

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

*José Dantas de Lima¹
José Fernando Thomé Jucá²
Claudia Coutinho Nóbrega³
Maria Odete de Holanda Mariano⁴
Francisco Humberto de Carvalho Junior⁵
Maria Tereza Campelo D. de Lima⁶

*A DECISION SUPPORT MODEL FOR ALTERNATIVE
TECHNOLOGY OF MUNICIPAL SOLID WASTE
TREATMENT IN REGION NORTHEAST OF BRAZIL*

Recibido el 18 de marzo de 2013; Aceptado el 29 de noviembre de 2013

Abstract

The study of models for decision support technology alternatives for treating municipal solid waste for the Northeast Region of Brazil aimed to propose alternative treatment in the form of technological arrangements, criteria based on environmental, social, economic and political. To this end, we used two models for decision support, model Analytic Hierarchy Process - AHP and Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations – PROMETHEE II(V), so depending on their relevance, was proposed a way of ranking the identified technologies for the treatment of the waste in the region. The ranking produced as the final result a set of technologies that have become analyzed technological arrangements for the treatment of solid wastes in northeastern Brazil, given that determines National Policy on Solid Waste - PNRS. The results showed that the models used were found to be a suitable tool for the proposition of alternative waste treatment technology and can be applied in isolated situations or in public consortia.

Keywords: decisionsupportmodel, management andwastetreatmenttechnologies.

¹ Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana de João Pessoa-PB, Brasil

² Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

³ Universidade Federal da Paraíba, Brasil

⁴ Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, Brasil

⁵ Instituto Federal de Educação do Estado do Ceará, Brasil

⁶ Consultoria em Saneamento Ambiental, Brasil

*Autor correspondente: Rua Ciro Tróccoli, 1180 – Colibris – João Pessoa-PB E-mail: dantast@terra.com.br

Resumo

O estudo de modelos de apoio à decisão para alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos, para a Região Nordeste do Brasil, teve como objetivo propor alternativas de tratamento em forma de arranjos tecnológicos, baseados em critérios ambientais, sociais, econômicos e políticos. Para tanto, utilizou-se de dois modelos de apoio à decisão, o modelo AnalyticHierarchyProcess - AHP e o Preference Ranking OrganizationMethod for EnrichmentEvaluations - Promethee II(V), para que em função da sua relevância, fosse proposta uma forma de hierarquização das tecnologias identificadas para o tratamento dos resíduos sólidos na região. A hierarquização produziu como resultado final um conjunto de tecnologias que analisadas se tornaram arranjos tecnológicos para o tratamento de resíduos sólidos na região Nordeste do Brasil, atendendo ao que determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS. Os resultados obtidos mostraram que os modelos utilizados apresentaram-se como uma ferramenta adequada para a proposição de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos e pode ser aplicada em situações isoladas ou em consórcios públicos.

Palavras Chave: gestão, tecnologias de tratamento de resíduos, modelo de apoio à decisão.

Introdução

A região Nordeste do Brasil é constituída por nove (09) estados e a Ilha de Fernando de Noronha, totalizando uma população de 53.081.510 habitantes (IBGE, 2010), ocupando uma área de 1.558.156 Km² e representa 27,83% da população Brasileira. A Figura 1 mostra a localização da região Nordeste do Brasil.



Figura 1. Mapa da Região Nordeste do Brasil

O produto interno bruto (PIB) *per capita* médio da região é de R\$ 10379.55 (IBGE, 2013) e o IDH médio de 0.699 (PNUD, 2010). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2012) esta região produz 51689 t/dia, possui uma geração *per capita* de 1.309 Kg/hab/dia de resíduos sólidos urbanos (RSU), dos quais coletam apenas 40021 t/dia com índice de coleta de RSU de 77.43%. Ainda de acordo com a ABRELPE (2012) os resíduos sólidos gerados na região, 35.40% são dispostos em aterros sanitários e 64.60% são dispostos inadequadamente em aterros controlados e lixões, necessitando-se urgentemente de alternativas tecnológicas de tratamento para os resíduos sólidos urbanos (RSU) adequados que modifiquem o atual cenário com relação aos impactos ambientais, sociais e econômicos. O tratamento e a destinação final adequada dos resíduos gerados em qualquer municipalidade dependem sempre de alguma alternativa tecnológica, ou seja, de tecnologias, sejam elas, mais simplificadas, sejam elas, mais evoluídas tecnologicamente. Para a sua adoção deve se levar em consideração uma série de aspectos, como:

