



DESAFIOS NA APLICAÇÃO DE MÉTODOS MULTICRITÉRIO PARA A TOMADA DE DECISÃO EM POLÍTICAS PÚBLICAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS

Gracieli de Abreu SIMPLICIO, Universidade Estadual de Londrina UEL,
gracieli.abreu@uel.br

Weslei ANDRADE, Universidade Estadual de Londrina UEL, weslei.andrade@uel.br
Umberto Antonio SESSO FILHO, Universidade Estadual de Londrina- UEL, -
umasesso@uel.br

Referência:

SIMPLICIO, Gracieli de Abreu; ANDRADE, Weslei; SESSO FILHO, Umberto Antonio. Desafios na aplicação de métodos multicritério para a tomada de decisão em políticas públicas de gestão de resíduos. In: SIMPPA - SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO. 4., 2024, Maringá. **Anais eletrônico...** Maringá: PPA, 2024. p. 16-32. Disponível em: <https://ppa.uel.br/iv-simppa-2024x/anais>. Acesso em: 25 nov. 2024.

RESUMO

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um desafio crescente, exacerbado pela urbanização e aumento populacional, neste sentido o estudo visa analisar a aplicação de Métodos Multicritérios de Tomada de Decisão (MCDM), como AHP, TOPSIS e PROMETHEE, para apoiar decisões mais sustentáveis na gestão de resíduos. A metodologia envolve uma revisão da literatura sobre os conceitos fundamentais e a aplicação desses métodos, seguida de uma análise comparativa das alternativas de gestão, considerando critérios econômicos, sociais e ambientais. Os resultados demonstram que os MCDM são ferramentas eficazes para integrar múltiplos critérios na escolha de alternativas de gestão de resíduos, permitindo uma avaliação mais robusta e fundamentada. A comparação das metodologias revelou que, embora cada método tenha suas características e limitações, todos contribuem para uma abordagem mais sustentável e alinhada às necessidades contemporâneas. A discussão contextualiza os achados, destacando a importância da participação da comunidade e da capacitação técnica para a implementação bem-sucedida dessas metodologias. Em conclusão, a pesquisa sugere que a adoção de MCDM pode melhorar a efetividade da gestão de resíduos, promovendo decisões mais informadas e sustentáveis. Recomenda-se a continuidade de estudos para explorar direções futuras e práticas que possam ser implementadas em diferentes contextos de gestão de resíduos.

Palavras-chave: Gestão de Resíduos, Métodos Multicritérios, Sustentabilidade.

ABSTRACT

Urban solid waste management (USWM) is an increasing challenge, exacerbated by urbanization and population growth. In this context, the study aims to analyze the application of Multicriteria Decision-Making Methods (MCDM), such as AHP, TOPSIS, and PROMETHEE, to support more sustainable decisions in waste management. The methodology involves a literature review of fundamental concepts and the application of these methods, followed by a comparative analysis of management alternatives, considering economic, social, and environmental criteria. The results demonstrate that MCDMs are effective tools for integrating multiple criteria in the selection of waste management alternatives, allowing for a more robust and well-founded evaluation. The comparison of methodologies revealed that, although each method has its characteristics and limitations, all contribute to a more sustainable approach aligned with contemporary needs. The discussion contextualizes the findings, highlighting the importance of community participation and technical training for the successful implementation of these methodologies. In conclusion, the research suggests that adopting MCDMs can improve waste management effectiveness, promoting more informed and sustainable decisions. Further studies are recommended to explore future directions and practices that can be implemented in different waste management contexts.

Keywords: Waste Management, Multicriteria Methods, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A crescente complexidade das questões ambientais e sociais associadas à gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) exige uma abordagem de tomada de decisão mais robustas e fundamentada, levando em consideração a rápida urbanização e o aumento populacional intensificam os desafios enfrentados pelos gestores públicos na busca por soluções eficazes e sustentáveis para o manejo de resíduos. Nesse contexto, os Métodos Multicritérios de Tomada de Decisão (MCDM) emergem como ferramentas essenciais, pois permitem considerar múltiplos critérios e perspectivas em um cenário onde frequentemente há conflitos entre aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Os MCDM, como o AHP (Processo Analítico Hierárquico), TOPSIS (Técnica para Ordem de Preferência por Semelhança à Solução Ideal) e PROMETHEE (Método de Organização de Preferências para Avaliações de Enriquecimento), oferecem um suporte estruturado para a avaliação de alternativas, permitindo que os gestores analisem e priorizem opções de forma mais eficaz. Essas abordagens não apenas facilitam a identificação da alternativa mais sustentável, mas também promovem a inclusão de diferentes stakeholders no processo de decisão, refletindo uma variedade de interesses e perspectivas.

O objetivo deste estudo é analisar a aplicação de métodos multicritério (AHP, TOPSIS e PROMETHEE) na tomada de decisões relacionadas à gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Especificamente, busca-se descrever as características e limitações de cada método multicritério no contexto da gestão de resíduos, avaliar a viabilidade de uso desses métodos para integrar aspectos econômicos, sociais e ambientais, e propor diretrizes para a escolha do método mais adequado em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos. Assim se deparamos com o seguinte problema: como os métodos multicritério pode ser aplicados para apoiar decisões mais sustentáveis na gestão de resíduos sólidos urbanos? Essa análise

pretende contribuir para a efetividade da gestão de resíduos, promovendo uma abordagem mais sustentável e alinhada às necessidades sociais e ambientais contemporâneas.

