

# MODELAGEM DE MEDIDAS MITIGADORAS DE TECNOLOGIAS E FLUXO VEICULAR EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS - ESTUDO DE CASO EM JOINVILLE-SC<sup>1</sup>

Mariana Luersen Baggio<sup>2</sup>

## RESUMO

A dinâmica urbana é complexa e composta por diversos fatores, entre eles a questão do tráfego e deslocamentos, da formação de filas, atraso, estresse e custos relacionados, cuja combinação impacta diretamente na qualidade de vida e nos tempos de viagem de seus habitantes. Há também o impacto à saúde humana e à qualidade do ar, em razão das emissões advindas de fontes móveis e.g veículos. Nesse sentido, este estudo busca entender, com auxílio da ferramenta de simulação SUMO, o impacto resultante da substituição de parte da frota de veículos de passeio por ônibus urbano em uma interseção semaforizada central de Joinville, Santa Catarina. A análise demonstra que a variação nos volumes de tráfego pode auxiliar nas reduções de tempos de viagem, quantidade de emissões, fila e atrasos na rede. Constata-se também o benefício gerado pelas medidas mais restritivas adotadas em cada uma das fases PROCONVE, justificada através de percentuais de redução de emissões bastante expressivos que, em alguns cenários, mostrou potencial de redução em até 50%, comprovando sua eficiência.

**Palavras-chave:** emissões de poluentes, microsimulação, SUMO, tráfego urbano, PROCONVE.

## ABSTRACT

Urban dynamics is complex and composed of several factors, among them, traffic problems, queuing lengths, delay, stress and related costs, whose combination directly impacts the quality of life and travel times of its inhabitants. Impacts on human health and air quality are perceived, due to emissions derived from vehicles. This study seeks to understand, through the use of SUMO microsimulation software, the resultant impact from partial substitution of passenger vehicle fleet to urban buses at an intersection located in the central area of Joinville, Santa Catarina. Analyzed scenarios demonstrate that partial reduction of light vehicles fleet impacts positively in traffic parameters and calculated amount of emissions, queuing length and its duration. Generated data also shows that improvements made through PROCONVE standards' history were crucial for reduction in emissions, reaching -50% in certain scenarios.

**Keywords:** *pollutant emissions, microsimulation, SUMO, urban traffic, PROCONVE standards.*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para titulação no Curso de Graduação de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob orientação do Professor Dr. Helry Luvillany Fontenele Dias.

<sup>2</sup>Graduanda como Bacharel em Ciência e Tecnologia. E-mail: marianabaggio25@gmail.com

## 1. Introdução

Com o advento da urbanização, vinculado ao aumento da densidade populacional nas cidades e conseqüente necessidade de deslocamentos, faz-se necessário o planejamento urbano e de mobilidade, cuja qualidade influencia diretamente na dinâmica dos usuários. Dentre as conseqüências deste fenômeno, pode-se citar o aumento no fluxo de veículos, com impactos em tempos de viagem e eventuais atrasos decorrentes do fluxo veicular, bem como o aumento nos índices de acidentes. Os impactos também se estendem à saúde humana, por meio da presença de ruídos, aumento nos níveis de estresse e nos índices de poluição atmosférica (MANVILLE; TAYLOR; SHOUP, 2021).

Congestionamentos representam limitações para o ambiente urbano, pois impactam nos tempos de viagem dos usuários ao longo do dia, com o acúmulo de atrasos na rede de transportes. Em regiões metropolitanas como Los Angeles, na Califórnia, cuja vida urbana oferece oportunidades e atividades, medidas para melhorar a qualidade de vida poderiam ser alcançadas caso iniciativas para redução de densidade veicular fossem adotadas (MANVILLE; TAYLOR; SHOUP, 2021).

Dessa forma, a população seria capaz de utilizar seu dia de maneira eficiente, sem impedimentos decorrentes do atraso causado pelos fluxos de tráfego intensos e conseqüente aumento nas taxas de emissões de poluentes atmosféricos. O mesmo poderia ser verificado em cidades brasileiras de porte expressivo e densidade populacional significativa.

Ao estudar o tráfego na região de Los Angeles, nos Estados Unidos, Mondschein et. al (2015) confirmam que o impacto do fluxo de veículos também pode ser verificado na questão econômica, pois o tráfego adensado gera custos às empresas e à população, impactando em um maior custo de acesso aos locais de trabalho, alto custo para distribuição de bens e produtos, bem como aumento no consumo de combustível e nas emissões veiculares na rede de transporte.

A emissão de poluentes oriundos de fontes móveis é um dos agravantes da poluição atmosférica em regiões urbanas. A população das cidades busca viver em ambientes com boa qualidade de ar e maior segurança, de forma a melhorar a qualidade de vida. A logística urbana pode contribuir para este cenário, fazendo das cidades mais atrativas e produtivas, além de contribuir indiretamente para a redução de Gases de Efeito Estufa (GEE), bem como das emissões de derivados de MP, NO<sub>x</sub>, advindos da atividade veicular (TANIGUCHI *et al.*, 2014).

Os gases resultantes da reação de combustão trazem conseqüências que se estendem além dos problemas de mobilidade urbana e tráfego, pois impactam também a saúde humana e

ao meio ambiente. Na saúde, uma razão pela qual estes problemas ocorrem, é através da aspiração de partículas emitidas pela queima incompleta ou evaporação de combustíveis, como derivados de Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (HC). Parte deste material, de diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10  $\mu\text{m}$ , chamado Material Particulado ( $\text{MP}_{10}$ ), não é capaz de ser retido através do processo de filtração executado pelos pulmões, se instalando no aparelho respiratório, tendendo a causar problemas de saúde à vida humana (CETESB, 2021). No que tange à questão ambiental, o único produto preocupante é o Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), devido à sua classificação como Gás de Efeito Estufa (GEE) e ao impacto no aquecimento global.(CARVALHO, 2012).

Sob a ótica de diferentes ciclos de combustão disponíveis nas tecnologias veiculares utilizadas no Brasil, mais especificamente Otto para veículos leves, movidos à gasolina e diesel para veículos leves ou pesados, movidos a óleo diesel, há composições diferentes dos poluentes resultantes da exaustão para cada ciclo. O ciclo Otto emite majoritariamente CO, HC e  $\text{CO}_2$ , bem como MP e  $\text{NO}_x$  em taxas menos expressivas.(BRAUN;APPEL;SCHMAL, 2003).

O ciclo diesel, apesar de compreender todos estes poluentes, emite em menor quantidade, exceto pelo MP e  $\text{NO}_x$ , cujas concentrações são maiores, e isso ocorre em razão do motor a diesel operar em temperaturas mais altas, condição crítica para emissão de MP e  $\text{NO}_x$ .(BRAUN;APPEL;SCHMAL, 2003).

Quanto às emissões e seus impactos ao meio ambiente, entende-se que um importante fator para limitar a expansão dos efeitos do aquecimento global é a redução de emissões de gases de efeito estufa, especialmente derivados de  $\text{CO}_2$ , advindas da atividade veicular. Uma das formas possíveis de realizar este controle das emissões é através da substituição de veículos à combustão por elétricos. Embora os veículos elétricos sejam apontados como a principal fonte de energia para a propulsão de veículos no futuro, justificada pelo reforço de normativas mundiais de controle de emissões de  $\text{CO}_2$  e poluentes, os veículos à combustão devem se manter com expressiva presença a nível mundial até o ano de 2050.(HANNAPPEL,2015).

