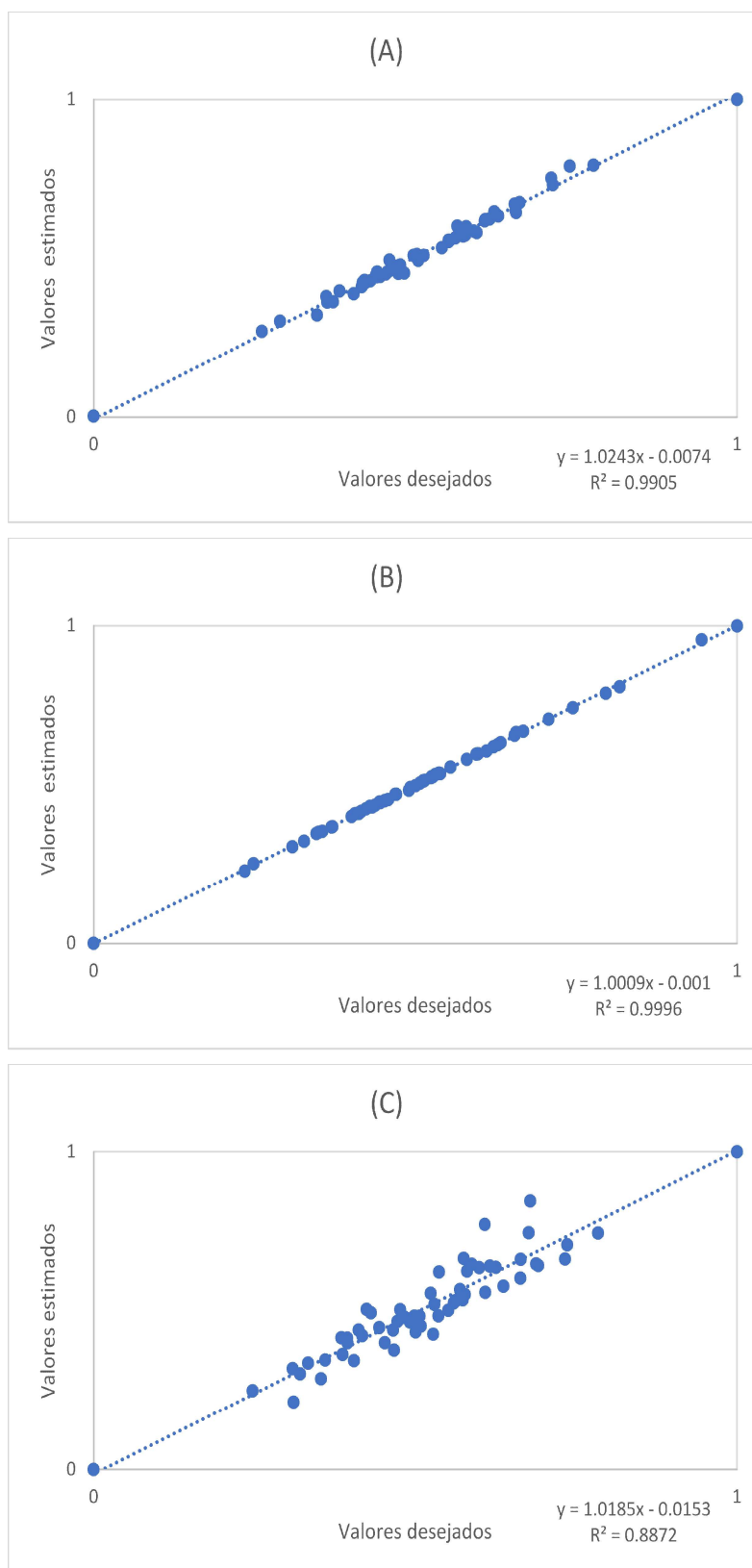
Fonte: Proposto pelo autor (2022).

5.4.1 Teste de regressão linear

Segundo Fávero *et al.* (2009) a técnica de regressão linear é utilizada para o estudo da relação entre uma variável explicativa, que se apresentam de forma linear e uma variável dependente quantitativa. A fim de analisar a relação entre os valores de saída desejados e os valores estimados pelas melhores topologias, foram executados testes de regressão linear. O coeficiente R^2 foi calculado com o intuito de verificar a relação de dependência da variável y (valores estimados pelos modelos ANFIS) com a variável independente x (valores de saída do conjunto de teste, gerados usando TOPSIS). O valor de R^2 representa o quadrado do coeficiente de correlação. Quanto mais próximo de 1, mais forte o modelo se ajusta à representação da relação de dependência entre as variáveis de entrada e saída.

