

Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil

Use of decision support models to analyze technological alternatives for municipal solid waste treatment in South Region of Brazil

José Dantas de Lima¹, José Fernando Thomé Jucá², Geraldo Antônio Reichert³,
Alessandra Lee B. Firmo⁴

RESUMO

Os modelos de apoio à decisão são importantes ferramentas que podem ser utilizadas para analisar alternativas tecnológicas na gestão e tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) frente a diversas situações envolvendo aspectos políticos, econômicos, ambientais e sociais. Este estudo teve como objetivo propor tecnologias e arranjos tecnológicos para o tratamento adequado de RSU para a Região Sul do Brasil, por meio do levantamento de informações e uso de dois modelos de apoio à decisão: AHP (Analytic Hierarchy Process) e Promethee II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations). As tecnologias analisadas foram: reciclagem, compostagem, tratamento mecânico-biológico, digestão anaeróbia, incineração com geração de energia elétrica em ciclo combinado (energia elétrica e térmica), aterro sanitário com e sem geração de energia. Essas tecnologias foram hierarquizadas nos modelos com base em quatro critérios: ambientais, sociais, econômicos e políticos. Como resultado, foram propostos quatro arranjos tecnológicos possíveis para a Região Sul e que podem ser utilizados como referência para estudos nas demais regiões geográficas do Brasil.

Palavras-chave: gestão de RSU; tecnologias de tratamento de RSU; modelo de apoio à decisão.

ABSTRACT

The decision support models are important tools that can be used to analyze technological alternatives in the management and treatment of municipal solid waste (MSW) against several situations involving political, economic, environmental and social aspects. This study aimed to propose alternatives for appropriate treatment of MSW in the South Region of Brazil by surveying information and using two decision support models: AHP (Analytic Hierarchy Process) and Promethee II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations). The studied technologies were: recycling, composting, mechanical-biological treatment, anaerobic digestion, incineration with electricity generation and combined cycle (electricity and heat) and landfill with and without power generation. These technologies were hierarchically ranked in the models based on four criteria: environmental, social, economic and political. As a result, we proposed four possible technological arrangements for the South Region and these can be used as reference for studies in other geographic regions of Brazil.

Keywords: MSW management; MSW treatment technologies; decision support model.

¹Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) - Campina Grande (PB), Brasil.

Doutor pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Recife (PE), Brasil.

²Engenheiro Civil. Professor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Recife (PE), Brasil. Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil. Doutor pela Universidade Politécnica de Madrid (UPM) - Madrid, Espanha.

Pós-Doutor pela Universidade de São Paulo (USP) - São Paulo (SP), Brasil.

³Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Doutorando da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Porto Alegre (RS), Brasil.

⁴Engenheira Química. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Doutoranda do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Membro do Grupo de Resíduos Sólidos e Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) - Recife (PE), Brasil.

Endereço para correspondência: Rua Ciro Tróccoli, 1180 - Jardim Cid. dos Colibris - CEP: 58073-172 - João Pessoa (PB), Brasil - E-mail: dantast@terra.com.br

Recebido: 21/03/13 - **Aceito:** 05/09/13 - **Reg. ABES:** ESA-899

INTRODUÇÃO

A Região Sul do Brasil é constituída pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os quais, segundo o IBGE (2010), somam 27.384.815 habitantes (representando 14,35% da população brasileira) e ocupam uma área de 576.409,60 km² (equivalente a 6,7% da área total do país). O Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* médio da região é um dos mais elevados do país com R\$ 19.324,00 (IBGE, 2009) e o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) médio de 0,74 (PNUD, 2012), acima da média do país.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2011), esta região gera cerca de 20.500 t/dia, possuindo uma geração *per capita* de 0,819 kg/hab/dia de RSU, dos quais coletam 19.183 t/dia, representando um índice de coleta de 92,33% para RSU. O PNSB (IBGE, 2008) afirma que, quanto à destinação final dos resíduos, os estados da Região Sul apresentam a menor taxa de disposição final em lixões do Brasil, com 2,7% para Santa Catarina, 16,5% para o Rio Grande do Sul e 24,6% para o Paraná.

Entretanto, ainda existe a necessidade de melhorias no setor que podem ser obtidas mediante o uso de alternativas tecnológicas adequadas para o tratamento de RSU, tais como aterros sanitários (com e sem aproveitamento energético), compostagem, reciclagem, tratamento mecânico-biológico, digestão anaeróbia e incineração com geração de energia.

Para a escolha dessas tecnologias e sua associação com outras (arranjos tecnológicos), deve-se levar em consideração uma série de critérios, tais como:

- Técnicos: características quantitativas e qualitativas dos resíduos gerados, geografia da região, geomorfologia, pluviometria, urbanização, distância do centro gerador e aspectos urbanísticos;
- Ambientais: disponibilidade de área adequada, emissões de gases, geração de líquidos e outros que devem atender às legislações específicas;
- Econômicos: capacidade financeira de investimentos e capacidade de operação e manutenção das tecnologias;
- Políticos: de fundamental importância no Brasil, em função da descontinuidade administrativa após a mudança periódica de gestão, que tem trazido cenários negativos na consolidação de tecnologias de tratamento de resíduos, tornando-se uma das maiores antipolíticas públicas existentes no país;
- Sociais: geração de emprego e renda e sua relação com a tecnologia a ser utilizada.

Em alguns casos, os aspectos políticos, ambientais e sociais podem apontar para o uso de uma tecnologia, como a reciclagem de materiais coletados convencionalmente, isto é, sem separação prévia. Por outro lado, os indicadores técnicos e econômicos para tal prática podem apresentar valores que apontam para uma tecnologia não viável econômica e tecnicamente.

Em geral, os problemas de decisão envolvem múltiplos objetivos e critérios muitas vezes contraditórios entre si, em que a contribuição de um critério quase sempre apresenta um prejuízo em outro. Nos dias atuais, a problemática da tomada de decisão é caracterizada por um número crescente de alternativas e critérios, posto que os decisores necessitam selecionar, ordenar, classificar ou ainda descrever com detalhes as alternativas tecnológicas disponíveis, considerando múltiplos critérios.

