

USO HÍBRIDO DO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS E DA MICROSSIMULAÇÃO DE TRÁFEGO: UMA CONTRIBUIÇÃO AO PLANEJAMENTO DA MOBILIDADE URBANA

Wellington Gonçalves

Doutor em Engenharia de Produção

Professor permanente do Mestrado Profissional em Gestão Pública (PPGGP/UFES) Departamento de Engenharias e Tecnologia – Engenharia de Produção

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES).

Jailany do Rozario Clarindo

Graduanda em Engenharia de Produção

Departamento de Engenharias e Tecnologia – Engenharia de Produção

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES).

Liliane Cristina Segura

Pós-Doutora em Administração

Doutor em Administração

Universidade Presbiteriana Mackenzie/ Centro de Ciências Sociais e Aplicadas.

Fernando Nascimento Zatta

Pós-Doutor em Controladoria, Finanças Empresariais e em Administração Doutor em Engenharia de Produção

Universidade Presbiteriana Mackenzie/ Centro de Ciências Sociais e Aplicadas.

Rodrigo Ribeiro de Oliveira

Doutor em Engenharia de Produção

Professor titular do Instituto Federal de São Paulo

Resumo

Restrições de mobilidade impostas pelo ambiente urbano têm afetado principalmente o uso dos transportes nas cidades, e isso, em parte, pode ser atribuído ao crescimento populacional desordenado e desenvolvimento tecnológico. Como desdobramento disso, o meio urbano tem sido obrigado a conviver com intensos e conturbados fluxos de veículos em diversos momentos, os quais influenciam a economia e sociedade.

Mesmo havendo recentes avanços (teóricos e metodológicos) sobre o tema, ainda persistem congestionamentos repetidamente. Por isso, o avanço em pesquisas é necessário, de forma a simular soluções, mas, também, dar voz a diferentes stakeholders presentes nos polos geradores de demanda. Com essa visão, foi proposta uma abordagem híbrida com uso de método multicritério e da microsimulação. Os resultados sugerem que o gerenciamento de equipamentos de sinalização e semáforos por meio da intervenção de agentes de trânsito, possibilita significativamente melhora na eficiência do fluxo de tráfego, assim o comprimento das filas pode ser reduzido em 65,6% e, o tempo total de viagem reduzido em 48,3% nos trechos analisados. Desta forma, contextos podem se beneficiar dessa proposta, em especial - quando dados refinados e dispendiosos não estão disponíveis para estudar os movimentos de veículos.

Palavras-chave: Modelagem de tráfego por microsimulação. AHP. Desenvolvimento urbano. Mobilidade urbana sustentável.

Abstract

Mobility restrictions imposed by the urban environment have mainly affected the use of transport in cities, and this can partly be attributed to disordered population growth and technological development. As a result, the urban environment has been forced to live with intense and troubled vehicle flows at various times, which influence the economy and society. Despite recent advances (theoretical and methodological) on the subject, congestion still persists repeatedly. For this reason, further research is needed in order to simulate solutions, but also to give a voice to the different stakeholders present at the demand-generating hubs. With this in mind, a hybrid approach was proposed using a multi-criteria method and microsimulation. The results suggest that the management of signaling equipment and traffic lights through the intervention of traffic agents significantly improves the efficiency of traffic flow, so that queue lengths can be reduced by 65.6% and total travel time by 48.3% on the stretches analyzed. In this way, contexts can benefit from this proposal, especially when refined and expensive data is not available to study vehicle movements.

Keywords: Traffic modeling by microsimulation. AHP. Urban development. Sustainable urban mobility.

1. Introdução

A mobilidade urbana é um tema de elevada relevância para a sociedade moderna, influenciando o desenvolvimento e, principalmente a qualidade de vida das pessoas. Na opinião de Diao *et al.* (2021) o rápido crescimento populacional e a crescente urbanização nas últimas décadas, resultaram em uma demanda cada vez maior por viagens nas cidades do mundo, impondo desafios significativos aos sistemas de transporte urbano.

As cidades brasileiras, principalmente nas últimas décadas do século XX, têm experimentado um elevado crescimento demográfico, o que tem impactado fortemente as demandas por transporte urbano (Lessa *et al.*, 2019). Para Guimarães *et al.* (2021) esse crescimento influencia diretamente o fluxo de veículo, o que, por conseguinte, está relacionado a diferentes fatores e subfatores que influencia a mobilidade urbana.

Conforme Cervellera *et al.* (2021) o planejamento do fluxo de veículos em áreas urbanas tem utilizado a microssimulação para apoiar os tomadores de decisão em planejamento de curto, médio e longo. Contudo, mesmo a simulação de tráfego urbano sendo uma ferramenta consolidada na literatura (Louro *et al.*, 2019; Kotagi; Asaithambi, 2019; Vennu, 2021; Castañeda *et al.*, 2022), contando com uma elevada disponibilidade de modelos e softwares, seu uso permite obter uma estimativa da realidade para comparar diferentes cenários, avaliar decisões estratégicas e analisar possíveis anomalias, mas, não congrega opiniões.

Dentro desse contexto, de acordo com Liu *et al.* (2020) e Gaskin *et al.* (2021) há uma necessidade crescente de soluções inovadoras que possam contribuir com o planejamento urbano, além de ir ao encontro das necessidades da sociedade. Algo que nos últimos anos tem sido agravado pelo advindo da pandemia gerada pela COVID-19 (Aloi *et al.*, 2020). Problemas como esse da pandemia são citados por Marçal *et al.* (2021), e, é por isso, que estes autores destacam que a mobilidade urbana deve estar fundamentada em condições adequadas de espaço, tempo e recursos voltados aos meios de locomoção da população.