A Figura 25 mostra as equações indicando o relacionamento entre as variáveis x e y , os valores de R^2 e os resultados dos testes de regressão realizados no Microsoft Excel. Nas equações apresentadas, o coeficiente linear mostra o ponto em que a reta intercepta o eixo vertical, enquanto o coeficiente angular representa a inclinação da reta, neste caso representando o quanto os valores estimados pelos modelos ANFIS se alteram com o aumento dos valores desejados.

Os valores obtidos de R^2 foram 0,9905, 0,9996 e 0,8872 para os modelos ANFIS 1, 2 e 3, respectivamente. Transformando para porcentagem, temos que os valores desejados têm 99,05%, 99,96% e 88,72% de impacto sobre os valores estimados, o que é uma influência significativa, concluindo assim que os valores estimados pelos modelos ANFIS estão muito próximos dos valores desejados (gerados usando TOPSIS). Dentre os três modelos analisados, o modelo ANFIS 3 apresentou o menor desempenho. Isso se deve por ter o maior número de variáveis de entrada, consequentemente maior quantidade de regras de inferência, o que implica em uma quantidade maior de parâmetros para serem ajustados durante o treinamento, interferindo assim diretamente na precisão do modelo.

Figura 25 - Regressão linear utilizando os resultados dos modelos ANFIS 1(A), 2(B) e 3(C)

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

5.4.2 Teste t pareado

Para verificar se há diferença significativa entre os valores desejados e os valores estimados pelos os modelos ANFIS, foram realizados três testes t pareados. Segundo Montgomery e Runger (2018), esse tipo de teste é adequado quando os dados das populações são coletados aos pares. O Quadro 11 demonstra os critérios para aceitação ou rejeição da hipótese nula com nível de significância α .

Quadro 11 - Descrição do teste t pareado

Hipótese nula:	$H_0: \mu_D = \Delta_0$
Hipótese alternativa:	$H_1: \mu_D \neq \Delta_0$
Estatística de teste:	$T_0 = \frac{\bar{D} - \Delta_0}{s_D/\sqrt{n}}$
Sendo:	$s_D^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}$
Critério de rejeição (teste bicaudal):	$t_0 < -t_{\alpha/2, n-1}$ ou $t_0 > t_{\alpha/2, n-1}$

Fonte: Montgomery e Runger (2018, p. 265)

Para a realização dos testes t , as amostras precisam cumprir com os requisitos de distribuição normal e homogeneidade das variâncias entre os grupos (FÁVERO; BELFIORE, 2017). Os testes de normalidade e homogeneidade das variâncias foram realizados no *software SPSS Statistics* com os conjuntos de 60 amostras da etapa de teste dos três modelos ANFIS, e foi definido o nível de significância de $\alpha = 0,01$ para rejeição da hipótese nula. O Quadro 12 apresenta as hipóteses que os testes de normalidade podem assumir. A Tabela 7 apresenta os resultados dos testes de normalidade dos seis grupos de amostras, sendo dois para cada modelo ANFIS.

Quadro 12 - Hipóteses dos testes de normalidade dos dados

Hipótese nula:	a amostra provém de uma distribuição normal
Hipótese alternativa:	a amostra não provém de uma distribuição normal

Fonte: Fávero e Belfiori (2017, p. 198).

Tabela 7 - Resultados dos testes de normalidade

Amostra	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estatística	gl	Sig, <i>p-value</i>	Estatística	gl	Sig, <i>p-value</i>
ANFIS 1 Desejado	0,106	60	0,092	0,984	60	0,629
Estimado	0,111	60	0,063	0,975	60	0,252
ANFIS 2 Desejado	0,127	60	0,017	0,965	60	0,087
Estimado	0,130	60	0,013	0,965	60	0,087
ANFIS 3 Desejado	0,040	60	0,200	0,993	60	0,982
Estimado	0,063	60	0,200	0,993	60	0,976

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Conforme a Tabela 7, o *software SPSS Statistics* calcula a normalidade dos dados a partir dos testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro-Wilk (S-W). O teste K-S é sugerido para amostras grandes ($n > 30$), pois com amostras pequenas ele perde potência e o S-W é recomendado para amostras de tamanho $4 < n < 2000$ (FÁVERO; BELFIORE, 2017). Considerando a quantidade de 60 amostras para cada modelo testado, ambos os testes se enquadram na avaliação. A análise dos resultados dos testes pode ser feita pela estatística do teste, comparando-a com o valor tabelado de K-S e S-W ou pelo seu *p-value*. Levando em conta o nível de significância de $\alpha = 0,01$ e considerando que para todos os casos apresentados o *p-value* $> \alpha$ retem-se as hipóteses nulas dos seis grupos de amostras, ou seja, todos os grupos de amostras da Tabela 7 provêm de uma distribuição normal.