O artigo está estruturado em seções que facilitam a compreensão do tema e a análise dos métodos multicritério na gestão de resíduos sólidos urbanos, inicialmente, a introdução apresenta o contexto e a relevância do estudo, destacando os desafios atuais da gestão de resíduos, em seguida, a revisão da literatura discute os conceitos fundamentais e as aplicações dos métodos AHP, TOPSIS e PROMETHEE, explorando suas características e limitações, a metodologia detalha a abordagem adotada para a análise das alternativas, incluindo critérios de avaliação e seleção. Os resultados são apresentados em subseções que comparam as diferentes metodologias, seguido de uma discussão que contextualiza os achados em relação à prática da gestão de resíduos. Por fim, a considerações finais que sintetiza as principais contribuições do estudo, oferece recomendações práticas e sugere direções para futuras pesquisas na área.

2 FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIO

Os Métodos Multicritérios de tomada de decisão (MCDM) são considerados uma ferramenta matemática usadas para auxiliar na escolha entre uma e outra alternativas, principalmente quando há alguns critérios conflitantes que precisam ser considerados, neste ponto de vista esses métodos são úteis na qual não há uma única solução boa, porém há um conjunto de opções que precisam ter uma análise de vários pontos de vistas diferentes até mesmo objetivos diferentes (Brans & Mareschal, 2005).

Gomes, (2009) nos últimos anos, o volume crescente de informações e a necessidade de usá-las para tomar decisões levaram ao desenvolvimento de novos métodos, esses métodos têm como objetivo ajudar a tomar decisões mais precisas e eficazes.

KHAN *et al.* (2016) aborda que a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um dos processos mais complexos, onde inclui várias etapas, bem como coleta, transporte e disposição final de resíduos, envolvendo desde a retirar em residências até os comércios, que leva os resíduos até um local específico para tratamento ou disposição final desse tratamento. Com o rápido aumento populacional e a crescente urbanização acentua as dificuldades enfrentadas pelos gestores da administração pública, que tentam cada vez mais por uma busca de gestão mais eficiente dos RUS, isto é, cada vez mais desafiador.

Quando se trata da simples disposição final dos (RSU) é feita em aterros ou até mesmo em lixões, tem sido uma prática comum em várias regiões, principalmente em países desenvolvidos, o que nos aponta que, apesar de ter outras possibilidades de gestão, ainda preferem utilizar estes métodos de descarte, em aterros ou lixões, simplesmente pelo fato econômico, infraestrutura ou falta de alternativas (BEHROOZANIA *et al.* 2018).

Para tanto Khan *et al.* (2016) nos aponta um grande desafio, com relação a necessidade de planejar e implementar alternativas com relação à gestão de resíduos mais sustentáveis, ainda que apesar do uso comum de aterros e lixões os gestores de resíduos, precisam buscar por práticas que sejam mais amigáveis ao meio ambiente e sustentáveis em um período de longo prazo.

Thakur; Ganguly; Dhulia, 2018; Yang *et al.* (2018) apontam desvantagens ambientais e socioeconômicas com relação ao uso de lixões e aterros, em específico que os resíduos sem tratamento contribuem para o efeito estufa, poluição do ar e das águas, além de problemas a saúde pública.

Müller, Luiz Neto Paiva e Silva *et al.* (2021) sugere que ao implementar unidades para tratamentos de resíduos, pode ser uma das alternativas sustentáveis do que o simples descarte, em vez de só armazenar os resíduos de uma forma passiva, isto é, ter um tratamento de forma ativa, onde ajudaria a reduzir o impacto ambiental tendo um melhor aproveitamento dos materiais descartados, como resultado melhor gestão de resíduos.

Entretanto, temos uma dificuldade em escolher a melhor alternativa para o tratamento de resíduos, pois é um processo complicado porque envolve a consideração de vários fatores diferentes. É necessário avaliar não apenas os aspectos econômicos, mas também os impactos sociais e ambientais das opções disponíveis. Em outras palavras, é preciso analisar como cada método de tratamento afeta as pessoas, o meio ambiente e o custo envolvido para tomar uma decisão eficiente (QAZI; ABUSHAMMALA; AZAM, 2018). Com base neste contexto, os métodos multicritérios para a apoio na tomada de decisão, possuem grande relevância para a área.

Abordados a seguir três métodos:

❖ **AHP (Analytic Hierarchy Process):** O AHP, ou Processo Analítico Hierárquico, é um método que auxilia na tomada de decisões complexas, organizando problemas em uma série de parâmetros e sub-parâmetros. Isso permite comparar quantitativamente as alternativas em relação a esses parâmetros. Os tomadores de decisão atribuem um peso a cada critério e comparam as alternativas aos pares, resultando em uma pontuação que ajuda a identificar a melhor escolha com base na combinação de critérios.

❖ **TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution):** O TOPSIS é um método que classifica alternativas com base em sua proximidade com a solução ótima. Ele compara cada alternativa com uma solução ótima positiva (melhor) e uma solução ótima negativa (pior). As alternativas são classificadas de acordo com sua proximidade da solução ótima positiva e sua distância da solução ótima negativa, ajudando a identificar as opções mais próximas e **ótimas**

❖ **PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations):** O PROMETHEE é um método que classifica alternativas com base na preferência de acordo com vários critérios. Este método utiliza um método de comparação pareado para avaliar como uma alternativa se compara a outra alternativa de acordo com cada critério. Este método calcula a classificação das alternativas com base nas preferências gerais, bem como nas vantagens e desvantagens em relação aos parâmetros avaliados.

