

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO
COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS ATRAVÉS DE
ALGORITMOS DE CONTROLE FUZZY E DO MÉTODO
PROMETHEE: UM SISTEMA DE AUXÍLIO À TOMADA DE
DECISÕES**

MESTRANDO(A)

NOBERTO PIRES MACIEL

ORIENTADOR(A)

DR. RODRIGO TRIPODI CALUMBY

FEIRA DE SANTANA

JUNHO - 2021

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Relevância	2
2	Revisão Bibliográfica	3
3	Metodologia	7
4	Resultados esperados	10
5	Cronograma	11

1 Introdução

Redes de transporte público são sistemas extremamente complexos e dinâmicos cujo desempenho depende de diversos parâmetros e de suas variações (Ivo Pons, 2015), a gestão desses sistemas tem sido um imenso desafio para as cidades de médio e grande porte no mundo inteiro. Diversos são os fatores responsáveis por uma boa ou má qualidade do serviço público de transporte coletivo (Eboli and Mazzulla, 2008), sobretudo, para os executados por ônibus. Todos sabemos o quanto o sistema de transporte público coletivo influencia na mobilidade urbana e na qualidade de vida das pessoas. Dentro desse contexto, as métricas do serviço desempenham um fator preponderante para definir ajustes com o objetivo de adaptar o sistema às novas condições, mantendo o equilíbrio financeiro e a qualidade aos usuários. Tradicionalmente, a obtenção de dados paramétricos, qualitativos ou quantitativos, é feita através de pesquisas de campo como a Pesquisa de Origem e Destino (Ivo Pons, 2015), Pesquisa de Sobe e Desce, Pesquisa de Satisfação, Demanda de Viagens e Intervalos de Viagem (Barbosa et al., 2017) (Costa and Br, 2000). Esses tipos de pesquisa demandam tempo, recursos, e nem sempre oferecem resultados satisfatórios, ou ágeis, para a tomada de decisão pelo gestor do sistema. Atualmente, as empresas que operam o serviço de transporte coletivo urbano (STCU) são obrigadas pelo poder público a instalar dispositivos de bilhetagem eletrônica e sistemas de localização (AVL) em cada um dos veículos da frota para automatizar a obtenção de dados quantitativos, o que facilita e torna mais ágil o levantamento de informações brutas, paramétricas, que podem servir na análise do sistema. Um STCU por ônibus necessita de avaliação constante, quase que diária, devido ao seu dinamismo. A demanda de passageiros, que é influenciada tanto por fatores internos (QoS, rotas, horários) quanto por externos (decisões governamentais, estado das vias de circulação, eventos diversos no trânsito), é o termômetro que mede a saúde do sistema. Porém, avaliar esses fatores não é algo trivial, sobretudo, quando os dados são obtidos por meio de pesquisas de campo, naturalmente carregadas de imprecisão e vieses, como é o caso das pesquisas de satisfação.

1.1 Objetivos

Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho das linhas do STCU por ônibus nos pontos de vista do usuário e da operadora, auxiliando na tomada de decisões. Propor a subs-

tituição da pesquisa de campo, frequentemente utilizada para avaliar a percepção de qualidade dos usuários, por dados quantitativos coletados pelos sistemas de bilhetagem eletrônica (quantidade de passageiros) e AVL (automatic vehicle location - quilometragem percorrida e tempo de viagem), utilizando um sistema de controle fuzzy (Zadeh et al., 1996) em conjunto com o método Promethee II (Brans et al., 1986) para gerar um ranking de desempenho/qualidade dos cenários/linhas selecionados na pesquisa.

