

## UMA ESTRUTURA DE APOIO À DECISÃO PARA ORIENTAR A ESCOLHA DE PROJETOS PRIORITÁRIOS PARA A INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE DO BRASIL

**Renaud Barbosa da Silva**

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas  
Praia de Botafogo, 190 – Rio de Janeiro, RJ  
renaud@fgv.br

**Maria Aparecida Cavalcanti Netto**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – COPPE – Engenharia Oceânica  
Centro de Tecnologia, Bloco C, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ  
aparecida@peno.coppe.ufrj.br

### Resumo

Este artigo propõe um procedimento para a formulação e escolha de projetos estratégicos que possam aumentar a eficiência e a eficácia da infraestrutura de transporte do Brasil em consonância com os requisitos do desenvolvimento sustentável. Neste sentido, são avaliados métodos de análise multicritério que podem ser aplicados na definição e escolha de projetos que contribuam para a implantação da infraestrutura de transporte necessária à criação e expansão de condições para o atendimento às demandas sociais e aos requisitos de conservação ou de mitigação dos fatores agressivos ao meio ambiente. Como resultado da avaliação realizada, é proposto o procedimento, baseado em três métodos tradicionais – Delphi, TOPSIS e AHP – testado em condições reais do ambiente de transporte no contexto atual do país.

**Palavras-chave:** Análise Multicritério. Delphi. Topsis. Infraestrutura de Transporte

### Abstract

This paper presents a procedure for formulating and setting priorities on strategic projects in order to increase efficiency and effectiveness to transport infrastructure in Brazil. Multi Criteria Decision Making (MCDM) methods are evaluated for application to defining and choosing projects that contribute to introduction of the transport infrastructure necessary to generate and expand conditions to meet social demands, while complying with environmental conservation or mitigation requirements. As a result of the assessment, the procedure – based on three traditional methods ( Delphi, TOPSIS and AHP) and tested under real transport environment conditions in the present Brazilian context – was proposed.

**Keywords:** Multi Criteria Analysis. Delphi. Topsis. Transport Infrastructure

## 1. Introdução

O sistema de transporte de um país de grandes dimensões é naturalmente complexo e impacta, de forma significativa, a política adotada para o desenvolvimento sustentável. Por isso exige análise do relacionamento entre infraestrutura, mobilidade (acessibilidade) e crescimento, como discorrem Didier e Prud'Homme (2007), ou, como sugerido por Rietveld (1994), entre os fatores de impacto na infraestrutura de transporte, elencando distâncias, velocidade de deslocamento, economia de combustível, produtividade, geração de empregos, entre outros. Em síntese, todos os elementos do sistema de transportes (pessoas e cargas, caminhos viáveis ou a malha viária, veículos e terminais) interrelacionam-se e são influenciados pelas políticas formuladas pelo governo. Para Liechti (2002), a sustentabilidade, como fator de desenvolvimento, está fundamentada em três pilares: (i) meio ambiente, orientado para a regeneração da natureza; (ii) econômico, quando não ameaça o funcionamento eficiente da economia; e (iii) social, quando beneficia e é justo para as pessoas. De acordo com essa perspectiva e tendo como foco a redução dos impactos ambientais, o conceito de infraestrutura de transporte deve considerar sua capacidade de disponibilizar meios de transporte de boa qualidade para pessoas e cargas, o que inclui nível de serviço, flexibilidade e tarifas acessíveis; proporcionar acesso aos portos, terminais rodoviários, ferroviários e aéreos; estimular a intermodalidade principalmente no transporte de cargas, com menores custos operacionais totais e aumento da eficiência energética; disponibilizar instalações de armazenagem ao longo da malha existente; agilizar procedimentos portuários de carga e descarga de produtos; obter combustíveis, energia elétrica e serviços de comunicações eficientes, confiáveis; utilizar recursos da tecnologia da informação no rastreamento dos percursos, na segurança dos veículos e na tomada de decisões correspondentes; e atender a marcos regulatórios que orientem e fiscalizem o funcionamento da oferta de serviços de transporte de acordo com as políticas públicas do país.

Os investimentos necessários à construção e à manutenção da infraestrutura de transporte para uma extensa superfície, como a brasileira – da ordem de 8,5 milhões de quilômetros quadrados – são de grande monta e exigem dos agentes governamentais a tomada de decisões complexas. Estas, em que pese a manutenção dos princípios de sustentabilidade implica o emprego de critérios que norteiem o planejamento e a definição de prioridades da palheta de projetos estratégicos e seu cronograma de execução. Em seu entorno, variáveis relacionadas ao crescimento e ao desenvolvimento são estimuladas e devem ser objeto de avaliação, tais como: distribuição demográfica, impacto ambiental, exploração econômica e sustentada dos recursos locais, habitação, saúde, educação e acessibilidade da população e presença do Estado como agente regulador, em termos amplos. O Estado, em suas três instâncias executivas, é essencial para que sejam realizados investimentos diretos, como também formuladas as políticas que promovem, incentivam e fomentam as iniciativas dos vários *stakeholders* do setor privado. Para isso, o Governo Federal do Brasil dispõe nos dias atuais de dois instrumentos: o Plano de Aceleração do Crescimento – PAC e o Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLTL (PNLTL, 2007). Ambos resultam em escolhas da palheta de projetos necessários ao desenvolvimento do país e os empreendimentos relacionados e conseqüente definição de prioridades. Para que esses tragam o retorno desejado em crescimento e desenvolvimento é necessário que sejam ordenados segundo prioridades determinadas por meio de análise criteriosa de grande parte das suas externalidades. Entre elas, uma das mais significativas é o impacto ambiental causado pela emissão de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) a partir da queima de combustíveis fósseis, principalmente nos transportes, na indústria, na produção de energia elétrica e na queima de gases nos campos de exploração de petróleo e nas refinarias (*flare*). Conforme as conclusões dos relatórios para subsidiar as diretrizes da Organização das Nações Unidas – ONU, a preservação ambiental é grande vetor do desenvolvimento sustentável. A recente Conferência do Clima de Copenhague aponta, em dezembro de 2009, para novo modelo de definições de metas e fortalecimento de iniciativas locais. Em seu impacto no Brasil, o momento pós-Copenhague requer a sua pronta regulamentação, no sentido de viabilizar recursos da ordem de R\$ 900