Para verificar a homogeneidade das variâncias entre os grupos, o *software SPSS Statistics* utiliza o teste de Levene. Comparado a outros testes de homogeneidade, como o teste de Hartley e o teste de Cochran, o de Levene é menos sensível ao desvio de normalidade e é considerado o teste mais robusto (FÁVERO; BELFIORE, 2017). A Tabela 8 apresenta os resultados alcançados pelas amostras dos modelos ANFIS no teste de homogeneidade das variâncias. Com níveis de significância observados de 0,728, 0,990 e 0,423, valores superiores a $\alpha = 0,01$, os testes apresentam uma não rejeição das hipóteses nulas, o que se pode concluir que, ao nível de confiança de 99%, as variâncias são homogêneas.

Tabela 8 - Teste de homogeneidade de variância

Par	Estatística de Levene	Sig. <i>p-value</i>
ANFIS 1	0,122	0,728
ANFIS 2	0,000	0,990
ANFIS 3	0,568	0,453

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Com os requisitos de normalidade e homogeneidade das variâncias alcançados, é possível realizar a aplicação do teste *t*. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos pelos testes *t* realizados no *software SPSS Statistics*. Além do nível de significância, a Tabela 9 apresenta a média entre as diferenças dos pares de cada grupo amostral, o desvio padrão, o erro de média padrão, o intervalo de confiança da diferença e o valor calculado de *t*. Para se rejeitar a hipótese nula do teste *t* o valor de *t* calculado deve ser comparado com o valor tabelado da distribuição de *t* de *Student* sendo $t_0 < -t_{\alpha/2, n-1}$ ou $t_0 > t_{\alpha/2, n-1}$, caso contrário não se rejeita a hipótese nula.

Tabela 9 - Resultados dos testes com amostras pareadas

Par	Média	Desvio Padrão	Erro de média padrão	99% Intervalo de Confiança da Diferença		<i>t</i>	Sig. <i>p-value</i>
				Inferior	Superior		
ANFIS 1	-0,00493	0,01473	0,0019	-0,00999	0,00013	-2,593	0,012
ANFIS 2	0,00051	0,00313	0,0004	-0,00057	0,00158	1,251	0,216
ANFIS 3	0,00592	0,05455	0,00704	-0,01282	0,02466	0,841	0,404

Fonte: Proposto pelo autor (2022).

Considerando um nível de significância de $\alpha = 0,01$, com os valores de *p-value* sendo 0,012, 0,216 e 0,404 para os modelos ANFIS 1, 2 e 3, respectivamente, não se pode rejeitar as hipóteses nulas, ou seja, não há diferenças estatisticamente significativas entre os valores desejados e os valores estimados. Dessa forma, reforça-se a acurácia dos modelos propostos e a adequabilidade da utilização de ANFIS na segmentação de fornecedores sustentáveis.

6 CONCLUSÃO

Este estudo propôs um modelo teórico para segmentação de fornecedores sustentáveis, com a aplicação de três modelos computacionais baseado em sistemas neuro-*fuzzy* do tipo ANFIS, um para cada dimensão do TBL. Para definir a configuração topológica mais adequada para cada modelo ANFIS foi aplicado a técnica de validação cruzada. Neste processo, avaliações de 200 fornecedores geradas de forma aleatória e separadas em dois subconjuntos, um de treinamento e outro de validação, foram utilizadas. Posteriormente 108 topologias, 36 para cada dimensão da matriz de segmentação de fornecedores sustentáveis, foram testadas a fim de identificar as que geram valores mais precisos, ou seja, que alcançaram os menores MSE na etapa de validação do processo.

Os resultados da implementação computacional dos modelos ANFIS, mostraram que o tipo de função de pertinência Gaussiana, foi o que obteve o melhor desempenho nos três modelos ANFIS. Já o número de partições de entrada 3 obteve o melhor resultado em dois modelos ANFIS e o número de 4 partições em um modelo. O tipo de consequente constante e o operador lógico produto foram os que alcançaram os menores MSE. Além disso, os resultados mostraram que quanto menor o número de variáveis de entrada, maior a precisão do modelo.

Para verificar a acurácia dos modelos ANFIS, foram realizados alguns testes estatísticos. A análise de regressão linear utilizando as topologias selecionadas e o cálculo de R^2 indicaram uma alta correlação positiva entre os valores desejados e os valores estimados pelos modelos. Para validar os resultados, foram executados testes de hipóteses do tipo t baseados em amostras pareadas, que indicaram que não houve diferenças significativas entre os valores desejados e os valores estimados pelos modelos ANFIS. Portanto, a adequabilidade dos modelos ANFIS para segmentação de fornecedores sustentáveis foi confirmada por meio dos valores de MSE obtidos na etapa de teste, dos resultados de R^2 e dos testes de hipótese.