1.2 Relevância

Os estudos envolvendo qualidade do serviço e desempenho dos sistemas de transporte, em geral, analisam esses dois aspectos de forma individual, tentando traduzir os dados imprecisos obtidos por meio de pesquisas de campo, pesquisas de satisfação dos usuários, em dados computacionais com o uso da lógica fuzzy. Contudo, pesquisas de campo são difíceis de realizar, são extremamente onerosas, são carregadas de imprecisões e erros. A presente proposta objetiva substituir esse tipo de pesquisa por dois fatores quantitativos que podem representar, com grande eficiência, a percepção de qualidade no ponto de vista do usuário (tempo de espera e lotação, este último, conhecido como índice de conforto), amplamente discutidos (TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM, 1999), cujos índices de referência já estão definidos mundialmente. Paralelamente, oferecer um ranking obtido com o método Promethee II, o qual utilizará os valores desfuzzyficados das saídas usuário e operadora do sistema de controle fuzzy, possibilitando, assim, a tomada de decisões mais equilibradas em relação aos dois pontos de vista: usuário, privilegiando a qualidade; operadora, privilegiando a demanda/equilíbrio financeiro. Do ponto de vista computacional, o desempenho de um sistema de controle fuzzy depende, essencialmente, da sua base de regras. Essa base de regras é composta por termos linguísticos que tentam aproximar (ou inferir) um valor preciso, numérico, através de informações imprecisas, num conjunto de proposições condicionais. O ponto chave aqui, é determinar qual conjunto de regras terá o melhor desempenho, melhor acurácia (menor erro), em relação a dados estatísticos de pesquisas de campo.

2 Revisão Bibliográfica

A lógica fuzzy (Zadeh et al., 1996) tem sido bastante utilizada para auxiliar na avaliação da percepção de qualidade experimentada pelos usuários dos sistemas de transporte público, e também de outras áreas, devido a grande vantagem em tratar dados imprecisos obtidos através de variáveis linguísticas. Na lógica dos conjuntos CRISP, a pertinência de um elemento é clara: ele pertence ou não pertence a um determinado conjunto (1 ou 0, true ou false). Na lógica dos conjuntos Fuzzy, um elemento tem grau de pertinência numa escala de 0 a 1, inclusive. Sendo 1 o maior grau de pertinência e zero a indicação de que aquele elemento não pertence ao subconjunto. Assim, é possível determinar intervalos de pertinência dentro de uma função $f(x)$ atribuída a um termo linguístico (Zadeh et al., 1996) dentro de um conjunto em um universo de discurso (espaço amostral) Figura 1.

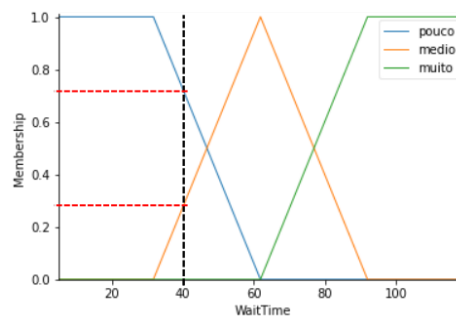


Figura 1: Conjunto fuzzy, funções de pertinência

Um sistema de controle fuzzy é composto por entrada (fuzzificação), base de regras, sistema de inferência e saída (defuzzificação), figura 2. A entrada do sistema fuzzy é um conjunto que representa o universo de discurso (espaço amostral do critério), dividido em subconjuntos definidos pelas funções de pertinência que podem ser lineares ou não. A base de regras é o conjunto de condições, proposicionais (se X_1 é a e X_2 é b , então Y é c ; na lógica fuzzy: SE *lotação=alta* AND *tempo de espera=médio*, ENTÃO *Qualidade=baixa*) normalmente definidas por especialistas da área de estudo. O sistema de inferência realiza a agregação das regras ativadas (cujo valor de corte se apresentem superiores a zero) através de uma função geométrica como por exemplo a Centroide. Esse valor já defuzzificado é enviado para o conjunto fuzzy de saída que apresenta, então, um valor preciso.