milhões ao ano para fomento de iniciativas de combate ao efeito estufa. Ademais, conforme Jardim (2010), algumas conclusões e diretrizes para próximas décadas interferem no sistema de transportes de pessoas e cargas: “Políticas públicas inovadoras e eficientes podem oferecer as diretrizes necessárias para que possamos efetivamente promover uma profunda mudança em nosso estilo de vida, nos modos de produção e consumo. Assim como é preciso uma profunda revisão da nossa matriz de transportes, privilegiando o uso de biocombustíveis. [...] o momento agora é fazer a lição de casa, ter um olhar local sobre as questões ambientais, para depois demonstrarmos ao mundo nossa liderança rumo à economia de baixo carbono”. Em momento anterior e em preparação para a Conferência do Clima, 22 das maiores empresas brasileiras e entidades privadas já haviam estabelecido uma carta-meta ambiental, com um marco na posição do setor produtivo rumo à economia de baixo carbono. Para isso, assumiram o compromisso de rastrear a cadeia de suprimentos e fornecedores, entre outras ações, e apoiam a criação de um sistema de incentivo para a preservação das florestas (ABIN, 2010).

Este artigo está circunscrito a decisões de planejamento relativas à infraestrutura de transporte brasileira e às propostas de dinamização da multimodalidade resultante de uma malha de transporte intermodal disponível ao movimento de cargas e pessoas e com a matriz de transporte mais equilibrada na distribuição do fluxo entre as várias modalidades. Seu principal objetivo é propor a aplicação de procedimento baseado em análise multicritério como uma estrutura de apoio à decisão - simples e amigável ao usuário/tomador de decisão. Esse procedimento deve orientar a hierarquização e a escolha de projetos estratégicos diante da gama de empreendimentos necessários e dos recursos limitados para executá-los. A questão ambiental, embora tratada como um problema subjacente, recebeu tratamento específico, pois é premissa de definição da palheta de projetos o alinhamento da eficiência-eficácia-agilidade da infraestrutura e do sistema de transportes com a sustentabilidade. A estrutura de apoio à decisão do procedimento proposto resultou da avaliação de métodos de análise multicritério e de outras metodologias específicas, e de experiências descritas em relatórios e em referências internacionais. Reúnem, de forma integrada, as propriedades dos métodos Delphi, TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution*) e AHP (*Analytic Hierachy Process*), como mostrado nos tópicos a seguir.

## 2. Fundamentação sobre Métodos de Análise Multicritério

A investigação de problemas relativos a crescimento econômico, desenvolvimento sustentável e infraestrutura de transporte requer, pela complexidade das variáveis envolvidas, o emprego de avaliação sob critérios múltiplos. Dados subjetivos exigem uma abordagem qualitativa que, sob determinadas condições, permitem ao analista-pesquisador transformá-la em avaliação quantitativa. Fishburn e Lavallo (1999) explicam que essa prática é denominada, genericamente, de *Multi-Criteria Decision Making* ou *MCDM*. Charnes e Cooper (1961) criaram o método multicriterial denominado Programação de Metas, com base em conceitos desenvolvidos por Koopmans (1951) sobre o vetor de eficiência empregado na programação matemática multiobjetivo. Outros métodos surgiram, como ELECTRE I - *Elimination et Coix Traduisant la Réalité*, criado por Benayoun et al. (1966), seguido de várias versões, até a quinta. Novas propostas foram desenvolvidas por Lee (1972), Ignisio (1976), Keeney e Raiffa (1976). Saaty (1980) produziu o AHP - *Analytic Hierachy Process*, que apresentou conceitos de avaliação, envolvendo a extração de conhecimentos e experiências dos *stakeholders* presentes na situação sob avaliação. Hwang e Yoon (1981) criaram o *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* – TOPSIS. Este é um método no qual  $m$  alternativas são avaliadas segundo  $n$  atributos de avaliação de prioridades determinadas por um indicador derivado da combinação entre a aproximação a uma situação ideal (positiva) e ao distanciamento de uma situação não ideal (negativa). Pode ser considerado, também, como um sistema geométrico com  $m$  pontos no espaço  $n$ -dimensional. Janic e Regiani (2002) adotaram o mesmo princípio desenvolvido por Yoon (1987) e Hwang et al. (1993). Outros métodos, como o PROMETHEE I, criado por Brans

