

MODELAGEM MULTICRITÉRIO PARA A COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES SISTEMAS DE TRANSPORTES URBANOS PÚBLICOS

Alvaro Luiz Neuenfeldt Júnior

Universidade Federal de Santa Maria; Av. Roraima 1000, prédio 07, sala 300A, 97105-900
alvjr2002@hotmail.com

Julio Cezar Mairesse Siluk

Universidade Federal de Santa Maria; Av. Roraima 1000, prédio 07, sala 300A, 97105-900
jsiluk@ufsm.br

Marlon Soliman

Universidade Federal de Santa Maria; Av. Roraima 1000, prédio 07, sala 300A, 97105-900
marlonsoliman@gmail.com

Resumo

Inserido ao contexto social e demográfico das cidades, os sistemas de transportes públicos são considerados como um dos principais elementos existentes para a dinâmica da mobilidade urbana, de modo a estar diretamente vinculado ao nível de eficiência ao qual este se desempenha, sendo que atualmente existe uma série de modais capazes de realizar essa tarefa, o que torna o processo de escolha pela melhor alternativa um processo de alta relevância, visto a relação custo-benefício deste investimento a sociedade. Logo, a presente pesquisa objetiva propor um modelo capaz de realizar uma avaliação comparativa entre os diversos sistemas de transportes públicos, por meio dos conceitos relativos aos métodos multicritérios de apoio a decisão e a mensuração de desempenho, além de utilizar para a sua consequente testagem um modelo urbano inspirado na configuração encontrada em Curitiba, chegando-se a conclusão que o BRT é o mais viável de ser implantado.

Palavras-Chaves: Transportes públicos; Mobilidade urbana; Métodos multicritério; Mensuração de desempenho.

Abstract

Correlated to social and demographic cities context, the public transport systems are considered as one of the main elements for the dynamics of urban mobility, in order to be directly linked to the level of efficiency at which it works, being that currently there are a series of modals capable of performing this, which makes the process of choosing the best alternative relevant because of your cost-benefit of investment to the society. Therefore, the present research aims to propose a model able to perform a comparative evaluation between the various public transport systems, by concepts relating to multi-criteria decision aid methods and performance measurement, in addition to using for their consequent testing a model inspired by the urban setting found in Curitiba, reaching the conclusion that the BRT system is the most viable of being deployed.

Keywords: Urban mobility; Public transports; Multi-criteria methods; Performance measurement.

1. INTRODUÇÃO

Acompanhado do desenvolvimento das formas de organização das sociedades modernas, atualmente é possível afirmar que mais de 50% da população mundial está localizada em centros urbanos, o que gera uma diversidade de problemas e desafios para a vida da comunidade como um todo (Wright e Hook, 2007; Lerner, 2009). Grande parte desse crescimento ocorreu de forma consideravelmente acelerada, gerando assim uma quantidade relativamente elevada de ocupações ilegais de territórios, bem como de um aumento irreversível da especulação imobiliária, gerando altos graus de discrepância dos valores imobiliários em relação aos planejamentos concebidos em épocas passadas (Kittelsohn et al., 2007; Duarte et al., 2012).

Apesar desse cenário relativamente adverso, é possível observar também ao longo dos últimos anos o desenvolvimento maior de tecnologias e formas de se transportar pessoas em massa com qualidade, segurança, conforto e eficácia, de maneira a se adequarem a realidade econômica local, com reduzidos valores de investimento inicial, prospectando períodos de tempo para a sua implantação cada vez menores (Duarte et al., 2012; UFPR, 2012; Vasconcellos, 2012). A esse contexto podem ser citados como soluções mais difundidas atualmente no contexto brasileiro o *Bus Rapid Transit* (BRT), os ônibus tradicionais (com corredores exclusivos), o Veículo Leve sob Trilhos (VLT) e o metrô (Wright e Hook, 2007; Ferreira, 2009; IPEA, 2011; Miranda e Silva, 2012).

Porém, por se tratarem de locais que possuem naturezas e características distintas de funcionamento, é possível perceber a dificuldade corrente quando do momento de se escolher entre uma dessas alternativas, principalmente no que tange o campo de estudos que visa o entendimento das questões relacionadas a verificação de qual atende satisfatoriamente as demandas dos usuários locais (Druciaki et al., 2011). Com isso, o presente artigo tem por objetivo propor um modelo capaz de realizar uma avaliação comparativa capaz de abranger diversos sistemas de transportes urbanos públicos existentes atualmente, por meio dos conceitos relativos aos métodos multicritérios de apoio a tomada de decisão e os sistemas de mensuração de desempenho, além de utilizar para a sua consequente testagem um modelo inspirado na configuração demográfica encontrada na região central da cidade de Curitiba.

Como justificativa para a efetivação da proposta tem-se a preocupação com a plenitude da realização das funções consideradas básicas para o fornecimento de um serviço capaz de atender as exigências mínimas dos clientes, bem como da otimização dos recursos públicos investidos para a implantação e manutenção dos serviços propostos, evitando assim como consequência a ineficiência dos acarretes públicos, que pode tomar proporções que envolvem os agentes envolvidos amplamente, partindo do descontentamento dos próprios usuários, capaz de resultar na migração destes para os modais privados, resultando assim no aumento da proporção do número de veículos deste tipo, causando como consequência o congestionando ainda maior dos centros urbanos e aumentando assim o número de acidentes.