- Os aspectos técnicos, considerando-se aqui a geração dos resíduos, características dos resíduos, seus aspectos qualitativos e quantitativos, geografia da região, geomorfologia, pluviometria, urbanização, distância do centro gerador, aspectos de localização e aspectos urbanísticos.
- Os aspectos ambientais, considerando-se que as tecnologias devem atender ao que determina toda legislação ambiental.
- Os aspectos econômicos, considerando-se a capacidade financeira de investimentos e a capacidade de operação e manutenção das tecnologias e os aspectos políticos, que no Brasil são demasiadamente importantes em função da descontinuidade administrativa após a mudança de gestor, que tem trazido cenários negativos na consolidação de tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos, tornando-se uma das maiores anti-políticas públicas existentes no Brasil.
- 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 *AnalyticHierarchyProcess* (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, a saber:

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

- c) Determinar as prioridades relativas do peso dos atributos de decisão em cada nível ou grupo;
- d) 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& 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&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&Vincke (1985), Brans et al. (1986) e Beynon&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&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& 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 Interactive 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 geral deste artigo é propor alternativas tecnológicas adequadas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, para a região nordeste do Brasil, em forma de arranjos tecnológicos utilizando-se de dois métodos de apoio à decisão.

Metodologia

A metodologia utilizada nessa pesquisa foi concebida em seis etapas:

- 1^a Etapa. Realização de diagnóstico da situação atual do tratamento de resíduos, na Região Nordeste do Brasil e, identificar o estado da arte das alternativas tecnológicas disponíveis para o tratamento dos resíduos sólidos domiciliares nesta região.
- 2^a Etapa. Proposição de critérios ambientais, sociais e econômicos, aliados aos critérios políticos para a seleção hierárquica das alternativas tecnológicas para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos.
- 3^a Etapa. Elaboração de questionário específico para a área de resíduos sólidos e aplicá-lo com especialistas (profissionais, órgãos ambientais e instituições representativas do setor). Os resultados foram compilados de maneira a se obter um resultado da região, e não respostas individuais.
- 4^a Etapa. Aplicação dos modelos de apoio a decisão AHP e o PROMETHEE II (V) utilizando os critérios e hierarquias definidos, anteriormente, para a obtenção de arranjos tecnológicos para a região Nordeste do Brasil.
- 5^a Etapa. Análise dos resultados fornecidos pelos dois modelos de apoio à decisão para o tratamento de resíduos sólidos, para a região Nordeste do Brasil, definindo uma escala hierárquica de arranjos tecnológicos.
- 6^a Etapa. Proposição de arranjos tecnológicos para a região Nordeste do Brasil, referente as possíveis alternativas tecnológicas em formas de cenários regionais.

A Figura 2 mostra o resumo destas etapas metodológicas, com os critérios ambientais, sociais, econômicos e políticos, adotados nesta pesquisa, para a hierarquização das alternativas tecnológicas disponíveis para o tratamento do RSU.

Ao aplicar o modelo AHP, seguiram-se os seguintes passos: Estruturou-se o problema de forma hierárquica, mostrando os elementos-chave e os relacionamentos entre critérios, subcritérios e as alternativas definindo-se quatro (04) critérios e dezessete (17) subcritérios e oito (08) alternativas tecnológicas. A Figura 3 mostra os critérios destacados em amarelo e os subcritérios utilizados destacados em azul.

