

## **A MENSURAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS BUS RAPID TRANSIT POR MEIO DA ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)**

### **Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior**

Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima 1000, prédio 7, sala 300, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,  
Brasil  
alvjr2002@hotmail.com

### **Julio Cezar Mairesse Siluk**

Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima 1000, prédio 7, sala 300, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,  
Brasil  
jsiluk@ufsm.br

### **Marlon Soliman**

Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima 1000, prédio 7, sala 300, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,  
Brasil  
marlonsoliman@gmail.com

### **Edson Funke**

Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima 1000, prédio 7, sala 300, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,  
Brasil  
edsonfunke@gmail.com

### **Sabine Ritter de Paris**

Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima 1000, prédio 7, sala 300A, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,  
Brasil  
sa.paris@hotmail.com

### **Caroline Martins Machado**

Universidade Federal de Santa Maria  
Avenida Roraima 1000, prédio 7, sala 300, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul,  
Brasil  
carolmartinsm@hotmail.com

## **RESUMO**

Atualmente, o *Bus Rapid Transit* (BRT) é apontado como um dos melhores modais de transporte público, devido principalmente as suas características estruturais e operacionais. No entanto, as variadas configurações urbanas das cidades impede uma comparação direta da eficiência entre os sistemas instalados, fato que pode ser contornado utilizando-se modelagens de mensuração de desempenho compatíveis com esta finalidade. Assim, o objetivo central deste artigo é estudar o nível de eficiência com que as técnicas oriundas da Análise Hierárquica de Processos (AHP) se comportam em relação aos sistemas BRT no Brasil. Para tanto, testou-se a aderência de quatorze técnicas variantes da AHP a um modelo para avaliação de desempenho de sistemas BRT disponível na literatura, constatando-se ao final que as técnicas cuja concepção está baseada na escala linear, com função de agregação aditiva, apresenta maior grau de coerência em relação ao sistema de avaliação proposto.

**PALAVRAS CHAVE.** Sistemas de mensuração de desempenho, Bus rapid transit, Analytic hierarchy process.

**Área principal.** ADM - Apoio à Decisão Multicritério; L&T - Logística e Transportes.

### ABSTRACT

Currently, the Bus Rapid Transit (BRT) is touted as one of the best modals of public transportation, mainly due to its structural and operational characteristics. However, the varied urban configurations of cities prevents a direct comparison of the performance of the installed systems, which can be circumvented using modeling to measure performance consistent with this purpose. Thus, the central aim of this paper is to study the level of efficiency that techniques originated from the Analytic Hierarchy Process (AHP) behave in relation to BRT systems in Brazil. To this end, we tested the adherence of fourteen technics variants from AHP to an evaluation model of performance for BRT systems available in the literature, noting in the end that the techniques whose design is based on the linear scale, with additive aggregation function, presented a higher degree of consistency in relation to the evaluation system proposed.

**KEYWORDS.** Performance measurement systems, Bus rapid transit, Analytic hierarchy process.

**Main area.** ADM - Multicriteria Decision Support; L & T - Logistics and Transport.

### 1. Introdução

Ao decorrer dos anos, o crescimento descontrolado dos centros urbanos no Brasil gerou como consequência conflitos entre os diferentes meios de deslocamento disponibilizados, de modo a haver uma tendência pela priorização da utilização dos transportes privados em detrimento aos públicos, o que gera gastos extras para investimentos no aumento e manutenção das estruturas viárias, em supressão as premissas básicas da mobilidade urbana, que ressaltam a inclusão social através do acesso amplo aos espaços públicos existentes em uma comunidade local (KITTELSON & ASSOCIATES et al., 2007; WRIGHT; HOOK, 2007).

Dentre os atuais sistemas públicos existentes, o *Bus Rapid Transit* (BRT) surge como uma das melhores opções disponíveis atualmente no mercado, pois possui capacidade de disponibilizar um serviço de qualidade, segurança e com custo-benefício viável as expectativas da população, sem onerar em excesso a gestão dos recursos financeiros destinados a sua instalação e manutenção periódica (RODRIGUEZ; MOJICA, 2009; DUARTE et al., 2012; GLOBAL BRT, 2014).

Porém, devido a possíveis diferenças existentes nos arranjos estruturais e gerencial dos centros urbanos, os BRTs estão concebidos de modo a considerar as demandas por transportes locais, o que causa uma distinção entre eles (NTU, 2011; DUARTE; ROJAS, 2012). Tal situação pode estar diretamente vinculada também a não possibilidade de garantir que a operacionalização ocorre de maneira uniforme nos diferentes sistemas instalados, fato que pode ser controlado e visualizado quando da aplicação de modelagens para a mensuração de desempenho, compatíveis para a comparação das diferentes formas com que o BRT está funcionando (FTA, 2009; LERNER, 2009; LINDAU et al., 2010).

Por se tratar de um problema que compreende o ranqueamento dos centros urbanos, denominados neste caso também por alternativas, técnicas como as relacionadas ao enfoque multicritério de apoio a tomada de decisão podem ser aplicadas, pois visam o tratamento das informações tanto de natureza quantitativa como qualitativa, sintetizando de maneira coerente mensuração a fim de aumentar o entendimento a respeito do problema (GOMES; GOMES, 2012; ISHIZAKA; NEMERY, 2013).

Dentre as técnicas difundidas e relacionadas a tal conceito, a *Analytic Hierarchy Process* (AHP) tem por premissa básica indicar a importância relativa existente entre cada um

dos fatores pertencentes a um nível principal, por meio de comparações paritárias, onde as alternativas são elencadas conforme o seu grau de relevância, gerando assim uma pré-ordem das opções de modo a facilitar a visualização das condições de cada uma ao contexto (SAATY, 2008).