2. PLANEJAMENTO DOS TRANSPORTES PÚBLICOS URBANOS

Atualmente, o oferecimento de serviços públicos torna-se uma das principais formas de escoar o fluxo de veículos, devendo oferecer aos usuários um serviço eficaz e democrático de mobilidade e acessibilidade, contextualizados com as políticas de planejamento urbano, integrado a outras formas existentes, conforme o contexto abordado (Wright e Hook, 2007; Lerner, 2009; Duarte et al., 2012; Ferreira e Silva, 2012; UFPR, 2012; Vasconcellos, 2012).

Dentre os sistemas de locomoção possíveis, podem ser considerados como de maior

relevância quatro formas distintas de classificação: o ônibus tradicional, o *Bus Rapid Transit* (BRT), o metrô e o Veículo Leve sob Trilhos (VLT), sendo a primeira considerada como a mais difundida atualmente, no qual é necessário para a sua operacionalização a simples definição de itinerários independentes, onde cada um possui uma frota específica para o seu cumprimento, havendo para tanto a existência de uma agência reguladora responsável por definir as diretrizes do transporte público no local, com cobrança das tarifas realizada no interior do veículo e paradas de ônibus sinalizadas por meio de postes ou coberturas simples (UFPR, 2012).

De modo considerado como evolutivo em relação ao ônibus tradicional de transporte, o BRT se insere no contexto das cidades como um modal sob pneus que visa o oferecimento de um serviço com melhorias significativas no contexto da mobilidade urbana, sob o cumprimento de quatro preceitos básicos: prestação de um serviço rápido, confortável, eficiente e de qualidade, por meio da utilização de corredores exclusivos com as mesmas características dos transportes sobre trilhos, integrado as demais formas existentes (Levinson et al., 2003; Wright e Hook, 2007; Koehler et al., 2011).

Quanto aos modais públicos sobre trilhos, os metrôs surgiram no século XIX como uma alternativa de conectar as localidades de maneira expressa e não concorrente ao trânsito dos veículos, seja de forma elevada, no mesmo nível dos leitos das ruas ou até mesmo por túneis, arranjados em redes interligadas, visando o transporte de um elevado número de pessoas simultaneamente por viagem, evitando assim o seu contato direto com os modais motorizados (Boareto; 2007; Lerner, 2009). Por fim, a quarta classificação está proposta com base nos veículos denominados por *Light Rail* (VLT), onde circulam por meio de trilhos instalados nas vias das cidades, geralmente partilhando o espaço de circulação com outros tipos de locomoção, possuindo como característica predominante o uso da energia elétrica para o seu funcionamento, além da fácil mecânica adotada para a captação dos usuários (Lerner, 2009; Vasconcellos, 2012).

3. O APOIO A TOMADA DE DECISÃO E A MENSURAÇÃO DE DESEMPENHO

Para os problemas de decisão que possuem como enfoque um conjunto de dados e variáveis discretas, existem diversas técnicas capazes de suprir tal demanda, podendo estas ser separadas, segundo os pressupostos de Ensslin et al. (2001); Greco et al. (2012) e Gomes e Gomes (2012) em três grupos distintos: a Escola Americana, Francesa e a Mista, onde a primeira determinada conforme o paradigma racionalista, relacionado a realização dos julgamentos das diversas etapas da estrutura hierárquica até se chegar a uma solução ótima ao problema e as condições do estado da arte proposto, gerando assim para cada critério funções utilidade capazes de exprimir o seu comportamento em analogia as alternativas, sendo alguns de seus modelos a *Multi-attribute Utility Theory* (MAUT), o *Analytic Hierarchical Process* (AHP), o *Analytic Network Process* (ANP), o *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART) e o *Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking* (SMARTER) (Figueira et al., 2005; Gomes e Gomes, 2012).

Quanto a mensuração de desempenho, estes podem ser caracterizados como capazes de verificar o modo com que um processo está posicionado em relação as suas atividades, considerado como um dos pontos básicos no que tange a gestão para o aprimoramento dos conhecimentos a respeito do contexto ao qual está sendo estudado, tornando-se uma das partes essenciais para a gestão em todos os níveis considerados como chave para o sucesso (Kaplan e Norton, 2008; Hubbard et al., 2011).

Para tanto, a mensuração deve ser composta de indicadores, com métricas e metas

bem definidas, nas quais devem estar alinhadas estrategicamente com as diretrizes do sistema estudado, visando a plena representação dos possíveis efeitos caso não se atinja o objetivo central estipulado anteriormente a mensuração, de maneira mais fidedigna possível com a realidade abordada (Pyke, 2006; Pavlov e Bourne, 2011). Em meio a as diversas formas de se realizar a mensuração de desempenho, pode-se afirmar que alguns métodos são considerados como de maior relevância para o contexto, tais como: Administração por objetivos (APO), *Balanced Scorecard* (BSC), *Key Performance Indicators* (KPI) e os Três Níveis de Desempenho.