Assim, a tomada de decisão requer um grande esforço para resolver o dilema dos objetivos conflitantes que impede a existência da “solução ótima” e conduz para a “solução de melhor acordo”, e por ser uma questão de elevada complexidade, requer um tratamento qualificado e justifica a utilização de métodos de apoio à decisão em diversas circunstâncias. Esses métodos são comumente aplicados em diversas áreas da engenharia, recursos hídricos, urbanismo, gestão de bacias hidrográficas, engenharia de transportes e na gestão e tratamento de resíduos sólidos.

Em função dessa complexidade, os métodos multicritérios de apoio à decisão são ferramentas importantes para auxiliar os tomadores de decisão a resolver problemas com objetivos conflitantes, e também dar suporte em toda a análise de escolha de forma mais direta envolvendo todos os elementos e consequências das ações potenciais (ALMEIDA, 2009).

Dentre os métodos multicritérios de apoio à decisão, tem-se os métodos da teoria da utilidade multiatributo e o método da sobreclassificação (VINCKE, 1986), aqui estudados utilizando o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e o PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), respectivamente.

A teoria da utilidade multiatributo tem como princípio o conceito de agregação de diferentes critérios em uma única função-utilidade. A formulação desta teoria pode ser visualizada em Keeney & Raiffa (1976), envolvendo a apresentação da terminologia, identificação das condições de independência, desenvolvimento das funções de utilidade condicionais, determinação das constantes de escala e a realização de testes de consistências.

O AHP foi um dos primeiros métodos de tomada de decisão do tipo multiatributo (SAATY, 1980), apesar de sua formulação matemática ter sido bastante aprimorada ao longo do tempo (SAATY, 1991; GOMES, 2007). Fundamenta-se na comparação de alternativas de escolha por pares, questionando os elementos que satisfazem a análise e o quanto satisfazem. Tem como propósito organizar os objetivos ou critérios em uma hierarquia representada pela preferência dos decisores, com base na determinação de peso dos critérios por meio de pesquisa direta com especialistas da área (GRANDZOL, 2005).

Segundo Iañes & Cunha (2006) e Azeredo *et al.* (2009), a aplicação do método AHP consiste em seguir ao menos quatro etapas nos níveis descritos na Figura 1, a saber:

1. Estruturar os objetivos, atributos e alternativas em hierarquias;
2. Obter os dados do julgamento comparativo de cada par de fatores de decisão em um determinado nível do grupo, verificando a consistência do julgamento atribuído;

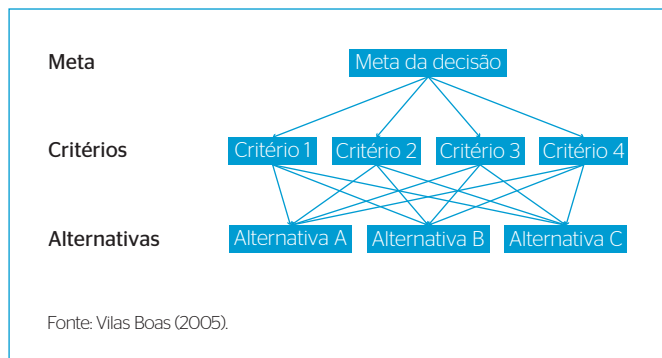


Figura 1 - Elementos básicos da estrutura do AHP.

3. Determinar as prioridades relativas do peso dos atributos de decisão em cada nível ou grupo;
4. Consolidar todos os pesos, propagando o efeito desses pesos na estrutura até o nível das alternativas. A recomendação da decisão é dada pela classificação das alternativas de decisão, ordenadas relativamente ao objetivo global.

A vantagem do método AHP consiste em permitir ao decisor a atribuição de pesos relativos para as múltiplas alternativas e, concomitantemente, realizar uma comparação par a par. Sob a ótica do processo decisório, Freitas *et al.* (1997) argumentam que este método pode ser utilizado para: (a) auxiliar nas fases de concepção em que os tomadores de decisão analisam os dados; (b) determinar e esclarecer questionamentos; (c) refinar os critérios de avaliação; (d) definir as alternativas, já que permite comparar elementos de decisão quantitativos e qualitativos; (e) na fase de escolha, permitir a verificação do impacto dos fatores não quantificáveis e (f) selecionar as alternativas mais adequadas.

Roper-Lowe e Sharp (1990) destacam ainda a capacidade do modelo AHP em realizar a análise de sensibilidade e monitorar a inconsistência com a qual os tomadores de decisão fazem seus julgamentos. Para este modelo, a análise de sensibilidade é realizada por meio do índice de inconsistência, que deve ser menor que 0,10, isto é, a consistência do modelo apresentado deve ser superior a 90%.

Este método pode ser aplicado em diversas áreas, como no planejamento de recursos hídricos (ZUFFO, 1998), auxílio à decisão para adoção de política de compras por empresas do ramo automobilístico (SALOMON, 2002) e na avaliação de impactos ambientais (LUCENA, 2004).

O PROMETHEE II é um método de sobreclassificação de apoio à decisão que subsidia a realização e a comparação de várias alternativas de decisão, a partir de critérios classificatórios, no intuito de contribuir para a escolha das melhores alternativas dentre aquelas consideradas. Segundo Brans e Mareschal (1994), as principais características deste método são a simplicidade, clareza, estabilidade e flexibilidade.

O ponto de partida deste método é uma matriz de avaliação de alternativas em relação aos critérios. Para cada critério j , deve ser definida

uma função de preferência P_j , que assume valores entre 0 e 1. A metodologia de cálculo e formulação deste método pode ser visualizada em Brans e Vincke (1985), Brans *et al.* (1986) e Beynon e Well (2008).

Segundo Brans *et al.* (1986), o método PROMETHEE II sugere seis formas diferentes para a função preferência: usual tipo I, forma U, forma V, com níveis, linear e gaussiano.

Este método prevê também uma ordenação das alternativas com base na intensidade de preferência e de pesos atribuídos a cada um dos critérios estabelecidos pelos decisores. Brans e Vincke (1985) citam que a intensidade de preferência é determinada em todos os critérios para cada par de alternativas.