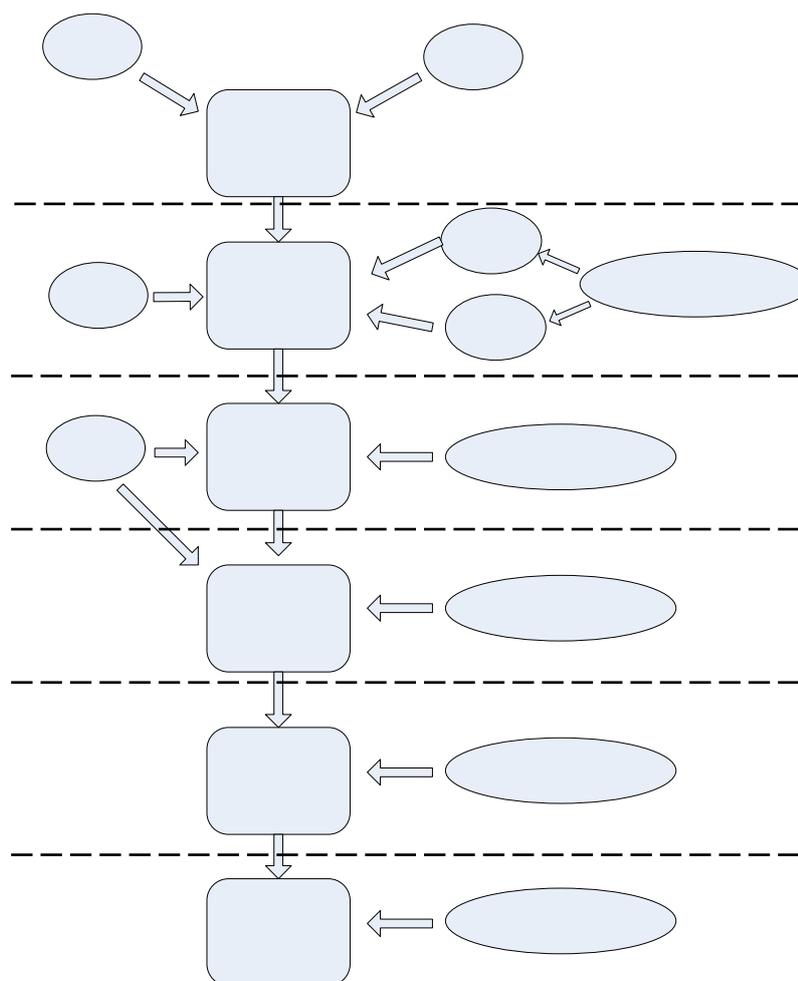
*et al.* (1992), semelhante ao ELECTRE dos anos 60, foram desenvolvidos por meio de versões I, II, III e IV e assim por diante. A partir de 1990, destacaram-se as variações em torno dos métodos clássicos, como o AHP Multiaplicativo, criado por Lootsma (1999) e que difere do AHP original por converter as preferências da escala verbal para a numérica, e utilizar escala geométrica em vez de linear. A versão V do PROMETHEE foi mais uma comprovando o interesse de desenvolvimento e aplicação do método.

A aplicação conjunta AHP e TOPSIS tem sido realizada, de forma combinada ou com variações envolvendo a lógica *fuzzy*, ora com o AHP, ora com o TOPSIS. O emprego da lógica *fuzzy* tem sido justificado como recurso para minimizar possíveis distorções na atribuição de valores aos critérios de avaliação. Gumus (2008) aplicou AHP e TOPSIS para selecionar empresas transportadoras de produtos perigosos, tendo trabalhado com base na experiência de 15 especialistas, submetidos a uma pesquisa tipo Delphi (Scapolo e Miles, 2006). Outra experiência na fusão AHP/TOPSIS foi mostrada por Iç e Yurdakul (2008) que desenvolveram *software* para determinar prioridades na escolha de centros de usinagem. Önüt e Soner (2007) conduziram um estudo, aplicado em Istambul, Turquia, para escolha de locais adequados para deposição de lixo sólido, sendo usado o AHP para determinar as ponderações aplicadas à matriz TOPSIS com avaliações iniciais definidas por números triangulares *fuzzy*. O emprego do procedimento derivou da complexidade e das incertezas que envolviam o problema, razões pelas quais foi útil o uso de informações qualitativas extraídas dos *stakeholders*. Wu *et al.* (2008) apresentaram uma aplicação do AHP com o TOPSIS para definir prioridades na escolha da melhor alternativa de seguro vendido por bancos (*bancassurance*). Uma outra abordagem MCDM envolvendo AHP + TOPSIS foi a experiência conduzida por Isiklar e Büyüközkan (2007) na escolha de alternativas entre telefones celulares. Lin *et al.* (2008) realizaram um estudo teórico sobre *design* de *palmtops* que melhor atendesse às necessidades dos consumidores. Sua contribuição foi o desenvolvimento de *software* com base nos algoritmos dos dois métodos. Além disso, concluiu-se que futuros estudos poderiam visar a integração do sistema com o CAD-Computer Aided Design.

Destaca-se o estudo de Tzeng *et al.* (2005) para avaliar alternativas de combustíveis para ônibus do transporte público. O número de alternativas foi elevado, se comparado às outras aplicações e estudos relatados. A quantidade de variáveis tornou o estudo complexo e exigiu a participação de especialistas de setores como indústria, academia, organizações de pesquisa e operadores de ônibus para a escolha dos pesos a serem atribuídos aos critérios de avaliação. Foram utilizados os métodos Delphi e AHP, com os resultados tratados estatisticamente para a obtenção dos valores médios. A etapa final consistiu no processamento do TOPSIS com base nos valores obtidos com os especialistas. Os autores também empregaram o método VIKOR, semelhante ao TOPSIS, para validar os resultados obtidos. Concluíram os que os ônibus do tipo híbrido (eletricidade + combustíveis convencionais) seriam os mais desejáveis para o transporte público com o oferecimento de benefícios ambientais. Ressaltaram que a participação de especialistas na produção de dados foi relevante para que o método multicritério pudesse ser aplicado sem a necessidade do emprego de outras modelagens matemáticas para avaliar critérios. Estudos sobre avaliação de serviços de linhas aéreas em Tsaour *et al.* (2002), avaliação de países para desenvolvimento de negócios internacionais em Chen e Tzeng (2004), alocação de pessoas em linhas de produção em Yang *et al.* (2007), e gestão de cadeia de suprimentos global em Sheu (2008) mostram que o uso do AHP + TOPSIS é uma ferramenta aceitável para avaliar alternativas onde o aspecto subjetivo está presente, sem que fosse descartada a possibilidade de transformar tais aspectos em referências numéricas, para uma avaliação consistente, antes da tomada de uma decisão final. Ressalte-se que todas as experiências relatadas estão fundamentadas nos modelos clássicos de Saaty (1980) e Hwang e Yoon (1981), e nelas foi aplicado ou testado um número limitado de alternativas, com critérios claramente definidos, tendo a maioria conteúdo técnico específico.