4. METODOLOGIA

De modo a compreender os principais aspectos a serem abordados para a resolução do objetivo proposto, a pesquisa será compreendida sob três prismas distintos, denominados por: revisão bibliográfica, desenvolvimento da modelagem e sua respectiva aplicação, interligados sob regime sequencial, onde a primeira etapa da pesquisa está compreendida pelo estudo a respeito das principais teorias e conceitos a respeito dos temas abordados durante o referencial teórico. Para tanto, houve a necessidade de se recorrer a ferramentas de investigação capazes de retornar ao pesquisador informações com alto grau de fundamento, utilizando-se prioritariamente o portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), assim como dos editores *Scientific Direct*, *Emerald* e *Scopus*, a fim de obter artigos publicados em revistas tanto relacionadas ao âmbito nacional quanto internacional, além de referências em livros sobre os principais autores e anais de congressos. Com esse rol de dados em mãos, fez-se necessária a aplicação de metodologias quantitativas, a fim de realizar a transformação para informações numéricas as quais são possíveis de serem tratadas e verificadas conforme as características do caso, por intermédio de softwares como o *Microsoft Excel*®, desenvolvido pela *Microsoft Corporation*®.

Quanto ao desenvolvimento propriamente dito da modelagem, esta é proposta inicialmente por meio da verificação das alternativas de transportes a serem estudadas para o caso e o seu comportamento perante fatores considerados como críticos para o sucesso de sua implantação, no qual a escolha por ambos os grupos parte dos pressupostos descritos por Levinson et al. (2003), Kittelson et al. (2007), Wright e Hook (2007), Lerner (2009), NTU (2011), Arruda et al. (2012), Vasconcellos (2012) e Embarq Brasil (2013). Quanto ao modelo para a viabilização da mensuração de desempenho de cada fator para as alternativas, definiu-se como base a utilização dos *Key Performance Indicators* (KPI's), conforme as definições de Olson e Slater (2002), Kaplan e Norton (2008), Parmenter (2010), Bartz et al. (2011) e Hubbard et al. (2011), por esta possuir como foco o tratamento dos indicadores de maneira inter-relacionada, em um sistema no qual tem, por finalidade principal mensurar o nível de desempenho do objetivo, possibilitando a compreensão de todas as informações necessárias para a definição de cada um deles.

O processo de normalização está concebido seguindo as diretrizes vinculadas ao software *PerformancePoint Server*® (2007), desenvolvido pela *Microsoft Corporation*®, por ser uma ferramenta de simples aplicação que atende satisfatoriamente a demanda para a unificação dos resultados encontrados. Em relação aos modelos de apoio a tomada de decisão, designou-se a utilização dos métodos AHP Clássico, Referenciado e B-G, bem como o SMART, com base em Guitouni e Martel (1998) relacionando aos indicadores uma escala de valores, segundo as suas características, gerando resultados numéricos capazes de mensurar o seu desempenho relativo ao contexto global do problema, além da realização do cálculo que agregação desses em um KPI denominado por objetivo, seguindo uma métrica específica para

sua utilização e as definições dos modelos acima apresentados, possibilitando assim a verificação dos resultados.

Por fim, é proposta a aplicação propriamente dita do modelo, contando para tanto com a prévia definição das características tanto do local escolhido para estudo quanto dos tipos de transportes determinados como alternativas plausíveis de serem adotados, gerando assim um relatório capaz de informar qual destas é a mais viável.

5. DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM

A fim de demonstrar as bases utilizadas para a construção da modelagem proposta, é proposta a discussão a respeito dos diversos métodos determinados utilizados tanto para a mensuração do desempenho de cada um dos sistemas, bem como das formas com que será proposta a analogia destas alternativas com os critérios elencados. Para tanto, parte-se inicialmente da utilização dos *Key Performance Indicators* (KPI's) para expressar a avaliação, a fim de obter resultados quantitativos em relação ao contexto para um período de tempo (Latorre et al., 2010; Parmenter, 2010).

Para tanto, com base nas bibliografias descritas na etapa metodológica houve a determinação de nove fatores considerados como críticos para se obter sucesso na verificação, sendo cada um deles capazes de gerar as definições propostas para o desenvolvimento dos nove $KPI_d, \forall d = 1, 2, \dots, 9$, relacionados a cada uma das alternativas $s \in \{1, 2, \dots, n\}$ a serem determinadas na aplicação, conforme mostra o Quadro 1.