Com base nos pressupostos supracitados, o problema de pesquisa se estende ao âmbito de entender como as diferentes formas de aplicação da AHP podem oferecer resultados práticos mais claros e compatíveis com a realidade dos BRTs mensurados em um Sistema de Mensuração de Desempenho (SMD), de maneira a tornar tal tarefa mais prática e ágil de ser gerenciada. Assim, o objetivo central da proposta é estudar o nível de eficiência com que técnicas oriundas da AHP se comportam em relação a mensuração de desempenho dos sistemas BRT no Brasil.

O intento para o desenvolvimento se justifica pelo relevante aumento da demanda nacional por otimização dos transportes, visto um cenário atual majoritariamente predominado pela falta de planejamento das zonas urbanas, principalmente, de médio a grande porte (VUCHIC, 2007).

Conforme estudos elaborados pela Global BRT (2013), atualmente existe no Mundo uma capacidade instalada para corredores BRT superior a 3.800 km, número oito vezes superior ao encontrado no ano 2000, distribuídos em aproximadamente 147 cidades espalhadas por todos os continentes (desconsiderando a Antártida). Inserido nesse cenário, o Brasil possui o maior número de cidades com esse tipo de modal instalado, 31 ao total, sendo 56% superior a segunda maior concentração encontrada, Estados Unidos da América com 14 cidades, através de uma demanda de passageiros que se aproxima a 10 milhões de pessoas por dia, o que representa, em valores totais, a 6% de toda a população nacional.

Portanto, a escolha desta abordagem fundamenta-se através da percepção da importância do BRT nos sistema viário de um centro urbano, e suas implicações na maneira com que no futuro a sociedade irá se organizar, tema este que ainda possui lacunas de investigação científica, conforme revisão bibliográfica realizada nos portais de periódicos da CAPES®, *Scientific Direct*®, *Scopus*® e *Web of Knowledge*®, com as palavras-chaves “AHP comparison”, “AHP BRT” e “Analytic Hierarchy Process comparison”, entre os anos de 2010 a 2014.

O desafio de antever situações que possam prejudicar de alguma maneira a sistemática no qual o transporte público está composto faz com que estudos, a respeito de metodologias, capazes de transformar dados difusos e desconexos em informações relevantes se tornem premissas básicas para a tomada da melhor decisão gerencial, no momento certo e de acordo com as orientações consideradas como ideais para o contexto ao qual se está inserido.

Por possuir um caráter científico, esse tipo de abordagem visa o tratamento das informações tanto de natureza quantitativa como qualitativa, desde que estas sintetizem de maneira coerente mensuração, produzindo conhecimento e aumentando o entendimento a respeito do problema.

## 2. O Sistema de Mensuração de Desempenho (SMD)

Com base nos pressupostos descritos por Neuenfeldt Júnior (2014), a modelagem para a mensuração de desempenho foi concebida por meio da utilização dos pressupostos descritos pela método *Key Performance Indicators* (KPI) (PARMENTER, 2010), a partir da estruturação hierárquica do problema até se chegar a concepção dos dezoito KPIs responsáveis por auxiliar a avaliação de performance dos centros urbanos selecionados para pesquisa.

Para tanto, houve a necessidade de se parametrizar a maneira com que a construção dos KPIs foi desenvolvido, através do eixo de estudo centrado nos processos operacionais de deslocamento de pessoas no BRT, no caso a captação, transporte e distribuição, de modo a estar predisposta com base em fatores críticos, a fim de atender a necessidade de se converter os fatores qualitativos em informações quantitativas.

Assim, possibilitou-se a realização de verificações matemáticas para se gerar resultados que atendam satisfatoriamente ao cumprimento do objetivo ( $L_c$ ), calculado a partir da média dos resultados estabelecidos em cada um dos indicadores ( $Id_c$ ) a escala percentual denominada por  $\alpha$ , conforme mostra a Equação (1), com o respectivo número representativo do ordenamento ( $OL_c$ )

das alternativas submetidas a estudo,

$$L_c = \frac{\sum_{d=1}^{18} Id_c}{18}; \begin{cases} \forall L_c \in \alpha = [0\%, 100\%] \\ Id_c = Ind_c \times wId \end{cases} \quad (1)$$

onde  $wId$  é proporcional a relevância (ou peso) de  $Id_c$  ao contexto, de modo que  $Ind_c$  é a sua definição em grandeza normalizada.

### 3. Materiais e métodos

Para compreender os principais aspectos abordados, a pesquisa foi concebida em cinco etapas sequenciais, denominadas por: revisão bibliográfica; unidades de análise; modelagem das técnicas de AHP; visão geral do contexto comparativo e conclusões, interligados sob o regime sequencial.

A primeira parte da pesquisa foi compreendida através do estudo sobre as principais teorias e conceitos a respeito dos temas abordados, onde houve a necessidade de se recorrer a ferramentas de investigação capazes de retornar ao pesquisador informações com alto grau de fundamento, como os editoriais *Scientific Direct*<sup>®</sup>, *Scopus*<sup>®</sup> e *Web of Knowledge*<sup>®</sup>, a fim de obter artigos de relevância publicados em revistas nacionais e internacionais. Em conjunto, foram pesquisadas referências em livros sobre os principais autores e anais de congressos.

Como Unidade de Análise utilizou-se estudos relativos à situação do BRT no Brasil disponibilizados no Global BRT (2013), sendo esta reconhecida como a agência mundial responsável por prover um conveniente repositório a respeito das características de operacionalização do setor, visando estabelecer um vínculo entre a temática, os pesquisadores, organizações não governamentais e agências de trânsito, por meio do recolhimento de informações periódicas diretamente em cada um dos centros urbanos listados, de modo a expandir as possibilidades acerca da busca de melhores práticas para o crescimento e difusão do assunto em um âmbito global.

