



Modelo de apoio multicritério à decisão aplicado à destinação de resíduos industriais

Luciano B. Souto¹, Rosele F. W. Neetzow², Michel C. N. Belderrain³

¹ SENAI RS – Centro Nacional de Tecnologias Limpas (luciano.souto@senairs.org.br)

² PmaisL Consultoria Ltda-ME (rosele@pmaisl.com.br)

³ Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA (carmen.beld@gmail.com)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal abordar a gestão ambiental de empresas para a destinação de resíduos industriais perigosos utilizando o Método de Apoio Multicritério à Decisão *Analytic Hierarchy Process* (AHP) com *ratings*. A problemática abordada foi a escolha de tecnologia para tratamento e disposição de solo contaminado com melhor aderência às políticas do sistema integrado de gestão da empresa. O método AHP foi aplicado em duas etapas, utilizando uma estrutura hierárquica paralela e uma principal. Os resultados obtidos na estrutura hierárquica paralela referem-se ao desempenho técnico e ambiental das alternativas. Nesta avaliação destacaram-se 05 tecnologias biológicas, 02 tecnologias térmicas, 01 tecnologia química e 01 nanotecnologia, aplicadas para o de solo contaminado com BTEX em um universo de 34 tecnologias verificadas. O desempenho das alternativas obtido no AHP paralelo foi inserido em um dos critérios do AHP principal, onde foram avaliados fornecedores e tecnologias de forma conjunta. Os desempenhos das alternativas nos modelos decisórios foram confrontados com os seus respectivos custos, proporcionando um painel para decisão gerencial.

Palavras-chave: AHP. Resíduos Sólidos. Tecnologias de Tratamento e Disposição

Área Temática: Tema 15 - Tecnologias Ambientais

Multi-criteria decision model applied to the disposal of industrial waste

Abstract

This paper aims to address the environmental management of companies for the disposal of hazardous industrial waste using the Multicriteria Support Method Decision Analytic Hierarchy Process (AHP) with ratings. The issue addressed was the choice of technology for treatment and disposal of contaminated soil with better adherence to the policies of the integrated management system. The AHP was applied in two steps, using a parallel and a main hierarchical structure. The results obtained in parallel hierarchical structure refer to the technical and environmental performance of the alternatives. In this assessment were highlighted 05 biological technologies, 02 thermal technologies, 01 chemical technology and 01 nanotechnology applied to the soil contaminated with BTEX in a universe of 34 verified technologies. The performance of the alternatives obtained in parallel AHP was inserted into one of the criteria of main AHP that evaluated suppliers and jointly technologies. The performances of the alternatives in decision-making models were confronted with their respective costs, providing a dashboard for management decision.

Key words: AHP. Solid waste. Treatment and Disposal Technologies.

Theme Area: Item 15 - Environmental Technologies



1 Introdução

Na gestão ambiental de uma empresa, a seleção de alternativas para tratamento e disposição final de resíduos sólidos perigosos (TDFR) é uma atividade de rotina. A seleção de alternativas orientada apenas pelos custos não possibilita uma avaliação técnica capaz de diferenciar o desempenho das tecnologias. A utilização de uma abordagem multicritério é uma oportunidade para visualização das lacunas e oportunidades de melhoria entre os provedores de soluções de TDFR. A verificação de aspectos técnicos e ambientais na busca de aderência aos objetivos estratégicos de gestão da empresa geradora do resíduo proporciona a tomada de decisão bem fundamentada e potencializa a obtenção dos resultados almejados.

A tríade viabilidade técnica econômica e ambiental é utilizada como base para a tomada de decisão na ferramenta de Produção mais Limpa – PmaisL (SENAI, 2003). A PmaisL tem como foco a não geração de resíduos, direcionando as ações para a prevenção da poluição. Neste contexto, é realizada uma avaliação técnica das alternativas para a melhoria pretendida, além da avaliação dos investimentos necessários associados aos potenciais benefícios econômicos e ambientais (SENAI, 2003).