Nesse sentido, com vistas a mitigar impactos negativos relacionados ao fluxo de veículos em trechos urbanos, ferramentas de microssimulação de tráfego podem auxiliar na proposição de cenários para melhorias nas condições de tráfego e de qualidade ambiental. Estas ferramentas proporcionam ao analista uma visão realista de elementos viários, além da possibilidade de propor mudanças em um ambiente virtual, sem comprometer recursos utilizados na sua aplicação e aquisição (FERNANDES;BELTRÃO, 2018). Ademais, há a possibilidade de simular diferentes tipos de veículos, redes e fluxos viários, de forma a permitir uma análise mais clara e diversa das interações e variáveis do sistema de tráfego.

No que tange à medidas de emissões veiculares, segundo Dias *et. al* (2017), o uso de ferramentas de simulação de tráfego, integrado à modelos de emissão, pode contribuir com o planejamento urbano de transportes, de forma a aprimorar a circulação de veículos, bem como estimar as taxas de emissões de poluentes com maior nível de detalhamento.

Face ao exposto, o objetivo desta pesquisa consiste em avaliar, com o auxílio de uma ferramenta de microssimulação, o impacto nas medidas de desempenho de tráfego e emissões de poluentes derivados da atividade veicular, através da redução de fluxo, substituição modal dos usuários e aprimoramento de tecnologias veiculares em uma interseção semaforizada na região central da cidade de Joinville-SC. A análise contempla medidas de desempenho de tráfego como formação de filas, atrasos decorrentes de tráfego congestionado, tempos de viagem e velocidade média da rede, bem como estimativas de emissões dos principais poluentes atmosféricos, advindos de emissões dos poluentes de exaustão oriundas de fontes móveis, além de estimativas de dióxido de carbono.

A proposta para este estudo se dá através da identificação de elementos de tráfego na região-objeto de estudo, considerando aspectos de controle e comportamento de tráfego, bem como as emissões veiculares resultantes dos veículos no trecho. A configuração atual da via e demais cenários a serem analisados serão construídos com o auxílio de uma ferramenta de microssimulação de tráfego. A ferramenta definida para compor este estudo é o SUMO - *Simulation of Urban MObility*.

## **2. Modelos analisados**

Os modelos de emissão de tráfego podem ser baseados na velocidade média, cuja abordagem é melhor aplicada em modelos de tráfego com dados mais agregados (macroscópico) ou em modelos dinâmicos de tráfego, com dados mais desagregados, e.g microssimulação. Na abordagem microscópica, cada veículo na rede é analisado de forma individualizada, permitindo análises mais detalhadas sobre a operação veicular com a velocidade e aceleração instantâneas, cujos resultados são parâmetros de entrada em modelos estatísticos de emissão (PANIS *et.al*, 2006). Dito isso, serão apresentados os principais modelos de fluxo de tráfego e suas relações com modelos de emissão, com vistas à análise da região observada.

### **2.1 Modelos de fluxo de tráfego**

Os modelos de tráfego existentes na literatura podem ser classificados segundo aspectos

relativos à flexibilidade do tráfego. Segundo Araújo (2003), são divididos em dois modelos de fluxo: i) fluxo ininterrupto, cujas premissas são a ausência de causas fixas de atraso ou interrupções externas na corrente de tráfego. Esta representação é adequada para a representação de Freeways e rodovias rurais. ii) Há também o fluxo interrompido, cuja modelagem incorpora a existência de obstáculos físicos que causam bloqueios temporários e periódicos nos fluxos de tráfego. Um exemplo desta aplicação são redes urbanas, cuja presença de controladores de tráfego com acionamento periódico auxiliam nas contenções de fluxo da rede e alternância no direito de passagem da via.

Para este estudo, justificado pelo trecho-objeto estar localizado em área urbana, com presença de controladores de tráfego temporários e periódicos, bem como a presença de pedestres, considerou-se a classificação de fluxo interrompido.

## **2.2 Modelos de agregação de tráfego**

Além de aspectos relativos à flexibilidade de tráfego, há a classificação de tais modelos através do seu nível de representação e agregação de dados, sendo estes divididos em três níveis de agregação: macroscópico, cuja análise dos veículos da rede é feita de forma agrupada, com baixo nível de detalhamento, através da divisão da via por trechos ou seções. Esta representação consome um volume menor de dados, pois avalia as características de um grupo de veículos. Este modelo é indicado para análises que dispensam as interações veículo a veículo.(ARAÚJO, 2003).

No modelo mesoscópico, considerado de nível mediano de agregação dos dados, as interações veiculares são analisadas por pelotões de veículos. As análises neste modelo incorporam a percepção de densidade de faixa, e não as interações individuais entre os veículos.(LIEBERMANN;RATHI,1997).

Por fim, para o modelo microscópico, de maior detalhamento entre os três modelos existentes, são incorporados aspectos individuais de cada veículo, de modo que proporciona análises mais complexas e, para isto, demanda uma maior oferta de dados para seu processamento. Neste tipo de modelagem, cada veículo é analisado individualmente dentro da rede, desde o primeiro momento em que é identificado até sua chegada no destino final (MATHEW, 2019). Dada a configuração da rede e os parâmetros desejados para análise, o modelo a ser utilizado neste estudo é de natureza microscópica.

O modelo microscópico também incorpora submodelos para controlar o tráfego na rede: perseguição veicular (*car-following*), mudança de faixa (*lane-changing*) e aceitação de brechas

(*gap-acceptance*). Cada um destes submodelos possui parâmetros que os descrevem, sendo necessária sua calibração individualmente, o que resulta em uma maior complexidade de configuração.(DIAS, 2014)

Para este estudo, considerou-se análise utilizando parâmetros de modelagem mais desagregados - microscópico. Para permitir a codificação da rede e posteriores análises, se faz necessário o uso de uma ferramenta de microsimulação, no caso deste estudo, o SUMO - *Simulation of Urban Mobility*.

A modelagem microscópica de tráfego, baseada no impacto que cada veículo individualmente causa em uma rede de transportes, é uma importante ferramenta quando se trata do estudo de intervenções de tráfego e seus possíveis cenários resultantes, pois possibilita diversas alterações e uma visão confiável e factível dos cenários propostos (KRAJZEWICZ et. al, 2012).

Como vantagens da microsimulação comparado aos demais modelos, pode-se citar: alto nível de detalhamento entre as interações veiculares, informações sobre velocidade e aceleração instantânea e, possibilidade de configurar cada veículo de forma única, incorporando atributos como peso, idade da frota, tipo de veículo e suas dimensões (DIAS et al., 2017).

### **2.3 Ferramenta de modelagem microscópica**

Dado o anteriormente apresentado, justificado pelo uso das ferramentas de simulação e suas vantagens, escolheu-se a ferramenta de análise para este estudo. O SUMO - *Simulation of Urban Mobility*, desenvolvido pelo *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* (DLR) em parceria com o *Zentrum für Angewandte Informatik der Universität zu Köln* (ZAIK), um pacote de modelagem de tráfego com código aberto para simulações de redes de tráfego microscópicas.(DLR, 2021)

O SUMO permite a construção de uma simulação multimodal, com veículos de diferentes classes e configurações, com a codificação de vias exclusivas para sua operação, a exemplo de corredores exclusivos de ônibus e malha ferroviária. A aplicação também permite a avaliação do nível de desempenho das vias em interseções, através da formação de filas, velocidade, atrasos, tempo de viagem e outras medidas de desempenho, cujos dados resultantes podem auxiliar na análise para implantação de semáforos, medidas mitigadoras de interrupção de fluxo, além de análise em nível ambiental (FILHO, 2019).