O modelo proposto pelo estudo é uma ferramenta útil para gestores classificarem os fornecedores sustentáveis em grupos distintos, baseados no TBL e características em comum. Dessa forma é possível elaborar estratégias específicas aos grupos com o objetivo de potencializar o desempenho das cadeias suprimentos sustentáveis. Em comparação com os modelos de segmentação de fornecedores

encontrados na literatura, o modelo proposto utilizando sistemas ANFIS apresenta várias vantagens, como a possibilidade de aprendizagem supervisionada, baseada em dados históricos de desempenho dos fornecedores, o que possibilita a adaptação ao ambiente. Além disso, requer menos tempo de treinamento para ajustar seus parâmetros, quando comparado aos modelos baseados em redes neurais e inferência fuzzy. Os resultados desse estudo também são úteis para auxiliar pesquisadores e desenvolvedores de soluções computacionais na área de segmentação de fornecedores sustentáveis, uma vez que sugere os parâmetros topológicos mais adequados para obtenção de resultados mais precisos.

Uma limitação deste estudo está na dificuldade de coleta de dados em quantidade suficiente para realizar o processo de aprendizagem dos modelos ANFIS, o que impossibilitou até o momento uma aplicação real. Com o avanço de tecnologias da indústria 4.0 e a popularização de tecnologias de gerenciamento de dados, como o *big data*, emerge a possibilidade de haver mais disponibilidade de dados para aplicações reais do modelo.

Para o desenvolvimento de estudos futuros, sugere-se a aplicação real em empresas de diferentes setores econômicos, com critérios diferentes dos que foram utilizados nesse trabalho e que estejam de acordo com o TBL. Pode-se também testar o uso de outros métodos baseados em aprendizagem supervisionada e desenvolver estudos comparativos entre os modelos de segmentação de fornecedores encontrados na literatura.

REFERÊNCIAS

- AHI, P.; SEARCY, C. *A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production*, v. 52, p. 329-341, 2013.
- AKMAN, G. *Evaluating suppliers to include green supplier development programs via fuzzy c-means and VIKOR methods. Computers & Industrial Engineering*, v. 86, p. 69-82, 2015.
- AKKOÇ, S. *An empirical comparison of conventional techniques, neural networks and the three stage hybrid Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) model for credit scoring analysis: The case of Turkish credit card data. European Journal of Operational Research*, v. 222, n. 1, p. 168-178, 2012.
- ALOINI, D. *et al. Leveraging procurement related knowledge through a fuzzy-based DSS: a refinement of purchasing portfolio models. Journal of Knowledge Management*, v. 23, n. 6, p. 1077-1104, 2019.
- AMINDOUST *et al. Sustainable supplier selection: a ranking model based on fuzzy inference system. Applied Soft Computing*, v. 12, n. 6, p. 1668-1677, 2012.
- ANSARI, Z. N.; KANTI, R. *A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production*, v. 142, n. 4, p. 2524-2543, 2017.
- ASSIS, R. F. *et al. Segmentação de fornecedores: um estudo em uma indústria do setor automobilístico. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, v. 14, n. 4, p. 310-336, 2018.
- BAI, C.; REZAEI, J.; SARKIS, J. *Multicriteria green supplier segmentation. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 64, n. 4, p. 515-528, 2017.
- BAI, C.; SARKIS, J. *Integrating sustainability into supplier selection with grey system and rough set methodologies. International Journal of Production Economics*, v. 124, n. 1, p. 252-264, 2010.
- BAMAKAN, S. M. H.; FAREGH, N.; ZARERAVASAN, A. *Di-ANFIS: an integrated blockchain–IoT–big data-enabled framework for evaluating service supply chain performance. Journal of Computational Design and Engineering*, v. 8, n. 2, p. 676-690, 2021.
- BATISTA, L. *et al. In search of a circular supply chain archetype – a content-analysis-based literature review. Journal of Production Planning & Control*, v. 29, p. 438-451, 2018.

BIANCHINI, A. *et al.* Supply chain redesign for lead-time reduction through Kraljic purchasing portfolio and AHP integration. **Benchmarking: An International Journal**, v. 26, n. 4, p.1194-1209, 2019.

BERTRAND, J.; FANSOO, J. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, p. 241-264, 2002.

BILGEHAN, M. Comparison of ANFIS and NN models – with a study in critical buckling load estimation. **Applied Soft Computing**, v. 11, p. 3779-3791, 2011.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília, DF, ago 1981.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, ago 2010.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Proteção da Vegetação Nativa**. Brasília, DF, maio 2012.