Já o método Promethee (Brans et al., 1986) é um método outranking (Sobreclassifica-

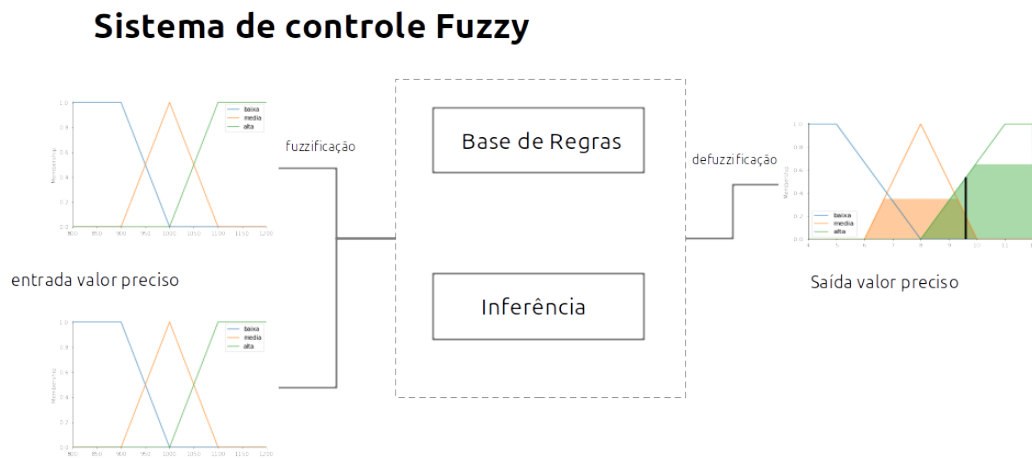


Figura 2: Diagrama de um sistema de controle fuzzy

ção), multicritério, para apoio a tomada de decisões baseado no cálculo de fluxos negativos, positivos e globais (Behzadian et al., 2010). No método Promethee, cada cenário é avaliado de acordo com seus atributos e pesos (arbitrários ou não) distribuídos conforme tabela da figura 3, onde q é o limiar de indiferença, cujos valores abaixo desse limiar não exercem influência sobre a tomada de decisão, e p o limiar de preferência, cujos valores superiores a esse limiar significam grande influência na escolha.

Tabela de critérios, pesos e limiares			
Critério	W_i	q	p
lotação	0,25	20	40
extensão	0,25	3	10
espera	0,25	10	30
dens. dem.	0,25	0,1	0,5
dens. estab.	0,25	0,1	0,5

Figura 3: Definição de critérios, pesos e limiares

Os limiares de preferência e indiferença auxiliam no cálculo dos fluxos positivos e negativos através da composição da matriz de graus de preferência para cada um dos cenários e critérios de escolha. Para funções lineares, é definindo um sistema condicional no qual a diferença entre os valores de um critério k em relação ao cenário i define o grau de preferência conforme 4 e matriz de resultados da figura 6.

$$\pi_{ij}^k = \begin{cases} 0 & \text{Se } f_k(a_i) - f_k(a_j) \leq q \\ \frac{[f_k(a_i) - f_k(a_j) - q]}{[p - q]} & \text{Se } q < f_k(a_i) - f_k(a_j) < p \\ 1 & \text{Se } f_k(a_i) - f_k(a_j) \geq p \end{cases}$$

Figura 4: Sistema de funções condicionais para composição da matriz de graus de preferência

