



Encontro Internacional sobre Gestão  
Empresarial e Meio Ambiente

## **Aplicação do método fuzzy-TOPSIS no apoio à seleção de fornecedores “verdes”**

**GUILHERME DONATTO AMARO**

Centro Universitário da Fundação Educacional Guaxupé  
guilhermeamaro94@gmail.com

**FRANCISCO RODRIGUES LIMA JUNIOR**

Universidade de São Paulo (USP)  
eng.franciscojunior@gmail.com

## **Aplicação do método *fuzzy-TOPSIS* no apoio à seleção de fornecedores “verdes”**

Devido ao aumento de pressões legais e às mudanças nos requisitos dos clientes, muitas empresas passaram a se preocupar em selecionar fornecedores que atendam às suas exigências ambientais e à legislação vigente. Na literatura acadêmica, a seleção de fornecedores “verdes” é abordada como um problema de tomada de decisão em que múltiplos critérios são considerados para avaliar as alternativas de abastecimento. Diversas técnicas vêm sendo exploradas para apoiar esse problema, mas muitas delas não são adequadas a este domínio de problema. Diante disso, o objetivo deste estudo é aplicar um método denominado *fuzzy-TOPSIS* (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) em uma situação de seleção de fornecedores “verdes”. Esse método possibilita avaliar os pesos dos critérios e as pontuações dos fornecedores de acordo com os julgamentos linguísticos de especialistas envolvidos na decisão. Além disso, esta técnica possibilita o uso de uma quantidade não limitada de critérios e de fornecedores. O *fuzzy-TOPSIS* foi aplicado em um caso de seleção de fornecedores “verdes”, no qual 10 fornecedores de uma empresa do setor metal mecânico foram avaliados com base em 5 critérios relacionados a aspectos ambientais. Quando comparado com outras técnicas existentes, este método apresenta diversas vantagens de uso.

**Palavras-chave:** Seleção de fornecedores “verdes”, *fuzzy-TOPSIS*, tomada de decisão multicritério, lógica *fuzzy*, gestão de cadeias de suprimento.

### ***An application of the fuzzy-TOPSIS method for supporting the “green” supplier selection***

*Recently, due to legal pressures and changes in the customer requirements, many companies have become concerned in selecting suppliers that meet their environmental requirements and current legislation. In the academic literature, the “green” supplier selection is dealt as a decision-making problem in which some criteria are considered for evaluation of the alternative suppliers. Several techniques have been explored to support the “green” supplier selection, but many of them are inadequate. The aim of this study is to apply a method named fuzzy-TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) for “green” supplier selection. The fuzzy-TOPSIS enables to assess the weights of criteria and scores of suppliers according to the linguistic judgments of experts involved in the decision. In addition, this technique enables the use of a non-limited number of criteria and suppliers. The fuzzy-TOPSIS was applied in a case for evaluation of 10 suppliers of a mechanical metal company based on five criteria. When compared with other existing techniques, this method provides several advantages.*

**Key Words:** *Green supplier selection, Fuzzy-TOPSIS, Multicriteria decision making, Fuzzy logic, Supply Chain Management.*

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, devido ao aumento da exigência por parte dos consumidores e das legislações vigentes, as organizações industriais passaram a investir esforços no gerenciamento de questões ambientais e a estender tais esforços para o âmbito da gestão cadeia de suprimentos. Como o desempenho ambiental dos fornecedores tem efeito sobre os resultados da organização compradora, surgiu a preocupação com a seleção de fornecedores que atendam aos requisitos ambientais da legislação vigente e do cliente final. Tais fornecedores são chamados na literatura acadêmica de *green suppliers*, ou fornecedores “verdes” (HUMPHREYS; WONG; CHAN, 2003).

A seleção de fornecedores é uma das mais importantes atividades do setor de compras e tem grande impacto na qualidade e nos custos dos produtos, bem como no desempenho da cadeia de suprimentos (LIMA JÚNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013). Muitos fatores têm contribuído para o aumento da complexidade das decisões sobre a seleção de fornecedores. As variações qualitativas e quantitativas no comportamento da demanda acarretam em mudanças constantes nas necessidades de aquisição das empresas. O uso da *Internet* aumenta a gama de possibilidades de fornecimento, dificultando assim o processo de seleção devido ao número de alternativas para serem avaliadas (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001).

Por lidar com diversos fatores, na literatura acadêmica o processo de seleção de fornecedores “verdes” é abordado como um problema de tomada de decisão no qual vários critérios são considerados para a avaliação de múltiplas alternativas e escolha da melhor (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001). Este problema de tomada de decisão é caracterizado por incerteza, informações imprecisas e objetivos conflitantes, o que torna a decisão ainda mais difícil de ser tomada (WANG, 2010). Para lidar com este problema, diversos estudos têm adotado o uso de métodos de tomada de decisão multicritério (*Multicriteria Decision-Making* – MCDM), técnicas de programação matemática e de inteligência artificial (HO; XU; DEY, 2010; CHAI; LIU; NGAU, 2013; LIMA JÚNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013). De Boer, Weger e Telgen (1998) ressaltam que o uso de tais técnicas contribui para o aumento da efetividade, da automação e da agilidade da tomada de decisão.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é aplicar um método de tomada de decisão multicritério denominado *fuzzy-TOPSIS* (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) em uma situação de seleção de fornecedores “verdes”. Este método possibilita a adoção de uma quantidade não limitada de critérios e a avaliação simultânea de uma quantidade não limitada de fornecedores. Além disso, as avaliações dos pesos dos critérios e das pontuações dos fornecedores podem ser feitas de acordo com os julgamentos linguísticos de especialistas no problema. Para implementar o *fuzzy-TOPSIS*, foi criado um modelo computacional usando o *software Microsoft Excel*. O método foi aplicado em um caso de seleção de fornecedores “verdes”, no qual 10 fornecedores de uma empresa do setor metal mecânico foram avaliados com base em 5 critérios. Sobre a estrutura deste artigo, a seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre assuntos relacionados à seleção de fornecedores “verdes” e sobre *fuzzy-TOPSIS*, a seção 3 descreve os procedimentos metodológicos utilizados neste estudo, a seção 4 apresenta o caso de aplicação do método *fuzzy-TOPSIS* e a seção 5 foca nas conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Seleção de Fornecedores “Verdes”

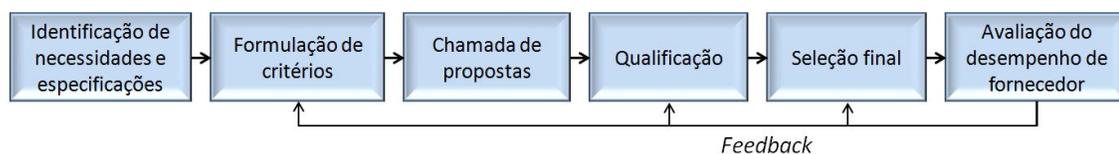
Nas duas últimas décadas, muitos pesquisadores e gestores passaram a se interessar pelo gerenciamento de cadeias de suprimento “verdes” (*Green Supply Chain Management*). Como a seleção de fornecedores é uma das atividades chave da gestão de cadeias de suprimento, a teoria sobre gerenciamento de fornecedores passou a ser revisada e atualizada, de modo a considerar os aspectos ambientais em ascensão (BEAMON, 1999; YANG; WU,

2007). Assim, surgiu o conceito de compras “verdes”, que segundo Igarashi, De Boer e Fet (2013), é uma prática de compra ambientalmente consciente que reduz as fontes de resíduos e promove a reciclagem e a recuperação dos materiais sem adversamente afetar os requisitos de desempenho do material comprado.