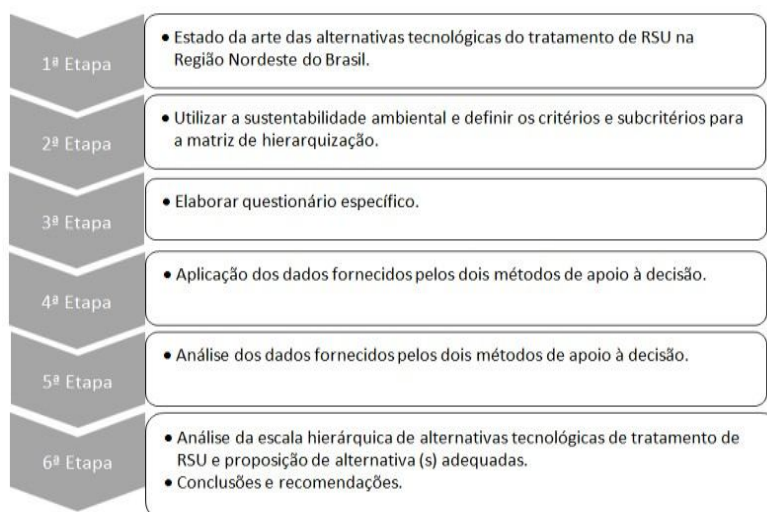


Figura 2. Esquema das etapas metodológicas

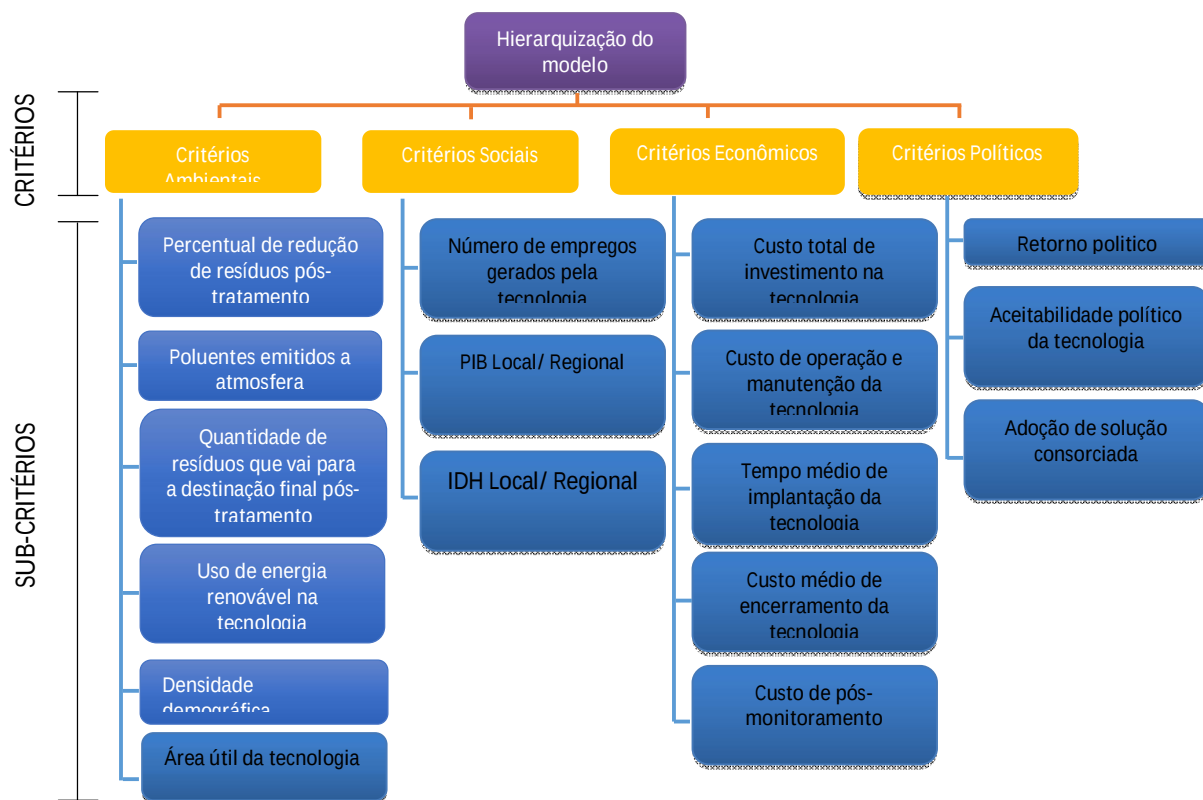


Figura 3. Hierarquização do Modelo AHP – Critérios e subcritérios utilizados

1. Definiram-se as tecnologias que poderiam ser selecionadas para a região. A saber: reciclagem, compostagem, aterro sanitário com e sem geração de energia, tratamento mecânico-biológico - TMB, digestão anaeróbia (D.A), incineração com geração de energia e em ciclo combinado (CHP).
2. Organizaram-se os critérios e subcritérios em matrizes para comparação par a par.
3. Calcularam-se os pesos das alternativas e dos critérios e subcritérios dentro da hierarquia estabelecida.
4. Compararam-se as alternativas de modo consistente, usando o conhecimento sobre o tema, de forma a obter-se resultados consistentes. Adequou-se então a escala de comparação elaborada por Saaty (SAATY,1991).
5. Calculou-se a relação de consistência para avaliar se o julgamento feito pelo tomador de decisão é coerente e não levará a uma decisão equivocada.
6. Sumarizaram-se os resultados e foi elaborada a escala final de valores com as alternativas ordenadas em ordem de preferência.