A partir das intensidades de preferência e dos pesos atribuídos é possível calcular o índice de preferência. Este índice é um parâmetro que mede a intensidade de preferência de uma alternativa sobre outra levando em consideração todos os critérios. Define uma relação de preferência valorada que pode ser utilizada na ordenação de alternativas.

Depois de calculado o índice de preferência, são calculados o fluxo positivo de sobreclassificação, $\Phi_i^+(a)$, e o fluxo negativo de sobreclassificação, $\Phi_i^-(a)$, conforme Belton e Stewart (2002). O fluxo positivo representa a intensidade de preferência de uma alternativa sobre todas as outras, isto é, o quanto uma alternativa sobreclassifica as demais. Quanto maior $\Phi_i^+(a)$, melhor a alternativa. O fluxo negativo representa a intensidade de preferência de todas as alternativas sobre uma alternativa, ou seja, o quanto uma determinada alternativa é sobreclassificada pelas demais. Quanto menor $\Phi_i^-(a)$, melhor a alternativa.

No PROMETHEE II, uma pré-ordem das alternativas é derivada de um fluxo líquido calculado para cada alternativa, sendo dado pela diferença entre o fluxo positivo e o fluxo negativo. Assim, uma alternativa a irá sobreclassificar uma alternativa b se o fluxo líquido da primeira for maior que o fluxo líquido da última, ou seja, $\Phi_i(a) > \Phi_i(b)$. Uma alternativa a será indiferente a uma alternativa b se seus fluxos líquidos forem iguais, ou seja, $\Phi_i(a) = \Phi_i(b)$.

A partir da informação dos fluxos líquidos, obtêm-se os rankings de cada alternativa, ordenando-as de acordo com a ordem decrescente dos respectivos fluxos líquidos.

O PROMETHEE II permite ainda analisar o grau de complexidade do problema a ser estudado, por meio de um procedimento gráfico denominado *Geometrical Analysis for Iterative Aid* (GAIA). Com este procedimento é possível verificar a maior ou menor influência do peso dos critérios no resultado final (BRANS & MARESCHAL, 2002).

Com relação ao índice de inconsistência, o valor máximo para este modelo é de 0,20, isto é, o modelo deve apresentar uma consistência superior a 80% (PROMETHEE, 2012).

Vários autores têm utilizado este método, como Souza *et al.* (2001) para a análise tecnológica de alternativas pós-tratamento de reatores anaeróbios; Macedo (2008) para estabelecimento de indicadores de

sustentabilidade; e Campos (2011) na decisão multicritério para priorização de projetos de saneamento.

Neste contexto, o objetivo deste artigo consistiu em propor alternativas tecnológicas e arranjos tecnológicos mais adequados para o tratamento dos RSU, por meio do levantamento de informações, aplicação de questionário com especialistas da área e uso de dois modelos de apoio à decisão, AHP e PROMETHEE II, para a hierarquização de tecnologias e estabelecimento de arranjos tecnológicos para o tratamento adequado de resíduos na Região Sul do Brasil.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi concebida em seis etapas, descritas abaixo:

- 1ª etapa – Realização de diagnóstico da situação atual do tratamento de RSU e identificar o estado da arte das alternativas tecnológicas disponíveis para o tratamento dos RSU na Região Sul;
- 2ª etapa – Proposição de critérios ambientais, sociais e econômicos, aliados aos critérios políticos para a seleção hierárquica das alternativas tecnológicas para o tratamento dos RSU;
- 3ª etapa – Elaboração de questionário específico para a área de gestão de resíduos sólidos e aplicação direta com especialistas (profissionais, órgãos ambientais e instituições representativas do setor). Foram enviados 15 questionários para especialistas convidados da região e obtiveram-se respostas de 12 especialistas, representando o atendimento de 80%, podendo esta amostra ser representativa para analisar a região. Os resultados foram compilados para obter um resultado geral e não respostas individuais;
- 4ª etapa – Aplicação dos modelos de apoio à decisão AHP e o PROMETHEE II utilizando os critérios e hierarquias definidos anteriormente para a obtenção de arranjos tecnológicos;
- 5ª etapa – Análise dos resultados fornecidos pelos dois modelos de apoio à decisão para o tratamento de RSU, definindo uma escala hierárquica de arranjos tecnológicos;
- 6ª etapa – Proposição de arranjos tecnológicos para a Região Sul do Brasil referente às possíveis alternativas tecnológicas em forma de cenários regionais.

Assim, a aplicação do modelo AHP foi realizada por meio do software *Expert Choice 11* e foi estruturada conforme fases sequenciais descritas a seguir:

1. Estruturação do problema de forma hierárquica, mostrando os elementos-chave e a relação entre quatro critérios, 17 subcritérios e oito alternativas tecnológicas. A Figura 2 apresenta os critérios e os subcritérios utilizados para cada alternativa tecnológica estudada;

2. Definição das tecnologias que poderiam ser selecionadas para a região, a saber: reciclagem, compostagem, aterro sanitário com e sem geração de energia, tratamento mecânico-biológico, digestão anaeróbia, incineração com geração de energia;
3. Organização dos critérios e subcritérios em matrizes para comparação par a par;
4. Cálculo do peso das alternativas e dos critérios e subcritérios dentro da hierarquia estabelecida;
5. Comparação das alternativas de modo consistente e adequação da escala de comparação elaborada por Saaty (1991);
6. Cálculo da relação de inconsistência para avaliar se o julgamento feito pelo tomador de decisão foi coerente e não apontará para uma decisão equivocada com incomparabilidade entre os critérios e subcritérios;
7. Sumarização dos resultados e elaboração da escala final de valores com as alternativas ordenadas em ordem de preferência.

A aplicação do modelo PROMETHEE II consistiu em analisar os critérios individuais (obtidos na 3ª etapa desta pesquisa) estabelecidos pelos especialistas, incluindo a avaliação dos valores, atribuição de pesos, escolha das funções de preferência e definição dos valores-limite.

Em seguida, foi iniciada a tomada de decisão em grupo, onde todos os decisores passaram a ter uma melhor visão do problema e, assim, realizar a agregação das preferências discutidas.