Quanto às potencialidades da ferramenta, pode-se citar como vantagem sua acessibilidade ao público geral, visto que é um software de código livre e gratuito, bastando

acessar a *homepage* do SUMO para realizar seu *download* e efetivar o acesso à ferramenta. Também pode-se citar o fato do SUMO não se restringir a ser um simulador de tráfego, e sim uma série de aplicações que possibilitam a preparação e performance do simulador e.g NETEDIT, NETCONVERT e OpenStreetMaps (DLR, 2021).

Outra particularidade é a permissividade da ferramenta para variação de parâmetros, o que gera diferentes resultados para cada cenário de simulação, possibilitando diversas análises e.g índices de emissões veiculares, formação de fila e atraso. O SUMO também dispõe de uma documentação completa para sua utilização, ofertado em seu *website* próprio, com tutoriais em texto para auxiliar na construção dos arquivos de simulação.(DLR,2021)

Quanto às desvantagens, embora haja auxílio de ferramentas de edição como o NETEDIT, pode-se citar a complexidade em criar cada um dos elementos da rede de tráfego, fluxos, viagens, sinalização, faixas de pedestres e paradas de ônibus, que devem ser criados manualmente e de forma individual. O fato destes elementos serem convertidos, posteriormente em arquivos de formato XML, gera uma vulnerabilidade a erros, devido à alta complexidade do código de texto gerado para a aplicação (RONALDO;ISMAL, 2012).

Além dos modelos de emissão embutidos na ferramenta SUMO, estão também os sub-modelos microscópicos de tráfego: *Car-following*, *lane-changing* e *gap-acceptance*.

### 2.3.1 Modelo de Krauss para Car-Following

Embora haja diferentes modelos de *car-following* disponíveis dentro da ferramenta do SUMO, neste estudo será utilizado o modelo *default*, denominado Krauss, buscando analisar as saídas do simulador com sua configuração padrão para a realidade observada. Este modelo, desenvolvido por Stefan Krauss em 1997, consiste na premissa de que todos os veículos da rede trafegam na maior velocidade possível enquanto mantém níveis perfeitos de segurança. Ou seja, a configuração de Krauss é capaz de evitar colisões se o veículo-líder (EGO) da fila começar a frear dentro dos limites máximos de aceleração definidos para si e para os veículos-seguidores (BARCELÓ, 2010). O modelo para a velocidade de segurança (1) é definido por:

$$v_{safe}(t) = -\tau \cdot b + \sqrt{(\tau - b)^2 + v_{leader}(t - 1)^2 + 2 \cdot b \cdot g_{leader}(t - 1)} \quad (1)$$

#### Onde:

$v_{safe}(t)$  é a velocidade de segurança no tempo  $t$  (em m/s)

$\tau$  é o tempo de reação do veículo-líder (EGO) (em s);

$b$  é o fator máximo de desaceleração (em  $m/s^2$ );

$v_{leader}(t)$  é a velocidade do veículo líder em um tempo  $t$  (em  $m/s$ );

$g_{leader}(t)$  é a brecha (entre a frente do veículo-líder e a traseira do veículo-seguidor) num tempo  $t$  (em  $m$ ).

Considerando que o modelo de Krauss para *car-following* assume que o condutor não é capaz de manter a velocidade perfeitamente, e sim que a velocidade desenvolvida é menor que a máxima possível, este se torna um fator importante no quesito comportamental do simulador. Estas variações na velocidade criam congestionamentos momentâneos e, por consequência, atrasos na partida dos veículos da fila (BARCELÓ, 2010)

Quanto à classificação deste modelo, o modelo de Krauss pode ser classificado como um modelo Gazis-Herman-Rothery (GHR), que por definição engloba modelos que interpretam a aceleração do veículo líder como proporcional à velocidade do veículo seguidor, à diferença de velocidade entre o seguidor e líder e o espaço de headway entre o seguidor e o líder (SOUSA, 2016).

A ferramenta SUMO permite a variação do parâmetro ( $\sigma$ ) de *car-following*, relativo ao estilo de condução do motorista do veículo, compreendida no intervalo  $[0,1]$ , onde 0 representa um estilo de direção perfeito e seguro e 1 sendo a agressividade máxima do condutor. O valor padrão de  $\sigma$  para o modelo de Krauss de *car-following* do SUMO é de 0,5 (DLR, 2021).

Além do modelo comportamental para estudo de interação com veículo seguidor (*car-following*), há também modelos para analisar a interação do veículo com os demais localizados em faixas adjacentes e a permissividade de brecha para entrar na via (*lane-changing e gap-acceptance*).

### 2.3.2 Modelo LC2013 para *Lane-Changing* do SUMO

O modelo LC2013 é um dos modelos disponíveis para análise do fenômeno de *lane-changing* no SUMO. Este modelo, desenvolvido por Jakob Erdmann em 2013, opera conforme a premissa de que a velocidade do veículo é determinada majoritariamente pelo veículo que o precede (veículo-líder), que pode estar na mesma faixa de tráfego ou em outra faixa adjacente. Este modelo é calibrado de modo que o veículo a executar a mudança de faixa só realize esta manobra caso haja espaço físico na faixa de destino, sem que ofereça riscos aos demais veículos trafegando em ambas as vias, de origem e destino. Os principais parâmetros de



segurança analisados neste modelo são a velocidade e aceleração do veículo que deseja realizar a conversão de faixa, de forma que seja possível realizá-la de modo seguro, sem que haja veículo algum bloqueando este movimento (ERDMANN, 2014).

Dentre as capacidades do modelo, destacam-se: 1) considerar a decisão de mudança de faixa de um veículo em cada *step* da simulação, baseado em sua rota atual e no histórico de tráfego observado ao longo da via. 2) computar mudanças na velocidade do veículo estudado e dos veículos vizinhos, cujas variações influenciam na operação de *lane-changing*. No que diz respeito às razões para que um veículo efetue a manobra de *lane-changing*, o SUMO reconhece quatro motivações: i) Estratégica, para que possa continuar trafegando na mesma rota, ii) cooperativa, para que possa permitir a passagem de outro veículo, iii) para ganho de velocidade ao mudar para outra faixa e iv) para permanecer na via lenta (faixa da direita para o caso de vias de faixa dupla) (ERDMANN, 2014).

Além do modelo de mudança de faixa, há também outro parâmetro lateral a ser analisado, o de *Gap-Acceptance*, que estima a aceitação de brecha para possibilitar que o veículo que está esperando fora da via, possa entrar nela de forma segura, a fim de evitar colisões.

### **2.3.3 Modelo de *Gap-Acceptance***

No SUMO, de forma distinta ao modelo de *Car-Following* e *Lane-Change*, o modelo de *Gap-Acceptance* não é implementado de forma separada, e sim computado junto ao modelo de *Lane-Changing* (ERDMANN, 2014). O modelo de *Gap-Acceptance* se utiliza de funções do modelo para determinar a brecha mínima aceitável para adentrar a via, por exemplo, a função *lcAssertive*, que permite variar a motivação do condutor para aceitar brechas menores do que uma faixa considerada segura.