Para a modelagem da AHP, primeiramente partiu-se da definição dos indicadores que estão contidos no SMD, e que serviram por base para a fundamentação dos critérios do ranqueamento, identificados a partir de pesquisas acerca dos temas mobilidade urbana e BRT descritos em Levinson et al. (2003), Kittelson & Associates et al. (2007), Wright e Hook (2007), Lerner (2009), Lindau et al., 2010, NTU (2011), Embarq Brasil (2013) e Global BRT (2013).

Inseridos nesse contexto, buscou-se utilizar os pressupostos contidos na Análise Hierárquica de Processo (AHP), com base no processo de decisão descrito por Guitouni e Martel (1998), Saaty (2008), Gomes e Gomes (2012) e Ishizaka e Nemery (2013), em específico na concepção das matrizes de julgamentos, incorporado a utilização de sete escalas ( $\epsilon$ ) de medidas da proporcionalidade das alternativas em relação aos indicadores, sendo elas: Linear ( $\epsilon = 1$ ), Quadrada ( $\epsilon = 2$ ), Geométrica ( $\epsilon = 3$ ), Logarítmica ( $\epsilon = 4$ ), Raíz quadrada ( $\epsilon = 5$ ), Assíntota ( $\epsilon = 6$ ) e Balanceada ( $\epsilon = 7$ ).

Ainda em relação a definição da técnicas, houve a necessidade da seleção das funções capazes de conceber a agregação ( $\rho$ ) para reunir os resultados estabelecidos em cada um dos dezoito indicadores, no caso a Aditiva ( $\rho = 1$ ) e a Multiplicativa ( $\rho = 2$ ), com base nos pressupostos descritos por Ishizaka e Nemery (2013), a fim de expressar de maneira única a situação das alternativas elencadas perante o contexto do sistema.

Por meio da combinação da mensuração através das sete escalas, em conjunto com as duas funções de agregação propostas, tem-se ao final um total de quatorze técnicas de AHP possíveis de serem utilizadas para o processo de ranqueamento da situação dos centros urbanos que, posteriormente, poderão ser comparáveis aos resultados estabelecidos no SMD previamente desenvolvido a esta pesquisa, conforme a predisposição proposta em seu objetivo central.

A fim de garantir que a modelagem possa gerar resultados que remetam consideravelmente a realidade em relação aos dados disponibilizados, foi proposta a verificação do nível de confiança da aplicação prática. Primeiramente, com base nos pressupostos descritos por Saaty (2008), calculou-se a razão de consistência dos julgamentos estabelecidos nas análises

hierárquicas do problema.

Para a verificação da técnica proposta que mais coincide com as medidas encontradas no SMD, foi proposta a utilização de três formas de estudo: o erro absoluto, o nível de amplitude e a análise das mudanças nos ordenamentos, a fim de oportunizar maneiras práticas e quantitativas de se visualizar qual proposta atende de forma mais coerente a tendência da modelagem pré-definida, a partir das diretrizes descritas por Anderson et al. (2013) e Chattamvelli (2014).

Na aplicação da modelagem foram escolhidas como referência cidades que possuem BRT instalado e uma faixa demográfica superior a um milhão de habitantes, devido a sua significativa relevância ao contexto, além de permitirem contemplar significativamente a maior parte das questões envolvidas com a operacionalização dos BRTs no país, onde foi possível listar ao total doze centros urbanos ( $c$ ): São Paulo ( $c = 1$ ); Rio de Janeiro ( $c = 2$ ); Recife ( $c = 3$ ); Salvador ( $c = 4$ ); Brasília ( $c = 5$ ); Fortaleza ( $c = 6$ ); Olinda ( $c = 7$ ); Belo Horizonte ( $c = 8$ ); Curitiba ( $c = 9$ ); Porto Alegre ( $c = 10$ ), Goiânia ( $c = 11$ ) e Campinas ( $c = 12$ ).

#### 4. Desenvolvimento da modelagem

Os indicadores foram definidos, de acordo com a sua natureza de origem e métrica, por meio das mais distintas unidades de medidas, o que impossibilita a correta comparação global destes. Dessa forma, para ser realizada essa atividade é necessária a normalização deles para uma mesma padronizada, segundo os pressupostos desenvolvidos para o *software* PerformancePoint Server® (2007), através do cumprimento de seis etapas de tratamento dos dados, iniciados com o cálculo da pontuação bruta  $GP(Ind_c)$  entre  $TInd_c$  e  $Ind_c$ , conforme a Equação (2),

$$GP(Ind_c) = \begin{cases} \infty, \frac{\theta \times Ind_c}{TInd_c} \left\{ \begin{array}{l} \lim_{Ind_c \rightarrow 0} [PB(Ind_c)] = 0 \\ \theta = 1 \end{array} \right. \\ 0, \frac{TInd_c}{\theta \times Ind_c} \left\{ \begin{array}{l} \lim_{Ind_c \rightarrow 0^+} [PB(Ind_c)] = \infty \\ \theta = 1 \end{array} \right. \end{cases} \quad (2)$$

onde  $\theta$  é a constante na definição da curva da função  $GP(Ind_c)$  e  $PB(Ind_c)$  é a pontuação bruta obtida através da métrica utilizada em cada indicador.