O processo de seleção de fornecedores é definido por De Boer, Labro e Morlacchi (2001) como uma sequência de 4 etapas, sendo elas:

- i. **Definição do problema:** Nesta etapa a empresa compradora deve se decidir entre fabricar internamente ou terceirizar a produção (“*make or buy*”). No caso da terceirização, é necessário definir a quantidade de fornecedores a serem contratados para suprir o item;
- ii. **Formulação dos critérios:** A organização deve determinar a lista dos critérios que serão utilizados na avaliação dos fornecedores. Estes critérios podem ser quantitativos ou qualitativos, e abranger fatores de nível operacional, tático ou até mesmo estratégico;
- iii. **Qualificação:** A etapa de qualificação consiste na eliminação das alternativas que não atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pelo comprador. Tais requisitos podem ser relacionados, por exemplo, à localização geográfica ou à existência de certificação de qualidade ou certificação ambiental;
- iv. **Escolha final:** A última etapa consiste na elaboração de um *ranking* dos fornecedores qualificados por meio da aplicação de uma ou mais técnicas quantitativas de apoio à tomada de decisão. O *ranking* de fornecedores deve ser formado a partir da ordenação das pontuações finais de cada um deles, as quais devem ser calculadas de acordo com o desempenho alcançado em cada critério. Se mais de um fornecedor for escolhido, deve-se também determinar as quantidades de item a serem alocadas para cada fornecedor.

Com base no estudo de De Boer, Labro e Morlacchi (2001), Igarashi, De Boer e Fet (2013) propuseram um modelo de seleção de fornecedores “verdes”, ilustrado na Figura 1. Nesse modelo, o processo de seleção começa com a identificação das necessidades ambientais do comprador. Em seguida, os tomadores de decisão devem chegar a um consenso sobre os critérios de seleção utilizados para então lançar uma chamada de propostas (licitação) para as alternativas de fornecimento. Após os candidatos submeterem suas informações ao comprador, é feita uma pré-seleção (ou qualificação) dos fornecedores que atendem aos requisitos básicos. Os fornecedores qualificados são avaliados mais detalhadamente na etapa de seleção final. Após a contratação do fornecedor, inicia-se o monitoramento do desempenho do mesmo. Os resultados dessa etapa e o aprendizado gerado ao longo de todo o processo podem ser usados para realimentar as etapas anteriores, de modo a melhorar continuamente os critérios usados e os níveis de desempenho requeridos.



**Figura 1.** Etapas da seleção de fornecedores “verdes”. Fonte: Igarashi, De Boer e Fet (2013)

## 2.2 Critérios e Técnicas de Seleção de Fornecedores “Verdes”

Os critérios de seleção de fornecedores consistem nos requisitos quantitativos ou qualitativos que são utilizados pela organização compradora para avaliar seus possíveis fornecedores. Na literatura há diversos trabalhos dedicados especificamente à proposição de critérios que podem ser utilizados no processo de seleção de fornecedores. Na década de

1960, em um estudo pioneiro que contou com a participação de 170 profissionais de compras, o fator custo foi apontado como o critério mais relevante (DICKSON, 1966). A partir da década de 1990, aspectos relacionados à qualidade, ao desempenho de entrega e ao estabelecimento de relacionamentos estratégicos com o fornecedor ganharam importância (VERMA; PULLMAN, 1998; HUANG; KESKAR, 2007). Nos anos 2000, emergiram critérios relacionados à responsabilidade ambiental do fornecedor, tais como o nível de consumo de recursos, nível de reciclagem e reutilização de materiais, a existência de uma infraestrutura de logística reversa pós-consumo, controle de resíduos sólidos, consumo de energia, certificação de gerenciamento ambiental, quantidade de poluição gerada, práticas e tecnologias de produção mais limpa, uso de materiais de origem sustentável, entre outros (JABBOUR; JABBOUR, 2009; GUREL et al., 2015). A Tabela 1 lista alguns critérios de seleção de fornecedores “verdes” adotados em aplicações utilizando técnicas quantitativas de tomada de decisão.

**Tabela 1.** Critérios de seleção de fornecedores “verdes”

| Critérios                               | Proposto por                      |                              |                  |                     |                         |                     |                     |
|---|-----------------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
|   | Walton, Handfield e Malnyk (1998) | Humphrey, Wong e Chan (2003) | Yang e Hu (2007) | Lu, Hu e Kuo (2010) | Kuo, Wang e Tien (2010) | Yeh e Chuang (2011) | Gurel et al. (2015) |
| Certificações ambientais                | X                                 | X                            | X                |                     | X                       | X                   | X                   |
| Reciclagem                              |                                   | X                            |                  |                     |                         | X                   | X                   |
| Uso de energia                          |                                   | X                            |                  | X                   | X                       | X                   | X                   |
| Geração de resíduos sólidos             | X                                 | X                            |                  | X                   |                         | X                   | X                   |
| Poluição do ar                          | X                                 | X                            |                  | X                   |                         | X                   |                     |
| Poluição da água                        |                                   | X                            |                  | X                   |                         | X                   |                     |
| Restrição de uso de produtos perigosos  | X                                 |                              |                  | X                   | X                       | X                   | X                   |
| Logística reversa                       | X                                 |                              |                  |                     |                         | X                   |                     |
| Reuso de materiais                      |                                   | X                            |                  |                     |                         |                     | X                   |
| Tecnologias ambientalmente responsáveis |                                   | X                            | X                |                     |                         |                     |                     |

Fonte: Autor

A escolha e a ponderação dos critérios influenciam diretamente sobre o resultado da decisão. Esses critérios podem ser escolhidos com base na literatura acadêmica ou desdobrados pelos funcionários da empresa de acordo com os requisitos operacionais e estratégicos do comprador. Algumas recomendações para a definição dos critérios de seleção de fornecedores são (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001; LIMA JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013):

- i.** Os critérios devem possuir um nome específico e serem definidos claramente;
- ii.** Devem ser definidos de modo consistente com as metas de desempenho e os objetivos estratégicos do comprador;
- iii.** A empresa compradora precisa desenvolver meios efetivos de medir o desempenho dos fornecedores em relação a cada um dos critérios adotados, por isso deve-se adotar uma quantidade de critérios balanceada;

- iv. O desdobramento dos objetivos estratégicos do comprador em critérios de seleção requer a participação de representantes de diferentes funções da empresa, como qualidade, logística e compras.