Dentre as principais características do ferramental SUMO, destacam-se: a sua natureza microscópica, e a possibilidade de analisar cada veículo individualmente, desde sua entrada na rede até o momento de sua saída no ambiente de simulação. No que tange à análise de emissões veiculares, a ferramenta também possibilita esta análise (ERDMANN, 2014).

### **2.3.4 Modelo de Emissões Veiculares**

A fim de medir o impacto nas emissões e interações de tráfego resultantes de variações

das tecnologias veiculares, utilizou-se o modelo dinâmico de emissões integrado à ferramenta de microssimulação. Quanto aos modelos disponíveis no SUMO, destaca-se aqui o PHEM Light, combinado ao HBEFA, tido como modelo de emissões nativo da ferramenta e base de dados de emissão padrão, respectivamente (HAUSBERGER et. al, 2009).

O PHEMLight é um modelo de emissões veiculares instantâneas, desenvolvido pela *Technische Universität zu Graz* em 1999. Este modelo é baseado em normas europeias e contempla automóveis de passageiros, veículos de carga leves e pesados, além de motocicletas. A operação do modelo consiste em estimar emissões de cada modo através de dados de aceleração e velocidade registrados durante sua trajetória.

O PHEMLight é um modelo simplificado, derivado do modelo PHEM, e foi implementado para operar de forma nativa no SUMO (HAUSBERGER; KRAJZEWICZ, 2014). Na versão 1.9.2 do SUMO, utilizada neste trabalho, os fatores de emissões utilizados, calculados através do PHEMLight, são extraídos da base HBEFA.

O *Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA, 1994)*, desenvolvido com base nas agências de proteção ambiental de países como Alemanha, Suíça e Áustria, é uma base de dados contendo fatores de emissão para todas as classes de veículos (automóveis de passeio, veículos de carga - leves e pesados, ônibus e motocicletas), sendo que cada veículo está dividido em diferentes classes, a fim de contemplar variadas situações de tráfego (HBEFA, 2021). A versão da base utilizada neste estudo é a HBEFA V3.1.

No que diz respeito às classes de emissões presentes na base de dados, têm-se: CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub> e PM<sub>x</sub>. Além disso, a base também fornece *outputs* de consumo de combustível dos veículos à combustão, bem como de consumo de energia por veículos elétricos. A unidade padrão de emissões é dada em miligramas por segundo (mg/s) (DLR,2021).

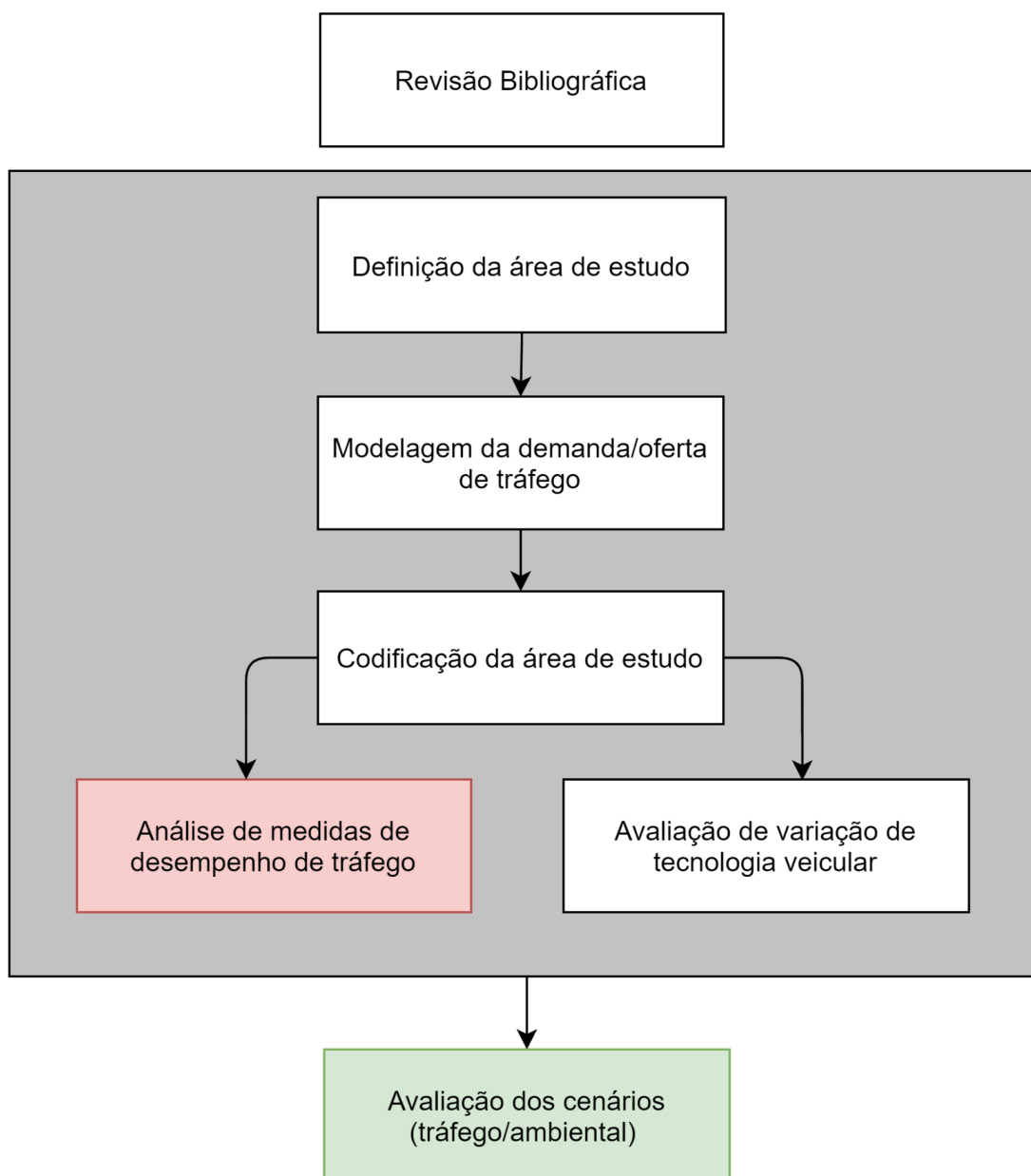
A metodologia utilizada para análise e construção da área de estudo, em conjunto com o detalhamento da ferramenta SUMO, serão descritos na seção seguinte, intitulada metodologia.

### **3. Metodologia**

Nesta seção será demonstrado o método de análise e construção deste trabalho, apresentado na Figura 1. Inicialmente, houve a definição da área de estudo e, uma vez definida, utilizou-se da tecnologia de microssimulação de tráfego, através da ferramenta SUMO, para possibilitar a construção do trecho de forma virtual. Posteriormente, com auxílio dos modelos integrados ao SUMO, será feita a análise sob o ponto de vista de diferentes medidas de desempenho, contemplando impactos no fluxo de tráfego e também nas emissões veiculares

resultantes desta atividade.

**Figura 1** - Fluxograma da metodologia aplicada



### 3.1 Definição da rede de transportes

A rede analisada neste estudo trata-se de uma interseção localizada em área central no município de Joinville, Santa Catarina, cujas proximidades concentram polos geradores de tráfego, tais como: *shopping-centers*, instituições de ensino, comércio e lazer, o que resulta em uma movimentação de veículos de volume expressivo ao longo do dia.