O deslocar-se cotidianamente é uma necessidade comum a maioria da população urbana, por diversas vezes, diferentes polos geradores de tráfego de uma região urbana influenciam o comportamento do fluxo de veículos (Zhong *et al.*, 2018). Outro importante ponto a ser observado está relacionado as viagens urbanas que são

consideradas mais convenientes, entretanto, os problemas de segurança no trânsito são, também, cada vez mais proeminentes (Fan *et al.*, 2019).

Adicionalmente, Bertolini (2020) destacam que o comportamento inadequado do fluxo de veículos, se dá, dentre outros fatores, a ausência de ouvir os atores envolvidos. Esse ouvir é algo que deve ser priorizado ao se planejar a mobilidade urbana, afirma Ortúzar (2019). Anastasiadou *et al.* (2021) apontam em seu estudo que a utilização de métodos multicritério auxiliam não somente no ouvir, como também, na consolidação de julgamentos. Por esse motivo, Saaty (1987) e Jena *et al.* (2020) ressaltam a necessidade do uso de métodos multicritério quando se tem elevado número de atores com diferentes percepções e necessidades, contribuindo assim para o entendimento de fenômenos.

De acordo com Ruiz Bagueño *et al.* (2021) e Bastida-Molina *et al.* (2022), a sociedade urbana moderna necessita dialogar e convergir opiniões sobre atributos que influenciem a mobilidade. Para estes autores o crescimento populacional desordenado, além de influenciar negativamente a mobilidade, é responsável por elevada parcela a qual prejudica a qualidade de vida da população. Guimarães *et al.* (2021) afirmam que pensar mobilidade urbana vai além do pensar em vias asfaltadas ou transportes, é necessário descobrir quais fatores e subfatores influenciam o planejar da mobilidade.

Considerando os motivos expostos, este trabalho se concentrou em contribuir por meio do método multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e da microssimulação de fluxo de veículos com a proposição de possíveis soluções para gargalos no trânsito da cidade de São Mateus, localizada no norte do estado do Espírito Santo.

2. Referencial teórico

O rápido crescimento populacional e a crescente urbanização nas últimas décadas têm resultado num aumento contínuo da procura de viagens nas cidades em todo o mundo, impondo desafios significativos aos sistemas de transporte urbano (Diao *et al.*, 2021). Nesse sentido, Vennu (2021) destaca que, associado a essas circunstâncias há o agravamento na demanda por transporte gerado pelo comércio eletrônico, o qual vêm nos últimos anos impulsionando não somente os equipamentos logísticos, mas em especial o transporte urbano.

Ampliando essa visão, Rahimi *et al.* (2021) apontam que, é necessário ouvir stakeholders entendendo seus pontos de vistas e opiniões, assim como, usar da

tecnologia para simular possíveis soluções e circunstâncias. Essas circunstâncias podem ocorrer de diversas formas, segundo Cervellera *et al.* (2021) a simulação do tráfego urbano, por exemplo, é uma ferramenta bem consolidada e empregada rotineiramente para apoiar os tomadores de decisão no planejamento de curto, médio e longo prazo. Contudo, a ferramenta por si só não consegue entender as necessidades e expectativas dos diversos atores envolvidos, completam estes autores.

Por outro lado, Aloï *et al.* (2020) ressaltam que a mobilidade urbana está suscetível não somente a dimensões e variáveis técnicas, mas principalmente às intempéries que afligem a humanidade, como a COVID-19 recentemente. Essa opinião é corroborada por Anastasiadou *et al.* (2021) que concordam ao destacarem a ocorrência dessas intempéries, e também ao atendimento de necessidades e expectativas dos diversos stakeholders, assim as propostas de soluções devem convergir opiniões e serem revistas constantemente – afirmam.

A literatura tem avançado em diversas direções com inúmeras opiniões, contudo, não tem ocorrido convergência de visões e soluções sobre de tráfego de veículos e planejamento da mobilidade urbana (Chaudhary *et al.*, 2018; Ruiz Bargueño *et al.*, 2021; Bastida-Molina *et al.*, 2022; Castañeda *et al.*, 2022). Na opinião de Fan *et al.* (2019), o problema de pouca fluidez no fluxo de veículos deve ser entendido inicialmente e, diagnosticado de forma acurada, qual seja em suas dimensões e complexidades, assim como, considerar constantemente variações nos polos geradores de demanda que o influenciam.