Esse método propicia a definição de graus de preferência representados por um número real que varia entre 0 (indiferença) e 1 (preferência forte). Para isso, foram seguidas as etapas abaixo:

1. Comparação dos critérios e subcritérios par a par definidos na escala hierárquica, considerando as vantagens de um sobre o outro e sem negligenciar as características comuns;
2. Estabelecimento da aproximação I: os critérios e subcritérios para a definição das alternativas tecnológicas não apresentam relação de incomparabilidade, considerando o resultado da análise do *ranking* total;
3. Estabelecimento da aproximação II: os critérios, os subcritérios e as alternativas estão interligados de forma que um determinado indicador pode refletir parcialmente em outro.

Neste sentido, foram utilizados os mesmos pesos e a mesma escala hierárquica adotada no uso do AHP e realizada a aplicação do modelo por meio do software *Visual PROMETHEE*. Este software permitiu a aplicação dos dados no formato semelhante ao modelo AHP, procedendo assim à análise de sensibilidade desses modelos.

A moda (resposta que mais se repetiu em cada comparação par a par) foi o parâmetro estatístico adotado para representar a preferência para cada resposta.

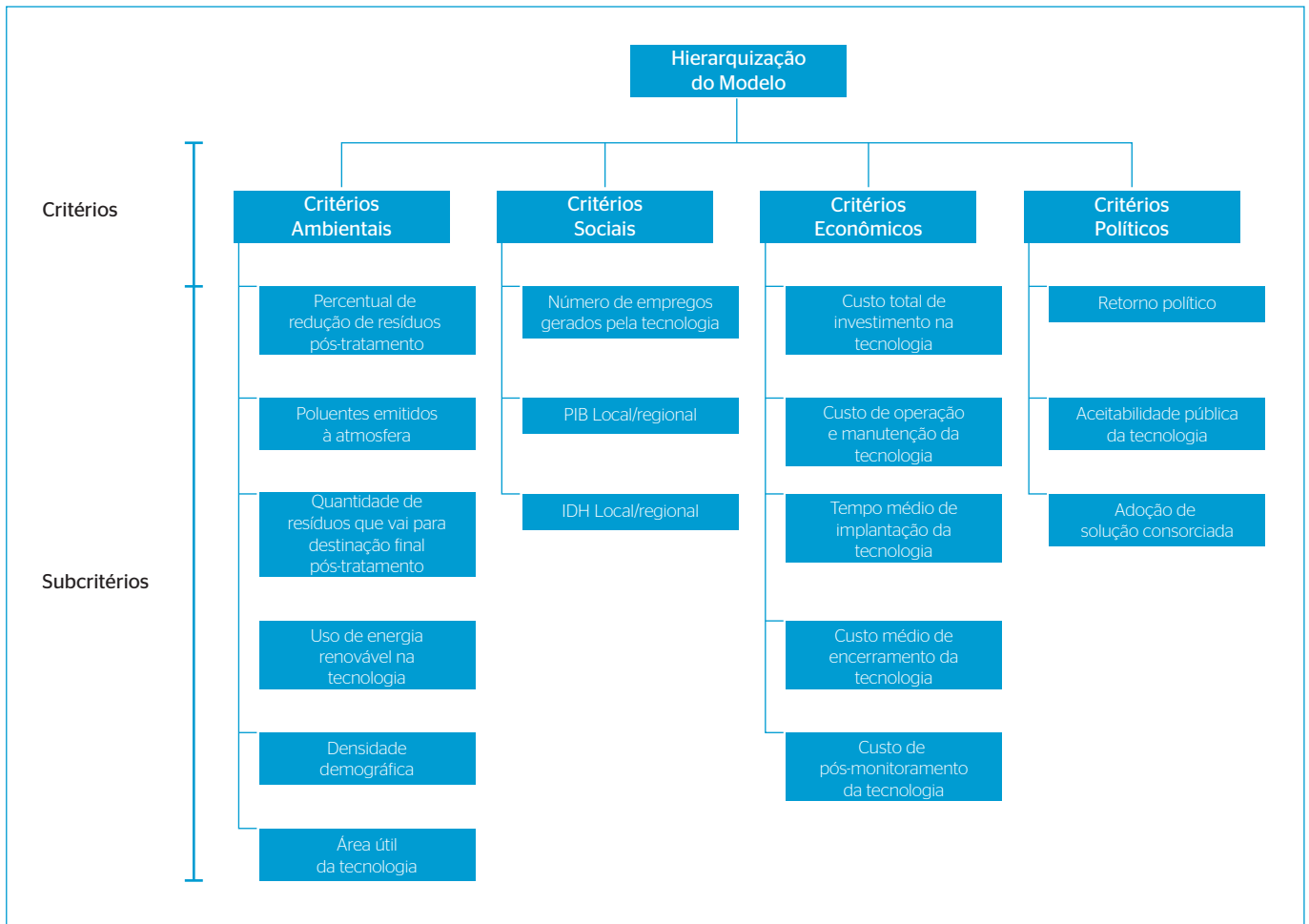


Figura 2 - Hierarquização do modelo AHP - critérios e subcritérios utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de análise multicriterial – AHP e PROMETHEE II – foram estudados e aplicados para analisar algumas alternativas tecnológicas sob a ótica da Região Sul do Brasil, como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, tratamento mecânico biológico, aterro sanitário com geração de energia, incineração com geração de energia elétrica e ciclo combinado (energia elétrica e térmica). Estão apresentados, inicialmente, os resultados e análises no modelo AHP e, em seguida, os resultados e análises do modelo PROMETHEE II.

Os resultados da aplicação numérica dos métodos AHP e PROMETHEE II são mostrados por meio de gráficos, quadros e tabelas extraídos da interface gráfica existente no sistema *Expert Choice* e *Visual PROMETHEE* para os respectivos métodos.

Modelo AHP

A Tabela 1 apresenta os resultados referentes à aplicação do modelo relacionados ao critério ambiental, social, econômico e político, e seus respectivos subcritérios. A soma dos pesos relativos calculados dos critérios é igual a 1,0.