Dentre os maiores empreendimentos geradores de tráfego localizados na região destacam-se: Terminal Central de Joinville, Colégio dos Santos Anjos, Catedral São Francisco Xavier e Shopping Mueller. As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam informações acerca da



carro de passeio (EIONET, 2020), e um ônibus com capacidade média de 50 ocupantes (RODRIGUES et.al, 2008). Considerando-se a métrica citada, resulta-se na seguinte equivalência: 1 ônibus substitui em média 35 veículos de passeio.

### **3.2 Codificação da rede de transportes**

A rede selecionada foi codificada com auxílio da ferramenta de simulação SUMO. Os principais fatores para a escolha deste simulador foram: (i) capacidade de simular tráfego em escala microscópica, (ii) possibilidade de configuração multimodal, (iii) possibilitar a análise de modelos comportamentais de tráfego, (iv) ser uma ferramenta de acesso gratuito e, por fim (v) apresentar modelos nativos que possibilitem a variação e análise de modelos de emissão veicular.

A rede de tráfego foi construída com auxílio da ferramenta *OpenStreetMaps*, cuja construção possibilitou importar o trecho de estudo em formato XML. Optou-se por importar a rede desta forma em razão do nível de detalhamento e complexidade que o arquivo-base oferecia.

Na sequência, com o auxílio da ferramenta NETEDIT, acessou-se a rede de estudo e iniciou-se a etapa de ajuste da rede, contemplando aspectos como: conversões permitidas, indicação de faixas exclusivas de ônibus, localização de faixas de pedestres, correção de número de faixas de tráfego e largura das faixas.

Nesta etapa, ainda auxiliada pela ferramenta NETEDIT, foram incluídos os equipamentos de semáforo. Após isso, configurou-se os estágios semaforicos para cada uma das aproximações, obtendo-se, assim, o tempo total de ciclo da interseção semaforizada.

### **3.3 Configuração dos fluxos de tráfego**

Estima-se que a frota veicular na cidade de Joinville-SC seja de 439.615 veículos para 597.658 habitantes (IBGE, 2020), o que configura uma densidade veicular de 1,35 habitantes/veículo. Este índice, comparado a grandes cidades como São Paulo, com população de 12.325.232 habitantes e 8.761.213 veículos (índice de 1.41 habitantes/veículo), demonstra que Joinville, apesar de mais enxuta, possui uma concentração veicular bastante expressiva.

Uma vez configurada a rede, iniciou-se a configuração dos volumes de tráfego. Os dados de tráfego considerados na pesquisa foram obtidos através de uma matriz Origem-Destino (OD), contemplando todos os movimentos possíveis no cruzamento de estudo

(Quadro 1), bem como as contagens veiculares correspondentes a cada modo de transporte presente no intervalo analisado (Quadro 2).

**Quadro 1:** Identificação dos movimentos possíveis no cruzamento

<b>Movimento</b>	<b>Origem - Destino</b>
AB	R. Nove de março - Leste → Av. Juscelino Kubitschek - Sul
AD	R. Nove de março - Leste → R. Doutor João Colin - Norte
BA	Av. Juscelino Kubitschek - Sul → R. Nove de março - Leste
BD	Av. Juscelino Kubitschek - Sul → R. Doutor João Colin - Norte
CA	R. Nove de março - Oeste → R. Nove de março - Leste
CB	R. Nove de março - Oeste → Av. Juscelino Kubitschek - Sul
CD	R. Nove de março - Oeste → R. Doutor João Colin - Norte

Os fluxos de tráfego considerados referem-se à hora pico da manhã, momento de maior fluxo de tráfego durante o período matutino. Para esta análise, foi considerado o intervalo de maior movimento dentro da hora pico, estimado entre 7:00:00h e 7:59:59h, obtendo-se, portanto, a seguinte matriz veicular:

**Quadro 2:** Contagem de automóveis na interseção durante o período de pico considerado.

<b>Intervalo</b>	<b>Movimento</b>	<b>Motocicletas</b>	<b>Automóveis</b>	<b>Ônibus</b>	<b>Caminhões leves</b>
<b>7:00:00h à 7:59:59h</b>	AB	0	0	41	0
	AD	0	1	35	0
	BA	1	11	56	2
	BD	219	843	14	15
	CA	5	149	26	2
	CB	29	377	12	2
	CD	15	231	1	2
	<b>Totais</b>	<b>269</b>	<b>1612</b>	<b>185</b>	<b>23</b>

### 3.4 Codificação da simulação

O documento de simulação do SUMO demanda duas entradas para seu funcionamento: um arquivo referente à rede de tráfego e outro referente à demanda de tráfego, resultando em um terceiro arquivo, de formato específico para o SUMO (.sumocfg).

Neste arquivo de simulação, o tempo total da simulação deve ser definido. O tempo de simulação no SUMO é definido em segundos. Dessa forma, para simular o intervalo de 1 hora,

convertidos em segundos, têm-se um período de simulação de 3600 segundos.

Entretanto, é necessário considerar um período de aquecimento na simulação, denominado *warm-up time* (tempo de aquecimento), a fim de garantir que a simulação inicie com veículos nas aproximações, excluindo-se o tempo de deslocamento destes veículos desde a entrada no ambiente de simulação até sua chegada na aproximação.

Dessa forma, baseada na codificação de Kim et. al (2020), considerou-se um *warm-up time* de 15 minutos (900 segundos), resultando assim, em um tempo total de simulação de 3600 segundos: 900 de *warm-up* + 2700 de simulação efetiva.

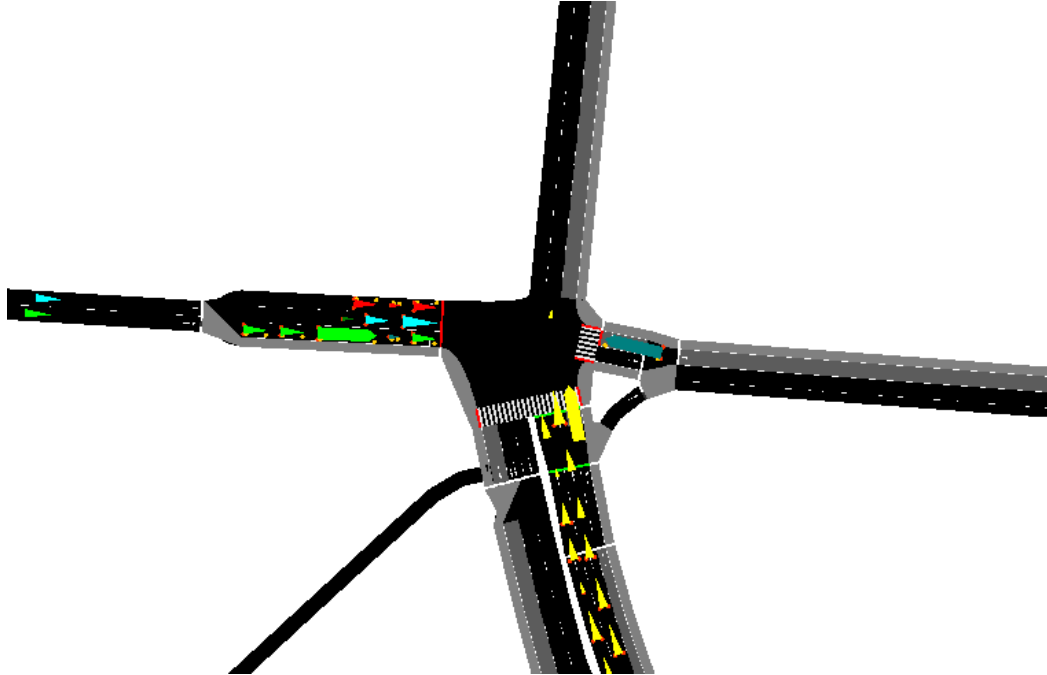
Para a configuração da rede, desconsiderou-se a presença de pedestres, visto que os cenários analisados contemplam análises mais voltadas ao tráfego e às emissões. Entretanto, considerou-se o tempo de travessia dos pedestres a cada ciclo do plano semaforico vigente (tabela 1).