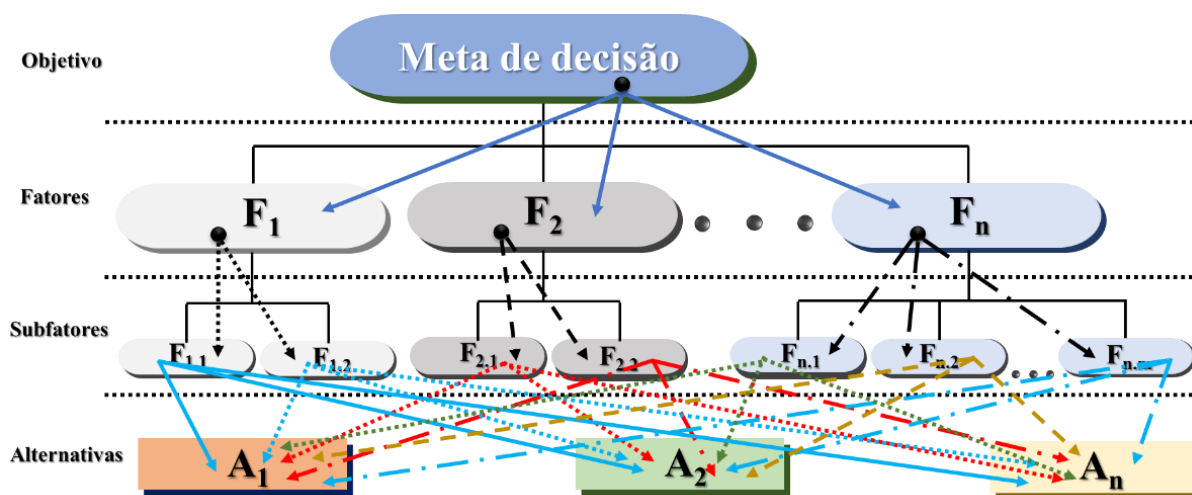
Para Hamurcu e Eren (2018), considerando a essência dos métodos multicritério – em especial a versatilidade e adaptabilidade a diferentes problemas e condições, estes podem auxiliar no entendimento do que se deseja de uma solução para fluxo de veículos, contribuindo com a convergência de opiniões. Apoiando essa consideração, Jena *et al.* (2020) reforçam que, métodos multicritério como o Analytic Hierarchy Process (AHP), o qual considera a percepção humana em sua operacionalização, algo que para solucionar problemas de decisão é essencial.

O AHP inicialmente desenvolvido pelo matemático Thomas Lorie Saaty na década de 1970 (Saaty, 1987), tem se consolidado como uma ferramenta efetiva em processos de tomada de decisão (Hamurcu; Eren, 2018), e por esse motivo, gestores o estão utilizando em variadas circunstâncias de seu cotidiano, como também por pesquisadores devido ao fato de ser aplicável a diversas áreas do conhecimento (Ruiz Bargueño *et al.*, 2021).

A realização de uma decisão de forma organizada é possível a partir da definição de prioridades (Saaty, 2008). Complementarmente Hamurcu e Eren (2018) e Ruiz Bagueño *et al.* (2021) ressaltam que, para melhor entendimento do que se propõe, é essencial decompor o processo decisório. Por este motivo, Saaty (2008) entendendo que, esse processo necessita ser estudado tanto no domínio físico como no social, idealizou o AHP sendo operacionalizado por meio de quatro etapas.

A primeira etapa para a operacionalização do AHP, de acordo com Ruiz Bagueño *et al.* (2021), está no entendimento e diagnóstico do objetivo a ser alcançado, a partir disso é elaborada uma estrutura hierárquica (Figura 1) com base na meta de decisão e atributos (fatores e subfatores), seguidos das alternativas vislumbradas como possíveis soluções.

Figura 1 - Representação da estrutura de hierárquica do AHP



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na sequência, a segunda etapa realiza comparações paritárias entre cada atributo da estrutura hierárquica (Figura 1), utilizando uma escala conceitual (Tabela 1) em que, cada um dos elementos do respectivo nível hierárquico é considerado, sendo a partir disso, elaboradas matrizes que subsidiarão o processo de escolha (Saaty, 2008; Jena *et al.*, 2020). Além disso, Gonçalves (2023) salienta que, essa escala idealizada por Saaty, possui origens e fundamentos que consideram a percepção humana, conciliando a estatística à psicologia, tendendo assim, minimizar possíveis ausências de lógica comparativa.

Tabela 1 - Escala de Saaty

Escala	Definição
1	Igual importância
3	Importância pequena
5	Importância grande
7	Importância muito grande
9	Importância absoluta
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários

Fonte: Saaty (2008).

A partir da estrutura hierárquica do AHP (Figura 1) são realizadas de comparações paritárias de julgamentos individuais e, assim formadas matrizes de comparações, em vez de tentar priorizar toda a lista de decisões e atributos concomitantemente (Ruiz Bagueño *et al.*, 2021). Essas matrizes também envolvem a priorização das alternativas em relação aos fatores e subfatores de decisão, sendo composta por n atributos e m alternativas – terceira etapa, conforme Figura 2 (Saaty, 2008).

Figura 2 - Matriz genérica para comparação paritária

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Saaty (2008).

A literatura tem concordado que o AHP é uma valiosa ferramenta amplamente difundida que, vem sendo utilizada na triagem e priorização de atributos diversos em diferentes cenários (Hamurcu; Eren; 2018; Ruiz Bagueño *et al.*, 2021; Gonçalves, 2023). Desta forma, decisores podem se valer das avaliações feitas empregando as prioridades efetuadas em seus planejamentos e ações, para que, tanto num dado momento como em futuras decisões, tais prioridades sejam importantes na avaliação de alternativas, algo que é ratificado pelo pensar de forma lógica e, na verificação de inconsistências nos julgamentos presentes no AHP (Jena *et al.*, 2020). Como preconizado por Saaty (2008), a quarta etapa é efetuada ao ser realizado o cálculo da razão de consistência (Equação 1).

$$RC = IC/IR \tag{1}$$

Em que: *RC* corresponde à razão de consistência dos julgamentos; *IC* retrata o índice de consistência e o *IR* configura o índice aleatório (Tabela 2).

Tabela 2 - Índices de consistência aleatória

<i>n</i>	2	3	4	5	6	7
<i>IR</i>	0,0	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3
		8	0	2	4	2

Fonte: Saaty (2008).