Observa-se que os critérios ambientais e sociais representam 81,5% do peso dos critérios utilizados. O critério político, apesar de grande interferência prática nas soluções adotadas pelas municipalidades, apresenta um peso bastante reduzido, menos de 5% de importância relativa. O critério relacionado ao custo (econômico) da tecnologia foi representativo (14%), porém seu valor indica que seria possível a adoção de tecnologias mais caras, mas que trouxessem maior retorno ambiental e social para a região.

Tabela 1 - Importância relativa do peso dos critérios e subcritérios em relação aos critérios ambiental, social, econômico e político para a Região Sul.

REGIÃO SUL	
Critério	Importância relativa (L)
Ambiental	0,440
Social	0,374
Econômico	0,140
Político	0,046

Por ordem de preferência, estão apresentadas na Figura 3 as indicações de alternativas tecnológicas para o tratamento de RSU na Região Sul. Por ordem de preferência, a alternativa tecnológica da reciclagem foi a mais indicada, seguida do aterro sanitário com geração de energia, da compostagem e do incinerador com geração de energia em ciclo combinado e do aterro sanitário sem geração de energia. Por outro lado, o tratamento mecânico-biológico, a incineração com geração de energia e a digestão anaeróbia foram as alternativas menos indicadas.

Na Figura 4 estão apresentadas, por ordem de prioridade, as alternativas tecnológicas para o tratamento de RSU na Região Sul, com o cálculo do índice de inconsistência. Neste caso, o índice de inconsistência calculado foi de 0,10 e uma consistência de 90%, o que mostra que

a aplicação numérica do modelo é aceitável, sendo que o AHP apresenta robustez, estando dentro dos limites admitidos para este modelo.

Modelo PROMETHEE II (V)

Os fluxos de preferência por tecnologia estão apresentados na Tabela 2, indicando o fluxo positivo (Φ_i^+), o fluxo negativo (Φ_i^-) e o fluxo líquido (Φ_i) obtido pela diferença entre eles para as tecnologias indicadas. A sigla TMB refere-se ao tratamento mecânico-biológico.

A Figura 5 apresenta os resultados de fluxo de preferência obtidos utilizando a interface gráfica do PROMETHEE V. As quatro melhores alternativas tecnológicas para a região estudada, indicadas com os maiores valores do fluxo de preferência (fluxo em rede) são, em ordem

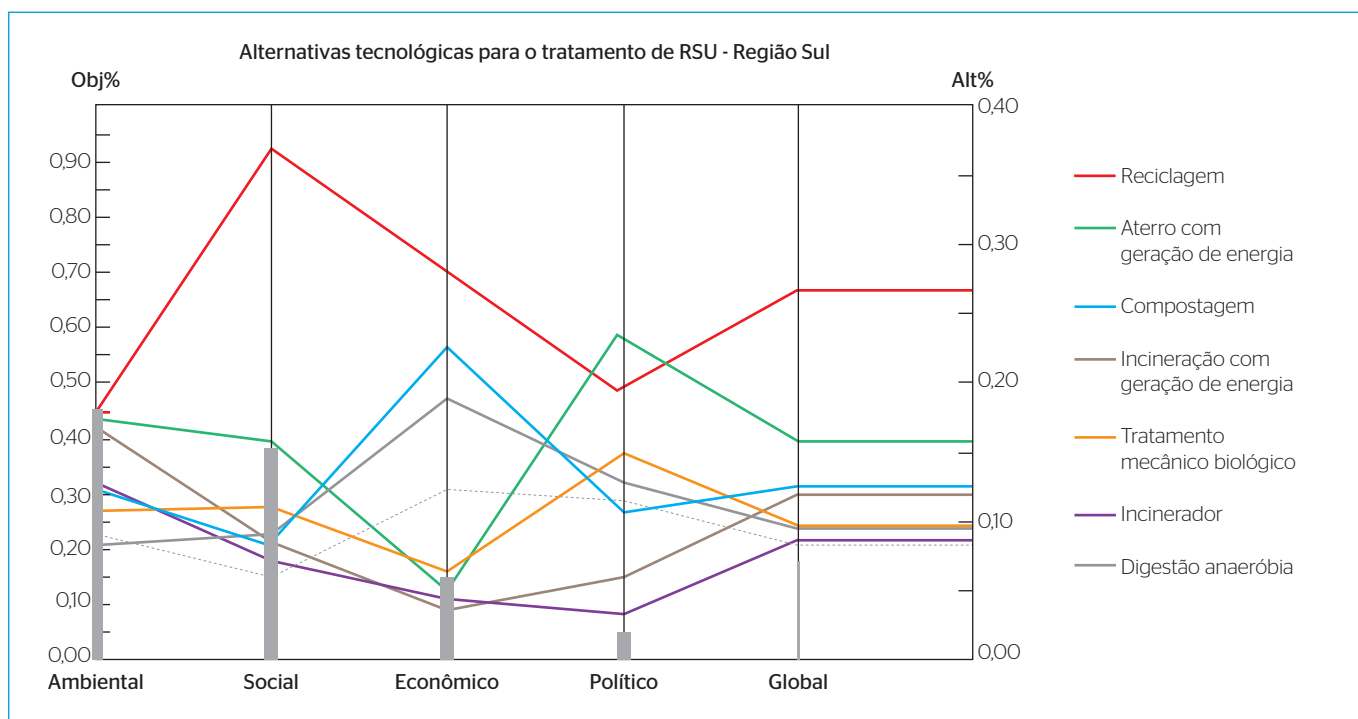


Figura 3 - Alternativas tecnológicas por ordem de prioridade para a Região Sul.



Figura 4 - Indicação do índice de inconsistência dos critérios em relação às alternativas tecnológicas para o tratamento de RSU na Região Sul.

descrescente: reciclagem, digestão anaeróbia, compostagem e aterro sanitário sem geração de energia.

Definição dos arranjos tecnológicos

Os arranjos tecnológicos são um conjunto de possíveis tecnologias que, combinadas, podem indicar uma potencial solução para o tratamento de resíduos em um município ou num conjuntos deles.