Além dos critérios adotados, outro aspecto importante da seleção de fornecedores “verdes” se refere às técnicas quantitativas de tomada de decisão utilizadas. A Tabela 2 sumariza uma listagem das aplicações dessas técnicas em diversas situações de seleção de fornecedores e destaca o escopo de cada estudo. Entre as técnicas utilizadas, incluem-se métodos multicritério como AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ANP (*Analytic Network Process*), DEA (*Data Envelopment Analysis*) e DEMATEL, e técnicas de inteligência artificial, como redes neurais artificiais e inferência *fuzzy*. Também são usadas técnicas de programação matemática como programação linear, programação linear multiobjetivo e algoritmo genético multiobjetivo. Na literatura podem ser encontrados diversos estudos de revisão sistemática sobre a aplicação destas técnicas na seleção de fornecedores, tais como Ho, Xu e Dey (2010), Chai, Liu e Ngau (2013) e Lima Junior, Osiro e Carpinetti (2013). Apesar de analisarem amostras diferentes, esses três estudos apontam para o uso predominante das técnicas baseadas em lógica *fuzzy*.

**Tabela 2.** Aplicações de técnicas de tomada de decisão para seleção de fornecedores

| Abordagem | Técnica (s)  | Aplicação   | Autor (es)                         |
|-----------|--|---|------------------------------------|
| Isolada   | DEMATEL  | Seleção de fornecedores de eletrônicos considerando emissões de carbono                               | Hsu et al. (2013)                  |
|           | DEA  | Aplicação simulada de seleção de fornecedores “verdes”  | Wen e Chi (2010)                   |
|           | <i>Grey entropy</i>  | Seleção de fornecedores “verdes” em empresa de manufatura de produtos elétricos                       | Yang e Hu (2007)                   |
|           | AHP  | Seleção de fornecedores socialmente responsáveis  | Mani, Agrawal e Sharma (2014)      |
|           | <i>Fuzzy-AHP</i>   | Seleção de fornecedores em linha aérea  | Rezaei, Fahim e Tavasszy (2014)    |
| Combinada | Redes neurais artificiais e método multiatributo                 | Seleção de fornecedores ambientalmente responsáveis em uma companhia de câmeras digitais de Taiwan    | Kuo, Wang e Tien (2010)            |
|           | <i>Fuzzy-AHP</i> e programação linear multiobjetivo <i>fuzzy</i> | Seleção de fornecedores para desenvolvimento de uma cadeia de suprimento com baixa emissão de carbono | Shaw et al. (2012)                 |
|           | ANP, inferência <i>fuzzy</i> e redes neurais artificiais         | Seleção de fornecedores em siderúrgica multinacional  | Kar (2015)                         |
|           | Algoritmo genético multiobjetivo                                 | Seleção de parceiros em cadeias de suprimento “verde”   | Yeh e Chuang (2011)                |
|           | <i>Fuzzy bayesian</i>  | Seleção de fornecedores em uma cadeia de suprimento de biodiesel                                      | Ferreira e Borenstein (2012)       |
|           | QFD ( <i>quality function deployment</i> ) e DEA                 | Seleção de fornecedores em um hospital privado  | Karsak e Dursun (2014)             |
|           | <i>Fuzzy SVDD (support vector domain description)</i>            | Seleção de fornecedores em uma indústria de eletrodomésticos  | Guo, Zhu e Shi (2013)              |
|           | SWOT e programação linear  | Exemplo numérico de seleção de fornecedores e alocação de ordens                                      | Ghorbani, Bahrami e Arabzad (2012) |

Fonte: Autor

Como pode ser visto na Tabela 2, enquanto algumas abordagens são baseadas em uma única técnica, outros estudos combinam duas ou mais técnicas na tentativa de obter vantagens provenientes de cada uma. Tais abordagens combinadas se dão a partir da hibridização de técnicas diferentes para formar uma nova técnica ou por meio da aplicação sequenciada de técnicas distintas em um mesmo problema (LIMA JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013).

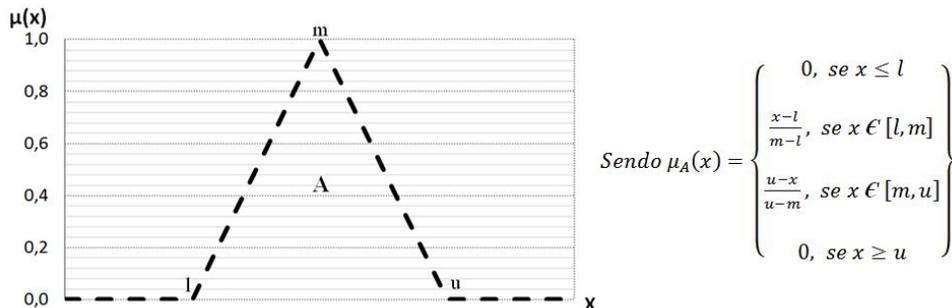
Um dos requisitos para a escolha de uma técnica adequada à seleção de fornecedores “verdes” é que esta deve permitir a inclusão e a exclusão de critérios e de fornecedores sem gerar inconsistências nos resultados (LIMA JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2014). Contudo, as metodologias baseadas nas técnicas AHP (MANI; AGRAWAL; SHARMA, 2014), ANP (KAR, 2015) e *fuzzy*-AHP (SHAW et al., 2012; REZAEI; FAHIM; TAVASSZY, 2014) podem inverter o resultado do ranqueamento sempre que novos critérios ou alternativas forem incluídos ou excluídos. Além dessa limitação, as abordagens baseadas em tais técnicas comparativas limitam a quantidade de fornecedores que podem ser avaliados simultaneamente por requererem a comparação par a par entre as alternativas avaliadas. Essa limitação também é válida para as abordagens baseadas em DEMATEL (HSU et al., 2013). Já as metodologias baseadas em redes neurais artificiais (KUO; WANG; TIEN, 2010) e em inferência *fuzzy* (KAR, 2015) dificultam a avaliação de fornecedores por requererem demasiados dados para o ajuste dos parâmetros internos dos modelos computacionais.

Diante do exposto, verifica-se que muitas das abordagens encontradas na literatura para apoiar a seleção de fornecedores não são plenamente apropriadas a este domínio de problema devido ao uso de técnicas inadequadas. Apesar de na literatura existir um grande número de estudos que aplicam técnicas baseadas em lógica *fuzzy* na seleção de fornecedores “verdes”, não foram encontradas aplicações da técnica *fuzzy*-TOPSIS. As subseções a seguir discutem os princípios dessa técnica.

## 2.4 Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (*Fuzzy Set Theory* - FST) foi proposta por Zadeh (1965) e vem sendo usada na modelagem de problemas de tomada de decisão que envolvem incerteza, informações imprecisas e julgamentos subjetivos. A adequação da FST ao tratamento de incerteza se deve principalmente à lógica que define o grau de inclusão dos elementos em conjuntos *fuzzy*: a FST modela um conjunto *fuzzy* por meio de uma função de pertinência  $\mu_A(x): X \rightarrow [0.0, 1.0]$ , para permitir níveis parciais de inclusão. Ao contrário da teoria dos conjuntos clássica, em que um conjunto pode ser definido usando uma função característica  $\mu_A(x): X \rightarrow \{0.0, 1.0\}$ , na teoria dos conjuntos *fuzzy* e na lógica *fuzzy* (versão lógica desta teoria), como  $\mu_A(x)$  toma valores no intervalo contínuo  $[0.0, 1.0]$ , admite-se a existência de níveis intermediários entre os valores de pertinência “falso” (0.0) e “verdadeiro” (1.0) (PEDRYCZ; GOMIDE, 2007; ZADEH, 1965).