A seguir, é necessário determinar os limites e as faixas em que as pontuações estão localizadas, de forma a identificar o seu posicionamento em relação a uma classificação padrão, o que deve representar o seu nível de desempenho de acordo com as  $r$  faixas estabelecidas, das quais permeiam desde o valor considerado mínima  $N_{min}$  até o máximo  $N_{max}$ , sendo os valores limites superiores ( $LS_r$ ) para cada faixa determinados pela Equação (3), a partir das diferenças  $\Delta_r$  originadas do intervalo de valores assumido.

$$LS_r = \begin{cases} r = N_{max}, Ind_{max} \left\{ \begin{array}{l} Ind_{max} \geq 100\% \rightarrow Ind_{max} = 100\% \\ Ind_{max} < 100\% \rightarrow Ind_{max} \end{array} \right. \\ r \in \{2, \dots, NF_{max-1}\}, \Delta_r + LS_{r-1} + u_i \\ r = N_{min}, Id_{min} \left\{ \begin{array}{l} Ind_{min} \leq 0 \rightarrow Ind_{min} = 0 \\ Ind_{min} > 0 \rightarrow Ind_{min} \end{array} \right. \end{cases} \quad (3)$$

Para tanto,  $u_i$  é a constante que determina a diferença de  $LS_{r-1}$  e o limite inferior  $LI_k$  entre duas faixas subsequentes,  $\forall \sum_{k=NF_{min}}^{NF_{max}} \Delta_r = 100\%$ . O próximo passo é o cálculo do fator limite  $FL(LS_r)$ , ajustando proporcionalmente  $LS_r$  e  $LI_r$  para o comprimento em que  $GP(Ind_c)$  está compreendida, através da Equação (4). Como consequência, a pontuação convertida ( $PC_r$ ) é calculada pela relação da distância entre a pontuação bruta e o respectivo limite inferior da faixa em que ela está localizada, conforme a Equação (5),

$$FL(LS_r) = [LS_r - (LS_{r-1} - u_j)] \times NF_{max}, \quad (4)$$

$$PC_r = 0,01 \times \left[ \frac{GP(Ind_c) - (LS_{r-1} - u_j)}{FL(LS_r)} \right] \quad (5)$$

onde  $u_j$  é a constante na definição da curva da função  $FL(LS_r)$ ,  $\forall u_j = 1$  de acordo com as características do SMD.

A  $PC_r$  tem por finalidade relacionar o valor bruto em relação aos limites da faixa. Com isso, afere-se com precisão o posicionamento dessa pontuação, a partir do referencial estabelecido pela faixa de desempenho mínima ( $N_{min}$ ), a fim de determinar a quantidade de ajustes necessários para a padronização das pontuações brutas  $AF(r)$ , Equação (6). Por fim, é possível encontrar através da Equação (7) o valor dos indicadores normalizados ( $Id_c$ ),

$$AF(r) = \frac{r-1}{NF_{max}}, \forall r \in \{1, \dots, NF_{max}-1\} \quad (6)$$

$$Id_c = (PC_k)_c + AF(k)_c \quad (7)$$

para uma escala padrão  $\alpha = [0; 100\%]$ .

A definição das técnicas para a classificação seguiu os pressupostos descritos na AHP Clássica (Saaty, 1977), onde propõem-se primeiramente a definição das escalas de valor ( $\varepsilon$ ), no caso sete (Tabela 1), para remeter a comparação do desempenho das cidades para cada um dos indicadores, representadas pela construção de matrizes de julgamentos ( $AI_\varepsilon d_c$ ), com base na relação descrita pela Equação (8), a partir dos pressupostos descritos por Saaty (1980).

$$AI_\varepsilon d_c = \sum_{c'=1}^{12} \frac{I_\varepsilon d_c}{I_\varepsilon d_{c'}} \quad (8)$$

Para tanto, é necessária que haja a conversão dos valores mensurados na escala padrão do SMD mostrada na Equação (9), no caso a percentual  $\alpha = \{Id_{cmin} = 0, Id_{cmax} = 100\%\}$ , de modo a estarem parametrizadas de acordo com os limites mínimos ( $I_\varepsilon d_{min}$ ) e máximos ( $I_\varepsilon d_{max}$ ) identificados para as  $\varepsilon$  escalas selecionadas e mostradas na Tabela 1,

$$I_\varepsilon d_c = \begin{cases} Id_c = 0; Id_c = Id_{cmin} \rightarrow I_\varepsilon d_c = I_\varepsilon d_{min} \\ Id_c = Id_{cmax} \rightarrow I_\varepsilon d_c = I_\varepsilon d_{max} \end{cases} \quad (9)$$

para  $Id_c \neq 0$ , tem-se que  $I_\varepsilon d_c$  é equivalente ao resultado da função de evolução dos dados características das escalas, conforme mostra a Equação (10),

$$I_\varepsilon d_c = \begin{cases} \varepsilon = 1 \rightarrow Id_c \times \frac{I_\varepsilon d_{max}}{Id_{max}} \\ \varepsilon = 2 \rightarrow 80 \times Id_c^2 + 1 \\ \varepsilon = 3 \rightarrow 0,946 \times e^{5,601 \times Id_c} \\ \varepsilon = 4 \rightarrow 0,504 \times \ln(Id_c) + 3,32 \\ \varepsilon = 5 \rightarrow Id_c^{0,5} \\ \varepsilon = 6 \rightarrow 0,163 \times \ln(Id_c) + 0,76 \\ \varepsilon = 7 \rightarrow 0,978 \times 2,71^{2,219 \times Id_c} \end{cases} \quad (10)$$

que subsequentemente permitiu a derivação das alternativas prioritárias dos indicadores, com base nas comparações paritárias características do método geométrico, mostradas na Equação (11) e concebidas a partir das definições propostas por Ishizaka e Nemery (2013).

$$g'I_\varepsilon d_c = \sqrt{\prod_{c'=1}^{12} AI_\varepsilon d_{c'}} \rightarrow gI_\varepsilon d_c = \frac{g'I_\varepsilon d_c}{\sum_{c=1}^{12} g'I_\varepsilon d_c} \quad (11)$$

A seguir, houve a necessidade de se estabelecer as maneiras com que os dados resultantes das relações individuais das alternativas nos indicadores contribuem para a formação da priorização global do ranqueamento. Para tanto, utilizou-se os pressupostos descritos por Ishizaka e Nemery (2013) quanto da agregação dos valores sob duas óticas distintas ( $\rho$ ): a aditiva ( $\rho = 1$ ) e a multiplicativa ( $\rho = 2$ ), quantitativamente descritas a partir da Equação (12),

$$I_{\varepsilon\rho}d_c = \begin{cases} \sum_{d=1}^{18} gI_{\varepsilon}d_c \times wI_d; & \forall \rho = 1 \\ \prod_{d=1}^{18} (gI_{\varepsilon}d_c)^{wI_d}; & \forall \rho = 2 \end{cases} \quad (12)$$

assim, por meio do arranjo das sete opções de escalas ( $\varepsilon$ ) mostradas com as duas funções de agregação ( $\rho$ ) recentemente descritas, tem-se de maneira lógica a composição de quatorze técnicas de mensuração de desempenho dos sistemas BRTs sob a ótica da AHP Clássica.