d	KPI	Propósito	Unidade medida	Métrica proposta
1	Capacidade	Lotação média permitida por deslocamento capaz de atender o deslocamento dos usuários de maneira segura e com qualidade.	Pass./ hora	$KPI1 = \frac{\sum_{v=1}^n (CV * FR)_v}{n}$
2	Flexibilidade	Capacidade de adequar ao impacto do aumento cada vez maior da densidade demográfica dos centros urbanos.	Absoluta (Escala α)	$KPI2 = \partial \rightarrow \partial \in \{1, 2, \dots, 10\} \propto \alpha$
3	Demandas especiais	Atendimento a situações especiais que compreendem a realização de eventos, visando aumentar a capacidade de deslocamento das pessoas.	Absoluta (Escala α)	$KPI3 = \gamma \rightarrow \gamma \in \{1, 2, \dots, 10\} \propto \alpha$
4	Investimentos necessários	São os custos alocados para a implementação dos sistemas, desde o seu planejamento até a operacionalização.	Reais	$KPI4 = \sum_{tr=1}^n (VPB + VF + VPE + VIMP)_{tr}$
5	Prazos	Tempo médio em que as obras mínimas para o funcionamento do sistema demandam para serem concluídas.	Anos	$KPI5 = \sum_{tr=1}^n (PPB + PF + PPE + PIMP)_{tr}$
6	Distância para deslocamento usuário	Distância necessária para que usuário consiga realizar o seu deslocamento até a estação de embarque.	Kilômetros	$KPI6 = \frac{\sum_{pas=1}^n (\overline{DE} + \overline{DP} + \overline{AR})_{pas}}{n}$
7	Tempo para deslocamento usuário	Tempo médio necessário para que o usuário realize o seu deslocamento desde o seu ponto de origem até a saída da estação de destino.	Horas	$KPI7 = \frac{\sum_{pas=1}^n (\overline{TE} + \overline{TP} + \overline{TT} + \overline{TR})_{pas}}{n}$
8	Nível de conforto	Determinado de acordo com o situação em que o passageiro é tratado durante todas as etapas do serviço.	Absoluta (Escala α)	$KPI8 = \frac{\sum_{q=1}^n \beta_q}{n} \rightarrow \begin{cases} \beta \in \{1, 2, \dots, 10\} \propto \alpha \\ q \in \{1, 2, 3, 4\} \end{cases}$

9	Nível de inserção no centro urbano	Relacionado a imagem pública da prestação do serviço e das instalações constituídas para a sua operação em proporção ao plano urbanístico local.	Absoluta (Escala α)	$KPI9 = \rho \rightarrow \rho \in \{1, 2, \dots, 10\} \propto \alpha$
---	------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------	-----------------------------------------------------------------------

Quadro 1: KPI's determinados para a modelagem proposta. Fonte: Autores.

Para tanto, CV representa a capacidade unitária de cada veículo, FR a frequência de veículos por hora designados para trafegar, $v \in \{1, 2, \dots, n\}$ o número de veículos possíveis de serem utilizados, θ o grau capaz de medir a flexibilidade do sistema, γ a possibilidade de se atender aos eventos especiais, VPB , VF , VPE e $VIMP$, respectivamente, como os valores estimado para o projeto básico, o financiamento, o projeto executivo e a implantação, bem como de PPB , PF , PPE e $PIMP$ relativos ao prazo para a conclusão do projeto básico, o financeiro, o executivo e da implantação. Ainda, $tr \in \{1, 2, \dots, n\}$ está proposto para cada tarefa executada nas atividades preliminares a operacionalização, \overline{DE} é a distância percorrida desde a origem até a estação, \overline{DP} a distância percorrida na plataforma de embarque, \overline{AR} a deslocamento necessário para se chegar do ponto de desembarque até a rua, além de \overline{TE} estar reservado ao cálculo do tempo médio necessário para se chegar a estação, \overline{TP} até a plataforma, \overline{TT} do transporte propriamente dito e \overline{TR} para se chegar até rua, sendo todos submetidos ao índice $pas \in \{1, 2, \dots, n\}$ relativo a expectativa de passageiros diária que utiliza o transporte público.

Por fim, β indica os respectivos índices de qualidade das diferentes formas de avaliação propostas em q , onde $q=1$ proposto para a verificação da qualidade dos veículos, $q=2$ para a qualidade das estações, $q=3$ referente a acessibilidade e $q=4$ a operação propriamente dita, além de ρ ser concernente ao nível de inserção no centro urbano. O fator escalar α , $\forall \alpha \in \{1, 2, \dots, 10\}$ foi determinado linearmente segundo os pressupostos descritos pela Escala Likert, considerando o valor igual a 1 como o mínimo possível de ser atingido e 10 o máximo. Dessa forma, a definição do alvo está estabelecida de maneira igual para todos os KPI's, segundo a definição predisposta na Equação (1).

$$Td = \frac{\sum_{s=1}^n (KPI_d)_s}{n} \quad (1)$$

Com o SMD estipulado por meio dos seus KPI's, percebe-se que a mensuração destes não é determinada em unidades de medidas constantes, onde para se obter um valor proporcional entre eles é necessário se realizar a normalização de cada um para uma unidade considerada padrão. Para tanto, a metodologia do *software PerformancePoint Server*® (2007) propõe a realização do procedimento de padronização para cada indicador através do cumprimento de cinco etapas distintas (cálculo da pontuação bruta, determinação dos limites e das faixas, cálculo do fator limite, cálculo da pontuação convertida e o ajuste das faixas) encontrando com a Equação (2) a pontuação final normalizada (KPI_{normd}),

$$KPI_{normd} = (PC_k)_d + AF(k)_d \quad (2)$$

sendo finalmente possível realizar, através da interrelação dos KPI_{normd} , o cálculo do KPI objetivo RMS_1 conforme descrito pela Equação (3),

$$RMS_1 = \frac{\sum_{d=1}^n KPI_{normd}}{n} \quad (3)$$

bem como para os resultados globais dos outros métodos, considerando para tanto a utilização de mais quatro métodos multicritério: A AHP Clássica, o AHP Referenciado, a AHP B-G e o SMART.