Em suma, vê-se que os métodos multicritérios de tomada de decisão (MCDM) oferecem um entendimento mais robusto para enfrentar a complexidade dos fatores que envolve as escolhas no contexto de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) onde cada método- AHP, TOPSIS e PROMETHEE possui suas características distintas, mas que se completam quando se tem uma visão mais abrangente das reais alternativas, na sequência, abordaremos cada método de forma mais aprofundada.

2.1 AHP (Analytic Hierarchy Process) AHP (Analytic Hierarchy Process)

O método AHP (Processo Analítico Hierárquico), criado por Tomas L. Saaty no início dos anos 1970, é amplamente reconhecido e utilizado como uma das principais ferramentas multicritério para apoiar a tomada de decisões em situações que envolvem a resolução de conflitos e problemas com diversos critérios (MARINS; SOUZA; BARROS, 2009).

A programação multicritério através do método Analytic Hierarchy Process é uma

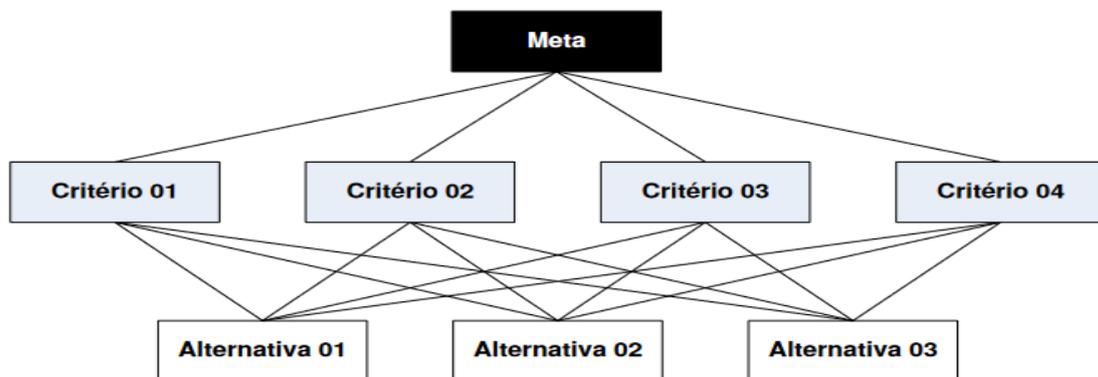
abordagem estruturada para a tomada de decisões em ambientes complexos, onde múltiplos critérios ou variáveis são analisados para priorizar e escolher entre alternativas ou projetos (VARGAS; IPMA-B, P. M. P. 2010).

Assim o uso do AHP começa com a decomposição do problema em uma hierarquia de critérios que podem ser analisados e comparados de forma independente e mais facilmente, após a construção dessa estrutura hierárquica, os tomadores de decisão avaliam as alternativas de forma sistemática, realizando comparações par a par dentro de cada critério (VARGAS; IPMA-B, P. M. P. 2010).

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) se destaca como uma ferramenta eficaz para a tomada de decisões em contextos complexos, onde múltiplos critérios devem ser considerados. Através de comparações pares a par, os decisores conseguem priorizar alternativas de forma sistemática, promovendo uma escolha mais informada e fundamentada. Sua ampla aplicação em diversos campos demonstra a versatilidade do AHP, tornando-o uma metodologia valiosa para enfrentar desafios decisórios que envolvem conflitos e múltiplas variáveis (MARINS; SOUZA; BARROS, 2009; VARGAS; IPMA-B, P. M. P. 2010).

Essas comparações podem ser baseadas tanto em dados concretos das alternativas quanto em julgamentos subjetivos dos decisores, que servem como base de informação (SAATY, 2009).

Figura 1:AHP



Fonte: VARGAS; IPMA-B, P. M. P. 2010.

Observe que o AHP frequentemente converte comparações baseadas em julgamento em valores quantitativos que podem ser processados em análises estatísticas, cada recurso recebe um peso, permitindo a análise quantitativa dos elementos em uma ordem definida. Este método de transformar dados de conhecimento em um modelo matemático estruturado é o principal diferencial entre o AHP e outros métodos comparativos, tornando a análise dos demais robusta e a tomada de decisões precisas (VARGAS; IPMA-B, P. M. P. 2010).

Entretanto Marins; Souza; Barros (2009) este método tem como base ou se baseia no método newtoniano e cartesiano de se pensar, onde procura tratar a complexidade por meio da decomposição e divisão do problema em fatores menores. Esses fatores podem ser subdivididos em elementos ainda mais simples e mensuráveis até que se atinjam níveis mais básicos de análise. Em seguida, são estabelecidas relações entre os fatores, permitindo uma síntese final.