**Tabela 1:** Plano semaforico do cruzamento

<b>Estágios</b>	<b>Tempo (s)</b>
Avenida Juscelino Kubitschek	28
Travessia de Pedestres (geral)	14
Rua 9 de Março	23
Corredor exclusivo de ônibus da Rua 9 de Março	20
Total	85

A Figura 3 apresenta uma demonstração do ambiente de simulação da ferramenta SUMO. Nela podem-se observar as aproximações do cruzamento, bem como os diferentes modos de transporte considerados, cuja representação é feita por diferentes formas. Cada fluxo e rota correspondente incluídos na simulação foram configurados com cores distintas, a fim de facilitar o ajuste e auxiliar na acuracidade dos dados simulados.

**Figura 3:** Área de estudo representada no ambiente de simulação da ferramenta SUMO.



### **3.5 Análise de emissões**

#### **3.5.1 Normas/Tecnologias de emissão de poluentes**

Os poluentes atmosféricos emitidos pelos veículos através da queima incompleta e evaporação de combustíveis são nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. No Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) foi instituído em 1986, com o objetivo de reduzir os níveis de emissões de poluentes por veículos automotores, incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional na engenharia de automóveis e medições de poluentes, bem como a promoção de melhorias nas características técnicas e químicas dos combustíveis, visando a redução de poluentes emitidos através da sua queima.(CETESB, 2021)

O PROCONVE é composto por várias fases, cujas normas e requerimentos tornaram-se mais rigorosos ao longo do tempo, a fim de incentivar o desenvolvimento de tecnologia veicular e, assim, auxiliar na redução dos limites de emissão de poluentes por veículos leves e pesados. Estas fases são baseadas nas normas EURO, cuja implementação na Europa data de 1991. Ainda dentro das divisões da norma, são estabelecidos padrões para para diferentes tipos de veículos comercializados no mercado brasileiro, a destacar veículos leves (L), compreendidos por automóveis de passageiros e veículos leves comerciais, e veículos pesados (P), compreendidos por caminhões e ônibus.(CETESB, 2021).



Para fins de adaptação, o quadro 3 demonstra a equivalência realizada entre a norma original Euro e as fases PROCONVE operantes no cenário brasileiro.

**Quadro 3:** Equivalência entre norma EURO e PROCONVE (adaptado de Dias, 2018)

<b>EURO Norma</b>	<b>PROCONVE Veículos Pesados</b>	<b>PROCONVE Veículos Leves</b>
Pre-EURO	P1 (1989)	PP (1982)
Pre-EURO	P2 (1996)	L1 (1988)
EURO I (1991)	P3 (2000)	L2 (1992)
EURO II (1996)	P4 (2002)	L3 (1997)
EURO III (2000)	P5 (2006)	L4 (2005)
EURO IV (2006)	P6 (não utilizada)	L5 (2009)
EURO V (2008)	P7 (2012)	L6 (2015)
EURO VI (2014)	P8 (2023 - previsão)	

A variação entre as fases PROCONVE diz respeito à tecnologia veicular disponível no momento de implementação de cada uma delas. Para permitir a adequação ao índice de emissões permitidos pelo PROCONVE, houve uma série de modificações a nível tecnológico nas diferentes classes veiculares compreendidas pelo programa, datadas de meados de 1990.

Embora a norma P8 já exista, equivalente à EURO VI vigente no cenário europeu, ela não foi utilizada neste trabalho por ainda não estar vigente no cenário brasileiro. Conforme resolução emitida pelo Diário Oficial da União em 2018, sua data para entrar em vigor é 1º de Janeiro de 2023.

Para os veículos leves operando em Ciclo Otto, movidos à gasolina, uma significativa evolução a ser destacada é a substituição do carburador, dispositivo utilizado para a mistura de ar e combustível, por injeção eletrônica. Esta substituição, em conjunto com a ignição eletrônica, proporciona um maior controle da queima da mistura ar/combustível ao dosar o volume de combustível disponibilizado na câmara de combustão do motor. Esta substituição permite o uso do catalisador, equipamento que trata os gases de exaustão, cuja presença proporciona a redução de emissões veiculares (CETESB, 2021).

Em relação aos veículos pesados, operando em Ciclo diesel, movidos à diesel, a

adequação veio de forma mais lenta, ocorrendo apenas em meados do ano 2000, com a implementação de injeção de diesel com controle eletrônico e, em 2012, adotou-se também o uso de catalisadores para esta categoria. Este equipamento foi responsável pela redução do principal poluente emitido por veículos a diesel: o NO<sub>x</sub> (CETESB, 2021).

Outro ponto a ser destacado é a composição das emissões geradas pelos diferentes tipos de combustíveis, neste caso, gasolina e diesel. No Ciclo Otto, alimentado por gasolina, quando em contato com o ar atmosférico, gera uma centelha que reage nas velas do veículo e reage com o combustível, dando partida ao motor. Esta temperatura de combustão é um pouco maior do que a temperatura ambiente do ar. Já no Ciclo diesel, a mistura ar+diesel, contida dentro do cilindro, é comprimida pelo pistão, e a inflamação espontânea, resultante da pressão, é o que dá partida ao motor. (CARVALHO, 2011).

Embora os produtos resultantes da exaustão de combustível por ambos os ciclos-motores sejam de composição similar, há uma discrepância entre as quantidades emitidas em cada um. Tomando como exemplo o Material Particulado: para motores operantes em Ciclo diesel, em razão da elevada temperatura de combustão e da queima incompleta de combustíveis próximo ao bico do injetor (MMA, 2020), o teor de MP emitido é da ordem de 50 a 100 vezes maior do que motores operantes em ciclo Otto. (QUIRINO, 2020).

### **3.5.2 Variações da norma/ tecnologias veiculares**

A fim de simular uma variedade de cenários, serão consideradas as fases PROCONVE P1, P4 e P7, devidamente adaptadas da norma EURO, para emissões de automóveis e veículos pesados.

A ferramenta SUMO, além de permitir a configuração multimodal, também permite a alteração das classes de emissão veicular para cada tipo de veículo. Dessa forma, espera-se uma maior discrepância entre os resultados de cada fase, principalmente no que tange à emissões veiculares, visto que a tecnologia veicular sofreu evoluções e os limites de emissões tornaram-se mais restritivos ao longo do tempo.