#### 4. A Estrutura do Procedimento para a Escolha dos Projetos Prioritários

O procedimento e suas macro-etapas é mostrado no fluxograma da Figura 1. Em fase preliminar da etapa inicial são discutidas as “Premissas de projeto” por meio de debates conduzidos por times de trabalho formados por analistas-pesquisadores com os *stakeholders*, em oficinas de trabalho (*workshops*) e entrevistas semi-estruturadas, envolvendo questões como prioridades da infraestrutura de transporte para o crescimento e desenvolvimento sustentável e ponderações no estabelecimento de critérios/atributos de avaliação de projetos e empreendimentos relacionados.



**Figura 1** – Fluxograma geral do procedimento de formulação e escolha de projetos

Para a obtenção dos dados iniciais (brutos) sobre projetos e critérios de avaliação é empregado o Método Delphi, cuja propriedade é extrair conhecimentos, experiências e expectativas no ambiente de aplicação do procedimento. Deve ser obtido um nível aceitável de consenso entre analistas-pesquisadores e os *stakeholders* em geral sobre três pontos: (a) os critérios de avaliação em face do objetivo do estudo; (b) a ponderação dos critérios; e (c) a indicação dos projetos objeto de avaliação. Uma árvore de decisão, semelhante à estrutura hierárquica do AHP pode ser empregada para auxiliar o planejamento da extração de conhecimentos. A estrutura hierárquica é constituída dos seguintes elementos: objetivo (definição de prioridades) como primeiro nível decisório; no segundo, os critérios gerais pré-definidos (engenharia de transporte, visões econômica e social, visão ambiental); no terceiro nível, os critérios específicos, escolhidos com o auxílio do método Delphi, em número entre seis e dez, de modo a evitar um número elevado de combinações quando do processamento AHP; e no quarto nível, as alternativas propostas, correspondentes aos projetos a serem avaliados pelo procedimento.

Governo

Com os dados coletados é feita a distribuição de frequência para os critérios propostos, de modo que os valores com os maiores percentuais são considerados para refinamento por parte da equipe condutora da pesquisa. Operação idêntica é feita com relação aos projetos considerados prioritários, com base em uma escala de prioridades de 1(maior) a 5 (menor). Esses dados são utilizados na primeira aplicação do TOPSIS, que vai determinar os coeficientes de prioridade, respeitado o princípio do método que é o de priorizar as alternativas que apresentem o menor desvio (distância euclidiana) em relação à solução ideal e o maior em relação à solução não ideal ou negativa. Na Figura 2 é mostrado o conteúdo da árvore hierárquica, com o fluxo da montagem dos critérios e das alternativas para a avaliação pelo Método TOPSIS.

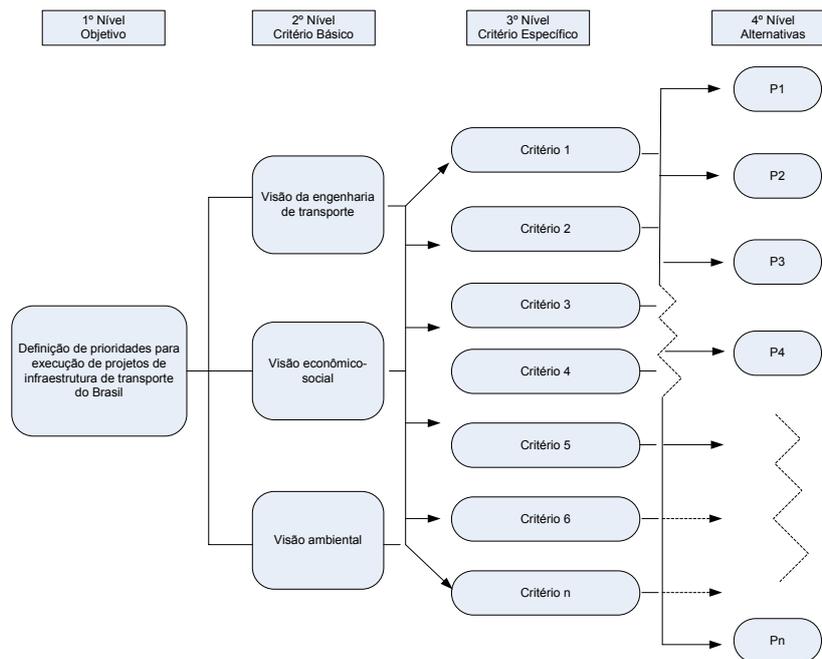


Figura 2 – Árvore hierárquica para avaliação dos projetos

A aplicação do TOPSIS obedece aos seguintes passos:

*Primeiro passo:* Montagem da matriz preliminar  $A = [a_{ij}]$ , na qual há  $j$  alternativas (projetos), representadas por  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_j$ . Para cada uma das alternativas, a medição do critério de ordem  $i$  é representada por  $a_{ij}$ , sendo  $n$  o número de critérios.

*Segundo passo:* Cálculo da matriz normalizada, que pode ser realizada sob a abordagem linear ou por vetor. Na abordagem linear o cálculo pode ser feito, entre outras formas, determinando-se a razão  $r_{ij}$  entre o valor atribuído a um critério  $a_{ij}$  e o valor máximo atribuído ao mesmo critério. O cálculo é realizado pela equação (1), a seguir:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_j^*} \quad i = 1 \dots, m; \quad j = 1 \dots, j \quad (1),$$

sendo  $a_j^*$  o valor máximo do  $j^{\text{enésimo}}$  critério. Assim,  $0 \leq r_{ij} \leq 1$ , sendo 1 o mais favorável.

A normalização por vetor pode ser calculada com o emprego da equação (2) a seguir:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^j a_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, 3 \dots, n; \quad j = 1 \dots, j. \quad (2)$$

A matriz normalizada  $A_n$  corresponde à matriz  $A$ , com os valores de  $a_{ij}$  substituídos por  $r_{ij}$  ou seja,  $A_n = [r_{ij}]$ .