BORGES, W. V. *et al.* Proposta de um modelo hesitant fuzzy linguistic TOPSIS para segmentação de fornecedores. **Revista De Administração Contemporânea**, 2021.

BORGES, W. V.; LIMA JUNIOR, F. R. Modelos de suporte à decisão para segmentação de fornecedores: uma revisão sistemática da literatura. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, X. Ponta Grossa, 2020. **Anais eletrônicos [...]**. Ponta Grossa: CONBREPPO, 2020.

BOUJELBEN, M. A. A unicriterion analysis based on the PROMETHEE principles for multicriteria ordered clustering. **Omega**, v. 69, p. 126-140, 2017.

BOWERSOX, D. J. *et al.* **Gestão logística de cadeia de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BÜYÜKÖZKAN, G. An integrated fuzzy multi-criteria group decision-making approach for green supplier evaluation. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 11, p. 2892-2909, 2012.

BÜYÜKÖZKAN, G.; KARABULUT, Y. Energy project performance evaluation with sustainability perspective. **Energy**, v. 119, p. 549-560, 2017.

CANNING, L. Rethinking market connections: mobile phone recovery, reuse and recycling in the UK. **Journal of Business & Industrial Marketing**, v. 21, n. 5, p.320-329, 2006.

CARTER, C. R.; EASTON, P. L. Sustainable supply chain management: evolution and future directions. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 41, p. 46-62, 2011.

- CARTER, C. R.; ROGERS, D. S. *A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management***, v. 38, p. 360-387, 2008.
- CHE, Z. H. *Clustering and selecting suppliers based on simulated annealing algorithms. **Computers & Mathematics with Applications***, v. 63, p. 228-238, 2011.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operação**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- CHRISTOPHER, M.; PECK, H. *Building the resilient supply chain. **The International Journal of Logistics Management***, v. 15, n. 2, p. 114, 2004.
- COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.
- DAI, J.; BLACKHURST, J. *A four-phase AHP–QFD approach for supplier assessment: a sustainability perspective. **International Journal of Production Research***, v. 50, n. 19, p. 5474-5490, 2012.
- DAY, M.; MAGNAN, G. M.; MOELLER, M. M. *Evaluating the bases of supplier segmentation: a review and taxonomy. **Industrial Marketing Management***, v. 39, n. 4, p. 625–639, 2010.
- DEMIR, L. *et al.* *A green supplier evaluation system based on a new multi-criteria sorting method: VIKORSORT. **Expert Systems With Applications***, v. 114, p. 479-487, 2018.
- DU, L. *et al.* *The construction research on rapid-response eco-supply chain of the textile industry based on the circular economy. **International Conference on E-Health Networking Digital Ecosystems and Technologies (EDT)***, p. 248-251, 2010.
- DUC, D. A. *et al.* *A dynamic generalized fuzzy multi-criteria group decision making approach for green supplier segmentation. **Plos One***, 2021.
- DUBEY, R. *et al.* *Sustainable supply chain management: framework and further research directions. **Journal of Cleaner Production***, v. 142, n. 2, p. 1119-1130, 2017.
- DYER, J. H.; CHO, D. S.; CHU, W. *Strategic supplier segmentation: the next ‘best practice’ in supply chain management. **California Management Review***, v. 40, n. 2, p. 57–77, 1998.
- ELKINGTON, J. **Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st Century Business** 1. ed. Capstone, 1997.
- FAN, W. *et al.* *An evaluation model of supply chain performances using 5DBSC and LMBP neural network algorithm. **Journal of Bionic Engineering***, v. 10, n. 3, p. 383-395, 2013.

FARAHANI *et al.* *Competitive supply chain network design: an overview of classifications, models, solution techniques and applications.* **Omega**, v. 45, p. 91-118, 2014.

FAROOQUE, M. *et al.* *Circular supply chain management: a definition and structured literature review.* **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 882-900, 2019.

FÁVERO, L. P. *et al.* **Análise de dados**: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Campus Elsevier, 2009.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**: estatística e modelagem multivariada com Excel, SPSS e Stata. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FREDERICO, G. *et al.* *Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda.* **Supply Chain Management**, v. 25, n. 2, p. 262-282, 2020.

GATTORNA, J. **Dynamic supply chain: delivering value through people.** Financial Times Prentice Hall: London, 2010.

GENOVESE, A. *et al.* *Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications.* **Omega**, v. 66, p. 344-357, 2017.

GLOCK, C. *Lead time reduction strategies in a single-vendor–single-buyer integrated inventory model with lot size-dependent lead times and stochastic demand.* **International Journal of Production Economics**, v. 136, n. 1, p. 37-44, 2012.