Números *fuzzy* são constituídos por conjuntos *fuzzy* que obedecem às condições de normalidade e convexidade. Conforme ilustra a Figura 2, um número *fuzzy* triangular pode ser escrito na forma  $(l, m, u)$ , em que  $m$  denota um valor *crisp* formal para o conjunto *fuzzy*,  $l$  é o limite inferior e  $u$  é o limite superior (PEDRYCZ; GOMIDE, 2007). A morfologia de um número *fuzzy*, definida por meio do comportamento de sua função de pertinência  $\mu(x)$ , permite a quantificação da imprecisão associada a uma dada informação. Operações algébricas com dois números triangulares,  $\tilde{A}$  e  $\tilde{B}$ , podem ser feitas usando a equação 1 para soma, equação 2 para subtração, equação 3 para multiplicação e equação 4 para divisão.



**Figura 2.** Número *fuzzy* triangular. Fonte: Lima Junior e Carpinetti (2014)

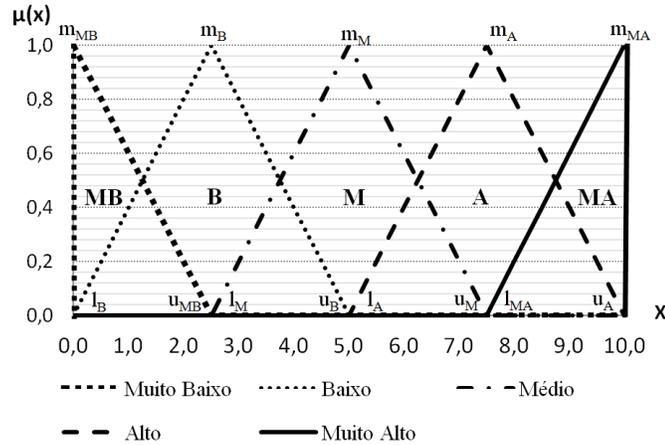
$$\tilde{A} + \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] + [l_B, m_B, u_B] = [l_A + l_B, m_A + m_B, u_A + u_B] \quad (1)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] - [l_B, m_B, u_B] = [l_A - u_B, m_A - m_B, u_A - l_B] \quad (2)$$

$$\tilde{A} * \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] * [l_B, m_B, u_B] = [l_A * l_B, m_A * m_B, u_A * u_B] \quad (3)$$

$$\tilde{A} / \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] / [l_B, m_B, u_B] = \left[ \frac{l_A}{u_B}, \frac{m_A}{m_B}, \frac{u_A}{l_B} \right] \quad (4)$$

Na maioria dos métodos de tomada de decisão baseados em lógica *fuzzy*, as pontuações das alternativas e o peso dos critérios de decisão são definidos como variáveis linguísticas. Uma variável linguística é aquela cujos valores são sentenças definidas em linguagem natural ou artificial, permitindo distinguir qualificações por meio de faixas de gradações. O uso de variáveis linguísticas requer a definição de um conjunto de termos linguísticos para mensurar seus valores de forma adequada. Termos linguísticos são comumente representados por números *fuzzy* triangulares e trapezoidais. Por exemplo, conforme ilustra a Figura 3, o valor da variável linguística “nível de emissão de poluição do fornecedor” pode ser medido por meio dos termos linguísticos “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto” e “muito alto” (ZADEH, 1965; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2014).



**Figura 3.** Exemplo de escala de valores linguísticos. Fonte: Lima Junior e Carpinetti (2014)

## 2.5 O Método *Fuzzy*-TOPSIS

O método TOPSIS foi proposto inicialmente por Hwang e Yoon (1981). Visando adequar o método TOPSIS para tomada de decisão em cenários de incerteza, Chen (2000) propôs a primeira combinação entre este método e a teoria dos conjuntos *fuzzy*, denominada *fuzzy*-TOPSIS. O princípio básico do TOPSIS consiste em escolher uma alternativa que esteja tão próxima quanto possível da solução ideal positiva e o mais distante quanto possível da solução ideal negativa. A solução ideal é formada tomando-se os melhores valores alcançados pelas alternativas durante a avaliação em relação a cada critério de decisão, enquanto a solução ideal negativa é composta de forma similar, tomando-se os piores valores. O princípio do método *fuzzy*-TOPSIS também é baseado na distância entre as pontuações e as soluções ideais positiva e negativa. Os passos desse método são descritos a seguir (CHEN, 2000; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2014):

- i. Agregar os valores linguísticos fornecidos por cada tomador de decisão ( $DM_i$ ) em relação à pontuação das alternativas e ao peso dos critérios. A equação 5 é usada para agregar as pontuações das alternativas. Nessa equação,  $\tilde{x}_{ij}^r$  descreve as pontuações da

alternativa  $A_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), em relação ao critério  $C_j$  ( $j = 1, \dots, m$ ), dado pelo tomador de decisão  $DM_r$  ( $r = 1, \dots, k$ ). As avaliações dos pesos dos critérios são agregadas usando a equação 6, em que  $\tilde{w}_j^r$  descreve o peso do critério, dado por  $DM_r$ ;

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^r + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (5)$$

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{K} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad (6)$$

ii. Montar uma matriz de decisão *fuzzy*  $\tilde{D}$  para as pontuações das alternativas e um vetor *fuzzy*  $\tilde{W}$  para o peso dos critérios de acordo com as equações 7 e 8, respectivamente;

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} & \dots & \tilde{x}_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nj} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (8)$$

iii. Normalizar a matriz  $\tilde{D}$ . A matriz normalizada  $\tilde{R}$  é dada pela equação 9, sendo  $\tilde{r}_{ij}$  obtido por meio das equações 10 ou 11;

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (9)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left( \frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right), \text{ sendo } u_j^+ = \max_i u_{ij} \text{ (critérios de benefício)} \quad (10)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left( \frac{l_j^-}{u_{ij}^-}, \frac{l_j^-}{m_{ij}^-}, \frac{l_j^-}{l_{ij}^-} \right), \text{ sendo } l_j^- = \min_i l_{ij} \text{ (critérios de custo)} \quad (11)$$

iv. Obter a matriz normalizada e ponderada  $\tilde{V}$  (equação 12) por meio da multiplicação dos pesos  $\tilde{w}_j$  pelos elementos  $\tilde{r}_{ij}$  da matriz normalizada, conforme a equação 13;

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (12)$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad (13)$$

v. Definir a solução ideal positiva *fuzzy* (*Fuzzy Positive Ideal Solution*, FPIS,  $A^+$ ) e a solução ideal negativa (*Fuzzy Negative Ideal Solution*, FNIS,  $A^-$ ) conforme as equações 14 e 15, em que  $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$  e  $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$ ;