De acordo com Costa (2002, p. 16-17) este método baseia-se em três etapas de pensamento analítico: (I) *Construção de hierarquias* facilita a compreensão e também a avaliação, para aplicação dessa metodologia é preciso que tantos os critérios e quanto as alternativas estejam estruturados em níveis hierárquicos, onde o primeiro nível desta hierarquia seja correspondente ao problema geral, por conseguinte seja os critérios e por fim as alternativas; (II) *Definição de prioridades* fundamenta na capacidade humana de identificar e analisar as relações entre diferentes objetos ou situações, fazendo comparações entre pares com base em um critério específico ou foco. Ao comparar duas alternativas ao mesmo tempo, é possível avaliar de forma mais clara e significativa como cada alternativa se posiciona em relação aos critérios em análise, essa abordagem facilita a tomada de decisões, permitindo que os julgamentos paritários ajudem a estabelecer prioridades e identificar a melhor alternativa. (III) *Consistência lógica* aqui neste método os humanos têm a capacidade de fazer conexões coerentes entre coisas ou ideias, portanto essas conexões são fortes e têm o mesmo significado.

Saaty (2000) acredita que essa habilidade está relacionada ao estabelecimento de relacionamentos estáveis, ou seja, relacionamentos que mantêm a lógica interna para que as comparações e julgamentos entre as coisas analisadas sejam estáveis e confiáveis. Esta é a base do processo de tomada de decisão, e a consistência na avaliação garante que a análise seja exata e precisa.

[...] O processo básico de aplicação do AHP consiste em priorizar a importância relativa de n elementos de tomada de decisão em relação a um objetivo, através de avaliações parciais destes elementos, dois a dois, facilitando a análise pelos avaliadores. Através de um índice de consistência, verifica-se se os valores atribuídos a cada par de critérios estão coerentes [...]” (FRANCISCHINI; CABEL, 2003, p. 3).

Entende-se que o processo básico do método AHP envolve a comparação de elementos de decisão dois a dois em relação a um objetivo principal assim essa comparação par a par facilita para os avaliadores analisarem e priorizarem a importância relativa de cada elemento. Para garantir que as comparações sejam consistentes, é utilizado um índice de consistência, que verifica se os valores atribuídos a cada par de critérios estão coerentes entre si.

Quando feito todas as comparações entre as alternativas e também estabelecer pesos para cada critério calcula então a probabilidade numérica para cada alternativa com relação a meta estabelecida, tal probabilidade vai indicar o quanto cada uma das alternativas contribuiu para alcançar o objetivo final, sabendo que quanto maior a alternativa mais favorece a meta final. Entretanto, embora pareça ser simples, ao mesmo tempo podem ser bastante complexos para algumas situações mais elaboradas, por isso para alguns casos é utilizado softwares especializados que facilitam a análise desses dados (VARGAS; IPMA-B, P. M. P. 2010).

Portanto o método AHP (Processo Analítico Hierárquico), desenvolvido por tomas L. Saaty, oferece uma abordagem estruturada e robusta para a tomada de decisões complexas que envolvem múltiplos critérios. Através da construção hierárquica dos problemas, definição de prioridades e verificação da consistência lógica, o AHP permite uma análise detalhada e precisa das alternativas disponíveis. Esse método transforma comparações qualitativas em dados quantitativos, facilitando a avaliação e priorização das opções com base em critérios estabelecidos.

2.2 TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

O método TOPSIS, desenvolvido por Hwang e Yoon em 1981, é uma técnica usada para classificar e ordenar diferentes opções com base em critérios múltiplos, isto é, ajuda a determinar qual alternativa é a melhor ou a mais preferível entre várias opções, considerando diversos fatores simultaneamente. Uma pesquisa de Behzadian e colegas em 2012 revelou que o TOPSIS e suas variações foram aplicados 266 vezes em publicações desde o ano 2000, com 103 áreas diferentes de estudo.

Lima, Carpinetti, (2015) discorre que um dos princípios básicos do TOPIS é selecionar dentre as opções uma melhor alternativa possível “a solução ideal positiva”, isto é, que esteja o mais distante possível da pior opção (a solução ideal negativa) isso ajuda a encontrar a opção que oferece o melhor equilíbrio entre todos os critérios considerados.

Kahraman (2008) aponta que a solução ideal, é criada a partir da identificação dos melhores valores possíveis para cada critério de decisão dentre as alternativas avaliadas, em contraste a solução negativa é formada tendo como base os piores valores encontrados para cada critério.

Quando há ambientes de incerteza Chen (2000) propôs combinar o método TOPSIS com a teoria dos conjuntos fuzzy que foi criada por Zadeh em 1965, que é utilizada para modelar sistemas as categorias não têm suas fronteiras bem definidas que são baseadas em propriedades subjetivas, assim esta combinação tem como propósito ajudar a lidar com as incertezas dos critérios de decisão, tendo assim uma avaliação mais flexível e realista das alternativas.

“No método Fuzzy-TOPSIS, as pontuações das alternativas e o peso dos critérios de decisão são definidos como variáveis linguísticas” (LIMA, CARPINETTI, p. 24 2015). Assim no método Fuzzy-TOPSIS as pontuações das alternativas e os pesos dos critérios de decisão fica expresso por meio de variável linguística, isto é, em vez de utilizar números exatos para representar informações, são usadas descrições qualitativas sendo "alto", "médio" ou "baixo".

Zadeh (1973) conceitua uma variável linguística como sendo uma variável cujo valor é expresso em forma de sentenças ou termos da linguagem natural, em vez de usar números exatos, as variáveis linguísticas utilizam palavras ou frases para descrever a quantidade ou a qualidade de uma característica.