GOH, C. S. *et al.* *Revisiting triple bottom line within the context of sustainable construction: A systematic review.* **Journal of Cleaner Production**, v. 252, 2020.

GOKTEPE, A. B.; AGAR, E.; LAV, H. *Comparison of multilayer perceptron and adaptive neuro-fuzzy system on back calculating the mechanical properties of flexible pavements.* **ARI The Bulletin of the Istanbul Technical University Communicated**, v. 54, n. 3, 2004.

GOVINDAN, K.; FATTAHI, M.; KEYVANSHOKOOH, E. *Supply chain network design under uncertainty: a comprehensive review and future research directions.* **European Journal of Operational Research**, v. 263n n. 1, p. 108-141, 2017.

GÓNCZ, E. *et al.* *Increasing the rate of sustainable change: a call for a redefinition of the concept and the model for its implementation.* **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 6, p. 525-537, 2007.

GÜNERI, A. F.; ERTAY, T.; YÜCEL, A. *An approach based on ANFIS input selection and modeling for supplier selection problem.* **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 12, p. 14907-14917, 2011.

HAGHIGHI, P. S.; MORAD, M.; SALAHI, M. *Supplier segmentation using fuzzy linguistic preference relations and fuzzy clustering. I.J. Intelligent Systems and Applications*, v. 5, p. 76-82, 2014.

HWANG, C.; YOON, K. ***Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey***. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

HENDIANI, S.; MAHMOUDI, A.; LIAO, H. *A multi-stage multi-criteria hierarchical decision-making approach for sustainable supplier selection. Applied Soft Computing*, v. 94, 2020.

JANG, J-S. R. *ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems*, v. 23, n. 3, p. 665-685, 1993.

JHARKHARIA, S.; DAS, C. *Low carbon supplier development: a fuzzy c-means and fuzzy formal concept analysis based analytical model. Benchmarking: An International Journal*, v. 26, n. 1, p. 73-96, 2019.

JIN, Y.; RYAN, J. K.; YUND, W. *Two stage procurement processes with competitive suppliers and uncertain supplier quality. IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 61, n. 1, p. 147-158, 2014.

KAUR, H.; SINGH, S. P. *Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. International Journal of Production Economics*, v. 231, 2021.

KESKIN, F. D.; KAYMAZ, Y. *Machine learning in supply chain management: a risk based supplier segmentation application*. In: UNVAN, Y. A. ***Business studies and new approaches***. Lyon: Livre de Lyon, 2021. p.139-161.

KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; MOUSAZADEH, H. *Application of multi-layer adaptive neuro-fuzzy inference system for estimation of greenhouse strawberry yield. Measurement*, v. 47, p. 903-910, 2014.

KRALJIC, P. *Purchasing must become supply management. Harvard Business Review*, p 109-117, 1983.

KO, M.; TIWARI, A.; MEHNEN, J. *A review of soft computing applications in supply chain management. Applied Soft Computing*, v. 10, n. 3, p. 661-674, 2010.

LAJIMI, H. F. *Sustainable supplier segmentation: a practical procedure*. In: REZAEI, J. ***Strategic Decision Making for Sustainable Management of Industrial Networks***. Cham: Springer, 2021. p. 119-137.

LIMA JR, F. R.; CARPINETTI, L. C. R. *An adaptive network-based fuzzy inference system to supply chain performance evaluation based on SCOR® metrics. Computers & Industrial Engineering*, v.139, 2020.

LIMA JR, F. R.; CARPINETTI, L. C. R. *Combining SCOR® model and fuzzy TOPSIS for supplier evaluation and management. Intern. Journal of Production Economics*, v. 174, p. 128-141, 2016.

LIMA JR, F.R.; CARPINETTI, L.C.R. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão para seleção de fornecedores. *Gestão & Produção*, v.22, n.1, p.17-34, 2015.

LIMA JR, F.R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L.C.R. *A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. Applied Soft Computing*, v.21, p.194-209, 2014.

LIN, Y.; TSENG, M. *Assessing the competitive priorities within sustainable supply chain management under uncertainty. Journal of Cleaner Production*, v. 112, n. 3, p. 2133-2144, 2016.

LO, S. C.; SUDJATMIKA, F. V. *Solving multi-criteria supplier segmentation based on the modified FAHP for supply chain management: a case study. Soft Computing*, v. 20, p. 4981–4990, 2016.

MARTINS, C. L.; PATO, M. V. *Supply chain sustainability: a tertiary literature review. Journal of Cleaner Production*, v. 225, p. 995-1016, 2019.

MATSHABAPHALA, N. M.; GROBLER, J. *Supplier segmentation: a case study of Mozambican cassava farmers. The South African Journal of Industrial Engineering*, v. 32, n. 1, 2021.