Ao aplicar o Promethee II(V) um aspecto muito importante considerado foi o fato de que para a tomada de decisão em grupo, os decisores impõem seus critérios individuais, os quais podem ser comuns aos outros decisores ou não e, os avaliam de acordo com seus próprios sistemas de valores, atribuindo pesos, escolhendo as funções de preferência e definindo os limiares, o que proporciona uma maior liberdade ao decisor em expor o seu ponto de vista. Assim, todos os decisores passam a ter uma visão melhor do problema e a partir daí, é realizada a agregação das preferências, gerando a decisão em grupo. Deste modo, o Promethee II(V) se apresentou mais adequado no contexto da aplicação do modelo, no qual são considerados vários agentes decisores e cuja interação é muito importante no caso em estudo.

Esse método propicia a definição de graus de preferência representados por um número real que varia entre 0 (indiferença) e 1 (preferência forte), a esta abordagem:

- a) comparam-se os critérios e subcritérios definidos na escala hierárquica considerando as vantagens de um sobre o outro e sem negligenciar as características comuns entre eles;
- b) consideram-se que os critérios e subcritérios para a definição das alternativas tecnológicas para cada um deles não apresentam relação de incomparabilidades, no caso de utilização do Promethee II, que apresenta com resultado da análise o ranking total;
- c) consideram-se que os critérios, subcritérios e as alternativas estão interligados, de forma que um determinado indicador pode refletir parcialmente em outro.

Neste sentido, utilizou-se dos mesmos pesos e da mesma escala hierárquica utilizada para o AHP e procedeu-se a aplicação do modelo através do software Visual Promethee. Neste software permitiu-se a aplicação dos dados que foram tratados de igual forma que os do modelo AHP, e procedeu-se, então, a análise de sensibilidade desses dados.

Foram enviados vinte (20) questionários a especialistas convidados e obtiveram-se respostas de dezesseis (16) especialistas, o que representa 80%, considerado uma amostra representativa da região. A análise e o tratamento dos dados fornecidos pelo questionário foram iguais para os dois métodos de apoio à decisão (AHP e Promethee II(V)) onde se obteve a média, a moda e a mediana de cada comparação par a par entre os critérios e entre os subcritérios. Para fins de tratamento definiu-se a moda como o parâmetro a ser usado para a aplicação no software Expert Choice 11 e Visual Promethee.

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 Nordeste do Brasil, como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, tratamento mecânico biológico, aterro sanitário com e sem 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 mostra os resultados referentes à importância relativa entre cada critério. A soma dos pesos relativos calculados dos critérios é igual a 1.0.

Tabela 1. Importância relativa dos pesos dos critérios e subcritérios em relação aos critérios 181 ambiental, social, econômico e político para a Região Nordeste

REGIÃO NORDESTE	
CRITÉRIO	Importância Relativa (L)
Ambiental	0.410
Social	0.298
Econômico	0.232
Político	0.060

Observa-se que os critérios ambientais e sociais representam 70% do peso dos critérios utilizados e que o critério político, apesar de grande interferência prática nas soluções adotadas pelas municipalidades, apresenta um peso bastante reduzido, menos de 10% de importância relativa. O critério de custo da tecnologia foi representativo, porém, seu valor indica que seria possível a adoção de tecnologias mais caras, porém que trouxessem maior retorno ambiental e social.

A Figura 4 mostra por ordem de preferência as alternativas tecnológicas para o tratamento de resíduos domésticos na região Nordeste. Pela ordem de preferência, a alternativa tecnológica da reciclagem foi a mais indicada, seguida do aterro sanitário com e sem geração de energia, da compostagem, do TMB e da incineração com geração de energia em ciclo combinado. Por outro lado, a digestão anaeróbia e a incineração com geração de energia foram às alternativas menos indicadas.