O problema TDFR pode ser abordado utilizando os princípios da PmaisL aplicado ao método de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A utilização do método AHP com *ratings* na destinação de resíduos proporciona uma priorização de alternativas e traz praticidade para a inserção ou exclusão de alternativas do processo decisório. Nesta ordenação de alternativas é possível identificar quais estão mais próximas do nível de desempenho idealizado pela organização.

Além da utilização da abordagem de PmaisL para a seleção de alternativas de tratamento e destinação de resíduos, existem outros aspectos que podem ser considerados na avaliação. Os valores da empresa, as políticas do sistema de gestão integrado, bem como o comprometimento com a causa ambiental declarado como marketing verde, são importantes aspectos a serem considerados no processo decisório.

Este trabalho teve como objetivo principal abordar o tratamento e a destinação de resíduos sólidos industriais perigosos de empresas considerando, além do custo, requisitos estabelecidos no Sistema de Gestão Integrado. O estudo de caso apresentado, com a utilização do método multicritério (AHP com *ratings*) trouxe a avaliação de tecnologias de tratamento e disposição do resíduo sólido perigoso (classe I): solo contaminado com Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xilenos - BTEX.

2 Metodologia

O método de apoio multicritério à decisão (AMD) é utilizado para avaliar alternativas com base em critérios que possibilitam a sua diferenciação (NASCIMENTO, 2010). Cada método AMD possui características que direcionarão o seu uso de acordo com as características do problema decisório. A problemática abordada neste trabalho consiste em um estabelecimento de um *ranking* de tecnologias de destinação e tratamento de resíduos. Este problema envolve uma grande variedade de alternativas, que são incrementadas por inovações lançadas no mercado. O AHP com *ratings* é um método AMD que atende às características mencionadas da problemática a ser abordada e, portanto será o método focado neste trabalho.

Conforme apresentado por Gomes e Moreira (1998), o método AHP é aplicável a situações que envolvam comparações subjetivas entre alternativas observando critérios, utilizando-se tanto dados qualitativos como quantitativos. A metodologia é indicada para comparar e/ou priorizar alternativas mais eficazes (ENSSLIN, 1996).

Explorando o entendimento dos *ratings*, Duarte Junior (2005) os define como um conjunto de níveis de intensidade (ou categorias) que servem como base para avaliar o desempenho das alternativas em termos de cada critério ou subcritério.

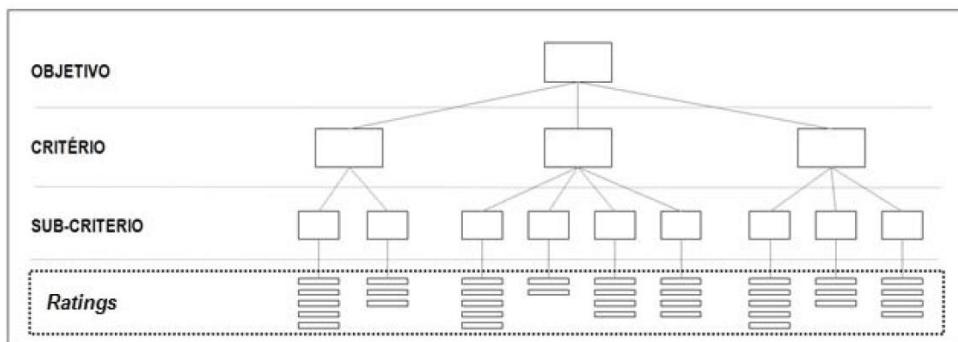


Segundo Saaty (2008), a problemática decisória deve ser abordada com as seguintes ações: definição do problema; construção da estrutura hierárquica; construção das matrizes de comparação par a par; e a utilização das prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades do nível imediatamente inferior.

Inicialmente o objetivo do processo decisório é definido, identificando os critérios e subcritérios com base em valores do decisor (SILVA, BELDERRAIN E PANTOJA, 2010). A seguir, a estrutura hierárquica é construída, posicionando-se o objetivo no topo e nos níveis seguintes são lançados os critérios e subcritérios de decisão. A utilização do desdobramento de um critério em subcritério não é obrigatória, mas auxilia no entendimento da composição de um critério e evita critérios duplicados.