MAVI, R. K.; MAVI, N. K.; GOH, M. *Modeling corporate entrepreneurship success with ANFIS. Operational Research*, v. 17, p. 213-238, 2017.

MEDEIROS, M.; FERREIRA, L. *Development of a purchasing portfolio model: an empirical study in a Brazilian hospital. Journal Production Planning & Control*, v. 29, n. 7, p. 571-585, 2018.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Applied statistics and probability for engineers**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

NASIR, M. *et al. Comparing linear and circular supply chains: a case study from the construction industry. International Journal of Production Economics*, v. 183, p. 443-457, 2017.

OSIRO, L.; LIMA-JUNIOR, F. R; CARPINETTI, L. C. R. *A fuzzy logic approach to supplier evaluation for development. International Journal of Production Economics*, v. 153, p. 95-112, 2014.

ÖZKANA, G.; INAL, M. *Comparison of neural network application for fuzzy and ANFIS approaches for multi-criteria decision-making problems. Applied Soft Computing*, v. 24, p. 232-238, 2014.

- PAGELL, M; SHEVCHENKO, A. *Why research in sustainable supply chain management should have no future. Journal of Supply Chain Management*, v. 50, n. 1, p.44-55, 2014.
- PARK, J. *et al. An integrative framework for supplier relationship management. Industrial Management & Data Systems*, v. 110, n. 4, p.4 95-515, 2010.
- PARKOUHI, S. V.; GHADIKOLAEI, A. S.; LAJIMI, H. F. *Resilient supplier selection and segmentation in grey environment. Journal of Cleaner Production*, v. 207, n. 1, p. 1123-1137, 2019.
- PEDROSO, C. B. *et al. Supplier development adoption: A conceptual model for triple bottom line (TBL) outcomes. Journal of Cleaner Production*, v. 3141, 2021.
- PIRES, Sílvio. R. I. **Gestão da cadeia de suprimentos: conceitos, estratégias, práticas e casos**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- RAJESH, G.; RAJU, R. *A fuzzy inference approach to supplier segmentation for strategic development. The South African Journal of Industrial Engineering*, v. 32, n.1, 2021.
- RAO, P. H. *Measuring environmental performance across a green supply chain: a managerial overview of environmental indicators. Vikalpa*, v. 39, n. 1, p. 57-74, 2014.
- RASHIDI, K. *et al. Applying the triple bottom line in sustainable supplier selection: a meta-review of the state-of-the-art. Journal of Cleaner Production*, v. 269, 2020.
- RESENDE, C. H. L.; GERALDES, C. A. S.; LIMA-JR, F. R. *Decision models for supplier selection in industry 4.0 era: a systematic literature review. Procedia Manufacturing*, v. 55, p. 492-499, 2021.
- RESTREPO, R.; VILLEGAS, J. G. *Supplier evaluation and classification in a Colombian motorcycle assembly company using data envelopment analysis. Academia Revista Latinoamericana de Administración*, v. 32, n. 2, p. 159-180, 2019.
- REZAEI, J. *Sustainable supplier selection: a process view. Handbook on the Sustainable Supply Chain*, p.136-147, 2018.
- REZAEI, J. *et al. Embedding carbon impact assessment in multi-criteria supplier segmentation using ELECTRE TRI-rC. Annals of Operations Research*, 2017.
- REZAEI, J.; LAJIMI, H. F. *Segmenting supplies and suppliers: bringing together the purchasing portfolio matrix and the supplier potential matrix. International Journal of Logistics: Research and Applications*, v. 22, n. 4, p. 419–436, 2019.
- REZAEI, J.; ORTT, R. *A multi-variable approach to supplier segmentation. International Journal of Production Research*, v 50, n 16, p 4593–4611, 2012.

REZAEI, J.; ORTT, R. *Multi-criteria supplier segmentation using a fuzzy preference relations based AHP*. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n.1, p.75-84, 2013a.

REZAEI, J.; ORTT, R. *Supplier segmentation using fuzzy logic*. **Industrial Marketing Management**, v. 42, n. 4, p. 507-517, 2013b.

REZAEI, J.; WANG, J.; TAVASSZY, L. *Linking supplier development to supplier segmentation using Best Worst Method*. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 23, p. 9152-9164, 2015.

RIUS-SOROLLA, G.; ESTELLES-MIGUEL, S.; RUEDA-ARMENGOT, C. *Multivariable supplier segmentation in sustainable supply chain management*. **Sustainability**, v. 12, n. 11, 2020.

SANTOS, L. F. O.M; OSIRO, L.; LIMA, R. H. P. *A model based on 2-tuple fuzzy linguistic representation and Analytic Hierarchy Process for supplier segmentation using qualitative and quantitative criteria*. **Expert Systems with Applications**, v. 79, p. 53-64, 2017.