É importante ressaltar que para a norma EURO, na qual o modelo HBEFA 3.1 de emissões do SUMO foi baseado, não foram encontrados dados de emissão para motocicletas e, embora este modo de transporte seja de forte presença e volume na realidade brasileira, e também de Joinville, optou-se por configurar como um veículo livre de emissões, tornando-se assim, uma limitação para este estudo.

Para a classe veicular de ônibus, visto que a versão da ferramenta SUMO não permite a

variação entre classes de emissão EURO para este tipo de veículo, optou-se por considerá-lo como um veículo pesado (HDV), movido à diesel, possibilitando assim a variação das normas EURO para cada cenário construído. No que diz respeito aos dados de emissão gerados, têm-se conhecimento de que a adaptação da classe veicular pode gerar discrepâncias nestes *outputs*.

Com o objetivo de mensurar o impacto de variações de fluxo de tráfego e tecnologia veicular nos índices de emissão da rede estudada, propuseram-se cenários contemplando a substituição de veículos de passageiros por ônibus sob o ponto de vista do número de passageiros transportados.

A métrica utilizada para as reduções foi feita em percentual. Foram realizadas diversas rodadas de simulação, nas quais propôs-se a redução de volume de carros de passeio, e substituição equivalente por ônibus, de modo que cada rodada possuísse um volume 10% menor de veículos de passeio do que a anterior em cada aproximação, ou seja: iniciou-se com o cenário original, com 100% do volume revelado através das contagens e, posteriormente, reduziu-se 10% do volume a cada rodada, aumentando proporcionalmente à quantidade dos ônibus, até o limite de redução de 50% do volume de veículos de passeio de cada aproximação.

A fim de cobrir uma diversidade de cenários, optou-se por utilizar variações na tecnologia veicular e percentuais veiculares na simulação, demonstrados no quadro 4.

**Quadro 4:** Cenários de variação de norma e volumes veiculares

% VEICULAR	GERAÇÃO PROCONVE		
100.00%	P1/L1	P4/L3	P7/L6
90.00%	P1/L1	P4/L3	P7/L6
80.00%	P1/L1	P4/L3	P7/L6
70.00%	P1/L1	P4/L3	P7/L6
60.00%	P1/L1	P4/L3	P7/L6
50.00%	P1/L1	P4/L3	P7/L6

### 3.6 Tratamento dos dados simulados

Uma vez construídos os cenários de simulação, com as devidas variações de tecnologia veicular e ajustes nos fluxos de tráfego, extraiu-se os dados de simulação através da inclusão de comandos de saída no arquivo de configuração do SUMO, sendo *Emission Output* para a análise de emissões, *Queue Output* para análises de formação de fila e *TripInfo e StatisticOutput* para medidas de atraso na rede. Uma vez extraídos, estes dados foram analisados com auxílio de uma planilha excel, cuja interface possibilitou análises quantitativas e

comparativas.

Outro ponto importante a ser citado é a presença de algumas combinações falhas entre tecnologia veicular e poluente analisado (DLR, 2021). Durante o tratamento dos dados, foram encontradas inconsistências nas seguintes combinações: PC\_G\_EU0 + NO<sub>x</sub> e PC\_G\_EU2 + HC, cujo resultado de emissões simuladas foi igual a zero e, portanto, desconsideradas na análise do poluente correspondente.

#### 4. Análise de resultados

A seção de resultados contempla o histórico de cenários propostas sob duas óticas: (i) do ponto de vista do tráfego, ao variar o parâmetro sigma de *car-following*, que diz respeito à agressividade do condutor, e também os volumes veiculares, a fim de identificar sua influência nas medidas de atraso e impacto no tempo de fila da rede como um todo, e (ii) sob o ponto de vista da evolução de tecnologia veicular, variando-se a fase de normas PROCONVE e mensurando o impacto destas evoluções nos índices de emissão realizadas por fontes móveis.

Para permitir uma análise quantitativa, há também o estudo de impacto sob o ponto de vista da transferência modal ao propor cenários contemplando variações no volume veicular, de forma que transformou-se parte do transporte realizado por veículos privados, aqui considerados como veículos individuais de passeio, para o público, operado por ônibus. É importante observar que não houve interferência nos volumes de passageiros transportados, apenas uma proposição de mudança no modo pelos quais eles se locomoveram.

Ao decorrer da seção, serão demonstrados diferentes cenários, contemplando análises de formação de fila e atraso para a rede como um todo, bem com os índices de emissão veicular encontrados para cada geração de tecnologia veicular utilizada.

##### 4.1 Cenário Base

Partiu-se do cenário base, que contempla os volumes de tráfego obtidos através da planilha de contagens fornecida (Quadro 1), representando um total de 100% do volume de tráfego da rede. Este cenário foi configurado a existir como um padrão para as demais variações propostas, pois foi calibrado com uma classe de emissão entendida como média para a rede, que neste estudo contempla apenas três classes: uma antiga (P1/L1), a média (P4/L3) e a nova (P7/L6).

O quadro 5 fornece informações acerca dos parâmetros considerados para construção do

cenário base, sendo eles: sigma de *car-following* em valor *default* (0,5), 100% do volume de tráfego revelado através da contagens (quadro 1) e a classe de emissão considerada para este cenário.

**Quadro 5:** Parâmetros de calibração do cenário original.

Classe de Emissão	Volume de tráfego	Sigma de <i>Car-Following</i>
P4/L3	100%	0,5

Uma vez configurado, extraiu-se as métricas referentes às emissões veiculares resultantes por cada modo, excetuando-se as medidas de emissões para motocicletas, entendidas como uma limitação, conforme anteriormente citado. Quanto aos ônibus e caminhões (classe HDV), expostos no quadro 5, a desagregação de parâmetros de emissão foi realizada em razão do limite encontrado acerca de variação de tecnologias da classe de ônibus no ambiente do SUMO, conforme exposição realizada na seção de métodos (3).

**Quadro 6:** Emissão veicular representada por cada modo de transporte presente e poluentes gerados por esta atividade.

		<b>P4 ÔNIBUS</b>	<b>P4 CAMINHÃO LEVE</b>	<b>L3 CARRO DE PASSEIO</b>
<b>Agente poluente *10<sup>6</sup> (g/h)</b>	<b>CO</b>	0.614	0.076	35.610
	<b>CO2</b>	547.956	68.124	1074.409
	<b>HC</b>	0.169	0.021	0.000
	<b>MP</b>	0.080	0.010	0.150
	<b>NOX</b>	5.781	0.719	1.466

Para os parâmetros relacionados à atraso (quadro 7), tempo e tamanho de fila (quadro 8), considerou-se todos os modos presentes da rede, incluindo motocicletas. Desta forma, obtiveram-se os seguintes resultados:

**Quadro 7:** Atraso total na rede

Quantidade de Veículos	Tempo de espera por veículo (s)	Atraso total por veículo (s)
2089	17.66	29.34