Primeiramente, a AHP Clássica consiste na verificação, por meio da realização de julgamentos durante todos os níveis da estrutura hierárquica estudada, de quais alternativas

elencadas são mais interessantes para o caso, gerando assim uma pré-ordem das opções a fim de facilitar na escolha a ser realizada pelos decisores, tendo por premissa básica a obtenção de pesos capazes de indicar a importância relativa existente de cada um dos fatores pertencentes a um nível principal, até se chegar aos critérios submetidos para análises quantitativas a respeito do problema, hierarquizando-os por meio de comparações paritárias, descrevendo como as mudanças das características nos primeiros níveis da estrutura se distribuem e afetam direta ou indiretamente os respectivos subníveis (Marins et al., 2010; Gomes et al., 2011; Saaty e Shang, 2011; Saaty e Vargas, 2012).

A interação deles ocorre paritariamente, gerando a matriz representativa do fator estudado no momento $C_d = (c_{ij})$, com base em Saaty (2008), tal que o número de julgamentos necessários para a construção de cada matriz é definido da relação $n*(n-1)/2$, de maneira que n compreende o número total de elementos existentes no nível onde o julgamento está sendo realizado. Com isso, são atribuídos para cada um deles pesos numéricos (w_{ij}), gerando assim o valor de importância c_{ij} para o sistema, devendo-se considerar para a adoção de w_{ij} a escala padronizada fundamental desenvolvida por Saaty (2008), possibilitando a interpretação normalizada das variáveis, credenciando a transformação dos dados desde o plano intangível até o tangível (Gomes et al., 2011).

Por meio da matriz de decisão é possível o cálculo dos vetores prioridades $\bar{w}_i(C_d)$ para cada indicador estipulado na estruturação da modelagem, normalizados a partir das definições baseando-se em Gomes et al. (2011), onde $\bar{w}_s(C_d)$ é o vetor prioridade ao qual sinaliza o quanto cada alternativa é relevante para o critério ao qual está ligado, de modo que o resultado final do julgamento daquele para com esses, segundo os conjecturas da AHP Clássica (RMS_2), ocorre por meio da Equação (4) proposta a seguir:

$$RMS_2 = \sum_{d=1}^n [\bar{w}_s(C_d)]_d \quad (4)$$

Costa (2006), Marins et al. (2010) e Saaty e Shang (2011) definem que para todo e qualquer modelo existe a necessidade de definir a 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 a definição dos pesos para os fatores, onde a medida dessa relação é apresentada a razão de consistência (CM_{C_d}). Em caso de CM_{C_d} exceder o limite tolerável para o modelo ($\geq 0,1$), o tomador de decisão deve realizar a revisão das comparações definidas atribuindo novas pontuações para os subcritérios envolvidos no julgamento proposto (Costa, 2006, Marins et al., 2010).

Gomes et al. (2011) citam que os Processos de Análise Hierárquica Referenciada e B-G surgiram como uma evolução natural da abordagem clássica proposta por Saaty (1980), onde o primeiro exprime a preocupação com a controvérsia surgida a partir da relação pressuposta entre os valores dos critérios em relação às alternativas, introduzindo-se para tanto uma constante de proporcionalidade K para a comparação entre elas, enquanto o segundo está baseado na inversão do ordenamento das alternativas do sistema em relação à introdução de mais uma no sistema, buscando-se para mitigar esse problema através da determinação de um valor z_{max} capaz de referenciar a alternativa com maior resultado relativo, a fim de se realizar a normalização dos resultados absolutos encontrados (Watson e Freeling, 1982; Belton e Gear, 1985).

Para tanto, ambos devem considerar em sua constituição fatores (d) elencados aos quais influenciam de maneira direta na seleção das alternativas (f) propostas, $\forall d \in \{1, 2, \dots, n\}$ e $\forall f \in \{1, 2, \dots, n\}$. Em relação ao método Referenciado, conforme descrito anteriormente, é necessário se determinar primeiramente a constante proporcional K a ser

adotada, conforme as características das unidades de medida do modelo, seguido dos fatores denominados por escala (q_d) que definem a medida de cada critério proporcionalmente as unidades do objetivo, para se chegar, finalmente, ao cálculo da importância de cada um deles (x_d), por meio das matrizes $C_{d_{n*n}}$ baseadas em Saaty (2008), obtendo ao final os vetores para os resultados do seu conjunto de fatores constituintes ($\bar{v}_{P_s}(C_{d_{n*n}})$), de maneira que a importância relativa das alternativas (RMS_3) pode ser observado para o Processo de Análise Hierárquica Referenciada através da analogia com o valor encontrado em x_d , resultando na proposta descrita pela Equação (5):

$$RMS_3 = \sum_{d=1}^n x_d * [\bar{v}_{P_s}(C_{d_{n*n}})]_d \quad (5)$$

Para o processo de análise B-G primeiramente deve-se encontrar, dentro de cada matriz $C_{d_{n*n}}$, o maior valor de $\bar{v}_i(C_{d_{n*n}})$, denominado por Z_{max} , a fim de tornar este proporcional a uma unidade de medida em relação aos outros valores da matriz obtendo-se como produto os elementos z_{id} dispostos em A_{n*n} proposta pela Matriz (6),