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad (14)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (15)$$

vi. Calcular a distância  $D_i^+$  entre os valores de FPIS e os valores da matriz  $\tilde{R}$  usando a equação 16. Analogamente, calcular a distância  $D_i^-$  entre os valores de FNIS e a matriz  $\tilde{R}$  usando a equação 17. Nas equações 16 e 17,  $d(\cdot, \cdot)$  representa a distância entre dois números *fuzzy* de acordo com o método *vertex*, que, para o caso de números *fuzzy* triangulares, pode ser obtida por meio da equação 18;

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (16)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (17)$$

$$d(\tilde{x}, \tilde{z}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_x - l_z)^2 + (m_x - m_z)^2 + (u_x - u_z)^2]} \quad (18)$$

vii. Calcular o coeficiente de aproximação  $CC_i$  de acordo com a equação 19;

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (19)$$

viii. Definir um *ranking* por meio da ordenação decrescente dos valores de  $CC_i$ . Quanto mais próximo de 1,0 for este valor, melhor é o desempenho global da alternativa.

### 3. Procedimentos Metodológicos

Conforme a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), a presente pesquisa pode ser caracterizada como uma pesquisa quantitativa empírica descritiva baseada em modelagem e simulação. Neste tipo de pesquisa, utilizam-se modelos quantitativos que representam variáveis específicas e inter-relacionadas dentro de um domínio de problema. Seguindo as definições propostas por Pidd (2004), as simulações realizadas neste estudo são caracterizadas como discretas, estáticas e determinísticas.

Esta pesquisa pode ser dividida nas etapas de pesquisa bibliográfica, modelagem e simulação computacional. A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir da análise de livros e artigos de periódicos internacionais sobre seleção de fornecedores “verdes”, lógica *fuzzy* e *fuzzy-TOPSIS*. Esta etapa forneceu embasamento teórico para a etapa seguinte, de modelagem computacional.

A implementação computacional do *fuzzy-TOPSIS* foi realizada usando o *software Microsoft Excel*. Um especialista que atua no desenvolvimento de fornecedores de uma empresa do setor metal mecânico foi entrevistado para fornecer alguns julgamentos usados na parametrização e na aplicação do modelo computacional. Com o auxílio dos autores deste estudo, esse especialista definiu os critérios de seleção de fornecedores usados na aplicação, os termos linguísticos usados na avaliação dos pesos dos critérios e do desempenho dos fornecedores, os valores dos pesos dos critérios adotados e as estimativas de pontuação de um conjunto de fornecedores. Utilizando os julgamentos coletados do especialista, foi realizada uma aplicação simulada do *fuzzy-TOPSIS*, a qual será detalhada na seção a seguir.

### 4. Aplicação do Método *Fuzzy-TOPSIS* na Seleção de Fornecedores “Verdes”

Uma empresa do setor metal mecânico precisa selecionar um fornecedor ambientalmente responsável para suprir a demanda por um componente de um novo produto. Para isso, foram avaliadas 10 alternativas dentre os fornecedores já qualificados pela empresa. Um funcionário da empresa atuou como tomador de decisão para escolher os critérios e fornecer os julgamentos requeridos pelo método *fuzzy-TOPSIS*. Com base nos estudos de Humphrey, Wong e Chan (2003), Yeh e Chuang (2011) e Gurel et al. (2015), o tomador de decisão optou pelos seguintes critérios:

- $C_1$ : reaproveitamento de matérias primas perdidas no processo;
- $C_2$ : utilização de práticas de gestão e tecnologias limpas;
- $C_3$ : logística reversa de embalagens;
- $C_4$ : controle de poluição;

- C<sub>5</sub>: reaproveitamento de energia e eficiência energética;

As Tabelas 3 e 4 descrevem as escalas linguísticas adotadas para avaliar o desempenho dos fornecedores e o peso dos critérios, respectivamente. A Figura 4 ilustra essas escalas. Com base em Chen (2000) e Lima Junior e Carpinetti (2014), optou-se por usar números *fuzzy* triangulares por estes apresentarem maior simplicidade de modelagem e menor complexidade computacional.

**Tabela 3.** Escala linguística utilizada para avaliação das alternativas

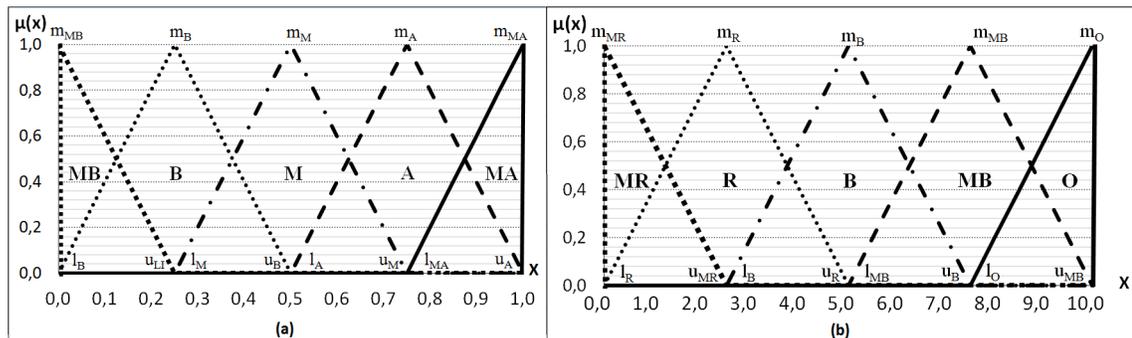
| Valor linguístico | Valor <i>fuzzy</i> |       |       |
|-------------------|--------------------|-------|-------|
|                   | l                  | m     | u     |
| Ótimo (O)         | 7,50               | 10,00 | 10,00 |
| Muito Bom (MB)    | 5,00               | 7,50  | 10,00 |
| Bom (B)           | 2,50               | 5,00  | 7,50  |
| Ruim (R)          | 0,00               | 2,50  | 5,00  |
| Muito Ruim (MR)   | 0,00               | 0,00  | 2,50  |

Fonte: Autor

**Tabela 4.** Escala linguística utilizada para avaliação dos pesos dos critérios

| Valor linguístico | Valor <i>fuzzy</i> |      |      |
|-------------------|--------------------|------|------|
|                   | l                  | m    | u    |
| Muito Alto (MA)   | 0,75               | 1,00 | 1,00 |
| Alto (A)          | 0,50               | 0,75 | 1,00 |
| Médio (M)         | 0,25               | 0,50 | 0,75 |
| Baixo (B)         | 0,00               | 0,25 | 0,50 |
| Muito Baixo (MB)  | 0,00               | 0,00 | 0,25 |

Fonte: Autor



**Figura 4.** Representação gráfica das escalas para o peso dos critérios (a) e o desempenho dos fornecedores (b)

Com base em informações históricas e na experiência do tomador de decisão, o desempenho de 10 fornecedores foi avaliado em relação aos 5 critérios adotados. A Tabela 5 mostra os julgamentos linguísticos referentes ao desempenho das alternativas. Já a Tabela 6 mostra os julgamentos relativos ao peso de cada critério.