A estrutura hierárquica da AHP com *ratings* é apresentada na figura 1.

Figura 1 - Estrutura Hierárquica com *ratings*



Fonte: SILVA, BELDERRAIN E PANTOJA, 2010

Uma vez conhecidos os critérios e *ratings* da avaliação multicritério são realizadas comparações par a par em cada nível hierárquico que determinarão as relações de importância. Concluído o modelo de apoio à decisão com *ratings*, as alternativas devem ser enquadradas nos *ratings* de cada critério e/ou subcritério. Com base nas relações de importância definidas, cada alternativa recebe uma pontuação final que indica a adequação da alternativa com relação aos níveis de intensidade ótimos (SAATY, 2006). A avaliação multicritério utilizando o AHP com *ratings* gera ao final de sua aplicação um *ranking* onde estarão posicionadas as alternativas avaliadas.

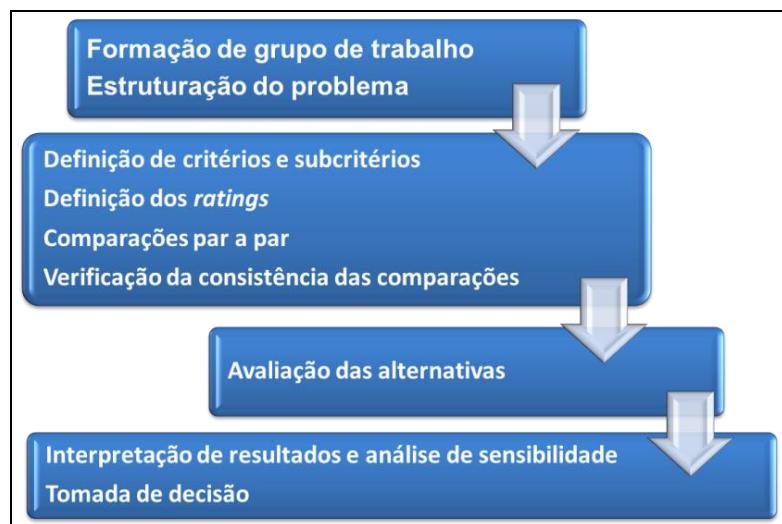
2.1 AHP com *ratings* aplicado à seleção de tecnologias para resíduos sólidos

Com base na literatura referente ao apoio multicritério à decisão utilizando o AHP com *ratings* são estruturadas e descritas as ações necessárias para a sua aplicação prática, a qual é implementada em um estudo de caso. O modelo de aplicação do método é ilustrado na figura 2.

A descrição do estudo de caso aplicado ao TDFR parte da identificação das alternativas tecnológicas de tratamento e disposição de solo contaminado com BTEX. Nesta etapa do trabalho foi realizada uma pesquisa de aspectos técnicos, ambientais e econômicos de onze tecnologias inovadoras e 23 tecnologias convencionais. Esta pesquisa inicial quanto às características das alternativas tecnológicas trouxe subsídios para a composição de critérios que proporcionem uma avaliação comparativa técnica, econômica e ambiental destas tecnologias. Até a realização deste trabalho, a empresa selecionava a tecnologia, basicamente, em função dos custos das alternativas. Foi estruturado um *ranking* para visualização das tecnologias que melhor atendem aos requisitos da empresa geradora dos resíduos. Para a composição do *ranking* das tecnologias foram inseridos múltiplos critérios utilizando o AHP com *ratings*.