$$A_{n*n} = \begin{bmatrix} 1 & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ 1/z_{12} & 1 & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/z_{1n} & 1/z_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} z_{id} = c; c_{ji} = 1/c, \forall z_{id} * z_{di} = z_{in} \\ z_{ii} = 1 \end{array} \right. \quad (6)$$

sendo o valor da importância de cada fator (δ_d) proposto pela Equação (7), resultando ao final na possibilidade de verificação das proporções relativas μ_i de cada uma das alternativas, de acordo com a Equação (8):

$$\delta_d = K * q_d * Z_{max} \quad (7)$$

$$RMS_4 = \sum_{d=1}^n \delta_d * z_{id} \quad (8)$$

A *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART), tem por definição possibilitar esse processo de ordenação decrescente direta para cada um deles por importância, onde o pior colocado é atribuído, geralmente, um valor igual a dez e, a partir desde, são elencados números que variam de modo crescente, de acordo com o grau de discrepância dos seus comportamentos, por meio do indicador RMS_5 (Edwards e Barron, 1994).

Com isso, é possível obter o resultado final de modo que compreende os valores de todos os métodos estabelecidos (RM_{ma}), a fim de exprimir com maior confiabilidade a solução ótima para a modelagem proposta se comparado a utilização de apenas um método individualizado, onde a compilação desses resultados proposta pela Equação (9),

$$VGS = \sqrt[n]{\prod_{ma=1}^n RMS_{ma}} \quad (9)$$

considerando uma importância de grau equivalente entre cada uma das formatações de resultados, $\forall ma \in \{1, 2 \dots, n\}$ proposta como representação indicativa destas.

6. APLICAÇÃO E RESULTADOS

Para a aplicação da modelagem proposta, inicialmente é necessário definir quais as alternativas de transportes e as características do trecho a ser verificado, de modo que, para o primeiro são adotados os quatros modais citados no referencial teórico anteriormente descrito, conforme as características estruturais consideradas para cada uma daquelas, de acordo com a sua compatibilidade no local, segundo a Tabela 1 a seguir, enquanto para o segundo ponto foi utilizado como padrão as características encontradas no centro urbano da cidade de Curitiba, em um trecho de 20 Km.

Alternativa	Tempo Veículo	Tipo Via	Tipo Estação	Tipo Linha	Veloc. Média linha (Km/h)
Metrô	Trem oito carros	Segregada	Sem ultrapassagem	Paradora	40
VLT	Trem quatro carros	Segregada parcialmente	Sem ultrapassagem	Paradora	20
BRT	Biarticulado	Exclusiva	Sem ultrapassagem	Paradora	20
Ônibus Tradicional	Convencional	Segregada parcialmente	Ponto de parada	Paradora	17

Tabela 1: Características das alternativas de transportes propostas. Fonte: Autores.

A estimativa conta com a utilização de um metrô composto por oito vagões, subterrâneo, onde a via é segregada para cada um dos dois sentidos, havendo a disponibilização de estações de embarque e desembarque a uma distância média de 2,5 Km. Para o VLT, considera-se a utilização de um trem com quatro vagões, sendo a via segregada parcialmente em um mesmo nível da de veículos motorizados, dividindo apenas os cruzamentos com estes, em trilhos com duplo sentido que não permitem a ultrapassagem, com terminais localizados em média a cada 1,5 Km de distância.

Quanto aos BRT's, estes estão determinados para servirem os clientes por meio de ônibus bi-articulados, em vias com corredores exclusivos ao mesmo nível dos outros tipos de veículos motores, porém sem espaço para que haja ultrapassagem, havendo terminais localizados a cada 1 Km aproximadamente. Por fim, tem-se o modelo de ônibus conhecido como tradicional, por meio da utilização da via em compartilhamento com os modais de uso privado, disponibilizando para o transbordo dos passageiros uma estrutura conhecida como parada de ônibus coberta, distantes entre elas de 1 a 1,5 Km em média.

Logo, parte-se para o cruzamento dessas características com os dados necessários para a mensuração de cada um dos nove KPI's propostos, partindo-se inicialmente da definição dos limites de faixa utilizados para a realização da normalização de cada um deles, onde os resultados encontrados nas pontuações brutas submetidos a adequação em uma das dez faixa de valor, das quais variam de um máximo igual a 2 até um mínimo zero em intervalos constantes de 0,2 pontos. Diante das proposições e com cada uma das alternativas para os indicadores, a Tabela 2 mostra os resultados obtidos para cada uma delas.

Alternativa	KPI _{normd}								
	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5	d=6	d=7	d=8	d=9
Metrô	1,0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,6	0,5	0,3
VLT	0,3	0,4	0,4	0,8	0,4	0,8	0,6	0,6	0,6
BRT	0,2	0,7	0,8	1,0	0,9	0,8	0,5	0,6	0,7
Ônibus Tradicional	0,1	0,8	0,6	1,0	1,0	0,8	0,4	0,3	0,4

Tabela 2: Resultados obtidos em cada indicador por alternativa proposta. Fonte: Autores.