Utilizando o modelo AHP, as tecnologias indicadas foram a reciclagem, aterro sanitário com geração de energia, compostagem e incinerador com geração de energia elétrica e térmica em ciclo combinado. Já utilizando o modelo PROMETHEE II, as tecnologias indicadas foram reciclagem, digestão anaeróbia, compostagem e aterro sanitário sem geração de energia. Assim, utilizando os dois modelos para auxiliar na decisão e análise dos arranjos tecnológicos para a região estudada, as potenciais tecnologias são: reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, aterro sanitário com geração de energia, aterro sanitário sem geração de energia e incineração com geração de energia em ciclo combinado.

Tabela 2 - Fluxos de preferência por tecnologia para a Região Sul.

	Tecnologia	Phi	Phi*	Phi
1	Reciclagem	0,1997	0,3708	0,1711
2	Digestão anaeróbia	0,1935	0,3710	0,1775
3	Compostagem	0,1696	0,3441	0,1745
4	Aterro sanitário	0,0471	0,3017	0,2546
5	Tratamento Mecânico-Biológico - TMB	-0,0830	0,2153	0,2983
6	Aterro sanitário com geração de energia	-0,1552	0,1668	0,3219
7	Incinerador com geração de energia	-0,1871	0,1586	0,3457
8	Incinerador	-0,2526	0,1569	0,4095

Para a proposta dos arranjos tecnológicos, foram criados os seguintes portes para os municípios da Região Sul:

- Municípios de pequeno porte: população menor que 30 mil habitantes;
- Municípios de porte intermediário: população entre 30 mil e 250 mil habitantes;
- Municípios de médio porte: população entre 250 mil e 1 milhão de habitantes;
- Municípios de grande porte: população acima de 1 milhão de habitantes.

Estas faixas e portes de municípios foram utilizados para definir os cenários regionais, junto com as potenciais tecnologias de tratamento de RSU obtidas pelos modelos de apoio à decisão. No total, foram definidos quatro arranjos tecnológicos na região, conforme apresentado na Tabela 3. As aplicações e discussões dos arranjos tecnológicos sugeridos neste quadro estão descritas a seguir.

No conjunto de arranjos tecnológicos, a compostagem está integrada com a digestão anaeróbia, visto que para a estabilização do composto

Tabela 3 - Resumo dos arranjos tecnológicos por faixa populacional para a Região Sul.

Item	Arranjo Tecnológico	Faixa Populacional (habitantes)
1	Reciclagem + Aterro sanitário com geração de energia	> 250 mil
2	Reciclagem + Digestão anaeróbia/compostagem + Aterro sanitário sem geração de energia	> 250 mil
3	Reciclagem + Incineração com geração de energia em CHP + Aterro Sanitário sem geração de energia	> 250 mil
4	Reciclagem + Aterro sanitário sem geração de energia	>30 mil <250 mil

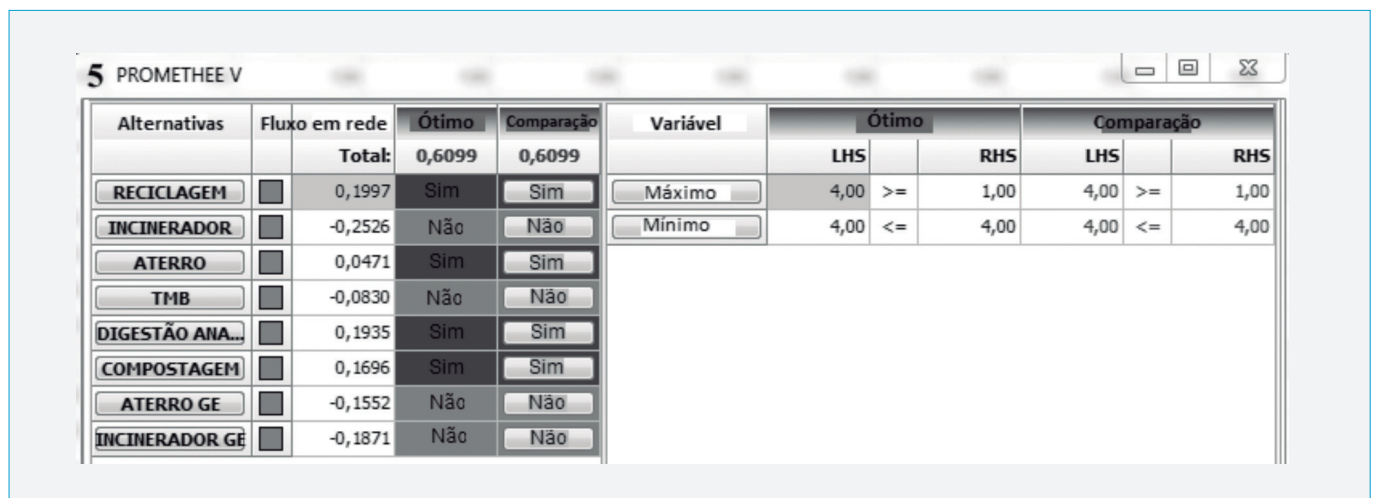


Figura 5 - Tecnologias por ordem de preferência utilizando o PROMETHEE V para a Região Sul.

após digestão anaeróbia a compostagem pode ser utilizada. Esta é uma estratégia para incentivar a valorização energética dos materiais com o uso de biodigestores.

Reciclagem + aterro sanitário com geração de energia

Este arranjo tecnológico pode ser utilizado para os municípios de médio e grande porte, ou conjunto destes com maior densidade demográfica da região, como a região metropolitana de Curitiba, Porto Alegre e Florianópolis. Este arranjo se afirma em função dessas regiões metropolitanas apresentarem o maior PIB *per capita* de toda Região Sul, e esta ser a região de maior desenvolvimento social, econômico e político do Sul do Brasil, onde, segundo relatos dos pesquisadores entrevistados, se encontra o desenvolvimento tecnológico mais avançado com relação aos resíduos sólidos do país.