Figura 2 - Proposta de apoio multicritério à decisão aplicada ao TDFR



Fonte: SOUTO, 2014

Para a modelagem e operacionalização do AHP foi utilizado o *software Super Decisions*. Foram elaboradas duas estruturas hierárquicas para a avaliação multicritério, uma denominada principal e a outra paralela. A estrutura hierárquica paralela foi composta com critérios técnicos e ambientais para a avaliação das tecnologias. A relação de prioridades obtida da avaliação da estrutura hierárquica paralela abastece um dos critérios aplicado na estrutura hierárquica principal, denominado de desempenho técnico. A estrutura hierárquica principal é destinada a uma avaliação conjunta de fornecedores e tecnologias. Na estrutura hierárquica principal foram inseridos critérios relacionados a aspectos logísticos, aspectos técnicos e ambientais relacionados à tecnologia e características do fornecedor. Por se tratar de um critério dominante os custos foram avaliados após a obtenção do *ranking* do AHP para que não dificultassem a visualização real do desempenho da metodologia. A empresa onde foi aplicado o estudo de caso possui unidades operacionais em diferentes estados brasileiros, o que impacta no desempenho dos aspectos logísticos das alternativas. Consequentemente, a obtenção dos rankings das alternativas será regionalizada com abrangência das mesorregiões brasileiras (IBGE, 1990) onde estão estabelecidas as unidades de operação da empresa.

A figura 3 apresenta a estrutura hierárquica principal utilizada para a avaliação multicritério. Embora não sejam ilustrados nas estruturas hierárquicas, para cada último nível hierárquico foram determinados *ratings* de caracterização das alternativas.

Na estrutura hierárquica paralela foram inseridos os critérios: 1) Dependência das condições climáticas; 2) Intensidade de consumo de insumos; 3) Tempo aproximado do tratamento; 4) Controle operacional; 5) Complexidade de instalação; 6) Geração de resíduos e; 7) Aproveitamento energético. Os critérios 2, 4 e 6 possuem os subcritérios: 2.1) Consumo de Água; 2.2) Consumo de Energia; 2.3) Consumo de produtos químicos; 4.1) Grau de envolvimento do operador; 4.2) Complexidade do controle; 4.3) Quantitativo de análises; 6.1) Resíduos sólidos; 6.2) Emissões atmosféricas e 6.3) Efluentes Líquidos respectivamente.

Foram desenvolvidos descritivos para cada critério, subcritério, *rating* e alternativa com a finalidade de estabelecer uma referência e orientar os decisores e demais interessados da empresa. A seguir foram efetuadas as comparações par a par e determinadas as relações de importância existentes na estrutura hierárquica da avaliação multicritério.

Elaborada a estrutura hierárquica e estabelecidas as relações de importância o modelo de apoio multicritério à decisão foi concluído. O resultado das comparações par a par da estrutura hierárquica principal é ilustrado na figura 4 e o resultado da estrutura hierárquica