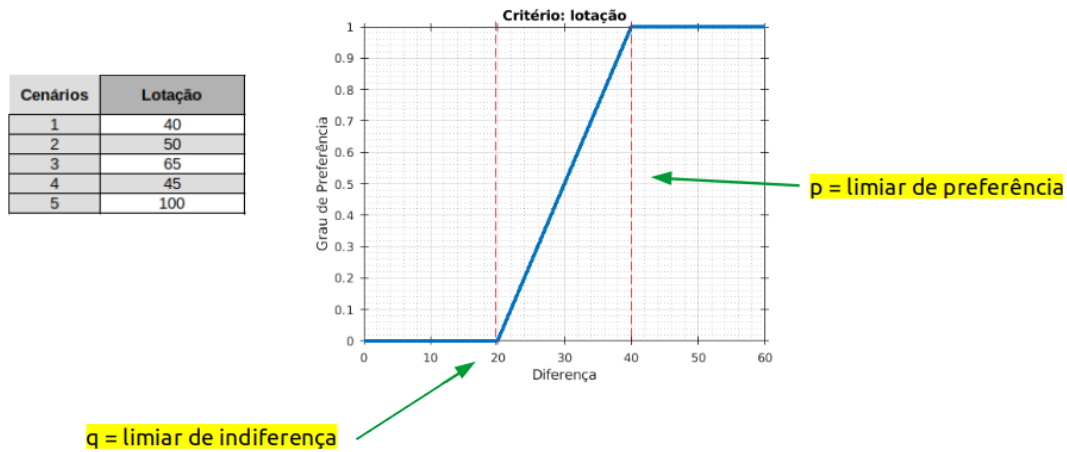


Figura 5: Gráfico do grau de preferência para o critério lotação

O método Promethee é realizado em três passos, o primeiro passo é a definição dos graus de preferência conforme matriz da figura 6, dado no procedimento anterior. O segundo passo é o cálculo dos fluxos positivo (soma dos valores das linhas da matriz de preferência), negativos (soma das colunas da matriz de preferência) e fluxo líquido 7. E o terceiro passo é o cálculo do fluxo global através da equação 1, que corresponde à somatória de todos os fluxos líquidos de todos os critérios para cada um dos cenários avaliados.

$$\phi(a) = \sum_{i=1}^k W_i * \phi_i(a) \quad (1)$$

Onde W_i é o peso do critério i e $\phi_i(a)$ representa o fluxo líquido do critério i , a é o cenário avaliado, k o número de critérios.

Por fim, criamos um ranking com os fluxos globais obtidos para cada um dos cenários de avaliação, figura 8 para o método Promethee II (no método Promethee I temos dois rankings, um para os fluxos positivos e outro para os fluxos negativos).

Cumpramos ressaltar que este exemplo mostra a escolha do melhor cenário para um único

Matriz dos graus de preferência					
	1	2	3	4	5
1	0	0	0,25	0	1
2	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0,75
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0

Figura 6: Matriz dos graus de preferência para o critério lotação

Matriz dos graus de preferência						
	1	2	3	4	5	$\Phi^*(a)$
1	0	0	0,25	0	1	0,3125
2	0	0	0	0	1	0,25
3	0	0	0	0	0,75	0,1875
4	0	0	0	0	1	0,25
5	0	0	0	0	0	0
$\Phi^*(a)$	0	0	0,0625	0	0,9375	

$\Phi(a)$	0,3125	0,25	0,125	0,25	-0,938	Fluxo Líquido
-----------	--------	------	-------	------	--------	---------------

Figura 7: Matriz dos graus de preferência, fluxo líquido

critério de seleção (lotação). Neste estudo, teremos a escolha do melhor cenário para duas óticas distintas (operadora e usuário) utilizadas como critério de seleção na saída do sistema de controle fuzzy, gerando um ranking ponderado, cuja determinação dos pesos poderá influenciar para vieses mais voltados ao equilíbrio financeiro (operadoras) ou para a percepção de qualidade do usuário.

Trabalhos utilizando sistemas fuzzy em conjunto com métodos outranking como o Promethee I e Promethee II (Digalwar and Date, 2016) são relatados nas mais diversas áreas de estudo (Pohekar and Ramachandran, 2004) (Tzeng and Huang, 2011) (Goumas and Lygerou, 2000). Quase sempre ligados à tomada de decisão através de fatores qualitativos, onde as variáveis podem carregar um grande teor de imprecisão, quase sempre ligadas a termos linguísticos, como é o caso dos atributos qualitativos de um sistema de transporte público (Begoña Guirao, 2016), muitas vezes, baseados em pesquisas de satisfação (Zhang et al., 2019).