**Tabela 5.** Matriz de avaliação linguística do tomador de decisão sobre o desempenho dos fornecedores

| Fornecedores   | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A <sub>1</sub> | O              | O              | O              | MB             | MR             |
| A <sub>2</sub> | O              | MB             | MB             | B              | R              |
| A <sub>3</sub> | MB             | MB             | O              | O              | MR             |
| A <sub>4</sub> | O              | MB             | MB             | MB             | MR             |

|                 |    |    |    |    |   |
|-----------------|----|----|----|----|---|
| A <sub>5</sub>  | B  | B  | B  | B  | B |
| A <sub>6</sub>  | O  | MB | R  | R  | R |
| A <sub>7</sub>  | O  | O  | MB | MR | R |
| A <sub>8</sub>  | B  | MB | R  | B  | R |
| A <sub>9</sub>  | B  | B  | R  | B  | B |
| A <sub>10</sub> | MB | MB | R  | MR | R |

Fonte: Autor

**Tabela 6.** Matriz de avaliação linguística do tomador de decisão sobre o peso dos critérios

|   | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| W | M              | MA             | A              | MA             | A              |

Fonte: Autor

Os valores mostrados nas Tabelas 5 e 6 foram convertidos em números *fuzzy* conforme os valores das escalas das Tabelas 3 e 4. A Tabela 7 apresenta a matriz de decisão e o vetor de pesos resultantes.

**Tabela 7.** Números *fuzzy* correspondentes aos valores fornecidos pelo tomador de decisão

|                 | C <sub>1</sub>       | C <sub>2</sub>       | C <sub>3</sub>       | C <sub>4</sub>       | C <sub>5</sub>     |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| A <sub>1</sub>  | (7.50, 10.00, 10.00) | (7.50, 10.00, 10.00) | (7.50, 10.00, 10.00) | (5.00, 7.50, 10.00)  | (0.00, 0.00, 2.50) |
| A <sub>2</sub>  | (7.50, 10.00, 10.00) | (5.00, 7.50, 10.00)  | (5.00, 7.50, 10.00)  | (2.50, 5.00, 7.50)   | (0.00, 2.50, 5.00) |
| A <sub>3</sub>  | (5.00, 7.50, 10.00)  | (5.00, 7.50, 10.00)  | (7.50, 10.00, 10.00) | (7.50, 10.00, 10.00) | (0.00, 0.00, 2.50) |
| A <sub>4</sub>  | (7.50, 10.00, 10.00) | (5.00, 7.50, 10.00)  | (5.00, 7.50, 10.00)  | (5.00, 7.50, 10.00)  | (0.00, 0.00, 2.50) |
| A <sub>5</sub>  | (2.50, 5.00, 7.50)   | (2.50, 5.00, 7.50)   | (2.50, 5.00, 7.50)   | (2.50, 5.00, 7.50)   | (2.50, 5.00, 7.50) |
| A <sub>6</sub>  | (7.50, 10.00, 10.00) | (5.00, 7.50, 10.00)  | (0.00, 2.50, 5.00)   | (0.00, 2.50, 5.00)   | (0.00, 2.50, 5.00) |
| A <sub>7</sub>  | (7.50, 10.00, 10.00) | (7.50, 10.00, 10.00) | (5.00, 7.50, 10.00)  | (0.00, 0.00, 2.50)   | (0.00, 2.50, 5.00) |
| A <sub>8</sub>  | (2.50, 5.00, 7.50)   | (5.00, 7.50, 10.00)  | (0.00, 2.50, 5.00)   | (2.50, 5.00, 7.50)   | (0.00, 2.50, 5.00) |
| A <sub>9</sub>  | (2.50, 5.00, 7.50)   | (2.50, 5.00, 7.50)   | (0.00, 2.50, 5.00)   | (2.50, 5.00, 7.50)   | (2.50, 5.00, 7.50) |
| A <sub>10</sub> | (5.00, 7.50, 10.00)  | (5.00, 7.50, 10.00)  | (5.00, 2.50, 5.00)   | (7.50, 0.00, 2.50)   | (0.00, 2.50, 5.00) |
| $\tilde{W}$     | (0.25, 0.50, 0.75)   | (0.75, 1.00, 1.00)   | (0.50, 0.75, 1.00)   | (0.75, 1.00, 1.00)   | (0.50, 0.75, 1.00) |

Fonte: Autor

Os dados da Tabela 7 foram apresentados ao modelo *fuzzy*-TOPSIS para computar o desempenho dos fornecedores. A Tabela 8 apresenta os resultados da ponderação conforme a equação 10. Já a Tabela 9 apresenta os resultados da normalização. Como um valor de pontuação alta nos critérios adotados contribui positivamente para o desempenho do fornecedor, estes foram normalizados como critérios de benefício usando a equação 13.

**Tabela 8.** Matriz de decisão ponderada

|                 | C <sub>1</sub>     | C <sub>2</sub>     | C <sub>3</sub>     | C <sub>4</sub>     | C <sub>5</sub>     |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A <sub>1</sub>  | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.33) |
| A <sub>2</sub>  | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.00, 0.33, 0.67) |
| A <sub>3</sub>  | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.33) |
| A <sub>4</sub>  | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.33) |
| A <sub>5</sub>  | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.33, 0.67, 1.00) |
| A <sub>6</sub>  | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.25, 0.50) | (0.00, 0.25, 0.50) | (0.00, 0.33, 0.67) |
| A <sub>7</sub>  | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.75, 1.00, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.25) | (0.00, 0.33, 0.67) |
| A <sub>8</sub>  | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.25, 0.50) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.00, 0.33, 0.67) |
| A <sub>9</sub>  | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.00, 0.25, 0.50) | (0.25, 0.50, 0.75) | (0.33, 0.67, 1.00) |
| A <sub>10</sub> | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.50, 0.75, 1.00) | (0.50, 0.25, 0.50) | (0.75, 0.00, 0.25) | (0.00, 0.33, 0.67) |

Fonte: Autor

**Tabela 9.** Matriz de decisão ponderada e normalizada

|                 | C <sub>1</sub>     | C <sub>2</sub>     | C <sub>3</sub>     | C <sub>4</sub>     | C <sub>5</sub>     |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A <sub>1</sub>  | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.56, 1.00, 1.00) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.33) |
| A <sub>2</sub>  | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.25, 0.56, 1.00) | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.00, 0.25, 0.67) |
| A <sub>3</sub>  | (0.13, 0.38, 0.75) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.56, 1.00, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.33) |
| A <sub>4</sub>  | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.25, 0.56, 1.00) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.33) |
| A <sub>5</sub>  | (0.06, 0.25, 0.56) | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.13, 0.38, 0.75) | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.17, 0.50, 1.00) |
| A <sub>6</sub>  | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.19, 0.50) | (0.00, 0.25, 0.50) | (0.00, 0.25, 0.67) |
| A <sub>7</sub>  | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.56, 1.00, 1.00) | (0.25, 0.56, 1.00) | (0.00, 0.00, 0.25) | (0.00, 0.25, 0.67) |
| A <sub>8</sub>  | (0.06, 0.25, 0.56) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.00, 0.19, 0.50) | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.00, 0.25, 0.67) |
| A <sub>9</sub>  | (0.06, 0.25, 0.56) | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.00, 0.19, 0.50) | (0.19, 0.50, 0.75) | (0.17, 0.50, 1.00) |
| A <sub>10</sub> | (0.13, 0.38, 0.75) | (0.38, 0.75, 1.00) | (0.25, 0.19, 0.50) | (0.56, 0.00, 0.25) | (0.00, 0.25, 0.67) |