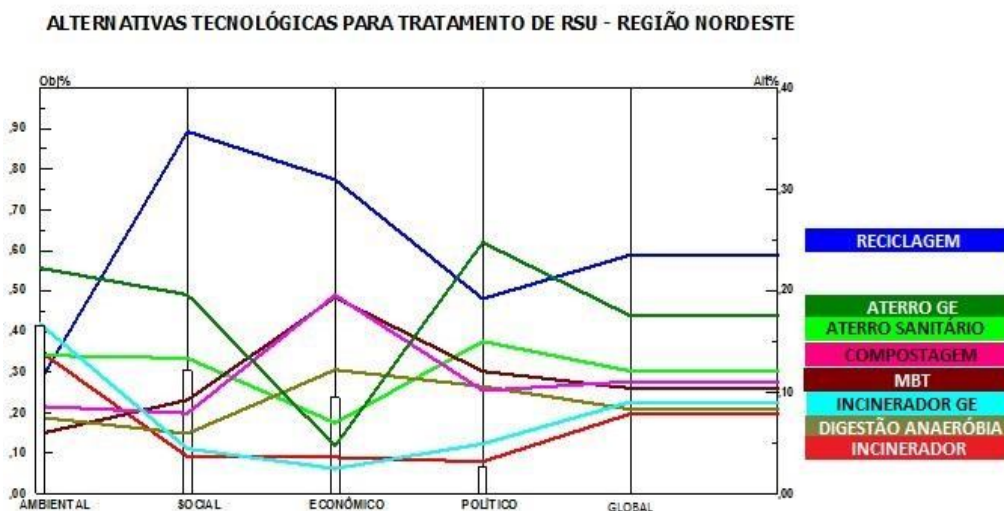


Figura 4. Alternativas tecnológicas por ordem de prioridade para a Região Nordeste

A Figura 5 mostra, por ordem de prioridade, as alternativas tecnológicas para o tratamento de resíduos urbanos na região Nordeste com o cálculo do índice de inconsistência, que representa a robustez do modelo adotado e que neste caso foi de 0,09, ou seja, uma consistência de 91% para esta aplicação, superior, portanto ao limite exigível.

Alternativas Tecnológicas para Tratamento de RSU - Região Nordeste
Inconsistência Global = 0,09

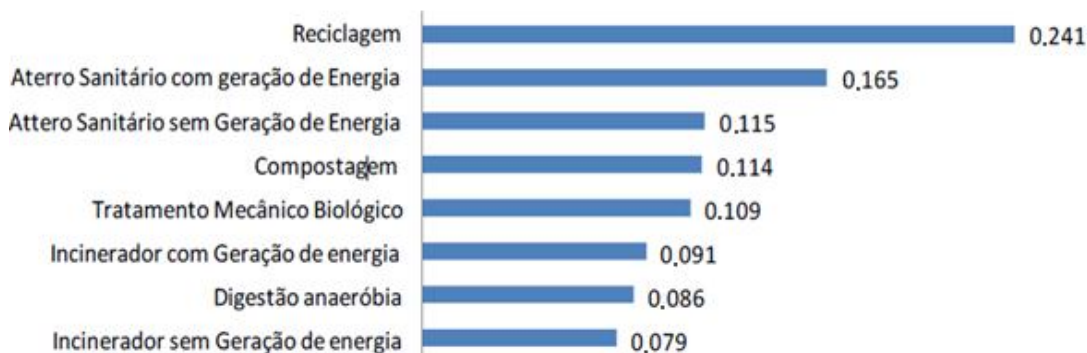


Figura 5. Indicação do índice de inconsistência da importância relativa dos critérios em relação as alternativas tecnológicas para o tratamento de resíduos domésticos na Região Nordeste

Modelo Promethee II (V)

Na Tabela 2 é apresentado os fluxos de preferência por tecnologia, indicando o fluxo positivo (Phi+), o fluxo negativo (Phi-) e o fluxo líquido (Phi), obtido pela diferença entre eles para a tecnologia indicada. O Fluxo líquido positivo representa a melhor alternativa entre as comparações par a par e o fluxo líquido negativo representam as piores alternativas.