Em se tratando de transporte público coletivo, os índices de avaliação qualitativa, ou mesmo quantitativa, (TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM, 1999) (Eboli and Mazzulla, 2008) representam uma forma de mensurar o quão distante, ou próximo, se encontra um STCU do seu ponto ideal de satisfação na perspectiva dos usuários (ANTP, 2013). Índices de avaliação da saúde de um sistema do ponto de vista econômico/financeiro (ANTP, 2017b) (ANTP, 2017a), como o índice de passageiros por quilômetro, trazem uma

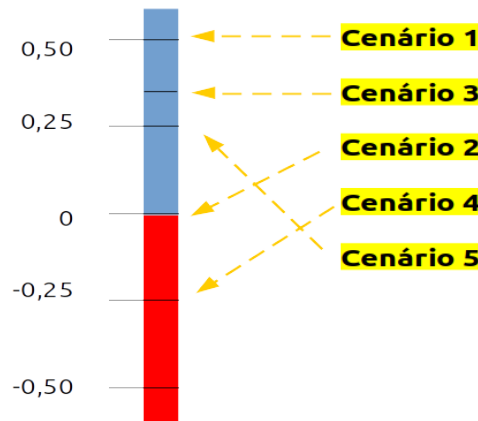


Figura 8: Ranking dos fluxos globais (Promethee II)

informação unicamente voltada à operação sem (Ivo Pons, 2015), contudo, levar em conta a qualidade do serviço ofertado para os usuários. Contudo, não foi possível encontrar estudos que priorizem os dois pontos de vista, simultaneamente, e que possam expressar um ponto de equilíbrio entre a melhor condição de operação, levando em conta o custo operacional e a demanda, e a satisfação dos usuários (algo que também exerce influência sobre a demanda).

3 Metodologia

Para a realização deste estudo, serão coletados dados do sistema de bilhetagem eletrônica e do AVL (GPS) dos veículos (quilometragem, tempo de viagem, quantidade de passageiros) da cidade de Feira de Santana no período entre janeiro de 2019 e dezembro de 2020. Esses dados apresentam-se desbalanceados e não possuem uma variável de referência para a composição de regras por meio do algoritmo de Wang-Mendel. Os conjuntos fuzzy serão definidos de acordo com critérios bem conhecidos na área de transportes públicos coletivos, índices de satisfação que irão compor as funções de pertinência e as variáveis linguísticas. A definição dos pontos máximos, médios e mínimos das funções de pertinência no eixo das abscissas será definido pela regra de variação do ponto médio inferior 2 e superior 3. Onde, V_i é a variação inferior, V_s a variação superior, PM o ponto médio, P_i o ponto inferior e P_s o ponto superior, figura 9.

$$V_i = PM - \left(\frac{PM - P_i}{2} \right) \quad (2)$$

$$V_s = PM + \left(\frac{PS - PM}{2} \right) \quad (3)$$

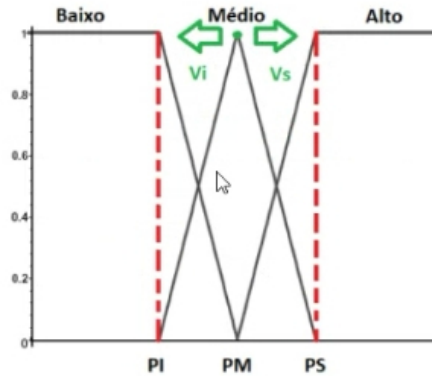


Figura 9: Conjunto fuzzy, variação do ponto médio para determinação das funções de pertinência