*Terceiro passo:* Cálculo da matriz ponderada constituída dos valores ponderados  $v_{ij}$ , obtidos (equação 3) pela multiplicação de cada valor  $r_{ij}$  pelo peso  $w_i$  atribuído aos  $n$  critérios ou seja,

$$v_{ij} = r_{ij} \times w_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad j = 1, \dots, j. \quad (3), \text{ sendo mantida a condição}$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

*Quarto passo:* Determinação das duas soluções: ideal positiva ( $A^+$ ) e ideal negativa ( $A^-$ ), a primeira representada pelo valor máximo ponderado de cada critério e a segunda o valor mínimo, calculados por (4) e (5):

$$A^+ = \{ v_1^+ \dots v_i^+ \} = \{ (\max_j v_{ij} | i \in I^+), \{ (\min_j v_{ij} | i \in I^-) \} \quad (4)$$

$$A^- = \{ v_1^- \dots v_i^- \} = \{ (\min_j v_{ij} | i \in I^+), \{ (\max_j v_{ij} | i \in I^-) \} \quad (5)$$

sendo  $I^+$  associado ao critério de benefício e  $I^-$  ao critério de custo.

*Quinto passo:* Cálculo dos desvios pela distância euclidiana entre os valores ponderados para cada alternativa  $j$  ou seja,

$$\Delta_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, J \quad (6)$$

$$\Delta_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, J \quad (7)$$

*Sexto passo:* Determinação do resultado da aproximação relativa de cada alternativa  $a_j$  às situações ideais positivas e negativas, representadas por  $\varphi$ . Finalmente, chega-se ao resultado da aproximação às situações positivas e negativas, com o emprego da equação (8):

$$\varphi = \frac{\Delta_j^-}{(\Delta_j^+ + \Delta_j^-)}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, J \quad (8)$$

O maior de valor de  $\varphi$  corresponderá à melhor alternativa dentro dos princípios de avaliação do TOPSIS. Para a resolução do algoritmo o aplicativo *MS-Excel™* oferece bons resultados, com flexibilidade e rapidez que proporcionam boas condições para a análise de sensibilidade.

Em seguida, escolhe-se entre os empreendimentos (alternativas) avaliados pelo TOPSIS, o conjunto com os maiores coeficientes de prioridade, em número significativo para o objetivo desejado pelo decisor. Para avaliar essas alternativas é aplicado o método AHP. Esse método está fundamentado em matriz quadrada, constituída dos critérios empregados para a avaliação. Os pares de critérios são comparados, determinando o grau de importância de um sobre o outro, com base na escala criada por Saaty (1980). Especialistas e *stakeholders* associados aos projetos avaliam o grau de importância entre os critérios de avaliação por meio de entrevistas e *workshops* para preenchimento da matriz AHP. A aplicação do AHP obedece aos seguintes passos:

*Primeiro passo:* Montagem da matriz principal  $A = [a_{im}]$  onde  $i, m = 1, 2, 3, \dots, n$ , de acordo com as regras para a definição de  $a_{ij}$  ou seja: (a) se  $a_{ij} = \alpha$ , tem-se que  $a_{ji} = 1/\alpha$ , sendo  $\alpha \neq 0$ , (b) quando dois empreendimentos (alternativas) forem considerados de igual importância, tem-se que  $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1$ ; e na situação específica  $a_{ii} = 1$ , para qualquer  $i$  (Saaty, 1980). A avaliação é feita comparando-se por pares de critérios, a partir de uma escala de valores de 1 (menor) a 9 (maior), o grau de importância de um sobre o outro, em função do objetivo sob análise.

*Segundo passo:* Normalização da matriz. Para tal, Saaty (1991) propõe quatro formas de determinação que, de acordo com o autor, apresentam resultados semelhantes, principalmente se a matriz for consistente. Um dos procedimentos para normalização é construir uma nova matriz

$A_y$ , em que os elementos de cada coluna ( $r_{ij}$ ) resultam da divisão do dado da coluna original pela soma da mesma, como mostrado na equação (9):

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

*Terceiro passo:* Determinação do vetor prioridades, constituído pelas ponderações (pesos), calculando-se a média das linhas da matriz normalizada  $A_y$ .

$$P_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n r_{ij}, \quad \text{onde } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

*Quarto passo:* Análise da consistência na avaliação dos pares de critérios.

Efetua-se por meio de um índice obtido a partir do cálculo do autovalor  $\lambda_{max}$ , resultante da multiplicação da matriz formada pela soma das colunas da matriz  $A$  ( $V$ ) pelo vetor prioridades ( $P$ ), como recomenda Saaty (1980):  $\lambda_{max} = V.P$  (11)

Com base no autovalor  $\lambda_{max}$  determina-se o índice de consistência IC, também denominado de

desvio de consistência:  $IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$  (12)

Para corrigir o desvio de consistência em função da ordem  $n$  das matrizes em geral aplica-se a razão de consistência RC, obtida em função de simulações com matrizes 9x9 e 11x11, em 100 e 500 amostras, respectivamente, geradas randomicamente, com recíprocas forçadas de Índice Randômico – IR, um tipo de consistência aleatória (Saaty,1991). Assim, a Tabela 1 apresenta a tabela proposta por Saaty e relaciona a ordem  $n$  da matriz com o respectivo índice.

**Tabela 1** – Índices randômicos em função da ordem  $n$  da matriz

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1991, p. 27)

Com base nesse raciocínio, a Razão de Consistência (RC) é o indicador que mostra a verdadeira consistência das respostas obtidas na pesquisa AHP e é determinada por:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (13)$$

Para Saaty (1991),  $RC \leq 0,10$  significa que as avaliações produzidas têm boa qualidade, sendo consideradas aceitáveis.