Quadro 1: Vantagens de uso e limitação dos métodos comparados.

| | TOPSIS | Fuzzy-TOPSIS |
|------------------|--|--|
| Vantagens de uso | <ul style="list-style-type: none"> - Adequado para modelar valores de critérios quantitativos precisamente conhecidos - O processo de coleta de dados é mais simples e requer menor quantidade de julgamentos - Menor complexidade computacional. | <ul style="list-style-type: none"> - Adequado para critérios qualitativos e pesos - Adequado para modelar critérios quantitativos em situações de seleção de fornecedores sob incerteza - A inserção ou exclusão de alternativas não causa inversão no <i>ranking</i> |
| Limitações | <ul style="list-style-type: none"> - Inadequado para modelar variáveis qualitativas - Dificuldade para definição dos pesos - Pode ocorrer inversão no <i>ranking</i> | <ul style="list-style-type: none"> - A coleta de dados para a modelagem é mais complexa e requer julgamentos adicionais para parametrizar os números <i>fuzzy</i> - Maior complexidade computacional |

Fonte: Lima, Carpinetti, (2015).

A combinação do TOPSIS e da teoria dos conjuntos fuzzy proposta por Chen e apoiada por Zadeh, é uma abordagem adequada e racional em situações incertas, utilizando mudanças de linguagem para expressar qualidade e conhecimento. Essa integração torna mais fácil e preciso considerar outros fatores, tomando decisões mais eficazes em situações complexas e incertas.

O método TOPSIS, desenvolvido por Hwang e Yoon, é uma ferramenta poderosa para recomendar e classificar outros com base em diversos critérios, com o objetivo de identificar o que está mais próximo da melhor solução e longe da solução ruim. O estudo realizado por Behzadian e colegas demonstra o uso generalizado do TOPSIS, demonstrando o seu valor e eficácia. O conceito de melhor solução e de pior solução, segundo o relatório de Kahraman, mostra a necessidade de comparar as alternativas com base nos melhores e piores padrões.

2.3 PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)

Em alguns casos, quando o resultado do processo decisório é o conjunto de critérios que satisfaz, onde os decisores têm por objetivo alcançar mais de um resultado (ALMEIDA; COSTA, 2002). Para essas escolhas quando há mais de um aspecto, é chamado multicritérios, multiatributos ou até mesmo multiobjetivos (Vincke, 1992; Olson, 1996; Gomes *et al.*, 2002).

Visto que, quando a um processo de tomada de decisão, os decisores constantemente se deparam com vários critérios para escolher entre uma ou outra alternativa, isto acontece em detrimento quando o objetivo é alcançar multicritérios no mesmo tempo, um exemplo neste caso seria em relação a otimizar custo, qualidade e sustentabilidade ao mesmo tempo.

PROMETHEE (Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation), foi desenvolvido por Brans e Vincke no ano de 1985, onde equivale a edificação de uma relação de sobre classificação, tendo como base a comparação de valores (Vincke, 1992).

O Método se destaca por integrar conceitos e parâmetros na qual tem uma interpretação clara tanto física quanto econômica, o que facilita a compreensão por parte dos tomadores de decisão, este método foi grandemente citado em trabalhos acadêmicos e vem sendo utilizado com sucesso em uma variedade de problemas englobando diversas áreas, isso se deve à sua flexibilidade em lidar com múltiplos critérios, permitindo uma avaliação mais precisa e compreensível para quem precisa tomar decisões complexas (Raju & Kumar, 1999; Brans *et al.*, 1998; Babic & Plazibat, 1998).

Almeida; Costa (2002) que o decisor deve atribuir um peso p_j a cada critério levando em consideração a importância desse critério, visto que o peso aumenta em decorrência que a medida desse critério aumenta se tornando mais relevante. O método PROMETHEE apresenta seis formas diferentes para o decisor expor suas preferências.

[...] Conforme o modo como a preferência do decisor aumenta com a diferença entre o desempenho das alternativas para cada critério [$g_j(a) - g_j(b)$], ele pode definir uma função $F(a,b)$ que assume valores entre 0 e 1. Esses valores aumentam se a diferença de desempenho ou a vantagem de uma alternativa em relação a outra aumenta e é igual a zero se o desempenho de uma alternativa for igual ou inferior ao da outra [...] (ALMEIDA; COSTA, p. 204, 2002).

Esses valores aumentam à medida que a diferença de desempenho ou a vantagem de uma alternativa sobre a outra cresce, sendo igual a zero quando o desempenho de uma alternativa é igual ou inferior ao da outra, veremos a seguir demonstração:

Quadro 2: Critérios gerais para o PROMETHEE

| | | |
|---|---|--|
| 1 – Critério usual não há parâmetro a ser definido | $g_f(a) - g_f(b) > 0$ $g_f(a) - g_f(b) \leq 0$ | $F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$ |
| 2 – Quase-critério define-se o parâmetro q (limite de indiferença) | $g_f(a) - g_f(b) > q$ $g_f(a) - g_f(b) \leq q$ | $F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$ |
| 3 – Limite de preferência define-se o parâmetro p (limite de preferência) | $g_f(a) - g_f(b) > p$ $g_f(a) - g_f(b) \leq p$ $g_f(a) - g_f(b) \leq 0$ | $F(a,b) = 1$ $F(a,b) = \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p}$ $F(a,b) = 0$ |
| 4 – Pseudocritério definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência) | $ g_f(a) - g_f(b) > p$ $q < g_f(a) - g_f(b) \leq p$ $ g_f(a) - g_f(b) \leq q$ | $F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 1/2$ $F(a,b) = 0$ |
| 5 – Área de indiferença definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência) | $ g_f(a) - g_f(b) > p$ $q < g_f(a) - g_f(b) \leq p$ $ g_f(a) - g_f(b) \leq q$ | $F(a,b) = 1$ $F(a,b) = (g_f(a) - g_f(b) - q)/(p - q)$ $F(a,b) = 0$ |
| 6 – Critério Gaussiano O desvio-padrão deve ser fixado | $g_f(a) - g_f(b) > 0$ $g_f(a) - g_f(b) \leq 0$ | <i>A preferência aumenta segundo uma distribuição normal</i> $F(a,b) = 0$ |

Fonte: Almeida; Costa (2002).