Reciclagem + digestão anaeróbia/compostagem + aterro sanitário sem geração de energia

Este arranjo é sugerido para os municípios de médio porte da região, e se afirma em função desses municípios apresentarem um maior PIB *per capita* e por terem tradição (principalmente Paraná e Rio Grande do Sul) de separar previamente os resíduos orgânicos dos RSU em geral. Ademais, de acordo com os entrevistados, nesses municípios se encontra o desenvolvimento tecnológico com menor intensidade com relação aos RSU, justificando o não aproveitamento energético dos aterros como sugerido.

Assim, este arranjo tecnológico pode ser aplicado nos municípios ou conjunto destes, abrangendo uma população superior a 250 mil habitantes, que viabilizem uma linha de tratamento mínima de 8t/h, definidos neste estudo como de porte médio.

Nos locais sugeridos para o primeiro e segundo arranjos tecnológicos, pode-se utilizar a formação dos consórcios públicos para o conjunto de municípios (principalmente os das regiões metropolitanas) de forma a obter escala no processamento dos RSU e redução de custos no sistema a ser definido e implantado.

Reciclagem + incineração com geração de energia + aterro sanitário sem geração de energia

Este arranjo é indicado para os municípios de médio e grande portes ou conjunto destes que apresentam uma população superior a 250 mil habitantes que viabilizem linha de tratamento mínima de 8t/h, definidos neste estudo como de médio a grande porte.

Este arranjo tecnológico se afirma para municípios com PIB *per capita* maior e com IDH também maior da região em estudo, por requisitar mão de obra qualificada e, principalmente, para os municípios que detenham modelo de gestão de resíduos sólidos com boa aplicabilidade.

Este arranjo tecnológico pode ser aplicado nos municípios com polos de desenvolvimento industrial para geração de energia,

e sua instalação deve levar em consideração o processo de urbanização local.

Na Região Sul, a figura dos consórcios públicos torna-se fundamental para o conjunto de municípios, de forma a obter escala no processamento dos RSU e redução de custos no sistema a ser definido e implantado.

Reciclagem + aterro sanitário sem geração de energia

Este último arranjo tecnológico é indicado para os municípios de porte intermediário e pequeno porte ou conjunto destes da Região Sul. Este arranjo se afirma apenas para os municípios que não tenham destinação final adequada, e em função de atender ao que determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em sua estrutura de arranjo mais simplificado.

Também se afirma em função dos locais apresentarem o segundo maior PIB *per capita* de toda Região Sul, aliado ao desenvolvimento social, econômico e político em crescimento. Nesta região, poucos municípios apresentam disposição final inadequada, havendo portanto poucos municípios para a indicação do aterro sanitário sem geração de energia como disposição final dos resíduos.

Este arranjo tecnológico pode ser aplicado nos municípios dos polos de desenvolvimento regional, definidos neste estudo como de porte intermediário a pequeno porte.

Como nas regiões sugeridas para os arranjos anteriores, a formação dos consórcios públicos torna-se fundamental para o conjunto de municípios, de forma a obter escala no processamento dos RSU e redução de custos no sistema a ser definido e implantado.

De uma forma sumarizada, apresenta-se na Figura 6 o resumo dos arranjos tecnológicos propostos, com base nos resultados e análises obtidos neste estudo.

CONCLUSÕES

Com o resultado apresentado pelo modelo hierárquico utilizado nos dois modelos de apoio à decisão, pode-se afirmar que, em função da metodologia e dos critérios e subcritérios adotados, foi possível determinar as potenciais tecnologias e propor os arranjos tecnológicos mais indicados para o tratamento adequado dos RSU na Região Sul do Brasil.

Como resultado, pôde-se propor quatro arranjos tecnológicos possíveis para a Região Sul do Brasil, compatíveis com a aplicação dos dois modelos de apoio à decisão, o AHP e PROMETHEE II.

Os resultados obtidos são compatíveis com a proposta dos autores de oferecer aos decisores um *ranking* completo de alternativas que contribua para a melhoria do processo de tomada de decisão em escolhas de alternativas tecnológicas de tratamento de RSU na região.

O modelo AHP se mostrou eficiente na definição das alternativas tecnológicas, mesmo utilizando dados qualitativos; e o modelo PROMETHEE

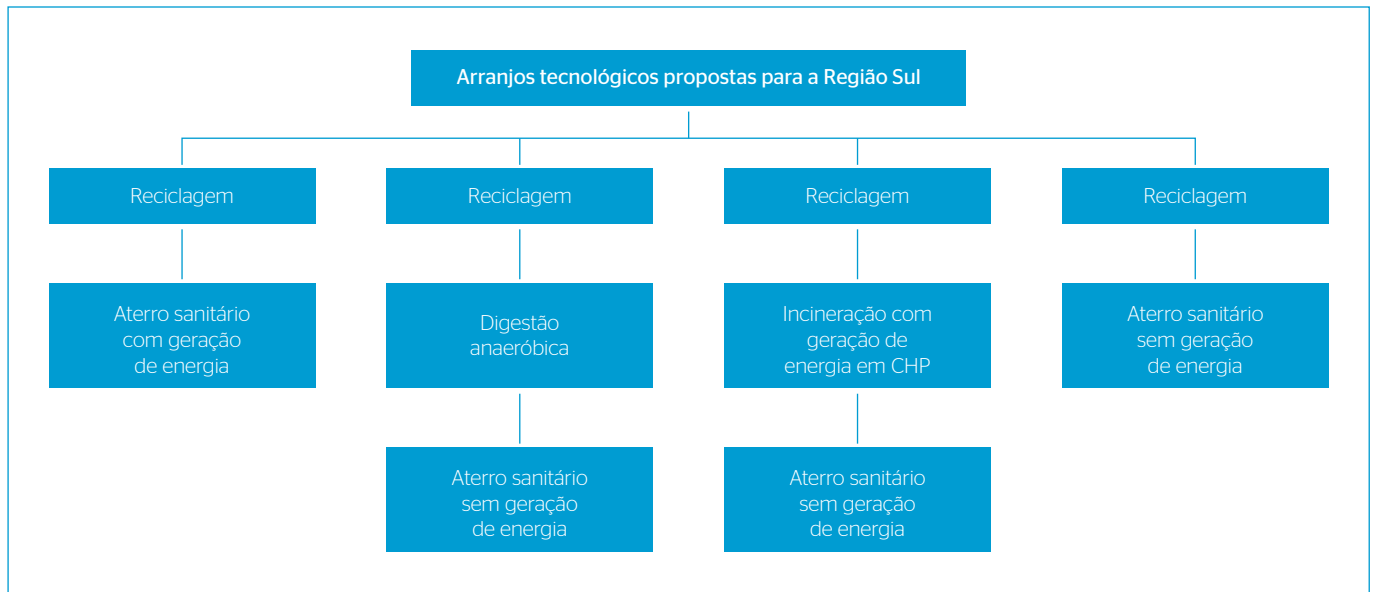


Figura 6 - Resumo dos arranjos tecnológicos propostos para a Região Sul.