Conforme Saaty (2008) e Gonçalves (2023), o *IC* é calculado utilizando a Equação 2, em que o $\lambda_{máx.}$ é o maior autovalor da matriz de julgamentos, sendo que conjugação geral a *RC* deve estar abaixo de 0,1 para se manter consistente.

$$IC = (\lambda_{máx.} - n) / (n - 1)$$

(2)

De acordo com Saaty (2008), embora o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) seja um método que considera diferentes julgamentos, além de uma escala que considera a percepção humana, em momentos que ocorrer o não atendimento de todas as condições de operacionalização, é relevante que se execute um reexame dos julgamentos, apesar disso, se perseverar o não atendimento, estes deverão ser rejeitados.

3. Abordagem metodológica

A unidade de pesquisa utilizada foi um fragmento de meio urbano do município de São Mateus, o qual está situado na microrregião Nordeste do Estado do Espírito Santo (ES). Esta escolha foi devido a representatividade desse município para essa microrregião e, também, ao volume intenso do fluxo de veículos, elevada quantidade de habitantes e diversas vias que se encaixam no modelo da pesquisa sobre mobilidade urbana. Dessa forma, avaliando elementos, o incremento da abordagem metodológica deste trabalho ocorreu por meio de 5 etapas (Figura 3). Essa abordagem

foi realizada a partir da efetivação de um diagnóstico, da operacionalização do AHP, da estruturação do problema, da modelagem e, da simulação de cenários.

Figura 3 - Sinopse da abordagem metodológica



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Assim, um diagnóstico foi feito com a intenção de ser conhecer as características da unidade de pesquisa a serem analisadas, assim como, a identificação de polos geradores de demanda que influenciam o problema de pesquisa (Gonçalves; Ribeiro, 2020; Maźziel *et al.*, 2021). Sendo levantadas as vias urbanas semaforizadas que se ajustem à realização deste trabalho, sendo considerados como fator de escolha a intensidade do fluxo de veículos em três momentos dos horários comercial e escolar. A partir do conhecimento dessas vias, foi realizada a concepção de um mapa georreferenciado da localidade selecionada para simulação (primeira etapa).

Na sequência foi realizada uma análise bibliométrica para levantar na literatura fatores e subfatores que subsidiam o entendimento de quais parâmetros influenciam o fluxo de veículos. Para tanto, para auxiliar nessa análise foi escolhida a base de dados *Web of Science* (WoS). Essa escolha ocorreu devido a representatividade a WoS ser uma base de diversas literaturas acadêmicas, das quais mais de 22.000 periódicos são revisados por pares em todo o mundo, permitindo inclusive a monitoração de resultados de buscas em uma interface intuitiva. Com isso, de acordo com Hamurcu e Eren (2018) foi conduzido um levantamento survey, o qual subsidiou a operacionalização do *Analytic Hierarchy Process* (AHP), apontando atributos que influenciam esse fluxo e, por conseguinte, compor o modelo a ser utilizado na simulação (segunda etapa).

A partir do conhecimento destes atributos ocorreu a elaboração da modelagem, terceira etapa, considerando os fatores intervenientes descobertos. A construção do modelo teórico empregado na microsimulação utilizou o software *Synchro Traffic 9* versão *trial* (Lu *et al.*, 2018; Rahimi *et al.*, 2021). Paralelamente a essa construção a quarta etapa levantou dados utilizados neste modelo, sendo estes coletados durante horários de pico comercial e escolar. Para essa coleta de dados o recurso de filmagem foi escolhido, o qual auxiliou na análise do fluxo de veículos nos locais selecionados, possibilitando posterior avaliação de variáveis a partir da análise dos vídeos gerados (Chaudhary *et al.*, 2018; Louro *et al.*, 2019).

Por fim, a quinta etapa, realizou-se a simulação do fluxo de veículos e, a partir disso, foi possível obter subsídios que auxiliem na caracterização dos fatores intervenientes que afetam o comportamento desse fluxo nas vias urbanas, além de sua interação com os veículos e com o ambiente em seu entorno de maneira geral (Chaudhary *et al.*, 2018; Cervellera *et al.*, 2021).

4. Resultados e discussão

Inicialmente foi realizado um diagnóstico para se conhecer o local que serviu como unidade de pesquisa, em que foram levantados o uso do solo, sinalizações existentes (vertical, horizontal e semaforica), características geométricas, físicas e estruturais das vias, área de influência, caracterização do tráfego local, quais sejam: volume de tráfego, variações de volume de tráfego, velocidade do trânsito local, a fim de subsidiar a microsimulação de tráfego feita. O local escolhido faz parte do centro urbano da cidade de São Mateus (Espírito Santo/ Brasil) e, apresenta cotidianamente problemas severos com o fluxo de veículos em suas vias (Figura 4) - primeira etapa.

Figura 4 – Mapa georreferenciado do trecho estudado



Fonte: Google Maps (2023).

Seguindo a abordagem proposta na metodologia, a partir da WoS utilizando as *strings*: *traffic microsimulation*; *microsimulate urban travel*; *microsimulation model of urban systems*; *microsimulation urban model*; *microsimulation urban traffic*; *micro-simulation modelling urban traffic*; *micro-simulation traffic model*; *micro-simulation urban transport*; *micro-simulation model of urban systems*; *micro-simulation model of urban traffic*; *microsimulation of traffic flow*; *micro-simulation of traffic flow*, a base retornou em 31 de março de 2023, 1.400 obras acadêmicas (Figura 5), destas 338 eram artigos científicos, publicados a partir de 1945, escritos em inglês.