Fonte: Autor

Usando as equações 14 e 15, foram definidas as soluções ideais positiva e negativa, conforme mostra a Tabela 10. Através da aplicação do método *vertex*, de acordo com as equações 16, 17 e 18, calculou-se as distâncias entre os valores da Tabela 9 e as soluções ideais positiva e negativa. A Tabela 11 mostra os valores das distâncias entre o desempenho das alternativas e a solução ideal positiva, enquanto a Tabela 12 mostra os valores da distância entre o desempenho das alternativas e a solução ideal negativa.

**Tabela 10.** Solução ideal positiva (A<sup>+</sup>) e solução ideal negativa (A<sup>-</sup>)

|                | C <sub>1</sub>     | C <sub>2</sub>     | C <sub>3</sub>     | C <sub>4</sub>     | C <sub>5</sub>     |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| A <sup>+</sup> | (1.00, 1.00, 1.00) | (1.00, 1.00, 1.00) | (1.00, 1.00, 1.00) | (1.00, 1.00, 1.00) | (1.00, 1.00, 1.00) |
| A <sup>-</sup> | (0.00, 0.00, 0.00) | (0.00, 0.00, 0.00) | (0.00, 0.00, 0.00) | (0.00, 0.00, 0.00) | (0.00, 0.00, 0.00) |

Fonte: Autor

**Tabela 11.** Distâncias entre o desempenho dos fornecedores e a solução ideal positiva

|                 | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | D <sup>+</sup> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A <sub>1</sub>  | 0.569          | 0.253          | 0.389          | 0.389          | 0.903          | 2.502          |
| A <sub>2</sub>  | 0.569          | 0.389          | 0.501          | 0.569          | 0.747          | 2.776          |
| A <sub>3</sub>  | 0.637          | 0.389          | 0.389          | 0.253          | 0.903          | 2.570          |
| A <sub>4</sub>  | 0.569          | 0.389          | 0.501          | 0.389          | 0.903          | 2.751          |
| A <sub>5</sub>  | 0.738          | 0.569          | 0.637          | 0.569          | 0.561          | 3.075          |
| A <sub>6</sub>  | 0.569          | 0.389          | 0.798          | 0.777          | 0.747          | 3.280          |
| A <sub>7</sub>  | 0.569          | 0.253          | 0.501          | 0.924          | 0.747          | 2.994          |
| A <sub>8</sub>  | 0.738          | 0.389          | 0.798          | 0.569          | 0.747          | 3.241          |
| A <sub>9</sub>  | 0.738          | 0.569          | 0.798          | 0.569          | 0.561          | 3.236          |
| A <sub>10</sub> | 0.637          | 0.389          | 0.701          | 0.765          | 0.747          | 3.238          |

Fonte: Autor

**Tabela 12.** Distâncias entre o desempenho dos fornecedores e a solução ideal negativa

|                 | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | D <sup>-</sup> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A <sub>1</sub>  | 0.53           | 0.88           | 0.75           | 0.75           | 0.19           | 3.110          |
| A <sub>2</sub>  | 0.53           | 0.75           | 0.68           | 0.53           | 0.41           | 2.906          |
| A <sub>3</sub>  | 0.49           | 0.75           | 0.75           | 0.88           | 0.19           | 3.068          |
| A <sub>4</sub>  | 0.53           | 0.75           | 0.68           | 0.75           | 0.19           | 2.909          |
| A <sub>5</sub>  | 0.36           | 0.53           | 0.49           | 0.53           | 0.65           | 2.562          |
| A <sub>6</sub>  | 0.53           | 0.75           | 0.31           | 0.32           | 0.41           | 2.327          |
| A <sub>7</sub>  | 0.53           | 0.88           | 0.68           | 0.14           | 0.41           | 2.644          |
| A <sub>8</sub>  | 0.36           | 0.75           | 0.31           | 0.53           | 0.41           | 2.362          |
| A <sub>9</sub>  | 0.36           | 0.53           | 0.31           | 0.53           | 0.65           | 2.381          |
| A <sub>10</sub> | 0.49           | 0.75           | 0.34           | 0.36           | 0.41           | 2.350          |

Fonte: Autor

Usando os dados das Tabelas 11 e 12, por meio da aplicação da equação 19, foi calculado coeficiente de aproximação ( $CC_i$ ) de cada uma das alternativas. A Tabela 13 apresenta um *ranking* dos fornecedores avaliados, destacando sua classificação final. Nota-se que o fornecedor  $A_1$  tem o maior desempenho global, o que significa que é o fornecedor que mais se aproxima da solução ideal positiva e também é o mais distante da solução ideal negativa. Isso se deve ao fato de este fornecedor apresentar um desempenho ótimo em relação aos critérios “reaproveitamento de matérias primas perdidas no processo”, “utilização de práticas de gestão e tecnologias limpas” e “logística reversa de embalagens”. Portanto, este fornecedor deve ser selecionado para o fornecimento do novo item. Caso a empresa deseje contratar um segundo fornecedor para minimizar o risco de abastecimento, conforme os dados da Tabela 12, a ordem de prioridade para a contratação seria  $A_3 > A_4 > A_2 > A_7 > A_5 > A_9 > A_8 > A_{10} > A_6$ .

**Tabela 13.** *Ranking* dos fornecedores avaliados

| Fornecedor | Desempenho global ( $CC_i$ ) | Classificação |
|------------|------------------------------|---------------|
| $A_1$      | 0.554                        | 1°            |
| $A_2$      | 0.511                        | 4°            |
| $A_3$      | 0.544                        | 2°            |
| $A_4$      | 0.514                        | 3°            |
| $A_5$      | 0.455                        | 6°            |
| $A_6$      | 0.415                        | 10°           |
| $A_7$      | 0.469                        | 5°            |
| $A_8$      | 0.422                        | 8°            |
| $A_9$      | 0.424                        | 7°            |
| $A_{10}$   | 0.421                        | 9°            |

Fonte: Autor

## 5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma aplicação do método *fuzzy*-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores “verdes”. Este método se mostra adequado para modelar critérios quantitativos e qualitativos e para apoiar a tomada de decisão em grupo e em situações de incerteza. Diferentemente de outras técnicas comparativas existentes na literatura, como AHP, ANP, *fuzzy*-AHP e *fuzzy*-ANP, o método *fuzzy*-TOPSIS possibilita utilizar um número não limitado de alternativas e de critérios e não causa inversão de *ranking* quando novas alternativas são incluídos. Além disso, o *fuzzy*-TOPSIS requer uma quantidade menor de julgamentos que as técnicas comparativas, os sistemas de inferência *fuzzy* e as redes neurais artificiais, contribuindo assim para a agilidade na tomada de decisão.