II se mostrou mais eficiente na definição das alternativas tecnológicas, pois são requisitados dados qualitativos e quantitativos da região, possibilitando uma maior compreensão dos estudos aqui propostos.

Os modelos de apoio à decisão aqui utilizados, quando estabelecidas escalas hierárquicas adequadas, podem atender a PNRS e seu Plano Nacional de Resíduos de forma eficiente, considerando em sua aplicação arranjos tecnológicos com soluções isoladas ou arranjos tecnológicos em forma consorciada.

Outro ponto importante para a região é que a utilização destes modelos de apoio à decisão podem se tornar uma importante ferramenta de

gestão, com possibilidade de estudar outros cenários na própria região e em outras regiões geográficas do Brasil.

Além disso, recomenda-se o aperfeiçoamento da metodologia empregada, com a utilização de outros métodos multicriteriais que permitam tratar de questões mais complexas como a maximização dos resultados obtidos para a otimização dos investimentos a serem realizados, a maximização da capacidade de receber a transferência das novas tecnologias e a maximização dos processos de educação ambiental e comunicação social na região, no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2011*. ABRELPE, 2011.
- ALMEIDA, A.T. *Conhecimento e uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. [S.l.]: Editora Universitária, 2009.
- AZEREDO, J.S.; PAULA JUNIOR, G.G.; SANTOS, R.B.O.; BARRETO, D.N.S. & GONÇALVES, T.J.M. *Utilização do método de análise hierárquica (AHP) para a seleção de um sistema integrado de gestão (ERP)*. XXIX Encontro Nacional de Engenharia da Produção. Salvador (BH), 2009.
- BELTON, V. & STEWART, J. *Multiple criteria decision analysis – an integrated approach*. London: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BEYNON, M. & WELLS, P.J. The lean improvement of the chemical emissions of motor vehicles based on preference ranking: A PROMETHEE uncertainty analysis. *OMEGA – International Journal of Management Science*, v. 36, n. 3, p. 384-394, 2008.
- BRANS, J.P. & MARESCHAL, B. The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems*, v. 12, p. 297-310, 1994.
- BRANS, J.P. & MARESCHAL, B. *PROMETHEE – GAIA: une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles, 2002.
- BRANS, J.P. & VINCKE, P. Note – A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science*, v. 31, p. 647-656, 1985.
- BRANS, J.P. & VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, v. 24, p. 228-238, 1986.
- BRASIL. Lei nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).
- CAMPOS, V.R. *Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento*. Tese (doutorado). São Carlos: EESC/USP, 2011.
- FREITAS, H.; BECKER, J.L.; KLADIS, C.M.; HOPPEN, N. *Informação e decisão: sistemas de apoio e seu impacto*. Porto Alegre: Ortiz, 1997.

- GOMES, L.F.A.M. *Teoria da decisão*. São Paulo: Thomson, 2007.
- GRANDZOL, J.R. Improving the faculty selection process in higher education: A case for the analytic hierarchy process. *IR Applications*, v. 6, n. 24, 2005.
- IAÑES, M.M. & CUNHA, C.B. Uma metodologia para a seleção de um provedor logístico. *Revista Produção*, v. 16, n. 3, p. 394-412, 2006.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2010*. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, v. 7, 2010.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2008.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produto Interno Bruto dos Municípios 2005-2009*. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2009.
- KEENEY, R.L. & RAIFFA, H. *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. New York: John Wiley, 1976.
- LUCENA, L.F.L. A análise multicriterial na avaliação de impactos ambientais. Disponível em: www.nepam.unicamp.br/ecoeco/artigos/encontros/downloads/mesa3/7.pdf
- MACEDO, M.G.C. *Indicadores de sustentabilidade ambiental na indústria da mineração: avaliação pelo método Promethee II*. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Faculdades Ibmec, 2008.
- PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. *PIB per capita para o Brasil e regiões geográficas*, 2010.
- PROMETHEE. Based Visual Promethee Software. Operational Research Society, version Education - 0.99.99.112, London, 2012.
- ROPER-LOWE, G.C. & SHARP, J. A. The analytic hierarchy process and its application to an information technology decision. *Journal of Operational Research Society*, v. 41, n.1, p. 49-59, 1990.
- SAATY, T.L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, T.L. *Método de análise hierárquica*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1991.
- SALOMON, V.A.P. Auxílio à decisão para adoção de políticas de compras. *Revista Produto e Produção*, v. 6, 2002.
- SOUZA, M.A.; CORDEIRO NETTO, O.M.; CARNEIRO, G.A.; LOPES JR, R.P. *Análise tecnológica de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: resultados da avaliação multiobjetivo*. In: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; AIDIS. Saneamento ambiental: desafio para o século 21. Rio de Janeiro, ABES, 2001. p. 1-22.
- VILAS BOAS, C.L. *Análise da aplicação de métodos multicritérios de decisão na gestão de recursos hídricos*. XVI Simpósio de Recursos Hídricos. Integrando a gestão de águas às políticas sociais e de desenvolvimento econômico. João Pessoa, Brasil, 2005.
- VINCKE, P. Analysis of multicriteria decision aid in Europe. *European Journal of Operational Research*, v. 25, p. 160-168, 1986.
- ZUFFO, A.C. *Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos*. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.