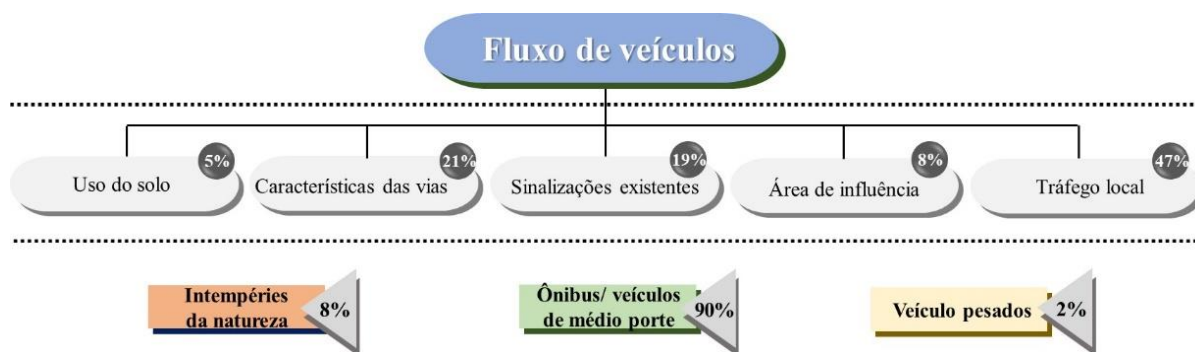
Figura 5 - Consolidado de registros por categorias da WoS



Fonte: WoS (2023).

A partir da descoberta desses fatores e subfatores, complementando esse resultado, de acordo com Jena *et al.* (2020), houve a condução de um levantamento survey, junto a 7 especialistas (1 policial militar, 1 servidor municipal, 2 empresários do setor e 3 pesquisadores) que atuam em pesquisas sobre o tema, na utilização comercial, na gestão e, na operacionalização do fluxo de veículos na unidade de pesquisa. Assim, seguindo os preceitos da literatura (Hamurcu; Eren; 2018; Jena *et al.*, 2020; Ruiz Bargeño *et al.*, 2021; Gonçalves, 2023), após o tratamento dos dados, estes foram inseridos no software *Expert Choice* versão trial para operacionalização do AHP, sendo apontados atributos que influenciam esse fluxo (Figura 7), os quais foram inseridos no modelo de microsimulação para compor cenários (segunda etapa).

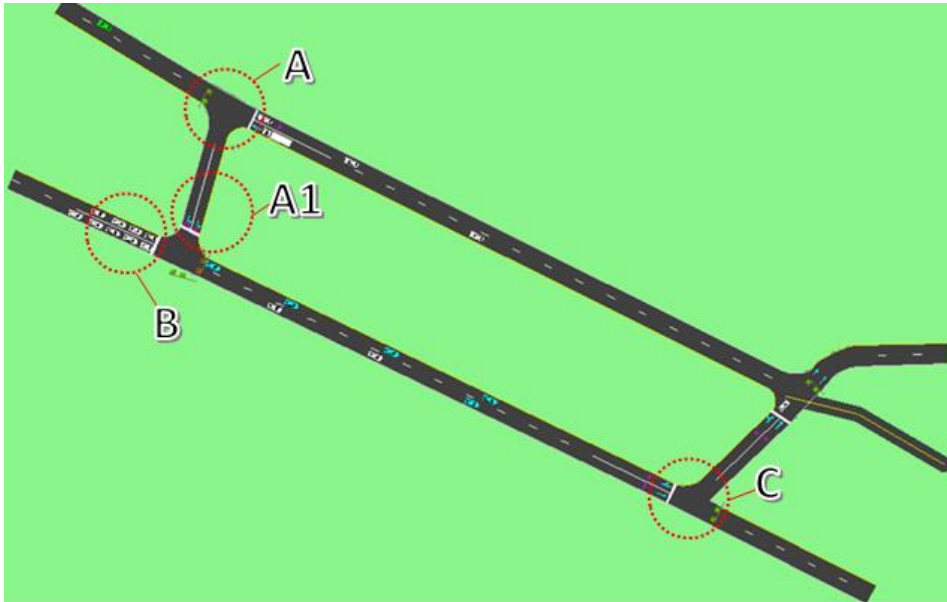
Figura 7 - Compilação dos julgamentos paritários



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Desta forma, considerando a valoração dos atributos que influenciam o comportamento do fluxo de tráfego de veículos em vias urbanas semaforizadas (Figura 7), como também o local objeto da microsimulação com suas particularidades, um modelo teórico (Figura 8) foi construído para visualizar o tráfego de maneira puramente microscópica (Lu *et al.*, 2018; Rahimi *et al.*, 2021). Paralelamente a isso, de acordo com Aloi *et al.* (2020), foram definidos polos geradores de demanda, o que acarretou em definições pontuais de diferentes movimentações de veículos geradas a partir de tais polos.

Figura 8 - Modelagem do local escolhido para estudo

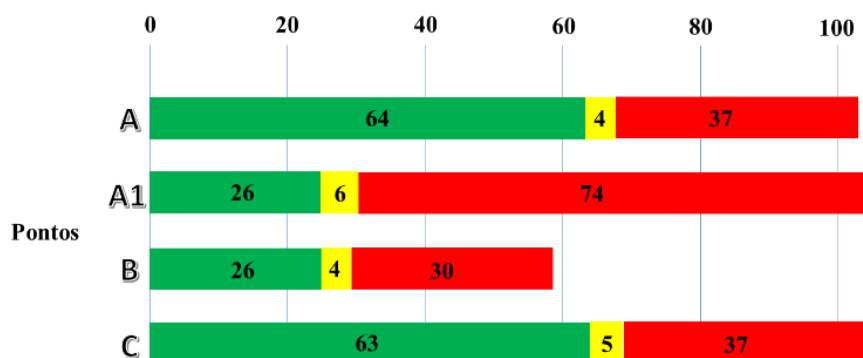


Fonte: *Synchro Traffic versão trial* (2023).