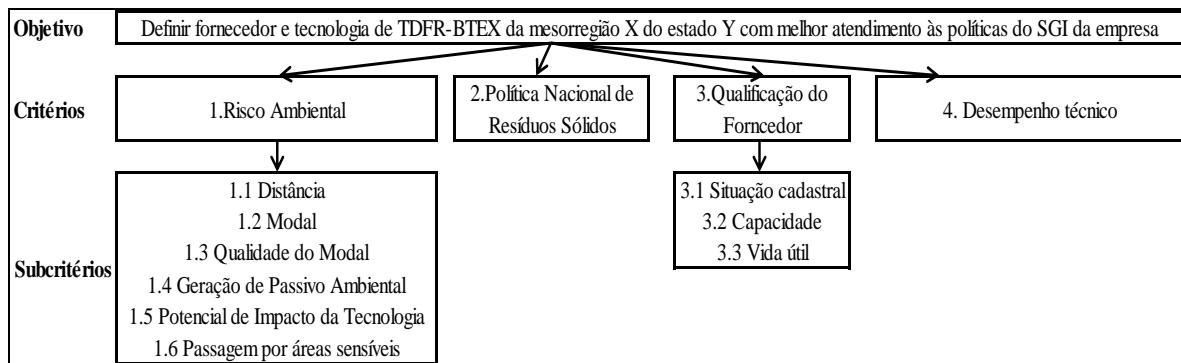


5º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 5 a 7 de Abril de 2016

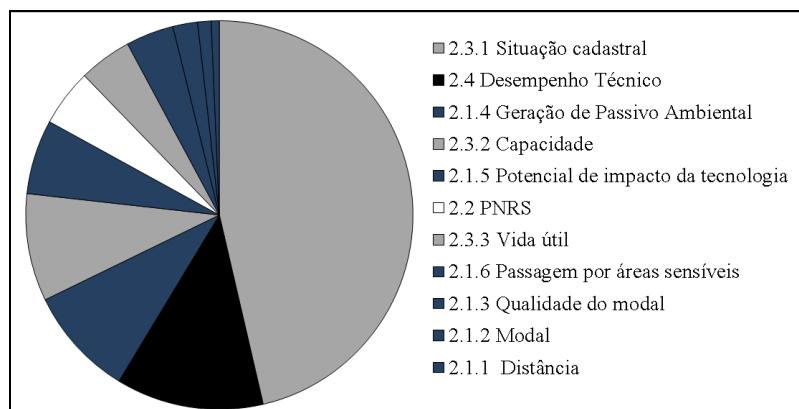
principal na figura 5. Na continuidade da aplicação do método AHP, as alternativas foram enquadradas nos *ratings* gerando um *ranking* das alternativas como resultado do método AHP. O desempenho da avaliação multicritério foi a seguir plotado em confronto com os custos de cada alternativa, proporcionando uma avaliação de *trade-offs* para os decisores da empresa, possibilitando a definição da tecnologia a ser utilizada.

Figura 3 - Estrutura hierárquica principal



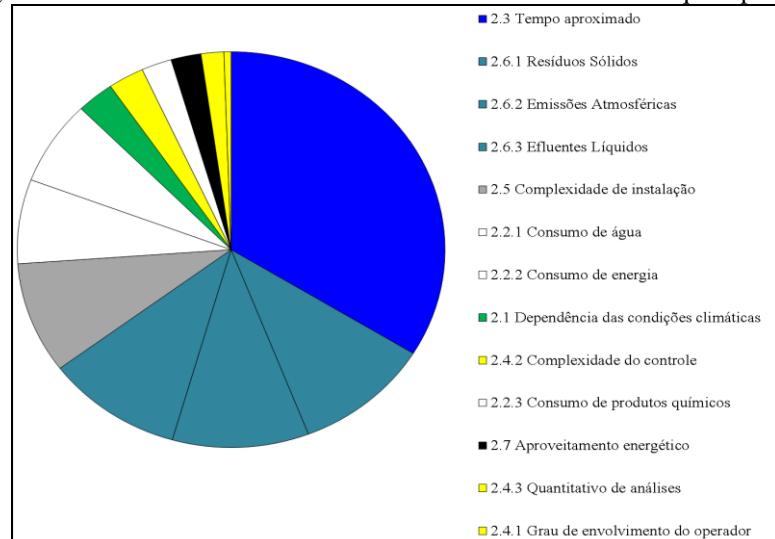
Fonte: SOUTO, 2014

Figura 4 - Prioridades de critérios e subcritérios da estrutura hierárquica principal



Fonte: SOUTO, 2014

Figura 5 - Prioridades de critérios e subcritérios da estrutura hierárquica paralela



Fonte: SOUTO, 2014



3 Resultados

A avaliação realizada na estrutura hierárquica paralela englobou 34 diferentes tecnologias. O grupo de tecnologias com maior destaque no ranking é composto por 08 tecnologias convencionais e uma tecnologia inovadora, apresentadas na tabela 1. Este resultado obtido com o modelo de avaliação multicritério desenvolvido traz um indicativo de que as tecnologias inovadoras avaliadas não apresentam um maior destaque com relação às tecnologias convencionais. Entre as tecnologias em destaque tem-se: 05 tecnologias biológicas (TC 23, TC 22, TC 13, TC 6, TC 5), 02 tecnologias térmicas (TC 8, TC 11), 01 tecnologia química (TC 14) e 01 nanotecnologia (TI 10). Destaca-se que os desempenhos obtidos para as tecnologias nesta avaliação são independentes de características de fornecedores.