A obtenção das ponderações do AHP é realizada, com rapidez e flexibilidade, empregando-se o *software Expert Choice*<sup>TM</sup>, cujos recursos gráficos e outros facilitam a análise de sensibilidade.

Em uma nova etapa, a avaliação final dos empreendimentos é feita com base em recálculo da planilha associada ao método TOPSIS com o emprego do conjunto de ponderações aplicável a cada um dos empreendimentos selecionados. Novo processamento é realizado, com obtenção de nova matriz ponderada e resultados subsequentes, inclusive do coeficiente de prioridade. Comparam-se os resultados com os obtidos pelo TOPSIS original, inclusive análise de sensibilidade.

A elaboração de relatório com as propostas de prioridades resume o objeto da aplicação do procedimento, obtido a partir dos dados processados. Nesta etapa, é feita a submissão do relatório para a decisão final por parte de formuladores e decisores de políticas públicas relacionadas aos projetos e empreendimentos relativos para a Infraestrutura de transporte no Brasil.

## 5. Discussão

As “Premissas de projeto” da aplicação do procedimento em situação real para escolha de projetos de infraestrutura de transportes no Brasil, de acordo com Silva (2008), foram: a) proporcionar condições para que um processo de intermodalidade seja efetivamente implantado, reduzindo custos logísticos dos produtos movimentados no país, especialmente aqueles com baixo valor agregado destinados às exportações; b) possibilitar a geração de empregos, diretos e indiretos, contribuindo para que benefícios decorrentes da obtenção de renda associada à produção possam gerar ganhos nas áreas de saúde, educação e habitação, contribuindo para fixar o homem à terra (ou evitar o êxodo demográfico); c) proporcionar condições para aumento da qualidade de vida da população, privilegiando a oferta de meios de transporte e a segurança dos indivíduos no seu deslocamento; d) possibilitar condições de funcionamento eficiente dos portos, no que diz respeito à entrada e saída de mercadorias e ao acesso aos mesmos pelos diversos modos de transporte; e) considerar o impacto ambiental, prevendo medidas corretivas que recuperem pelo menos parte do que for afetado pela implantação do empreendimento; f) levar em conta possíveis benefícios ambientais em função da implantação de projetos que, mesmo produzindo impactos produzam benefícios totais; e g) avaliar os prazos e custos de execução como variáveis importantes, mas que não devem se sobrepor a perdas ambientais ou à redução da qualidade de vida das populações envolvidas com os empreendimentos avaliados.

Outras variáveis que nortearam as escolhas de projetos prioritários de acordo com as estratégias de crescimento e desenvolvimento sustentável foram: (i) a resolução dos problemas logísticos de contorno das grandes cidades brasileiras, São Paulo e Rio de Janeiro, sujeitas ao trânsito de veículos pesados pela zona urbana para o acesso às diversas rodovias de acesso a essas cidades; (ii) custo médio dos investimentos necessários, considerando-se que o custo do modo ferroviário é da ordem de US\$ 1.000 x 10<sup>3</sup> /km, enquanto o custo do modo rodoviário é de US\$ 250 x 10<sup>3</sup> /km; (iii) redução do impacto ambiental decorrente da emissão de CO<sub>2</sub>, pelos veículos pesados que trafegam pelas duas grandes cidades.

**Tabela 2-** Atributos (critérios) e sua interpretação

Atributos	Interpretação
Conexão intermodal	Grau de contribuição para o desenvolvimento da multimodalidade
Geração de empregos	Medida da influência para a criação de empregos diretos e indiretos nas regiões afetadas
Bem-estar social	Alcance de benefícios sociais, p.e. em educação, saúde, segurança e mobilidade
Impacto ambiental	Interferências no meio ambiente, tanto as negativas como as positivas.
Recuperação de passivos ambientais	Ganhos de qualidade ambiental, em outros locais, decorrente da execução do projeto
Custos e benefícios	Nível de dispêndio de recursos para execução <i>versus</i> possíveis benefícios associados
Prazo de execução	Tempo decorrido entre a necessidade e o pleno uso dos benefícios obtidos

A utilização do método Delphi permitiu identificar, segundo as premissas relacionadas ao crescimento econômico e ao desenvolvimento sustentável, os atributos a serem empregados para a avaliação dos projetos com prioridade de execução para a Infraestrutura de transporte brasileira. Para isso, 30 *stakeholders* foram consultados, com resultante ordenação dos projetos, de acordo com uma escala quantitativa. Na Tabela 2 acima são apresentados os atributos resultantes e sua interpretação face aos projetos e empreendimentos avaliados.

Após o processamento das informações obtidas na consulta às agências de governo e demais *stakeholders* envolvidos, foram selecionados 60 projetos de Infraestrutura envolvendo rodovias, ferrovias e hidrovias, dos quais foram extraídos os 25 primeiros selecionados por meio de uma avaliação preliminar com o TOPSIS. Em seguida, foram montadas 25 matrizes do método AHP, submetidas a 32 especialistas e não-especialistas, processadas pelo *software Expert Choice*<sup>TM</sup>. As ponderações obtidas pelo AHP foram agrupadas por modalidade de transporte e calculados os respectivos valores médios, com os desvios-padrão de modo que validasse tais valores. As

ponderações por modalidade de transporte foram submetidas ao TOPSIS com o emprego de um conjunto integrado de planilhas *MS-Excel™*, nas quais foi introduzido o algoritmo do TOPSIS. O simulador resultante permitiu obter os coeficientes de prioridade por projeto e empreendimento e a realização de análise de sensibilidade até a obtenção do resultado final, mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3-** Projetos e empreendimentos prioritários avaliados por ponderações médias