Tabela 2. Fluxos de preferência por tecnologia para a região Nordeste

	Alternativa	Phi	Phi+	Phi-
1	ATERRO	0,1634	0,4250	0,2616
2	RECICLAGEM	0,1377	0,4859	0,3482
3	COMPOSTAGEM	0,1249	0,4011	0,2762
4	DIGESTÃO	0,0474	0,3599	0,3125
5	TMB	-0,0427	0,3090	0,3516
6	ATERRO GE	-0,0856	0,2917	0,3772
7	INCINERADOR	-0,1717	0,3238	0,4955
8	INCINERADOR GE	-0,1734	0,2469	0,4203

A Figura 6 mostra as tecnologias por ordem de preferência, usando-se o PROMETHEE II. Esta Figura apresenta o ranking total, ao aplicar os pesos atribuídos aos critérios e subcritérios, relacionando as tecnologias. Esta ordenação é obtida e corresponde a uma pré-ordem total, já que não apresenta uma relação de incomparabilidade entre as alternativas.

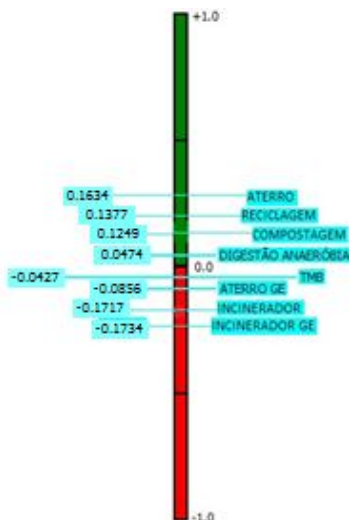


Figura 6. Tecnologias por ordem de preferência. Ranking total – Promethee II para a região Nordeste

A Figura 7 mostra os resultados das quatro (04) melhores alternativas usando o modelo Promethee (V), indicando que o aterro sanitário, a reciclagem, a compostagem e a digestão anaeróbia são as melhores alternativas tecnológicas para o tratamento de RSU para a região Nordeste.

5 PROMETHEE V										
Alternativas	Fluxo em rede	Fluxo em rede		Variável	Comparação					
		Fluxo em rede	Fluxo em rede		LHS	RHS	LHS	RHS		
	Total	0.4733	0.4733							
RECICLAGEM	0.1377	Sim	Sim	Máximo	4.00	>=	1.00	4.00	>=	1.00
INCINERADOR	-0.1717	Não	Não	Mínimo	4.00	<=	8.00	4.00	<=	8.00
ATERRO	0.1634	Sim	Sim							
TMB	-0.0427	Não	Não							
DIGESTÃO ANA...	0.0474	Sim	Sim							
COMPOSTAGEM	0.1249	Sim	Sim							
ATERRO GE	-0.0856	Não	Não							
INCINERADOR GE	-0.1734	Não	Não							

Figura 7. Tecnologias por ordem de preferência, Ranking total – Promethee (V) para a região Nordeste

De posse do conhecimento das tecnologias de tratamento de resíduos priorizadas pelos dois modelos de apoio à decisão, foram adotadas as tecnologias de reciclagem, compostagem, aterro sanitário com geração de energia, aterro sanitário sem geração de energia e incineração com geração de energia com ciclo combinado como as tecnologias que poderiam ser utilizadas nos arranjos tecnológicos da região Nordeste. Porém, como a região apresenta municípios com uma grande variação na faixa populacional, também adotou-se este critério para a escolha de arranjos tecnológicos da região.

No total foram definidos quatro (04) arranjos tecnológicos a região conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo dos Arranjos Tecnológicos por faixa populacional para a região Nordeste

ARRANJO TECNOLÓGICO	Faixa Populacional
reciclagem + aterro sanitário sem geração de energia	< 30000 habitantes
reciclagem + compostagem + aterro sanitário sem recuperação de energia	entre 30000 e 250000 habitantes
reciclagem + Aterro Sanitário com geração de energia	> 250000 habitantes
reciclagem + incineração com geração e ciclo combinado + aterro sanitário sem recuperação de energia	> 1000000 habitantes

O Primeiro arranjo tecnológico proposto é baseado nas premissas mínimas para o atendimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) e, pode ser utilizado para qualquer porte de município, porém foi pensado, prioritariamente, para os municípios menores ou conjunto destes, pois, de maneira geral, estes municípios apresentam os menores PIBs *per capita* de toda região, e possuem menor desenvolvimento social, econômico e político do Nordeste do Brasil. Este arranjo deve predominar na região Nordeste em curto à médio prazo, para a partir deste, a região evoluir para arranjos mais tecnológicos. É necessário salientar que este arranjo atinge 1505 municípios, representando 81% dos municípios da região.