Em suma, o método PROMETHEE apresenta destaque pela sua flexibilidade e clareza na hora de tomar decisões multicritérios, consentindo ao mesmo tempo múltiplos critérios, ao possibilitar a atribuição de pesos diferenciados para cada critério, o método oferece uma avaliação precisa e adaptada à relevância de cada fator, favorecendo decisões mais equilibradas e informadas. Sua ampla aplicação em diversas áreas reforça sua eficácia em lidar com problemas complexos, onde as preferências são estabelecidas de forma dinâmica, refletindo a evolução do desempenho das alternativas analisadas.

3 JUSTIFICATIVA PARA SEU USO EM POLÍTICAS PÚBLICAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS

O crescente aumento de RSU vem chamando a atenção dos gestores públicos mas também de empresas privadas e a população, DE SOUZA FRANÇA; KIM; DE VASCONCELOS BARROS (2024) aborda que os gestores, tanto em nível nacional quanto local, seja no setor privado ou público, tem necessidade de se adaptar às suas práticas com as novas diretrizes, responsabilidades e metas voltadas para a gestão sustentável de resíduos, isto é, as decisões devem ser tomadas com base em métodos e ferramentas que auxiliem nesse processo, como modelos de tomada de decisão multicritério (MTDM), estes métodos auxiliam os gestores na tomada decisão.

Goulart Coelho, Lange e Coelho (2017) complementam que na gestão de resíduos os Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) é um instrumento importante, pois eles não apenas levam em consideração aspectos econômico, sociais e ambientais, mas também como técnica participativa garantindo que diferentes perspectivas e interesses sejam considerados na busca por soluções sustentáveis.

Soltani *et al.* (2015) argumentam então que os Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) por conta da capacidade de reunir múltiplos critérios são considerados instrumentos eficazes para a tomada de decisão na gestão de resíduos sólidos.

Assim os Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) ajudam os responsáveis pela tomada de decisão a avaliar diferentes opções, levando em conta vários critérios ao mesmo tempo. Por conseguirem integrar diversos fatores simultaneamente, esses modelos são vistos como ferramentas eficientes e abrangentes para decisões relacionadas à gestão de resíduos sólidos.

Embora a gestão dos resíduos sólidos urbanos (GRSU) pleiteia desafios, por consequência da sua complexidade do problema, pois envolve múltiplos critérios, além do mais precisa lidar com aspectos ambientais, econômicos e sociais a GRSU deve considerar os interesses de vários stakeholders (partes envolvidas) bem como empresas, prefeituras e a população, isto torna a gestão mais complexa e muitas das vezes difíceis (ANTONOPOULOS, 2014; SOLTANI, 2015).

Neste sentido, Alvarenga; Pereira; Salgado (2023) discorre que devido às muitas dificuldades que municípios brasileiros têm para se adaptarem às imposições da Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) justifica-se o uso da ferramenta de Modelos de Decisão Multicritério (MCDM) na gestão de resíduos, pelo fato da complexidade do problema, isto é, busca desenvolver um protótipo para apoio a tomada decisão, com foco em determinar a ordem das decisões ou até mesmo a ordem de implementação dessas alternativas de tratamento de resíduos, com propósito final a eficiência dos RSU.

Por conseguinte Alvarenga; Pereira; Salgado (2023) ainda nos aponta que essas ferramentas possuem vantagens e desvantagens, adequando-as em diferentes situações um exemplo disso é o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) vem sendo muito usado em coleta de dados mais simples, onde geralmente é feita por meio de entrevistas, sendo ideal para obter opiniões subjetivas sobre o problema, possibilitando envolver diversos stakeholders neste processo, por um outro lado, temos a ferramenta TOPSIS (Reuters) e PROMETHEE, que possibilita a utilização de dados menos subjetivos onde o problema já tenha sido explorado, partindo então de dados já coletados “*in situ*” refere-se a dados que são obtidos diretamente no local onde o problema ocorre, ou seja, no ambiente real em que a situação está sendo estudada.

Por fim, Dong *et al.* (2014) aponta que essas ferramentas detêm de abordagens com um teor menos subjetivas, isto é, usam dados coletados “*in situ*”, deste modo a LCA é uma ferramenta que tem destaque por consentir essa coleta de dados “*in situ*” analisando entradas e saídas deste processo, sendo muito usada em questões ambientais, para avaliar o consumo dos recursos.

Em suma, a utilização de Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) na gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) justifica-se pela capacidade de integrar múltiplos critérios, contemplando aspectos econômicos, sociais e ambientais. Esses modelos oferecem suporte importante aos gestores ao facilitar a análise de diferentes opções e interesses de stakeholders envolvidos, proporcionando uma tomada de decisão mais eficiente e sustentável.