Com os resultados mensurados é possível perceber que o metrô, apesar de possuir uma capacidade superior de transportar passageiros, demanda de altos investimentos para a sua concepção e operacionalização, exigindo a construção de estruturas de maior grau de complexidade, além de maiores prazos para a conclusão das obras e que, por consequência, afetam de maneira mais intensiva na forma da utilização dos solos da área urbana e no nível de flexibilidade deste a possíveis mudanças especiais necessárias.

Em outro espectro se encontra o BRT, que se destaca principalmente pelo atendimento de forma flexível a demandas especiais anuais, com reduzidos custos para a efetivação do seu investimento, gerando assim um nível de inserção em relação a sociedade de modo integrado a

outros meios de transportes, tanto públicos quanto privados, o que torna essa opção como uma das mais viáveis quanto a questão da mobilidade urbana. Por fim, o VLT e o ônibus tradicional se mostram sobre diferentes espectros como alternativas intermediárias para as duas citadas anteriormente, conforme mostra a Tabela 3 relativa aos resultados para os cinco modelos quantitativos propostos para a verificação.

Alternativa	KPI objetivo (RM_{s_1})	AHP Clássico (RM_{s_2})	AHP Refer. (RM_{s_3})	AHP B-G (RM_{s_4})	SMART (RM_{s_5})	VG_s
Metrô	17%	19%	18%	20%	20%	19%
VLT	25%	25%	24%	24%	25%	25%
BRT	31%	30%	31%	30%	30%	30%
Ônibus Tradicional	27%	26%	27%	26%	25%	26%

Tabela 3: Resultados obtidos em cada método de avaliação proposto. Fonte: Autores.

Por consequência dos resultados de cada *KPI*, é possível confirmar que a tendência de avaliação positiva do BRT se confirma para todas os métodos de mensuração, com um valor global $VG_3 = 30\%$, 4% superior se comparado ao segundo melhor resultado encontrado para o ônibus tradicional ($VG_4 = 26\%$), que ainda se apresenta como uma alternativa viável por ser relativamente flexível e com baixos custos de implantação e manutenção da frota em comparação com os outros. Ainda, com apenas 1% de diferença para o segundo colocado se encontra o VLT ($VG_2 = 25\%$), e, por fim, com $VG_1 = 19\%$ se encontra a alternativa de transporte metroviária para o trecho, fato esse diretamente relacionado aos baixos valores obtidos na mensuração de seis dos nove KPI's propostos. Em complemento, para o método AHP Clássico, verificou-se que todas as razões de consistência (CM_{C_d}) calculadas para as matrizes estão abaixo do valor limite estipulado de 0,1, conferindo assim um elevado grau de confiabilidade dos julgamentos.

7. CONCLUSÕES

É consenso popular que a implantação de sistemas metroviários para qualquer natureza de arranjo urbano é necessário para se reduzir os impactos dos problemas existentes na mobilidade urbana do local. Porém, correspondente ao verificado para o perfil local adotado, esta solução pode não se apresentar como a melhor para solucionar os problemas encontrados no cotidiano, onde por muitas vezes ainda é capaz de gerar o agravamento dos atuais problemas e o surgimento de novos, agravados pela alta demanda da implantação e manutenção da sua operação.

Logo, de modo a contemplar as diversas naturezas dos fatores elencados, surgem soluções para os transportes públicos, tal como foi observado para o BRT, capazes de oferecer um serviço rápido, confortável, eficiente e de qualidade aos seus usuários, com reduzidos custos em relação ao tipo metroviário, com uma maior flexibilidade para o caso da existência de eventos especiais, sem demandar da necessidade de se construir um elevado número de obras para o seu funcionamento.

Com isso, acredita-se que o propósito do trabalho de propor um modelo capaz de realizar uma avaliação comparativa dos diversos sistemas de locomoção públicas existentes atualmente foi cumprido, por meio da utilização de embasamentos teórico-práticos a respeito do problema de pesquisa, que culminaram na obtenção dos principais fatores que podem estar influenciados com a implantação de determinado modal, conforme as características adotadas, onde para a aplicação proposta chegou-se ao consenso de que o BRT é a solução mais plausível de escolha.