Projeto	$\Delta^+$	$\Delta^-$	$\phi$
<b>RODOVIÁRIO</b>			
Arco metropolitano do Rio de Janeiro	0,39	0,51	0,57
Avenida Perimetral Santos, SP (acesso ao Porto)	0,41	0,49	0,54
Rodoanel de São Paulo, SP: trecho Sul	0,45	0,45	0,50
BR-163, trecho Guarantã do Norte, MT – Rurópolis/Santarém, PA	0,48	0,43	0,47
BR-470 Via expressa de acesso ao porto de Itajai, SC	0,51	0,40	0,44
BR-230/ PA, pavimentação trecho Marabá, Altamira, Medicilândia, Rurópolis	0,55	0,35	0,39
BR-101/ES: inclui contorno Vitória-ES	0,58	0,32	0,36
BR-153/TO: Restauração do trecho Divisa GO/TO -Divisa TO/PA	0,59	0,32	0,35
BR-364/MT: pavimentação trecho Diamantino-Campo Novo dos Parecis	0,59	0,32	0,35
<b>FERROVIÁRIO</b>			
Ferroanel de São Paulo, SP: tramo Norte	0,41	0,50	0,55
Contorno ferroviário de Curitiba, PR	0,45	0,46	0,51
Ferrovias Norte: construção trecho Alto Araguaia-Rondonópolis	0,45	0,46	0,50
Ramal ferroviário Estreito-Balsas, MA – construção	0,51	0,40	0,44
Ferrovias Norte-Sul, TO	0,53	0,38	0,42
Contorno ferroviário Camaçari - Aratú (BA) - construção	0,53	0,38	0,41
Ferrovias Nova Transnordestina	0,56	0,35	0,39
<b>AQUAVIÁRIO</b>			
Eclusas Tucuruí, PA, construção	0,43	0,47	0,52
Porto de São Francisco do Sul, SC: construção e recuperação de berços	0,44	0,47	0,52
Porto Vila do Conde-PA, ampliação	0,46	0,45	0,50
Hidrovia Paraná-Paraguai: serviços de dragagem e derrocagem	0,51	0,40	0,44
Porto de Itaguaí, RJ: serviço de dragagem	0,52	0,39	0,43
Porto de Paranaguá, PR: construção e recuperação de berços	0,55	0,36	0,40
Porto de Suape, PE, acesso	0,55	0,36	0,39
Porto de Santos, SP: serviço de dragagem e derrocagem	0,57	0,34	0,37
Porto de Itaqui, MA - dragagem e recuperação/ampliação de berços	0,61	0,30	0,33

O resultado derivou de análise de sensibilidade em função de externalidades e de restrições identificadas ao se discutirem tais resultados com os *stakeholders*. As análises de sensibilidade foram realizadas tanto no TOPSIS, via simulador, como no AHP no ambiente do *software Expert Choice™*. Assim, os projetos escolhidos e em execução (Silva, 2008) foram: (a) Arco Metropolitano do Rio de Janeiro- AMRJ, com uma extensão de 125 km, conectando por fora do centro urbano três grandes rodovias, com investimento previsto de US\$ 450 x10<sup>6</sup>; (b) Rodoanel de São Paulo, com o mesmo propósito do AMRJ, com 23 km com investimento previsto de US\$ 266 x10<sup>6</sup>; (c) Ferroanel de São Paulo, com o objetivo de liberar linhas de trens urbanos, com extensão de 66 km, investimento previsto de US\$ 156 x10<sup>6</sup>; d) Eclusas de Tucuruí, permitindo a implantação da hidrovia do Rio Tocantins, na Amazônia, com investimento previsto de US\$ 360 x10<sup>6</sup> [38]. Esses quatro empreendimentos estão incluídos no Plano de Aceleração do Crescimento do Governo Federal. Outros projetos prioritários correspondentes a empreendimentos com grande extensão e investimentos elevados, devem ser executados por meio de parcerias público-privadas.

## 6. Considerações Finais

Ainda que estudos e aplicações identificados na revisão da literatura demonstrem a viabilidade técnica da utilização conjunta AHP + TOPSIS, o desafio dos pesquisadores consistiu em verificar sua validade para a avaliação de um número elevado de projetos relacionados à infraestrutura de transportes no Brasil e um conjunto de atributos associados aos empreendimentos necessários à sua execução. A experiência de Tzeng *et al.* (2005) foi a que trouxe maior contribuição para a definição da estrutura de apoio à decisão utilizada na formulação das etapas do procedimento, muito embora essa tenha sido desenvolvida com o

suporte quase exclusivo de especialistas em Engenharia de Transportes, Pesquisa Operacional e Administração Pública do time de trabalho. Essa condição é plenamente aceitável, dado se tratar de assunto de natureza específica e essencialmente técnica, em que algumas externalidades foram mensuradas por especialistas de áreas complementares e em entrevistas com *stakeholders*. Em geral, nas demais experiências relatadas, esses métodos foram aplicados ou testados para um número limitado de alternativas e com critérios claramente definidos; entretanto, sempre a maioria teve conteúdo técnico específico. A aplicação feita do procedimento teve amplitude, especialistas e não-especialistas participaram igualmente, pois os projetos-alvo das avaliações tem impacto de grande alcance nos setores econômicos, sociais e ambientais.

Na situação particular deste artigo, a escolha do AHP foi condicionada à montagem de uma hierarquia que definisse critérios alinhados com as premissas estabelecidas para a elaboração do procedimento. Entretanto, o método AHP, embora proporcione uma ordenação teoricamente mais precisa do que o TOPSIS, quando trabalha com um grande número de subcritérios acarreta dificuldades para a extração do conhecimento sobre os mesmos. A comparação par a par de critérios exige dos respondentes um nível de consistência que, na maioria das vezes, fica além do mínimo de 0,10, recomendado por Saaty (1980), o que exige constantes ajustes, com vistas a favorecer o processo de análise. Por outro lado, o TOPSIS exige uma cuidadosa escolha das ponderações atribuídas aos critérios de avaliação, devido ao emprego de um único conjunto de ponderações para todas as alternativas avaliadas, que expõe seu ponto fraco quanto a sua utilização. A neutralização dessa deficiência pode ser alcançada pela aplicação das propriedades dos números triangulares *fuzzy*. Esse recurso, a despeito da elegância de sua formulação, apresenta resultados próximos dos obtidos com o TOPSIS clássico. Contudo, a aplicação dessa técnica viabiliza a realização, na prática, de planejamento participativo; ou seja, é factível obter-se, na base da pirâmide do processo decisório, elementos da realidade que possam auxiliar a tomada de decisões no vértice superior.