Ferramentas como AHP, TOPSIS e PROMETHEE demonstram-se adequadas para diferentes contextos, adaptando-se à complexidade dos problemas e ao tipo de dados disponíveis, sejam eles subjetivos ou coletados diretamente no local “*in situ*” como acontece com a ferramenta LCA.

4 DISCUSSÕES

A implementação de Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) na gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) resultou em avanços significativos na eficiência operacional e na sustentabilidade das práticas adotadas. Primeiramente, o uso do AHP (Analytic Hierarchy Process) permitiu uma hierarquização clara dos critérios relevantes, facilitando a comparação de diferentes alternativas de gestão.

Isso resultou em escolhas mais fundamentadas, refletindo uma análise detalhada dos impactos sociais, econômicos e ambientais, além disso, a aplicação do TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) contribuiu para a identificação de soluções que se aproximam do ideal, enfatizando a busca por práticas de gestão mais sustentáveis (Behroozenia et al., 2018).

A inclusão de stakeholders no processo decisório, através de entrevistas e workshops, aumentou a transparência e a legitimidade das decisões. Essa participação social foi crucial para a implementação das alternativas escolhidas, resultando em maior aceitação pela comunidade (Goulart Coelho et al., 2017). A integração de dados coletados “*in situ*” com informações qualitativas possibilitou uma análise mais robusta dos impactos de cada alternativa, alinhando as decisões com as necessidades locais e expectativas da população.

Os resultados também indicam uma melhora significativa na sustentabilidade a longo prazo, com a priorização de práticas mais responsáveis, como compostagem e reciclagem, contribuindo para a redução do impacto ambiental (Müller et al., 2021).

Entretanto, a eficácia da implementação dos MTDM pode ter sido influenciada por diversos fatores conjunturais. Mudanças na legislação, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que impõe diretrizes rigorosas para a gestão de resíduos, criaram um ambiente propício para a adoção de práticas mais sustentáveis. Além disso, o crescimento populacional e a urbanização acelerada exigiram soluções mais eficazes, pressionando os gestores a considerar abordagens multicritério (Dong et al., 2014).

A aplicação dos MTDM na gestão de RSU não só trouxe avanços tecnológicos, mas também promoveu um impacto social significativo. As discussões evidenciam a importância de integrar tecnologia e participação comunitária. Behroozenia et al. (2018) ressaltam que a adoção de tecnologias inovadoras para o tratamento de resíduos é uma alternativa sustentável em comparação ao descarte passivo em aterros. Essa perspectiva é corroborada por Müller et al. (2021), que defendem que tecnologias adequadas podem melhorar a eficiência dos processos de gestão, promovendo a recuperação de materiais.

Além disso, Goulart Coelho et al. (2017) enfatizam que os MTDM servem como ferramentas participativas que garantem a consideração das perspectivas de diferentes partes interessadas, fundamentais para a promoção de soluções sustentáveis. Essa abordagem é alinhada com a ideia de Dong et al. (2014) sobre a importância de coletar dados diretamente do ambiente real, permitindo que as decisões reflitam as necessidades e preocupações da comunidade.

A implementação dos MTDM pode também atuar como um catalisador para a educação e conscientização pública sobre a gestão de resíduos. Ao envolver a população no processo decisório e explicar os critérios utilizados nas escolhas, os gestores podem promover uma maior compreensão sobre a importância de práticas sustentáveis e da participação da comunidade. O uso de métodos como TOPSIS e PROMETHEE, segundo Soltani et al. (2015), é reconhecido por sua capacidade de integrar múltiplos critérios, resultando em uma gestão que não apenas atende aos requisitos legais, mas também contribui para a eficiência econômica e a redução dos impactos ambientais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta um conjunto complexo de desafios que requerem abordagens inovadoras e sustentáveis. A problemática central deste estudo reside na necessidade de integrar diferentes critérios na tomada de decisão, considerando não apenas os aspectos econômicos, mas também os sociais e ambientais. A crescente urbanização e a pressão por soluções mais eficazes revelam a urgência de um sistema de gestão que não apenas atenda às exigências legais, mas que também promova a sustentabilidade e a inclusão social.

Os Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM), como o AHP, TOPSIS e PROMETHEE, se destacam como ferramentas promissoras para enfrentar essa problemática, permitindo uma análise mais abrangente e fundamentada das alternativas de gestão de resíduos. A participação ativa da comunidade no processo decisório, aliada à aplicação de tecnologias inovadoras, contribui para a legitimidade das escolhas feitas e para o fortalecimento da consciência coletiva sobre a gestão de resíduos.

Contudo, a implementação efetiva dessas metodologias enfrenta barreiras, como a resistência cultural e a falta de capacitação técnica entre os gestores. A intersecção entre a política pública e as práticas locais deve ser cuidadosamente considerada, uma vez que as diretrizes e legislações podem tanto facilitar quanto dificultar o processo de implementação. Diante do exposto, é evidente que a adoção dos MTDM na gestão de RSU não apenas proporciona uma solução técnica, mas também representa uma oportunidade para um engajamento mais profundo da sociedade civil. Essa abordagem integrada e participativa é fundamental para garantir que as decisões tomadas reflitam as necessidades e expectativas da população, promovendo um futuro mais sustentável e consciente na gestão de resíduos.