Tabela 1 – Escalas para a comparação entre alternativas. Fonte: Com base em Ishizaka e Nemery (2013).

Escalas ( $\varepsilon$ )	Relevância					Autores referência
	Menor	Moderada	Forte	Muito forte	Extrema	
Linear ( $\varepsilon = 1$ )	1	3	5	7	9	Saaty (1977)
Quadrada ( $\varepsilon = 2$ )	1	9	25	49	81	(Harker e Vargas, 1987)
Geométrica ( $\varepsilon = 3$ )	1	4	16	64	256	(Lootsma, 1993)
Logarítmica ( $\varepsilon = 4$ )	1	2	2,58	3	3,32	(Ishizaka et al., 2006)
Raíz quadrada ( $\varepsilon = 5$ )	1	1,73	2,23	2,65	3	(Harker e Vargas, 1987)
Assíntota ( $\varepsilon = 6$ )	0	0,24	0,46	0,63	0,76	(Dodd e Donegan, 1995)
Balanceada ( $\varepsilon = 7$ )	1	1,5	2,33	4	9	(Salo e Hamalainen, 1997)

Com os resultados estabelecidos em  $I_{\varepsilon\rho}d_c$ , foi possível conceber o ordenamento dos centros urbanos conforme o seu desempenho em relação ao contexto dos BRTs, através da sequência lógica de comparação mostrada na Equação (13),

$$OI_{\varepsilon\rho}d_c = \begin{cases} I_{\varepsilon\rho}d_c = \min_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c; & OI_{\varepsilon\rho}d_{\min} \\ \min_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c < I_{\varepsilon\rho}d_c < \max_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c; & OI_{\varepsilon\rho}d_c \propto \Delta = \max_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c - I_{\varepsilon\rho}d_c \\ I_{\varepsilon\rho}d_c = \max_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c; & OI_{\varepsilon\rho}d_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

sendo que, primeiramente, para todo e qualquer  $c$  maior ou igual a dois, deve-se verificar quais são os extremos máximo  $OI_{\varepsilon\rho}d_{\max}$  e mínimo  $OI_{\varepsilon\rho}d_{\min}$  de desempenho, para que em um segundo momento seja possível a constatação da situação proporcional intermediária das demais envolvidas ( $OI_{\varepsilon\rho}d_c \propto \Delta$ ), tomando-se por referência  $OI_{\varepsilon\rho}d_{\max}$ .

A fim de entender melhor o comportamento dos indicadores ao contexto estudado e as possíveis alterações que possam influenciar o perfil dos resultados, é proposta a verificação das variáveis utilizadas para se demonstrar o nível de confiabilidade do SMD quando aplicado na prática.

Saaty e Shang (2011) definem que há a necessidade de se realizar o cálculo da consistência lógica dos julgamentos realizados em cada um dos níveis da estrutura, partindo do pressuposto que os avaliadores da situação podem ser, no momento da tomada da decisão, inconsistentes com relação à definição dos pesos para os fatores. A AHP incorpora essas situações possibilitando ao usuário a verificação do nível de contradição em cada etapa através da razão de consistência.

Em caso de exceder o limite tolerável para o modelo ( $\geq 0,1$ ), o tomador de decisão deve realizar a revisão das comparações definidas atribuindo novos valores para os subcritérios envolvidos no julgamento proposto (SAATY; SHANG, 2011).

Para a determinação da técnica que melhor se ajusta ao contexto, houve a proposta da utilização de três meios de análise dos dados, com base nos pressupostos descritos por Anderson et al. (2013) e Chattamvelli (2014). O primeiro é composto pela medida do erro absoluto ( $E\varepsilon_c$ ) entre o valor encontrado ( $L_c$ ) no SMD e a pontuação obtida nas técnicas ( $I_{\varepsilon\rho}d_c$ ) de AHP, para cada uma das cidades consideradas, conforme a Equação (14),

$$E\varepsilon\rho_c = |I_{\varepsilon\rho}d_c - L_c| \quad (14)$$

como consequência, o erro total ( $E\varepsilon_T$ ) relativo ao somatório dos valores nas alternativas pode ser verificado pela Equação (15), de maneira que a escolha entre as técnicas é determinada a partir da função de minimização de  $E\varepsilon_T$ :

$$E\varepsilon\rho_T = \sum_{c=1}^{12} E\varepsilon\rho_c \rightarrow \min_{1 \leq c \leq 12} E\varepsilon\rho_c; \text{ s. a: } \begin{cases} E\varepsilon\rho_c > 0 \\ 1 \leq \varepsilon \leq 7 \\ 1 \leq \rho \leq 2 \end{cases} \quad (15)$$

Em um segundo momento tem-se a proposta de estudo do nível de amplitude ( $A\varepsilon_T$ ) das variações entre os extremos mínimos e máximos dos resultados das AHPs, Equação (16), de modo a caracterizar tal comportamento e identificar qual técnica possui maior grau de similaridade em comparação a medida dos valores relativos ao SMD ( $AL$ ), segundo mostra a Equação (17):

$$A\varepsilon\rho = \max_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c - \min_{1 \leq c \leq 12} I_{\varepsilon\rho}d_c; \text{ s. a: } \begin{cases} I_{\varepsilon\rho}d_c > 0 \\ 1 \leq \rho \leq 2 \\ 1 \leq \varepsilon \leq 7 \end{cases} \quad (16)$$

$$A\varepsilon\rho_T = |A\varepsilon\rho - AL| \rightarrow \min_{\substack{1 \leq \varepsilon \leq 14 \\ 1 \leq \rho \leq 2}} A\varepsilon\rho_T; \text{ s. a: } A\varepsilon\rho_T > 0 \quad (17)$$