SCHRAMM, V. B.; CABRAL, L. P. B.; SCHRAMM, F. *Approaches for supporting sustainable supplier selection - A literature review*. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, 2020.

SEGURA, M.; MAROTO, C. *A multiple criteria supplier segmentation using outranking and value function methods*. **Expert Systems with Applications**, v. 69, p. 87-100, 2017.

SHIRALKAR, K.; BONGALE, A.; KUMAR, S. *Issues with decision making methods for supplier segmentation in supplier relationship management: a literature review*. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

SIKDAR, S. K. *Sustainable development and sustainability metrics*. **AIChE Journal**, v. 49, n.8, p. 1928-1932, 2003.

SRIVASTAVA, S. K. *Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review*. **International Journal of Management Reviews**, n. 9, v. 1, p. 53-80, 2007.

SVENSSON, G. *Supplier segmentation in the automotive industry: A dyadic approach of a managerial model*. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, v. 34, n. 1, p. 12-38, 2004.

SILVA, I. N.; SPATI, D. H., FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais: para engenharia e ciências aplicadas**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2016.

STOCK, J. R.; BOYER, S. L. *Developing a consensus definition of supply chain management: a qualitative study*. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 39, n. 8, p. 690-711, 2009.

TORRES-RUIZ, A.; RAVINDRAN, R. *Multiple criteria framework for the sustainability risk assessment of a supplier portfolio. **Journal of Cleaner Production***, v. 172, p. 4478-4493, 2018.

WANG, W.; CHAN, H. K. *A hierarchical fuzzy TOPSIS approach to assess improvement areas when implementing green supply chain initiatives. **International Journal of Production Research***, v. 51, n. 10, p. 3117-3130, 2013.

WASTI, S. N.; KOZAN, M. K.; KUMAN, A. *Buyer-supplier relationships in the Turkish automotive industry. **International Journal of Operations & Production Management***, v. 26, n. 9, p. 947-970, 2006.

XU, Z. *et al. Sustainable supplier selection based on AHP sort II in interval type-2 fuzzy environment. **Information Sciences***, v. 483, p 273-293, 2019.

ZIMMER, K.; FRÖHLING, M.; SCHULTMANN, F. *Sustainable supplier management a review of models supporting sustainable supplier selection, monitoring and development. **International Journal of Production Research***, v. 54, n. 5, p. 1412-1442, 2016.

APÊNDICE 1 – MÉTODO TOPSIS

O método TOPSIS é bastante utilizado para resolução de problemas de tomada de decisão multicritério, no qual considera as melhores alternativas as que possuem as distâncias euclidianas mais curtas da solução ideal, e as distâncias euclidianas mais distantes da solução ideal negativa. Este método é vantajoso para casos quando há um grande número de critérios e alternativas a serem analisadas, principalmente quando são de natureza qualitativa (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015). O TOPSIS pode ser aplicado conforme os passos abaixo (HWANG; YOON, 1981; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015):

- a) construir uma matriz de decisão e um vetor de pesos conforme a equação 8, onde d_{ij} representa a pontuação da alternativa i (A_i) no critério j (C_j);

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

- b) ponderar e normalizar a matriz de decisão usando a equação 9, onde d_{ij} são os elementos da matriz de decisão e w_j representa o peso dos critérios;

$$n_{ij} = w_j d_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2} \quad (9)$$

- c) calcular as soluções ideais positiva (A^+) e negativa (A^-) conforme as equações 10 e 11, respectivamente. A melhor pontuação alcançada por cada critério é representada por n_j^+ e a pior pontuação das alternativas neste mesmo critério é representado por n_j^- ;

$$A^+ = \{\text{MAX}_j n_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^+, \dots, n_j^+, \dots, n_m^+\} \quad (10)$$

$$A^- = \{\text{MIN}_j n_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^-, \dots, n_j^-, \dots, n_m^-\} \quad (11)$$

d) calcular as distâncias (D_i^+) e (D_i^-) entre os elementos da matriz de decisão ponderada e normalizada, e a solução ideal positiva e a solução ideal negativa, utilizando as equações 12 e 13; respectivamente;

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (n_{ij} - n_j^+)^2} \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (n_{ij} - n_j^-)^2} \quad (13)$$

e) Por último, usando a equação 14, deve-se calcular o coeficiente de aproximação (CC_i) de cada alternativa e ordenar o resultado de forma decrescente. Os valores estarão dentro do conjunto de dados de 0 e 1. Quanto mais próximo o valor for de 1, melhor será a qualificação e o desempenho da alternativa.

$$CC_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (14)$$