## Referências

- ABIN(2009). *Conferência do Clima de Copenhague*.  
In: <http://www.abin.gov.br/modules/articles/article.php?id=4824>, acesso 25 de abril de 2010.
- Benayoun, R., Roy, B., Sussman, B.(1966). Electre: method for a guided choice in presence of multiple points of view, *Direction Scientifique*, Working Note 49, EMS, Paris, France.
- Brans, J.P., Mareschal, B.(1992). PROMETHEE V: MCDM problems with segmentation constraints, *INFOR*, No. 30, p. 85-96.
- Charnes, A., Cooper, W.W.(1961). *Management models and industrial applications of linear programming*. Vol.1, Wiley & Sons, New York.
- Chen, M-F., Tzeng, R-I. (2004). Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country, *Mathematical Modelling and Computer*, 40, 1473-1490.
- Didier, M., Prud'homme, R. (2007). *Infrastructures, transport, mobilité et croissance*. La Documentation Française, Paris.
- Fishburn, P., Lavalley, I. (1999). MCDA: theory, practice and the future, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8, 1, 1-2.
- Gumus, A. T. (2008). Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two-step fuzzy AHP and TOPSIS methodology, *Expert Systems with Applications*, doi: 10.1016/j.eswa.2008.03.013.
- Hwang, C.L., Lai, Y.J., Liu, T.Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making, *Computers and Operations Research*, 20, 889-899.
- Hwang, C.L., Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making; methods and applications, *Lecture Series in Economics and Mathematical Systems*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Iç, Y.T., Yurdakul, M. (2008). Development of a decision support systems for machining center selection, *Expert Systems with Applications*, doi: 10.1016/j.eswa.2008.02.022.
- Ignizio, J. (1976). *Goal programming and extentions heath*. Lexington Books, Lexington.

- Islklar, G., Büyüközkan, G.** (2007). Using a multicriteria decision making approach to evaluate mobile phone alternatives, *Computer Standards & Interfaces*, 29, 265-274.
- Janic, M., Reggiani, A.** (2002). An application of the multiple criteria decision making (MCDM) analysis to the selection of a new hub airport, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2, 2, 113 – xx.
- Jardim, A.** (2010). *Pós-Copenhague aponta para novo modelo de definições de metas e fortalecimento de iniciativas locais*.  
<http://www.arnaldojardim.com.br/popNoticia.asp?NOTICIA=1940>, acesso 25 de abril de 2010.
- Keeney, R.L., Raiffa, H.** (1976). *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. John Wiley & Sons, New York.
- Koopmans, C.T.**(1951). Activity analysis of production and allocation, *Cowles Commission for Research in Economics*, monograph 13, Wiley & Sons, New York.
- Lee, S.M.** (1972). *Goal programming for decision analysis*. Auerbach, Philadelphia.
- Liechti, M.** (2002). *Safe and sustainable freight transport - our common challenge*. In: [www.www.t-e.nu](http://www.www.t-e.nu), European Federation for Transport and Environment, Brussels, Belgium.
- Lin et al.** (2008). Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process, *Computers in Industry*, 59, 17-31.
- Lootsma, F.** (1999). The expected future of MCDA, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, paragraph 2, p.59-60.
- Önut, S., Soner, S.** (2007). Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS, *Waste Management*, doi: 10.1016/j.wasman.2007.05.019.
- PNLT** (2007). *Plano Nacional de Logística e Transporte*. Ministério dos Transportes e Ministério da Defesa, Brasília, DF.
- Rietveld, P.** (1994). Spatial economic impacts of transport infrastructure supply, *Transportation Research - Part A*, Vol.28A, 4, 329-341.
- Saaty, T. L.** (1980). *The Hierarchy Analytic Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L.**(1991). *Método de Análise Hierárquica*. McGraw-Hill, São Paulo.
- Scapolo, F. e Miles, I.** (2006). Eliciting experts' knowledge: a comparison of two methods, *Tecnological Forecasting and Social Change*, Vol.73, pp. 679-704.
- Sheu, J-B.** (2008). The hybrid neuro-fuzzy approach to analytical mode choice of global logistics management, *European Journal of Operational Research*, 189, 971-986.
- Silva, R.B.** (2008), Análise estruturada das dimensões do desenvolvimento sustentável e a interdependência com a função Transporte: proposta de metodologia para orientar decisões estratégicas na implantação de projetos prioritários para a Infraestrutura de transporte no Brasil, *D.Sc.Dissertation*.COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, abril.
- Tsaur, H-S., Chang, T-Y., Yen, C-H.** (2002). The evaluation of airline service quality by fuzzy MCDM, *Tourism Management*, 23, 107-115.
- Tzeng, R-I., Lin, C-W., Opricovic, S.** (2005). Multi-criteria analysis of alternative-fuel basis for public transportation, *Energy Policy*, 33, 1373-1383.
- Wu, C.R., Lin, C.T., Lin, Y.F.** (2008). Selecting the preferable bancassurance strategic alliance by using expert group, *Expert Systems with Applications*, doi: 10.1016/j.eswa.2008.02.016.
- Yang, T., Chen, M-C., Hung, D-C.** (2007). Multiple attribute decision-making methods for the dynamic operator allocation problem, *Mathematical and Computers in Simulation*, 73, 285-299.
- Yoon, K.** (1987). The reconciliation among discrete compromise situations, *Journal of Operational Research Society*, 38, 21-30.