Por fim, está composta da análise das mudanças nos ordenamentos para as técnicas ( $M\varepsilon\rho_T$ ), a fim de verificar o número de alterações em comparação ao ranqueamento das alternativas obtida no SMD ( $OL_c$ ), conforme a Equação (18),

$$M\varepsilon\rho_T = \sum_{c=1}^{12} M\varepsilon\rho_c \rightarrow \min_{\substack{1 \leq \varepsilon \leq 7 \\ 1 \leq \rho \leq 2}} M\varepsilon\rho_T; \text{ s. a: } M\varepsilon\rho_T > 0 \quad (18)$$

onde,

$$M\varepsilon\rho_c = |OI_{\varepsilon\rho}d_c - OL_c| \quad (19)$$

de modo que a seleção da técnica mais ajustada ocorre por meio da função de minimização de  $M\varepsilon\rho_T$ , a fim de elencar qual promoveu alterações mais significativas ao contexto.

## 5. Visão geral do contexto comparativo

A partir das definições para a concepção da modelagem de avaliação do desempenho dos BRTs, tem-se que, primeiramente, a presente seção visa mostrar na prática o funcionamento das diretrizes metodológicas propostas, a fim de se constatar qual a situação dos sistemas instalados nos principais centros urbanos brasileiros em relação as quatorze técnicas de AHP apresentadas, conforme mostram as Tabelas 2 e 3, para que, em um segundo momento, possa ser possível proceder com a verificação comparativa da mais eficiente.

Porém, houve a retomada dos resultados obtidos com o sistema de mensuração de desempenho concebido por Neuenfeldt Júnior (2014), apresentado na seção 2, dos quais, para este caso, estão descritos pelos valores localizados na coluna “SMD” da Tabela 2.



Tabela 2 – Resultados das medidas de desempenho (Escala: Linear, Quadrática e Geométrica)

Cidade (c)	Ordem SMD ( $OL_c$ )	SMD ( $L_c$ )	Linear		Quadrática		Geométrica	
			Aditiva	Multipl.	Aditiva	Multipl.	Aditiva	Multipl.
			$I_{11}d_c$	$I_{12}d_c$	$I_{21}d_c$	$I_{22}d_c$	$I_{31}d_c$	$I_{32}d_c$
Curitiba (9)	1	10,6%	11,0%	11,7%	12,4%	15,3%	14,8%	20,4%
Rio de Janeiro (2)	2	9,7%	9,7%	9,7%	10,5%	11,5%	11,1%	13,0%
Recife (3)	3	9,4%	9,5%	9,8%	9,9%	10,7%	10,2%	11,3%
São Paulo (1)	4	9,3%	9,4%	9,8%	9,6%	10,7%	9,2%	11,0%
Goiânia (11)	5	9,0%	9,2%	9,2%	9,5%	9,6%	9,1%	9,4%
Olinda (7)	6	8,7%	8,9%	9,0%	8,9%	9,1%	8,9%	8,4%
Campinas (12)	7	8,5%	8,5%	8,6%	8,5%	8,2%	8,1%	7,7%
Porto Alegre (10)	8	7,7%	7,4%	7,3%	7,2%	6,0%	7,0%	5,2%
Belo Horizonte (8)	9	7,4%	7,3%	7,4%	6,4%	6,3%	5,1%	4,4%
Brasília (5)	10	6,9%	6,7%	5,8%	6,2%	4,5%	5,6%	3,5%
Salvador (4)	11	6,6%	6,4%	6,1%	5,7%	4,3%	5,6%	3,1%
Fortaleza (6)	12	6,2%	6,0%	5,7%	5,1%	3,8%	5,3%	2,6%

Tabela 3 – Resultados das medidas de desempenho (Logarítmica, Raíz quadrada, Assíntota e Balanceada)

Cidade (c)	Logarítmica		Raíz quadrada		Assíntota		Balanceada	
	Aditiva	Multipl.	Aditiva	Multipl.	Aditiva	Multipl.	Aditiva	Multipl.
	$I_{41}d_c$	$I_{42}d_c$	$I_{51}d_c$	$I_{52}d_c$	$I_{61}d_c$	$I_{62}d_c$	$I_{71}d_c$	$I_{72}d_c$
Curitiba (9)	9,4%	9,5%	9,0%	9,1%	10,3%	12,1%	11,7%	12,4%
Rio de Janeiro (2)	9,1%	9,1%	8,5%	8,3%	9,7%	11,4%	10,1%	10,4%
Recife (3)	8,8%	8,8%	8,7%	8,8%	9,1%	9,4%	9,6%	9,8%
São Paulo (1)	8,8%	8,8%	8,7%	8,8%	9,2%	9,6%	9,3%	9,7%
Goiânia (11)	8,7%	8,7%	8,5%	8,5%	9,1%	9,5%	9,2%	9,1%
Olinda (7)	8,7%	8,7%	8,4%	8,5%	8,9%	9,2%	8,8%	8,7%
Campinas (12)	8,3%	8,2%	8,7%	8,8%	8,2%	7,4%	8,4%	8,4%
Porto Alegre (10)	7,7%	7,7%	8,5%	8,6%	7,1%	5,9%	7,4%	7,2%
Belo Horizonte (8)	8,4%	8,4%	7,6%	7,6%	8,5%	9,0%	6,8%	6,8%
Brasília (5)	7,4%	7,3%	7,9%	7,7%	6,6%	5,4%	6,6%	6,2%
Salvador (4)	7,4%	7,4%	7,9%	7,8%	6,7%	5,6%	6,3%	5,9%
Fortaleza (6)	7,4%	7,4%	7,6%	7,6%	6,6%	5,5%	5,9%	5,5%

Como ponto de destaque individual, pode-se verificar que a cidade de Curitiba ( $c = 9$ ) manteve constante a sua primazia como BRT mais eficiente, a partir da manutenção do seu ranqueamento em todas as técnicas, sendo a única a manter em todos os casos tal comportamento constante. No extremo oposto, Fortaleza ( $c = 6$ ) atingiu em apenas três momentos performances distintas da última colocação ( $OI_{31}d_6 = OI_{42}d_6 = OI_{62}d_6 = 11$ ), de forma que nos restantes ordenamentos manteve-se inalterada.