A formação dos consórcios públicos torna-se importante para o conjunto de municípios, de forma a se obter escala no processamento dos RSU e redução de custos no sistema implantado. O segundo arranjo tecnológico proposto é formado pela reciclagem + compostagem + aterro sanitário sem aproveitamento energético e foi, prioritariamente, pensado para os municípios com população entre 30000 e 250000 habitantes, o que representa 324 municípios, isto é, 22% dos municípios da região.

Este arranjo tecnológico se afirma em função desta região apresentar PIB *per capita* intermediário de toda região e, a quantidade de resíduos gerados ainda não justificar economicamente a utilização do aterro sanitário como fonte geradora de energia, porém a matéria orgânica existente na massa de resíduo coletada seria processada pela tecnologia de compostagem.

O terceiro arranjo tecnológico proposto incorpora as tecnologias mais bem avaliadas nos modelos de apoio à decisão utilizados, que foram as tecnologias de reciclagem e aterro sanitário com geração de energia e pode ser utilizado para os municípios ou conjunto destes com população superior a 250000 habitantes.

Este arranjo tecnológico pode incorporar os principais municípios de médio e grande porte da região e que apresentarem um bom desenvolvimento social, incluindo as todas as capitais dos Estados, os municípios que compõem as regiões metropolitanas e os polos de maior desenvolvimento social e econômico da Região. O que representa isoladamente 17.20% dos municípios da região, isto é, 21 municípios.

O quarto e último arranjo tecnológico proposto, para a região Nordeste do Brasil, é composto pela reciclagem + incineração com geração de energia + aterro sanitário para os municípios de porte médio a grande porte, com populações superiores a 1.000.000 habitantes ou conjunto destes que tenham um PIB com faixa superior a 0.68, o que representa 0.20% dos municípios, isto é, 4 municípios da região. Este arranjo tecnológico se afirma para as maiores capitais do Nordeste que possuem maior desenvolvimento industrial bem como tenham implantados os melhores modelos de gestão de resíduos sólidos urbanos.

Observa-se claramente que para os arranjos tecnológicos mais avançados (aterro sanitário com aproveitamento energético e incineração de resíduos com geração de energia em ciclo combinado), uma grande necessidade de consórcios municipais, pois a quantidade de municípios onde estas tecnologias poderiam ser implementadas na região é muito baixa, tornando-os arranjos tecnológicos pontuais não representando assim a hegemonia na região.

De maneira geral, para todos os arranjos tecnológicos sugeridos, deve se priorizar a formação dos consórcios públicos para o conjunto de municípios de forma a se obter escala no processamento dos RSU e redução de custos no sistema a ser definido e implantado. A Figura 8 mostra o resumo dos arranjos tecnológicos propostos para a região Nordeste.

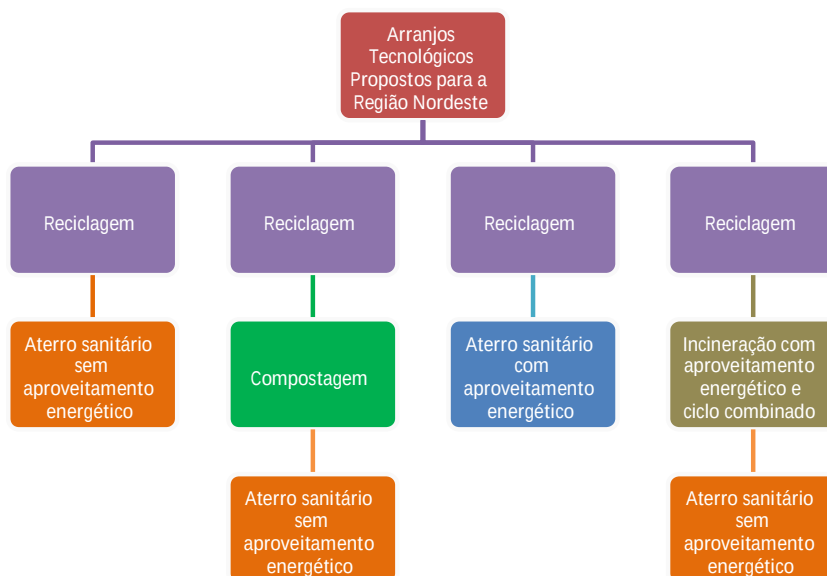


Figura 8. Resumo dos arranjos tecnológicos propostos para região Nordeste

Conclusões

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

Como resultado destes arranjos pôde-se propor quatro arranjos tecnológicos possíveis para a região nordeste do Brasil, compatível com a aplicação dos dois modelos de apoio à decisão. Os resultados obtidos são compatíveis com a proposta dos autores em oferecer aos decisores um *ranking* completo de alternativas tecnológicas que contribua para a melhoria do processo de tomada de decisão em escolhas de alternativas tecnológicas de tratamento de RSU na Região Nordeste.