Diante deste estudo, fica uma proposta para estudos futuros: uma pesquisa relacionada: uma pesquisa com relação a terceirização de serviços de gestão de resíduos sólidos urbanos por parte dos municípios, pois sendo uma prática comum que, embora possa oferecer eficiência e redução de custos, também levanta questões críticas sobre a qualidade do serviço e a responsabilidade social das empresas contratadas. Um estudo de caso aplicado poderia ser realizado em um ou mais municípios que adotaram essa abordagem, analisando o desempenho das empresas terceirizadas em relação aos critérios de sustentabilidade, eficiência econômica e aceitação social. A pesquisa poderia envolver a coleta de dados sobre a satisfação da comunidade, a conformidade com as normas ambientais e os resultados econômicos, utilizando os Modelos de Tomada de Decisão Multicritério (MTDM) para avaliar as alternativas de gestão de resíduos. Essa análise permitiria identificar as melhores práticas e os desafios enfrentados, contribuindo para o desenvolvimento de diretrizes que melhorem a gestão de resíduos em contextos de terceirização.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Adiel Teixeira de; COSTA, Ana Paula Cabral Seixas. Modelo de decisão multicritério para priorização de sistemas de informação com base no método PROMETHEE. *Gestão & Produção*, v. 9, p. 201-214, 2002.
- ALVARENGA, Augusto Duarte; PEREIRA, Aline Aparecida Silva; SALGADO, Eduardo Gomes. A tomada de decisão na gestão de resíduos sólidos de municípios pequenos brasileiros. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 14, n. 8, p. 14218-14240, 2023.
- ANTONOPOULOS, I.-S. et al. **Ranking municipal solid waste treatment alternatives considering sustainability criteria using the analytical hierarchical process tool**, *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, vol. 86, p. 149–159, 2014.
- BABIC, Z.; PLAZIBAT, N. Ranking of enterprises based on multicriterial analysis. *International Journal of Production Economics*, v. 56-57, n. 20, p. 29-35, sep. 1998.
- BEHROOZNI, L.; SHARIFI, M.; ALIMARDANI, R.; MOUSAVI-AVVAL, S. H. Sustainability analysis of landfilling and composting-landfilling for municipal solid waste management in the north of Iran. *Journal of Cleaner Production*, v. 203, p. 1028-1038, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.307>
- BEHZADIAN, M. et al. A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 17, p. 13051-13069, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Brans, J. P., & Mareschal, B. (2005). *Multiple criteria decision analysis – state of the art*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BRANS, J. P.; MACHARIS, C.; KUNSCH, P. L.; CHEVALIER, A.; SCHWANINGER, M. Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. An iterative real-time procedure. *European Journal of Operational Research*, v. 109, Issue 2, p. 428-441, 1 sep. 1998
- Costa, Helder Gomes. *Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão*. Niterói: H.G.C., 2002.
- DE SOUZA FRANÇA, Samara Avelino; KIM, Viviane Jin Hee; DE VASCONCELOS BARROS, Raphael Tobias. Método Processo Analítico Hierárquico como instrumento de apoio na gestão de resíduos sólidos: uma revisão. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 17, n. 1, p. 231-250, 2024.
- DONG, J. et al. Energy–environment–economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study. *Applied Energy*, London, vol. 114, p. 400–408, 2014
- FRANCISCHINI, P. G.; CABEL, G. M. Proposição de um indicador geral de desempenho utilizando AHP. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: UFOP, 2003. 1 CD-ROM.

Gomes, K. G. A. (2009). Um método multicritério para localização de unidades de celulares de intendência da FAB (Dissertação de mestrado). Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP.

KHAN, M.M.U.H.; JAIN, S.; VAEZI, M.; KUMAR, A. Development of a decision model for the techno-economic assessment of municipal solid waste utilization pathways. *Waste Management*, v. 48, p. 548-564, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.016>

LIMA, Francisco Rodrigues; CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão multicritério para seleção de fornecedores. *Gestão & Produção*, v. 22, n. 1, p. 17-34, 2015.

MARINS, Cristiano Souza; SOUZA, Daniela de Oliveira; BARROS, Magno da Silva. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. *Xli Sbpo*, v. 1, p. 49, 2009.

MÜLLER, Luiz Neto Paiva e Silva et al. Uma análise multicritério de alternativas para o tratamento de resíduos sólidos urbanos do município de Juazeiro do Norte no Ceará. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 26, n. 1, p. 159-170, 2021.

QAZI, W.A.; ABUSHAMMALA, M.F.M.; AZAM, M.H. Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. *Waste Management and Research*, v. 36, n. 7, p. 594-605, 2018. <https://doi.org/10.1177/0734242X18777800>
» <https://doi.org/10.1177/0734242X18777800>

RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. Multicriterion decision making in irrigation planning. *Agricultural Systems*, v. 62, Issue 2, p. 117-129, nov. 1999.

SAATY, T. L. (2009). Extending the Measurement of Tangibles to Intangibles. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol. 8, N. 1, p. 7-27, 2009. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1483438>.

Saaty, T.L. Decision making for leaders. Pitts burg, USA: WS. Publications, 2000

Soltani, A., Hewage, K., Reza, B., Sadiq, R. (2015). Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review. *Waste Management*, 35, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.010>

THAKUR, P.; GANGULY, R.; DHULIA, A. Occupational Health Hazard Exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India. *Waste Management*, v. 78, p. 483-489, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.020>
» <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.020>

VARGAS, Ricardo Viana; IPMA-B, P. M. P. Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process-AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. In: *PMI Global Congress*. sn, 2010.

VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid* Londres: John Wiley & Sons, 1992

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 3, n. 1, p. 28-44, 1973. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>