Ainda, a segunda colocação do sistema do Rio de Janeiro ( $c = 2$ ) foi alterado somente em três oportunidades ( $OI_{12}d_2 = 4$ ,  $OI_{51}d_2 = 7$  e  $OI_{52}d_2 = 8$ ), sendo que destas duas estão diretamente vinculadas a técnicas que trabalham com o conceito de escala Raiz quadrada ( $I_{51}d_2 = 8,5\%$  e  $I_{52}d_2 = 8,3\%$ ), na qual foi substituída integralmente pelo desempenho da cidade de Recife ( $I_{51}d_3 = 8,7\%$  e  $I_{52}d_3 = 8,8\%$ ), que oscilou desde  $OI_{12}d_3 = OI_{51}d_3 = OI_{52}d_3 = 2$  até um mínimo  $OI_{62}d_3 = 5$  na Assíntota multiplicativa.

De modo geral, pode-se verificar que o ordenamento estabelecido em relação ao SMD se manteve inalterado em 62% dos apontamentos, de modo que Belo Horizonte ( $c = 8$ ) foi o caso

onde ocorreu o maior número de modificações, nove ao total, variando desde a sétima colocação em quatro casos até a última ( $OI_{51}d_8 = 12$ ) na escala Geométrica aditiva. Tal fato pode ser atribuído a forte variabilidade encontrada nos resultados estabelecidos para as alternativas que se encontram localizadas nas posições intermediárias do ranqueamento do SMD, visto que entre Porto Alegre e Fortaleza a diferença de desempenho observada é de 1,5%, o que torna a propagação de pequenas alterações nos indicadores significativas no momento de ordenar o resultado final da AHP.

O processo de verificação da confiabilidade dos dados se iniciou através do cálculo da razão de consistência das matrizes utilizadas para os julgamentos contidos ao decorrer da aplicação da AHP. Para tanto, as cento e vinte e seis matrizes permaneceram abaixo do estipulado, equivalente a 0,1 (ou 10%), comprovando assim a legitimidade racional da relação existente dos dados de entrada disponibilizados.

Para a verificação da técnica mais eficiente, primeiramente foi avaliado o comportamento dos dados em relação ao erro absoluto ( $E\varepsilon\rho_T$ ), onde o menor valor em comparação com o SMD é a Linear ( $E11_T = 0,17\%$ ), seguido da Assíntota ( $E11_T = 0,25\%$ ) e da Balanceada Aditiva ( $E11_T = 0,31\%$ ), sendo todas aditivas.

Pode ser notado também que em cinco das sete escalas a função de agregação aditiva resultou em valores dos erros inferiores a multiplicativa, de maneira que as três piores expectativas, Geométrica ( $E32_T = 2,73\%$ ), Quadrática ( $E22_T = 1,53\%$ ) e Assíntota ( $E62_T = 2,73\%$ ), estão contidas neste grupo. Na visão ampla do contexto, tem-se que a média das distorções encontradas nas quatorze situações adotadas atingiu um módulo equivalente a 0,78%, considerado baixo em comparação com os limites inferiores e superiores da escala padrão  $\alpha = [0; 100\%]$ .

Em um segundo momento houve a análise dos números relacionados com as mudanças no comportamento do ordenamento original do SMD. Constatou-se inicialmente que as técnicas menos confiáveis estão relacionadas as Raízes quadradas, em que apenas as alternativas classificadas nos extremos de desempenho, Curitiba e Fortaleza, não alteraram a sua colocação em relação as demais.

Em complemento, não foi encontrado nenhum padrão de comportamento no que tange a questão das mudanças estarem vinculadas ao tipo de função de agregação utilizada, não se caracterizando portanto como um fator influente para a análise deste caso.

A terceira etapa da verificação consistiu na submissão dos dados para a identificação de qual AHP possui perfil de amplitude mais ajustada ao SMD ( $A\varepsilon\rho_T$ ), onde nenhuma técnica cuja função de agregação provém das diretrizes multiplicativas possuiu resultado mais favorável em relação aos aditivos. Tal fato pode ser explicado devido, principalmente, a própria natureza de cálculo daquela priorizar a valoração dos resultados que se encontram no extremo superior.

Dessa forma, tem-se que a escala Linear aditiva se ajustou de maneira mais coerente, com  $A11_T = 0,587\%$  de diferença, seguido da Assíntota aditiva ( $A61_T = 0,749\%$ ) e da Balanceada aditiva ( $A71_T = 1,426\%$ ).

## 6. Conclusões

Com referência nos resultados estabelecidos na aplicação prática, pode-se afirmar que a modelagem de cálculo para se verificar a eficiência das técnicas de AHP em relação a mensuração de desempenho em questão atendeu a realidade das rotinas encontradas no contexto de operacionalização dos sistemas BRT no Brasil.

Quanto aos resultados, ficou perceptível a tendência de técnicas cuja função de agregação e escala possuem natureza linear apresentaram grau de eficiência e coerência mais convergentes ao SMD onde, em específico, a linear aditiva atingiu um grau de coerência em relação ao SMD previamente estabelecido superior as demais.