Outro ponto importante para a região é que a utilização destes modelos de apoio à decisão, 301 podem se tornar uma importante ferramenta de gestão com possibilidade de se estudar outros 302 cenários na própria região e nas outras regiões geográficas do Brasil.

O modelo AHP se mostrou eficiente na definição das alternativas tecnológicas, mesmo utilizando-se de dados qualitativos, e o modelo Promethee II(V) se mostrou mais eficiente na definição das alternativas tecnológicas, pois são requisitados dados qualitativos e quantitativos, 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 de consórcios públicos.

Outro ponto importante para a Região Nordeste do Brasil 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 nordeste e no Brasil.

Referências bibliográficas

- Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais - ABRELPE. (2012) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. p.116.
- Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais - ABRELPE. (2010) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. p. 184.
- Almeida, A. T. (2009) *Conhecimento e uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. [S.l.]: Editora Universitária.
- Azeredo, J. S. et al. (2009) *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).
- Belton, V.; Stewart, J. (2002) *Multiple criteria decision analysis – an integrated approach*. London: Kluwer Academic Publishers.
- Beynon, M.; Wells, P. J. (2008) The lean improvement of the chemical emissions of motor vehicles based on preference ranking: A PROMETHEE uncertainty analysis. *OMEGA – International Journal of Management Science*, **36**(3), 384-394.
- Brans, J. P.; Mareschal, B. (1994) The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems*, **12**, 297-310.
- Brans, J. P.; Mareschal, B. (2002) *PROMETHEE – GAIA: une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles.
- Brans, J. P.; Vincke, P. Note – (1985) A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science*, **31**, 647-656.
- Brans, J. P.; Vincke, P.; Mareschal, B. (1986) How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, **24**, 228-238.
- Campos, V. R. (2011) *Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento*. Tese (doutorado). São Carlos: EESC/USP.
- Expert Choice (2011) based Expert software. Operational Research Society, USA, version 11.1.3338.2822.
- Freitas, H. M. R. et al. (1997) *Informação e decisão: sistemas de apoio e seu impacto*. Porto Alegre: Ortiz.
- Gomes, L. F. A. M. (2007) *Teoria da decisão*. São Paulo: Thomson.

- Grandzol, J. R. (2005) Improving the faculty selection process in higher education: A case for the analytic hierarchy process. *IR Applications*, **6**(24).
- Iañes, M. M. & Cunha, C. B. (2006) Uma metodologia para a seleção de um provedor logístico. *Revista Produção*, **16**(3), 394-412.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2013) *Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2010*. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, **7**.
- Keeney, R. L.; Raiffa, H. (1976) *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. New York: John Wiley.
- 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. (2008) *Indicadores de sustentabilidade ambiental na indústria da mineração: avaliação pelo método Promethee II*. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Faculdades Ibmecc.
- PNRS - Lei nº 12.305. (2010) Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. PIB *per capita* para o Brasil e regiões geográficas, 2010.
- PROMETHEE. (2012) Based Visual Promethee Software. Operational Research Society, version Education – 0.99.99.1.12, London.
- Roper-Lowe, G. C.; Sharp, J. A. (1990) The analytic hierarchy process and its application to an information technology decision. *Journal of Operational Research Society*, **41** (1), 49-59.
- Saaty, T. L. (1980) *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1991) *Método de análise hierárquica*. São Paulo: Makron Books do Brasil.
- Salomon, V. A. P. (2002) Auxílio à decisão para adoção de políticas de compras. *Revista Produto e Produção*, **6**.
- Souza, M. A. et al. (2001) *Análise tecnológica de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: resultados da avaliação multiobjetivo*. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. João Pessoa, Brasil.
- Vincke, P. (1986) Analysis of multicriteria decision aid in Europe. *European Journal of Operational Research*, **25**, 160-168.
- Zuffo, A. C. (1998) *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.