Tabela 1 - *Ranking* das alternativas da estrutura hierárquica paralela com desempenho superior a 0,70

Posição	Alternativas da estrutura hierárquica paralela		Desempenho (totals)
1	TC 23	Biorremediação aeróbia avançada (<i>ex situ</i>)	0,843
2	TC 8	Coprocessamento (<i>ex situ</i>)	0,839
3	TC 22	Biorremediação (<i>ex situ</i>)	0,829
4	TC 14	Oxidação química (<i>in situ</i>)	0,787
5	TC 13	<i>Landfarming</i> (<i>ex situ</i>)	0,765
6	TC 11	Incineração (<i>ex situ</i>)	0,765
7	TC 6	Biorremediação aeróbia avançada (<i>in situ</i>)	0,737
8	TC 5	Biorremediação (<i>in situ</i>)	0,728
9	TI 10	Nanotecnologia (<i>in situ</i>)	0,715

A avaliação realizada na estrutura hierárquica principal requer o conhecimento tanto das características da tecnologia quanto dos seus fornecedores e aspectos logísticos, nos casos de tecnologias *ex situ*. As tecnologias que possuem mais de um fornecedor são identificadas em seu nome com “fx”, onde o “x” é o número que identifica o fornecedor específico. Os fornecedores das tecnologias não serão abordados neste trabalho. Na estrutura hierárquica principal foram verificadas 63 alternativas.

As alternativas com melhor desempenho na avaliação da hierárquica principal são apresentadas na tabela 2. As 6 alternativas destacadas em amarelo na tabela 2 englobam 4 diferentes tecnologias com desempenho técnico superior a 0,70 nos resultados da estrutura hierárquica paralela.

Tabela 2 - *Ranking* das alternativas da estrutura hierárquica principal com desempenho superior a 0,70

Posição	Alternativas da estrutura hierárquica principal		Desempenho (totals)
1	OQ_f1	Oxidação química (<i>in situ</i>)	0,8203
2	OQ_f2	Oxidação química (<i>in situ</i>)	0,8203
3	CO_f1	Coprocessamento (<i>ex situ</i>)	0,8059
4	CO_f2	Coprocessamento (<i>ex situ</i>)	0,8059
5	LD_in_f1	<i>Landfarming</i> (<i>in situ</i>)	0,7935
6	SVE_f1	Extração de vapores do solo (SVE) (<i>in situ</i>)	0,7536
7	SVE_f2	Extração de vapores do solo (SVE) (<i>in situ</i>)	0,7536
8	SVE_f3	Extração de vapores do solo (SVE) (<i>in situ</i>)	0,7536
9	SVE_f4	Extração de vapores do solo (SVE) (<i>in situ</i>)	0,7536
10	INC_f1	Incineração (<i>ex situ</i>)	0,7510
11	BP_f1	Biopilhas (<i>in situ</i>)	0,7022

Entre as 9 tecnologias que se destacaram com relação aos seus desempenhos técnicos



(estrutura hierárquica paralela), 5 não obtiveram destaque na avaliação da estrutura hierárquica principal. Ao verificar os enquadramentos destas alternativas nos *ratings* da estrutura hierárquica principal, identificou-se que não possuíam a Situação Cadastral enquadrada como “Aprovado”.

Em função da prioridade do subcritério Situação Cadastral, foi realizada uma simulação de desempenho para estas alternativas, alterando o enquadramento para “Aprovado” na avaliação de fornecedores e tecnologias. Os resultados da simulação indicaram que todo este grupo de alternativas passaria a compor as alternativas em destaque da avaliação da estrutura hierárquica principal, com desempenhos superiores a 0,70. Esta constatação levou a uma orientação prática para a empresa: priorizar e prover suporte para a aprovação da situação cadastral de fornecedores de tecnologias com destaque no desempenho técnico obtido na avaliação da estrutura hierárquica paralela. Consequentemente, serão identificadas mais opções com desempenho superior a 0,70 na avaliação da estrutura hierárquica principal.