Seguindo a abordagem proposta na metodologia, inicialmente foram consideradas “matrizes origem/destino” (matrizes O/D), a fim de configurar as demandas oriundas dos polos geradores, como também, possíveis sazonalidades (Louro *et al.*, 2019). Em seguida, considerando o modelo teórico formulado foram pontuados movimentos entre zonas de atribuição de tráfego, de acordo com o número de veículos por tempo, a partir das características e particularidades do local objeto de estudo (Bastida-Molina *et al.*, 2022).

Após a pontuação desses movimentos foi dado início à coleta de dados durante horários de intenso fluxo de veículos (horários de pico), os períodos de coleta foram das 7h às 8h e, das 17h40 às 18h40, realizados no dia 6 de março de 2023. Os pontos de coleta foram definidos de forma a possibilitar uma visualização completa da localidade objeto de estudo (Figura 8). Destarte, conforme proposto por Chaudhary *et al.* (2018) e Cervellera *et al.* (2021), filmagens foram realizadas de maneira a identificar parâmetros para a microsimulação, como fluxo de veículos, trajetórias, ciclos e intervalos da programação semafórica (Figura 9).

Figura 9 - Temporização semafórica (segundos)



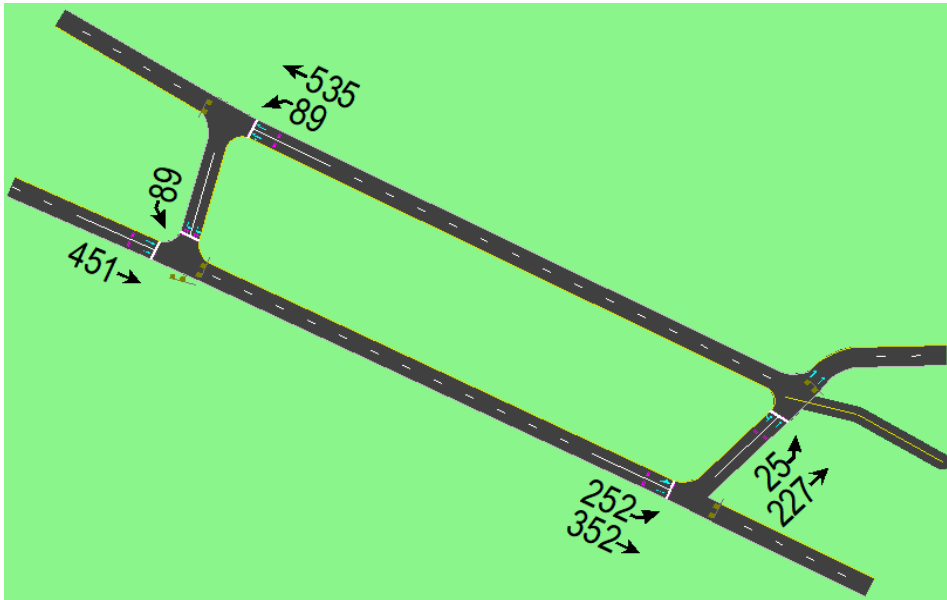
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Durante toda a coleta de dados, em termos climáticos o tempo pode ser considerado estável, ou seja, não houveram interferências nas filmagens. As estações de filmagem de veículos foram localizadas em cada um dos trechos considerados (postos A, A1, B e C), de forma que o início e o final de cada trecho da rodovia foram cobertos (Kotagi; Asaithambi, 2019). Os dados coletados nos postos de filmagens dos veículos foram armazenados em planilhas eletrônicas específicas, as quais posteriormente serviram de inputs para a realização da microssimulação.

O tempo de viagem ao longo de um determinado trecho da rodovia foi estimado como a diferença entre os tempos de saída e entrada de cada veículo (Marçal *et al.*, 2021). Durante a coleta de dados, em conformidade com Gonçalves e Ribeiro (2020), percebeu-se que o tempo de deslocamento foi relativamente grande para determinados veículos, de médio e grande porte, em alguns dos trechos considerados. Isso, de acordo com Zhong *et al.* (2018), Ortúzar (2019), Maźziel *et al.* (2021) e Vennu (2021), pode ser explicado pelo fato desses veículos fazerem variadas paragens ao longo de um determinado trecho, para recolher ou deixar mercadorias, para o desembarque e embarque de passageiros, dentre outros motivos.

Para avaliação dos trechos foi utilizado o software *Synchro Traffic 9* versão *trial* (Figura 10), sendo as taxas de fluxo de saturação e a distância entre os veículos calibradas de acordo com as condições do município de São Mateus (microrregião Nordeste do Estado do Espírito Santo), como sugerido por Louro *et al.* (2019). Simultaneamente, as condições de cada trecho foram inseridas no *Synchro*, sendo em três cenários simulados individualmente num período de 60 minutos (Cervellera *et al.*, 2021), e o número de replicações para cada cenário de cinco vezes, com isso, os resultados finais foram obtidos a partir da média dos resultados dessas replicações.

Figura 10 - Volume médio de tráfego por trecho (período da tarde)



Fonte: *Synchro Traffic* versão *trial* (2023).

Os resultados da simulação permitiram verificar que, houve a ocorrência de aumentos significativos no fluxo de veículos de forma global nos cenários. De tal modo, no primeiro cenário que levou em consideração intempéries da natureza, tais como mudanças climáticas, existiu um acréscimo de 80% nesse fluxo. O segundo cenário ponderou uma ampliação na movimentação de ônibus e outros veículos de médio porte para transporte de pessoas, apresentou adição de 90%. Por fim, o trânsito de veículos pesados que tende a formar pelotões, ocasionou um aditamento de 60% no fluxo de veículos (terceiro cenário).