Segundo publicação da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2013), o índice médio de conforto adotado no Brasil é de 4 pessoas / m^2 . Assim, é possível a utilização desse índice como ponto médio para o critério lotação, cujo ponto mínimo pode ser adotado como zero (condição de risco crítico para a o equilíbrio financeiro do sistema de transporte). A lotação será também calculada de acordo com cada tipo de veículo da frota. Para a base de regras, a composição será realizada por especialistas da área de transporte público coletivo por ônibus, sendo possível a geração de regras também através da própria base de dados de análise, além do repositório Data.world <https://data.world/datasets/transportation>. Serão feitos testes tanto para o sistema de inferência Mamdani quanto para o Sugeno, a base de comparação será uma pesquisa de campo entre usuários da linha/rota X em horários alternados, cujo questionário conterà as duas variáveis de estudo (lotação e tempo de espera) e atribuição de pontuação de 1 a 10, sendo 1 para a pior percepção de satisfação e 10 para a melhor percepção de satisfação com o serviço prestado. Do ponto de vista da operadora (concessionária do serviço de transporte), os fatores quantidade de passageiros transportados e quilometragem percorrida farão a base de equilíbrio do sistema para o viés econômico/operacional, cujos pontos mínimo, máximo e médio das funções de pertinência serão determinados com base em publicações oficiais (GEIPOT), ANTP (ANTP, 2017a) (Quintella Cury and Fuks, 1999) e índices de passageiros

por quilômetro equivalente - IPKe (passageiros pagantes). O ranking Promethee II será calculado com base nos valores precisos das saídas defuzzificadas do algoritmo. As duas saídas do sistema de controle fuzzy serão os dois fatores de escolha do Promethee 10.

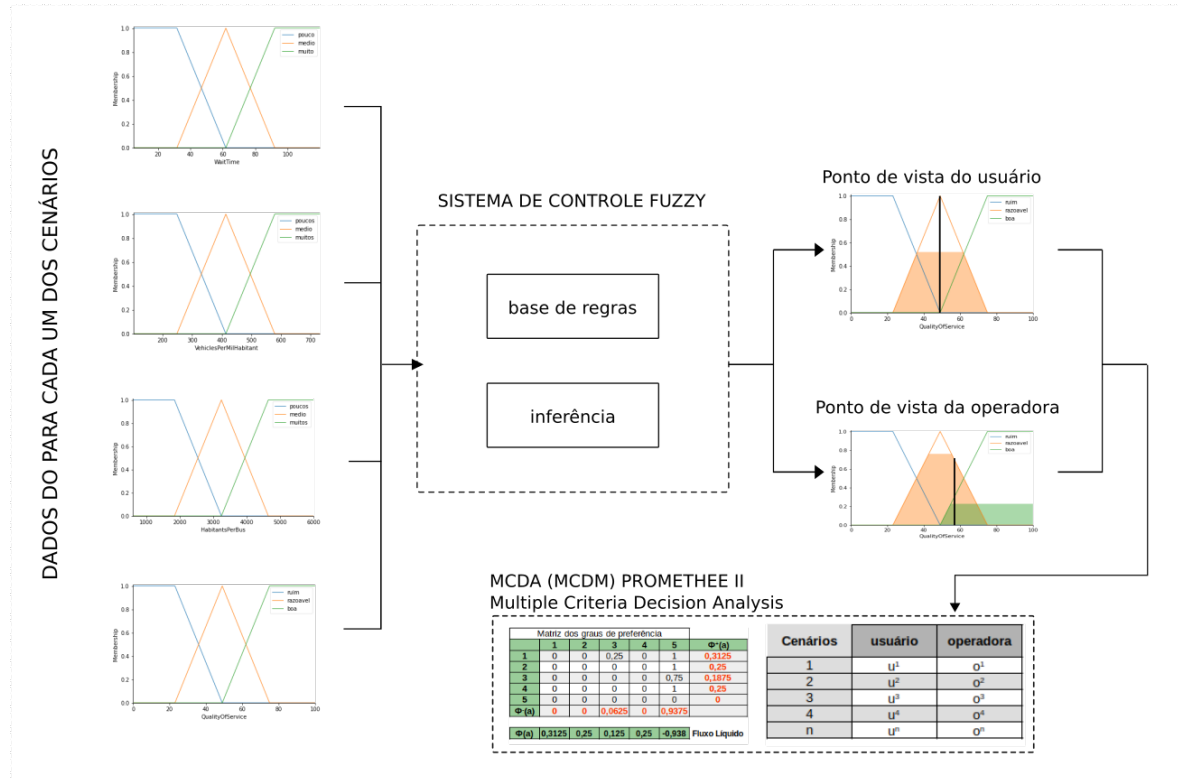


Figura 10: Diagrama do estudo proposto

Outros passos:

- Atribuição de pesos para o método Promethee II:

Execução com peso 0,60 para usuário, peso 0,40 para operadora;

Execução com peso 0,50 para usuário, peso 0,50 para operadora.

- Levantamento de pesquisa de campo e comparação com resultados do algoritmo;

Dias úteis, sábados, domingos e feriados separadamente;

Horários alternados.

- tabela comparativa:

pesos vs resultados;

pesquisa de campo vs algoritmo.

4 Resultados esperados

Este estudo espera apresentar um algoritmo para avaliação da percepção de qualidade do ponto de vista dos usuários em comparação com as necessidades operacionais e econômicas (ponto de vista das operadoras) de linhas e/ou rotas, de uma malha de serviço de transporte público por ônibus, utilizando, para isso, variáveis quantitativas em substituição àquelas obtidas através de pesquisas de campo, tornando o algoritmo um meio confiável para obtenção de dados de representação qualitativa, auxiliando, assim, a tomada de decisões por parte dos gestores do transporte.

5 Cronograma

11

[illegible]

Referências

- ANTP (2013). *Excelência na gestão do transporte e trânsito*. ANTP.
- ANTP (2017a). *Custos dos Serviços de Transporte Público por Ônibus - Instruções Práticas*. ANTP.
- ANTP (2017b). *Custos dos Serviços de Transporte Público por Ônibus - Método de Cálculo*. ANTP.
- Barbosa, S. B. et al. (2017). Modelo de avaliação multicritério para o serviço de transporte público: uma abordagem focada no usuário.
- Begoña Guirao, Antonio García-Pastor, M. E. L.-L. (2016). The importance of service quality attributes in public transportation: Narrowing the gap between scientific research and practitioners' needs. *Transport Policy*, 49:68–77.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R., Albadvi, A., and Aghdasi, M. (2010). Promethee: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1):198–215.
- Brans, J., Vincke, P., and Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2):228–238. Mathematical Programming Multiple Criteria Decision Making.
- Costa, H. and Br (2000). Metodologia multicritério para a medição e classificação do grau de satisfação de clientes.
- Digalwar, A. and Date, P. (2016). Development of fuzzy promethee algorithm for the evaluation of indian world-class manufacturing organisations. *International Journal of Services and Operations Management*, 24:308.
- Eboli, L. and Mazzulla, G. (2008). A stated preference experiment for measuring service quality in public transport. *Transportation Planning and Technology*, 31(5):509–523.
- Goumas, M. and Lygerou, V. (2000). An extension of the promethee method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*, 123(3):606–613.

- Ivo Pons, Julian Monteiro, R. S. (2015). *Big Data para análise de métricas de qualidade de transporte: metodologia e aplicação*. ANTP, São Paulo.
- Pohekar, S. and Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4):365–381.
- Quintella Cury, M. and Fuks, S. (1999). Heuristic neuro-fuzzy model for evaluation of urban transportation projects. In *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials. IPMM'99 (Cat. No.99EX296)*, volume 2, pages 1123 vol.2–.
- TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM, T. R. . (1999). *A handbook for measuring customer satisfaction and service quality*. National Academy Press.
- Tzeng, G.-H. and Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making: methods and applications*. CRC press.
- Zadeh, L. A., Klir, G. J., and Yuan, B. (1996). *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers*, volume 6. World Scientific.
- Zhang, C., Liu, Y., Lu, W., and Xiao, G. (2019). Evaluating passenger satisfaction index based on pls-sem model: Evidence from chinese public transport service. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 120:149–164.