Os resultados obtidos da estrutura hierárquica principal ainda são preliminares, uma vez que o enquadramento nos subcritérios 2.1.3 Qualidade do modal, 2.1.5 Potencial de impacto da tecnologia, 2.1.6 Passagem por áreas sensíveis, 2.3.2 Capacidade e 2.3.3 Vida útil foi fundamentado em premissas

4 Conclusões

A avaliação multicritério das alternativas tecnológicas de tratamento e disposição de solo contaminado com BTEX, utilizando o método AHP proporcionou o aprofundamento do conhecimento relativo às tecnologias e aos componentes deste processo decisório. Foram inseridos critérios estratégicos nos modelos, contemplando aspectos técnicos e ambientais, posteriormente confrontados com os aspectos econômicos. O modelo de avaliação elaborado proporcionou a identificação das alternativas tecnológicas que apresentam o melhor desempenho com relação aos critérios e subcritérios definidos, os quais podem auxiliar na estruturação de problemas similares relativos ao tratamento e destinação de resíduos sólidos industriais perigosos de organizações.

Embora ainda preliminares, os resultados obtidos da aplicação do método proporcionam a visualização do cenário de decisão que será apresentado aos decisores da empresa. O confronto dos desempenhos das alternativas com os seus respectivos custos possibilitará uma escolha fundamentada em benefícios e custo da tecnologia selecionada. Adicionalmente, os decisores terão informações disponíveis que justificam o desempenho obtido por cada alternativa, proporcionando intervenções junto aos fornecedores de tecnologias para a melhoria de seu desempenho.

Para a tomada de decisão no curto prazo, orienta-se a escolha entre aquelas alternativas com maior desempenho no AHP principal. Para uma avaliação de médio a longo prazo, orienta-se uma verificação conjunta dos resultados obtidos no AHP principal e paralelo, avaliando os casos onde um bom desempenho no AHP paralelo não refletiu um bom resultado no AHP principal. Nestes casos devem ser investigados os desempenhos em cada critério e subcritério do AHP principal, verificando potenciais oportunidades de melhoria de desempenho e adequações do fornecedor da tecnologia.

A empresa onde foi realizado o estudo de caso recebeu modelos comparativos dinâmicos, uma vez que se utilizou o método AHP com *ratings*. Nestes modelos de avaliação multicritério novas alternativas poderão ser facilmente inseridas, assim como alternativas poderão ser excluídas.

A realização da avaliação dos custos das alternativas à parte da aplicação do AHP foi bem aceita pelas partes interessadas da problemática. Esta abordagem proporcionou uma



visão de desempenho das alternativas confrontado com seu respectivo custo. Com a inclusão dos custos na análise não foi observada uma correlação entre um melhor desempenho e um maior custo.

Referências

- DUARTE JÚNIOR, A. M., **Gestão de riscos para fundos de investimentos**, Prentice Hall, São Paulo, 2005, p. 141-155.
- ENSSLIN, S. R. **A estruturação no processo decisório de problemas multicritérios complexos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Florianópolis: UFSC, 1996.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Divisão regional do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas. 1990**
- GOMES, L. F. M.; MOREIRA, A. M. M. **Da informação à tomada de decisão: agregando valor através dos métodos multicritério**. In: RECITEC, Recife, v. 2, n. 2, p. 117-139, 1998.
- NASCIMENTO, L. P. A. S. **Aplicação do método AHP com as abordagens Ratings e BOCR: O Projeto F-X2**. 2010. 150 folhas. Tese de mestrado, área de Produção – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- SAATY, T.L. **Rank from comparisons and from Ratings in the analytic hierarchy/network processes**. European Journal of Operational Research, v. 168, n.1, 557-570, 2006.
- _____, **Decision making with the analytic hierarchy process**. International Journal of Services Sciences, Vol. 1, No 1, pp. 83-97. 2008
- SENAI. RS. **Implementação de Programas de Produção mais Limpa**. Porto Alegre, Centro Nacional de Tecnologias Limpas SENAI-RS/UNIDO/INEP, 2003. 42 p.
- SILVA, A. C. S.; BELDERRAIN, M. C. N.; PANTOJA, F. **Priorização de Projetos de P&D no Setor Aeroespacial: método AHP com Ratings**. XII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE), São José dos Campos, 2010. ISSN: 1983 7402
- SOUTO, L. B. **Modelo de Apoio Multicritério à Decisão Aplicado à Destinação de Resíduos Sólidos Industriais**. 2014. 94 f. Dissertação de Mestrado Profissional em Produção – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.