Os resultados da análise da simulação mostraram que, ao considerar ações de gestão de equipamentos de sinalização, o uso de agentes de trânsito para conduzir pontualidades, além de uma programação semafórica exclusiva, associada a tais intervenções, ocorre a expressiva melhora das condições de viagem nos trechos analisados. Por outro lado, o ajuste na programação associado a diminuição de *delays* de movimentação, aumentou a velocidade média de deslocamento dos veículos de 23,7 km/h para 38,6 km/h, à medida que o tempo total de parada atenuou de 163,0 seg/km para 26,0 seg/km e, o tratamento proposto de gestão amortizou o número total de paradas de veículos em 76,3%.

Em conformidade com Rahimi *et al.* (2021), os resultados suscitam que melhoras significativas na eficiência do fluxo de tráfego podem ser obtidas por meio do

gerenciamento de equipamentos de sinalização, da intervenção planejada de agentes de trânsito e, da programação semafórica. A partir disso, considerando as variáveis utilizadas e condições de estudo, para os trechos analisados o comprimento das filas pode ser reduzido em 65,6%, com uma redução 48,3% do tempo total de viagem.

Enfim, é relevante destacar que o número de veículos com tempo de viagem atípica pode ser considerado ignóbil, em confrontação com o número total de veículos que transitavam nos pontos de medição. Corroborando com esta informação, foram coletados mais de 3.100 registros nos trechos considerados ao longo deste trabalho, e menos de 1% foram suprimidos da microssimulação e análise devido a tempos de viagem excepcionais.

5. Conclusões

A elevada dispersão geográfica da população metropolitana e a disseminação de padrões de uso do solo com uma alta concentração de atividades comerciais são fenômenos relativamente recorrentes nas últimas décadas no meio urbano do município de São Mateus. Desencadeando o debate, sob novas formas e com novas opções políticas, sobre um tema já bem consolidado no planejamento urbano, a da fluidez de fluxo de veículos. Dentro deste contexto, a abordagem híbrida deste trabalho (análise empírica e microssimulação) foi realizada com o objetivo de estabelecer uma contribuição que considere diferentes opiniões para o planejamento do fluxo de tráfego de veículos em centros urbanos.

Os achados da abordagem sugerem que independentemente da área de influência e suas características, como também, dos diferentes padrões de expansão urbana e de geração de mobilidade, é necessário ir além de diagnosticar e simular, a literatura embora não apresente explicitamente, concorda sobre a inserção de opiniões dos diversos stakeholders que compõe o ambiente de análise. Desta forma, neste trabalho é apresentada uma abordagem que pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar no monitoramento e previsão de tráfego urbano, qual seja em termos de planejamento, ou até mesmo em operação.

Vale ainda ressaltar que, considerando a literatura existente, este trabalho proporcionou uma precisão convincentemente em comparação com outras abordagens existentes. Em relação ao desempenho a abordagem proposta é computacionalmente leve, robusta e adaptável a diferentes contextos e situações, tendendo fornecer

resultados satisfatórios para a sociedade e iniciativa privada. As soluções obtidas foram testadas em diferentes cenários usando o software *Synchro Traffic* versão *trial*.

Diversos atributos (fatores e subfatores) podem ter impactado nos resultados obtidos, como a extensa linearidade da via investigada, o número total de parâmetros a serem otimizados e, a disparidade entre o número de motoristas, particulares e profissionais, e de passageiros em trânsito – por exemplo. Variações nestes atributos podem impactar expressivamente nos resultados finais, impedindo qualquer generalização dos resultados deste trabalho.

Em pesquisas futuras, operacionalizações semelhantes devem ser averiguadas num grafo onde os principais fluxos de trânsito não compartilham fases, mas concorrem pela prioridade. Outrossim, especificidades locais e particularidades devem ser consideradas, tais como atrasos pessoais dos passageiros em trânsito, algo que, de acordo com a pertinência receberia um peso especial que resultasse em operações sustentáveis.

Por fim, os resultados são de maneira satisfatória encorajadores, por contribuírem diretamente com soluções para a sociedade, gestão pública e iniciativa privada, por este motivo, esta linha de investigação deve continuar, com vista a analisar os efeitos práticos da segurança no trânsito, de análises realizadas com tamanho de amostra inadequado ou, outras questões práticas não observadas devido à ausência de opiniões de stakeholders. Outra recomendação é inserir análises que permitam avaliar o comportamento do software e dos resultados, com outras variações no modo de transporte rodoviário, como o transporte público de massa, circulação de veículos pesados, ciclovias, polos geradores de demanda (específicos e sazonais), como também em sua confrontamento com outros tipos de software.

Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Pesquisa Operacional, Logística e Transporte (POLT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)/ Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) pelo suporte acadêmico e tecnológico no projeto e desenvolvimento desse trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo suporte financeiro essencial para realização dessa pesquisa.

Referências

ALOI, A.; ALONSO, B.; BENAVENTE, J.; CORDERA, R.; ECHÁNIZ, E.; GONZÁLEZ, F.; ...; SAÑUDO, R. Effects of the COVID-19 lockdown on urban mobility: Empirical evidence from the city of Santander (Spain). **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3870, 2020.