Os resultados apresentados são especialmente úteis para auxiliar profissionais e pesquisadores envolvidos com a gestão de cadeia de suprimentos e com a seleção de fornecedores “verdes” durante a escolha e aplicação de um método adequado aos requisitos deste domínio de problema. Esse estudo também pode ser útil para ajudar pesquisadores iniciantes na área de tomada de decisão multicritério e de lógica *fuzzy*.

Pesquisas futuras podem ser feitas a partir da aplicação do método *fuzzy*-TOPSIS no monitoramento do desempenho dos fornecedores “verdes” após a etapa de contratação, na medição de desempenho de cadeias de suprimento “verdes” e na avaliação de programas de desenvolvimento de fornecedores. Pesquisas futuras também podem integrar o *fuzzy*-TOPSIS com técnicas como o ANP e DEMATEL para permitir a consideração das relações de interdependência entre os critérios usados.

## Agradecimentos

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

## Referências

- BEAMON, B.M. *Designing the green supplier selection*. **Logistics Information Management**, v.12, p. 332-342, 1999.
- BERTRAND, J.W.; FRANSOO, J. *Operations management research methodologies using quantitative modeling*. **International Journal of Operations and productions Management**, v.22, p.241-264, 2002.
- CHAI, J., LIU, J. N. K. & NGAU E. W. T. *Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature*. **Expert Systems with Applications**, v. 40, p. 3872-3885, 2013.
- CHEN, C. T. *Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment*. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 114, p. 1-9, 2000.
- DE BOER, L.; LABRO, E.; MORLACCHI, P. *A review of methods supporting supplier selection*. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v.7, p.75-89, 2001.
- DE BOER, L.; WEGEN, L.V.D.; TELGEN, J. *Outranking methods in supporting of supplier selection*. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v.4, p.109-118, 1998
- DICKSON, G. W. *An analysis of vendor selection systems and decisions*. **Journal of Purchasing**, v. 2, p.5-17, 1966.
- FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D. *A fuzzy-bayesian model for supplier selection*. **Expert Systems with Applications**, v.39, p. 7834-7844, 2012.
- GHORBANI, M.; BAHRAMI, M.; ARABZAD, S.M. *An integrated model for supplier selection and order allocation: Using Shannon entropy, SWOT and linear programming*. **Procedia – Social and Behavior Sciences**, v. 41, p. 521-527, 2012.
- GUO, X.; ZHU, Z.; SHI, J. *Integration of semi-fuzzy SVDD and CC-rule method for supplier selection*. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n.4, p. 2083-2097, 2013.
- GUREL, O.; ACAR, A.Z.; ONDEN, I.; GUMUS, I., *Determinants of the green supplier selection*. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v.181, p.131-139, 2015.
- HO, W.; XU, X.; DEY, P.K. *Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review*. **European Journal of Operational Research**, v. 202, p.16-24, 2010.
- HSU, C.W.; KUO, T.C.; CHEN, S.H.; HU, A.H. *Using DEMATEL to develop a carbon management model of supplier selection in green supply chain management*. **Journal of cleaner production**. v.56, p. 164-172, 2013.
- HUANG, S.H.; KESKAR, H. *Comprehensive and configurable metrics for supplier selection*. **International Journal of Production Economics**, v. 105, p. 510-523, 2007.
- HUMPHREYS, P.K.; WONG, Y.K.; CHAN, F.T.S. *Integrating environmental criteria in the supplier selection process*. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 138, p. 349-356, 2003.
- HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. Springer-Verlag: Berlin, 1981.
- IGARASHI, M.; DE BOER, L.; FET, A.M. *What is required for greener supplier selection? A literature review and conceptual model development*. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 9, p. 247-263, 2013.
- JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C. *Are supplier selection criteria going green? Case studies of companies in Brazil*. **Industrial Management & Data Systems**, v. 109, n. 4, p. 477-495, 2009.
- KAR, A.K. *A hybrid group decision support system for supplier selection using analytic hierarchy process, fuzzy set theory and neural network*. **Journal of Computational Science**, v.6, p. 23-33, 2015.
- KARSAK, E.E.; DURSUN, M. *An integrated supplier selection methodology incorporating QFD and DEA with imprecise data*. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 16, p. 6995-7004, 2014.
- KUO, R.J.; WANG, Y.C.; TIEN, F.C.. *Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection*. **Journal of cleaner production**. v.18, p. 1161-1170, 2010.
- LIMA JÚNIOR, F.R.; CARPINETTI, L.C.R. *Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores*. **Gestão & Produção**, v. 22, p. 17-34, 2014.

- LIMA JÚNIOR, 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.
- LIMA JÚNIOR, F.R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L.C.R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. *Gestão & Produção*, v.20, p. 781-801, 2013.
- LU, L.Y.Y.; WU, C.H.; KUO, T.C. *Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis. International Journal of Production Research*, v.45, p. 4317-4331, 2007.
- MANI, V.; AGRAWAL, R.; SHARMA, V. *Supplier selection using social sustainability: AHP based approach in India. International Strategic Management Review*, v.2, p. 98-112, 2014.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. *Fuzzy Systems Engineering – Toward Human-Centric Computing*. Wiley, New Jersey, 2007.
- PIDD, M. *Computer Simulation in management Science*. 5 ed. Lancaster, United Kingdom: Ed. John. Wiley & Sons, 2004.
- REZAEI, J.; FAHIM, P.B.M.; TAVASSZY, L. *Supplier selection in the airline retail industry using a funnel methodology: Conjunctive screening and fuzzy AHP. Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 18, p. 8165-8179, 2014.
- SHAW, K.; SHANKAR, R.; YADAV, S.S.; THAKUR, L.S. *Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain. Expert Systems with Applications*, v.39, p. 8182-8192, 2012.
- VERMA, R.; PULLMA, M. E. *An analysis of the supplier selection process. International Journal of Management Science*, v. 26, n. 6, p. 739-750, 1998.
- WALTON, S.V.; HANDFIELD, R.B.; MELNYK, S.A. *The green supply chain: Integrating suppliers into environmental management process. International Journal of Purchasing and Materials Management*, v. 34, n. 1, p. 2-11, 1998.
- WANG, W.A. *A fuzzy linguistic computing approach to supplier evaluation. Applied Mathematical Modelling*, v. 34, p.3130-3141, 2010.
- WEN, U.P.; CHI, J.M. *Developing green supplier selection procedure: A DEA approach. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM'10)*, p. 70-74, China, October, 2010.
- YANG, Y.; WU, L. *Grey Entropy Method for Green Supplier Selection. In: Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'07)*, p. 4682-4685, Shanghai, China, September, 2007.
- YEH, W.C.; CHUANG, M.C. *A Using multi-objective genetic algorithm for partner selection in green supply chain problems. Experts Systems with applications*, v.38, p. 4244-4253, 2011.
- ZADEH, L. A. *Fuzzy Sets. Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.