Como limitações da pesquisa verificou-se a necessidade de se realizar um elevado

detalhamento das características tanto do local quanto das alternativas propostas, tornando a aplicação do modelo limitada para o contexto urbano encontrado, o que certamente implica na necessidade, em futuros trabalhos, da utilização da mensuração em outras configurações urbanas, a fim de perceber a existência do grau de similaridade entre os resultados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARRUDA, B.D.L.; SILVA, L.R.; ANTUNES, R.T.; GOMES, H.A.S.; YAMASHITA, Y. (2012) Uma proposta de avaliação de desempenho para os sistemas de transporte rodoviário interurbano de passageiros. *Transportes*, v. 20 (1), p. 41 – 49.
- [2] BARTZ, T., SILUK, J.C.M. BARTH, L.E. (2011) Importance of industrial performance measurement in industry: a case study. *Revista Brasileira de Estratégia*, Curitiba, v. 4 (1), p. 91 – 104.
- [3] BOARETO, R. (2007) *Caderno de referência para elaboração de Plano de Mobilidade por Bicicleta nas Cidades*. Brasília: Secretaria Nacional de Transporte e da Mobilidade Urbana, 232 p.
- [4] COSTA, H.G. (2006) *Auxílio multicritério à decisão: método AHP*. Rio de Janeiro: ABEPRO.
- [5] DRUCIAKI, V.P.; FERREIRA, E.R.; OLIVEIRA, R.R. (2011) *Geografia e transportes: estudos sobre circulação, mobilidade e acessibilidade*. Rio Claro: Editora do IGCE/UNESP.
- [6] DUARTE, F.; SÁNCHEZ, K.; LIBARDI, R. (2012) *Introdução à mobilidade urbana*. Curitiba: Juruá.
- [7] EMBARQ BRASIL (2013) *Sobre o sistema BRT*. Disponível em: < <http://embarqbrasil.org/>>. Acesso em: 30 jan. 2013.
- [8] ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G.N.; NORONHA, S.M. (2001) Apoio à decisão – metodologia para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas. Florianópolis: Insular.
- [9] FERREIRA, D.I.R.; SILVA, J.P.C. (2012) Contributos da gestão da mobilidade na mudança de mentalidades: o caso do Instituto Politécnico de Leiria. *Transportes*, v. 20 (3), p. 18 – 27.
- [10] FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (2005) *Multiple criteria decision analysis: state of art surveys*. New York: Springer.
- [11] GOMES, L.F.A.M., ARAYA, M.C.G.; CARIGNANO, C. (2011) Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos métodos discretos de apoio multicritério à decisão. São Paulo: Cengage Learning.
- [12] GOMES, C.F.; GOMES, L.F.A.M. (2012) *Tomada de decisão gerencial: Enfoque Multicritério*. 4 ed. São Paulo: Atlas.
- [13] GRECO, S.; EHRGOTT, M.; FIGUEIRA, J.F. (2012) *Trends in Multiple Criteria decision analysis*. New York: Springer.
- [14] GUITOUNI, A.; MARTEL, J.M. (1998) Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDAmethod. *European Journal of Operational Research*, v. 109 (2), p.

- [15] HUBBARD, G.; RICE, J.; BEAMISH, P. (2011) *Strategic Management: Thinking, Analysis and Action*. Pearson Education.
- [16] IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. (2011) *A mobilidade urbana no Brasil*. Brasília.
- [17] KAPLAN, R.S.; NORTON, D.P. (2008) *A Execução Premium*. Rio de Janeiro: Campus.
- [18] KITTELSON & ASSOCIATES, INC.; LEVINSON TRANSPORTATION CONSULTANTS, H.S.; HARRIS, DMJM+. *TCRP Report 118: Bus Rapid Transit: Practitioner's Guide*. Washington, 2007. 255 p.
- [19] KOEHLER, L.A; CAMPONOGARA, E.; KRAUS JR., W. (2011) Modelo e controle da operação de um sistema BRT com segmento de faixa exclusiva única bidirecional. *Transportes*, v. 19 (3), p. 12 – 17.
- [20] LATORRE, V.; ROBERTS, M.; RILEY, M.J. (2010) Development of a systems dynamics framework for KPIs to assist project managers' decision making processes. *Revista de la Construcción*, v. 9, n. 1, p. 39-49.
- [21] LERNER, J. (2009) Avaliação comparativa das modalidades de transporte público urbano. Curitiba: Jaime Lerner Arquitetos Associados.
- [22] LEVINSON, H.; ZIMMERMAN, S.; CLINGER, J.; RUTHERFORD, S.; SMITH, R.L.;
- [23] MARINS, F.A.S; PEREIRA, M.S.; BELDERRAIN, M.C.N.; URBINA, L.M.S. (2010) *Métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios: aplicações na indústria aeroespacial*. São Paulo: Blucher Acadêmico.
- [24] MIRANDA, H.F.; SILVA, A.N.R. (2012) Benchmarking sustainable urban mobility: The case of Curitiba, Brazil, *Transport Policy*, v. 21, p. 141 – 151.
- [25] NTU. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. (2011) *Estudos de BRT no Brasil*. Brasília.
- [26] PARMENTER, D. (2010) Key Performance Indicators (KPI): Developing, Implementing, and Using Winning KPIs. 2 ed. Wiley: Hoboken.
- [27] SAATY, T.L. (2008) Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1(1), p. 83 – 98.
- [28] SAATY, T.L.; CHANG, J.S. (2011) An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based mutli-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts. *European Journal of Operational Research*, 214, 703 – 715.
- [29] SAATY, T.L.; VARGAS, L.G. (2012) *Methods, concepts & applications of the Hierarchy Process*. New York: Springer.
- [30] UFPR. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (2012) Departamento de Transportes. *Apostila Transporte Público*. Curitiba, 108p.
- [31] VASCONCELLOS, E.A. (2012) *Mobilidade urbana e cidadania*. São Paulo: Senac.
- [32] WRIGHT, L.; HOOK, W. (2007) *Manual de BRT: Guia de Planejamento*. Brasília.