ANASTASIADOU, K.; GAVANAS, N.; PYRGIDIS, C.; PITSIAVA-LATINOPOULOU, M. Identifying and prioritizing sustainable urban mobility barriers through a modified Delphi-AHP approach. **Sustainability**, v. 13, n. 18, p. 10386, 2021.

BASTIDA-MOLINA, P.; RIBÓ-PÉREZ, D.; GÓMEZ-NAVARRO, T.; HURTADO-PÉREZ, E. What is the problem? The obstacles to the electrification of urban mobility in Mediterranean cities. Case study of Valencia, Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 166, p. 112649, 2022.

CASTAÑEDA, K.; SÁNCHEZ, O.; HERRERA, R. F.; MEJÍA, G. Highway Planning Trends: A Bibliometric Analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5544, 2022.

CERVELLERA, C.; MACCIÒ, D.; REBORA, F. Improving the variability of urban traffic microsimulation through the calibration of generative parameter models. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, p. 1-13, 2021.

CHAUDHARY, S.; INDU, S.; CHAUDHURY, S. Video-based road traffic monitoring and prediction using dynamic Bayesian networks. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 12, n. 3, p. 169-176, 2018.

DIAO, M.; KONG, H.; ZHAO, J. Impacts of transportation network companies on urban mobility. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 6, p. 494-500, 2021.

FAN, Z.; LIU, C.; CAI, D.; YUE, S. Research on black spot identification of safety in urban traffic accidents based on machine learning method. **Safety science**, v. 118, p. 607-616, 2019.

GASKIN, D. J.; ZARE, H.; DELARMENTE, B. A. Geographic disparities in COVID-19 infections and deaths: The role of transportation. **Transport policy**, v. 102, p. 35-46, 2021.

GONÇALVES, L. A. P. J.; RIBEIRO, P. The impact of the ring road conclusion to the city of Guimarães, Portugal: Analysis of variations of traffic flows and accessibilities. **WSEAS Transactions on Environment and Development**, v. 19, p. 11-22, 2020.

GONÇALVES, W. *Analytic Hierarchy Process (AHP) para auxílio a tomada de decisões em logística: um panorama bibliométrico*. **DESAFIOS**, v. 2, p. 93-110, 2023.

GUIMARÃES, B. R.; PASQUALETTO, A.; SOUSA CUNHA, J. P. The vital necessity of urban mobility in Brazilian cities. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 9, n. 69, p. 122-134, 2021.

HAMURCU, M.; EREN, T. Transportation planning with analytic hierarchy process and goal programming. **International Advanced Researches and Engineering Journal**, v. 2, n. 2, p. 92-97, 2018.

JENA, R.; PRADHAN, B.; BEYDOUN, G.; SOFYAN, H.; AFFAN, M. Integrated model for earthquake risk assessment using neural network and analytic hierarchy process: Aceh province, Indonesia. **Geoscience Frontiers**, v. 11, n. 2, p. 613-634, 2020.

KOTAGI, P. B.; ASAITHAMBI, G. Microsimulation approach for evaluation of reversible lane operation on urban undivided roads in mixed traffic. **Transportmetrica A Transport Science**, v. 15, n. 2, p. 1613-1636, 2019.

LESSA, D. A.; LOBO, C.; CARDOSO, L. Accessibility and urban mobility by bus in Belo Horizonte/Minas Gerais–Brazil. **Journal of Transport Geography**, v. 77, p. 1-10, 2019.

LIU, L.; MILLER, H. J.; SCHEFF, J. The impacts of COVID-19 pandemic on public transit demand in the United States. **Plos one**, v. 15, n. 11, p. e0242476, 2020.

LOURO, A. M.; ZATTA, F. N.; FREITAS, R. R.; GONÇALVES, W. Microsimulation in the Assessment of Vehicle. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 9, p. 247-253, 2019.

LU, T.; BEI, X.; LIU, G. An Area-wide Traffic Signal Coordination Method Based on the Deep First Search of Intersection's Importance. **Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology**, v. 18, n. 2, p. 80-87, 2018.

MAĐZIEL, M.; CAMPISI, T.; JAWORSKI, A.; TESORIERE, G. The development of strategies to reduce exhaust emissions from passenger cars in Rzeszow city—Poland. a preliminary assessment of the results produced by the increase of e-fleet. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1046, 2021.

MARÇAL, M. F. A.; FREITAS, A. P. A.; GARCIA, F. F. Análise do Planejamento de Mobilidade Urbana na Avenida Brasil, em Anápolis/GO. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 2, p. 121-145, 2021.

ORTÚZAR, J. D. Sustainable Urban Mobility: What can be done to achieve it? **Journal of the Indian institute of science**, v. 99, n. 4, p. 683-693, 2019.

RAHIMI, A. M.; DULEBENETS, M. A.; MAZAHERI, A. Evaluation of microsimulation models for roadway segments with different functional classifications in northern Iran. **Infrastructures**, v. 6, n. 3, p. 46, 2021.

RUIZ BARGUEÑO, D.; SALOMON, V. A. P.; MARINS, F. A. S.; PALOMINOS, P.; MARRONE, L. A. State of the art review on the analytic hierarchy process and urban mobility. **Mathematics**, v. 9, n. 24, p. 3179, 2021.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International journal of services sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

VENNU, R. **A Microsimulation-based Analysis of the Price of Anarchy in Transportation Networks during an Evacuation**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Sul de Illinois Edwardsville, Edwardsville, 2021.

ZHONG, G.; ZHANG, J.; LI, L.; CHEN, X.; YANG, F.; RAN, B. Analyzing passenger travel demand related to the transportation hub inside a city area using mobile phone data. **Transportation research record**, v. 2672, n. 50, p. 23-34, 2018.