Para trabalhos futuros, espera-se a aplicação do estudo ao contexto de outras cidades brasileiras em que o BRT está instalado, a fim de perceber a maneira com que a estrutura quantitativa dos dados se comporta. Ainda, outra possibilidade é a substituição da AHP por outras metodologias também relacionadas ao enfoque multicritério, de modo a buscar outras

possibilidades que se adequem de maneira mais satisfatória ao contexto.

Quanto as limitações, foram percebidos de forma majoritária dois pontos a serem observados com maior cuidado. O primeiro trata da técnica de normalização utilizada, visto que a metodologia *PerformancePoint Server*® (2007) não contempla questões relativas a variabilidade do padrão de tendência do desempenho, o que acabou por restringir a forma com que as escalas naturais dos indicadores foram construídas, a fim de evitar tal situação.

O segundo ponto está diretamente vinculado a maneira com que o SMD foi desenvolvido, em específico a constituição dos seus indicadores, onde considerou-se o contexto somente ao âmbito dos pontos de vistas intrínsecos a estes, em coerência com as referências bibliográficas utilizadas e a ótica dos autores e pesquisadores envolvidos com o projeto.

## Referências

- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A. e Camm, J. D.**, *Statistics for Business & Economics*, Cengage Learning, Independence, 2003.
- Chattamvelli, R.**, *Statistics for Scientists and Engineers*, Wiley, Hoboken, 2014.
- Dodd, F. e Donegan, H.** (1995), Comparison of prioritization techniques using inter hierarchy mappings, *Journal of the Operational Research Society*, 46(4), 492–498.
- Duarte, F. e Rojas, F.** (2012), Intermodal connectivity to BRT: A comparative analysis of Bogotá and Curitiba, *Journal of Public Transportation*, 15(2), 1-18.
- Duarte, F., Sánchez, K. e Libardi, R.** *Introdução à mobilidade urbana*. Juruá, Curitiba, 2012.
- EMBARQ BRASIL**. Sobre o sistema BRT. Disponível em: <<http://embarqbrasil.org/>>. Acesso em: 30 jan. 2013.
- FTA.**, Characteristics of Bus Rapid Transit for decision-making, *Federal Transit Administration*, Washington, 2009.
- GLOBAL BRT**. *Data about BRT*. Disponível em: <<http://www.brtdata.org/>>. Acesso em: 30 jan. 2013.
- Gomes, C. F. e Gomes, L. F. A. M.**, *Tomada de decisão gerencial: Enfoque Multicritério*, Atlas, São Paulo, 2012.
- Guitouni, A. e Martel, J. M.** (1998), Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method, *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501 – 521.
- Harker, P. and Vargas, L.** (1987), The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic Hierarchy process, *Management Science*, 33(11), 1383–1403.
- Hidalgo, D., Carrigan, A.**, *Modernizing public transportation, lessons learned from major bus improvements in Latin America and Asia*, World Resources Institute, Washington, 2010.
- Ishizaka, A., Balkenborg, D. and Kaplan, T.** (2006). Influence of aggregation and preference scale on ranking a compromise alternative in AHP. Paper presented at the Multidisciplinary Workshop on Advances in Preference Handling.
- Ishizaka, A. and Nemery, P.**, *Multi-criteria decision analysis: methods and software*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2013.
- Kittelson & Associates, Inc., Levinson Transportation Consultants, H. S. and Harris, DMJM+**. *TCRP Report 118: Bus Rapid Transit: Practitioner's Guide*, Washington, 2007.
- Lerner, J.** *Avaliação comparativa das modalidades de transporte público urbano*. Jaime Lerner Arquitetos Associados, Curitiba, 2009.
- Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., Rutherford, S., Smith, R. L. e Soberman, R.**, *TCRP 90: Bus Rapid Transit, case studies in BRT*, Washington, 2003.
- Lindau, L. A., Hidalgo, D. e Facchini, D.** (2010), Curitiba, The Cradle of Bus Rapid Transit, *Built Environment*, 36, 274-282.
- Lootsma, F. A.** (1993), Scale sensitivity in the multiplicative AHP and Smart, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 2, 87–110.

- Neuenfeldt Júnior, A. L.** Modelagem para a mensuração de desempenho dos sistemas Bus Rapid Transit no Brasil. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- NTU.** Associação nacional das empresas de Transportes Urbanos. Estudos de BRT no Brasil. Brasília, 2011. 134 p.
- Parmenter, D.** *Key Performance Indicators (KPI): Developing, Implementing, and Using Winning KPIs*, Wiley, Hoboken, 2010.
- Performance Point Server.** Como calcular pontuações normalizadas. Redmond, 2007. Disponível em: < <http://office.microsoft.com/pt-br/support/explicacao-passo-a-passo-calculador-pontuacoes-normalizadas-para-kpis-HA010254033.aspx>>. Acesso em: 01 fev. 2013.
- Rodriguez, D. A and Mojica, C. A.** (2009), Capitalization of BRT network expansion effects into prices of non-expansion areas, *Transportation Research*, 43, 560–571.
- Saaty, T.** (1977), A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281.
- Saaty, T. L.**, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- Saaty, T. L.** (2008), Decision making with the Analytic Hierarchy Process, *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Saaty, T. L. e Chang, J. S.** (2011), An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based multi-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts, *European Journal of Operational Research*, 214, 703–715.
- Saaty, T. L. e Vargas, L. G.**, *Methods, concepts & applications of the Hierarchy Process*, Springer, New York, 2012.
- Salo, A., Hamalainen, R.** (1997), On the measurement of preference in the analytic hierarchy process, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(6), 309–319.
- Vuchic, V.**, *Urban Transit: Systems and Technology*, Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- Wright, L. e Hook, W.**, *Bus Rapid Transit: planning guide*. Institute for Transportation and Development Policy, New York, 2007.