**Quadro 8:** Tempo e tamanho de fila da rede.

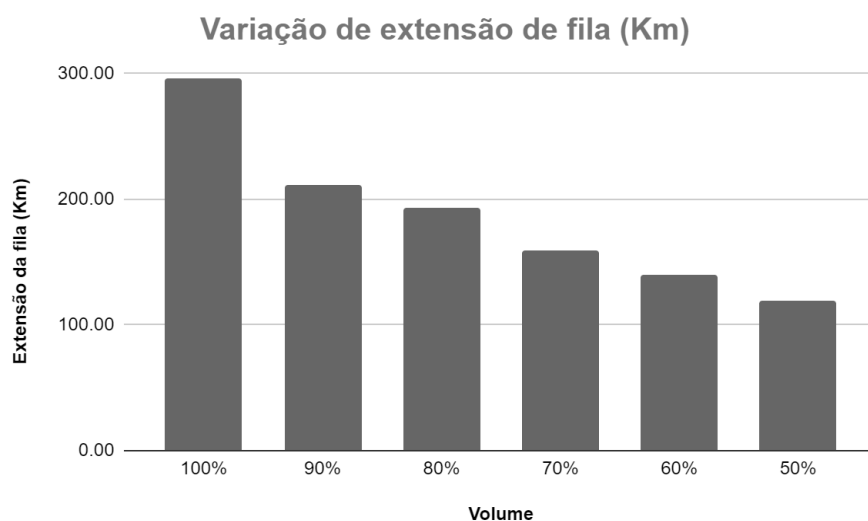
Classe de emissão	Tamanho da fila (Km)	Tempo de fila (h)
P4/L3	296.85	105.27

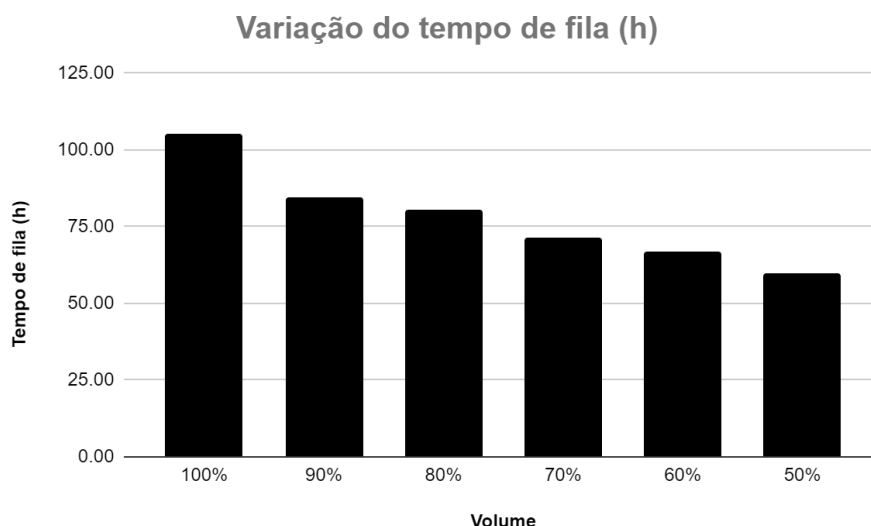
É importante ressaltar que os parâmetros de emissão do cenário original não contemplam as medidas para motocicletas que, conforme mencionado anteriormente, não foram utilizadas por conta de uma limitação encontrada no processo de classificação dos dados dentro da ferramenta de simulação. Sendo assim, a quantidade de veículos considerados nos cenários de emissão é de 1820 veículos, e não 2089 (quadro 1), pois excluem-se 269 motocicletas desta contagem.

Para os parâmetros de tráfego, a contagem permanece inalterada, contemplando o total de 2089 veículos.

#### 4.1.1 Formação e extensão de fila

Para os parâmetros de extensão (Figura 4a) e formação (Figura 4b) de fila, considerou-se cenários de substituição e compensação nos modos de ônibus e carros, reduzindo-se 10% do volume inicial referente aos carros em cada aproximação, a cada rodada reduzida, até alcançar a redução máxima proposta de 50% do volume total de veículos leves, resultando nas seguintes estimativas:

**Figura 4a:** Gráfico indicativo de variação de extensão de fila.

**Figura 4b:** Gráfico indicativo de variação de tempo de fila.

O quadro 9 demonstra de forma quantitativa o impacto das reduções em tempo e tamanho de fila através da proposição de cenários de transferência modal para a rede como um todo. Pode-se dizer, então, que o volume veicular e os tempos e tamanho de fila são diretamente proporcionais: quanto maior o volume de veículos na via, maiores os tempos e tamanho de fila gerados.

Em proporção, os cenários extremos (50%-100%) demonstram que as reduções na extensão de fila são possíveis em até 59,75% para os volumes propostos. Já para os tempos de fila, a redução possível calculada é de cerca de 42,99%.

**Quadro 9:** Impacto da variação no volume dos modais e impacto na formação de fila.

Volume	Extensão da fila (Km)	Tempo de fila (h)
100%	296.85	105.27
90%	211.52	84.71
80%	192.84	80.63
70%	159.59	71.63
60%	139.34	66.94
50%	119.46	60.01

#### 4.1.2 Atraso na rede

Conforme mencionado anteriormente, o atraso é uma medida de desempenho essencial a ser analisada entre os cenários de redução propostos. É importante observar que os tempos de

ciclo semafórico, que também poderiam impactar neste parâmetro, não sofreram alterações, apenas os fluxos veiculares.

Na quadro 10 é possível perceber o comportamento do atraso ao longo dos cenários de substituição de fluxo veicular, de forma que fica clara a redução nos tempos médios de atraso na rede, diretamente proporcional ao fluxo, com uma redução calculada em 30% entre os cenários extremos (50%-100%). Para a análise de atraso, vale ressaltar que os ônibus operam em velocidades mais lentas, se comparados às velocidades de carros, resultando em uma redução de atraso menos expressiva.

**Quadro 10:** Atraso médio na rede conforme variação de volumes veiculares.

<b>Volume</b>	<b>Atraso (s)</b>
100%	40.86
90%	33.91
80%	32.61
70%	30.83
60%	30.03
50%	28.57

#### 4.1.3 Velocidade média e tempo de viagem

Para as velocidades médias encontradas, percebe-se um comportamento diferente das demais medidas de desempenho de tráfego consideradas, de modo que o volume veicular considerado no cenário é inversamente proporcional às medidas encontradas: quanto menor o volume veicular, maior a velocidade média. A variação de velocidade média, e consequente aumento, calculada entre o cenário com 100% e 50% do volume é de 13,92%.

Em relação aos tempos de viagem, percebe-se que este parâmetro é diretamente proporcional aos volumes veiculares presentes na rede (quadro 11). A redução encontrada entre os dois extremos de volumes foi de 13,93%.

**Quadro 11:** Velocidade média e tempo de viagem conforme variação de volumes veiculares

<b>Volume</b>	<b>Velocidade média (Km/h)</b>	<b>Tempo de Viagem (s)</b>
100%	26.50	81.12
90%	29.27	74.29
80%	29.88	73.12
70%	30.71	71.61
60%	31.18	70.97
50%	31.90	69.82



#### 4.1.4 Variação de sigma de *Car-Following*

A fim de gerar cenários contemplando variação no comportamento e estilo de direção do condutor (quadro 12), através da variação do parâmetro sigma de *car-following*, onde 0 demonstra níveis perfeitos de segurança e 1 a agressividade máxima do condutor, obtiveram-se os seguintes resultados:

**Quadro 12:** variação de sigma de car-following

Sigma de Car-Following	Tempo de fila (H)
0	91.74
0,5	105.27
1	169.31

Ao variar o sigma de *car-following*, percebe-se um impacto bastante significativo, principalmente entre os níveis mediano (0,5) e de agressividade máxima (1), calculado em 37,82%, contra 12,85% calculado entre os cenários de segurança perfeita (0) e *default* (0,5).

Pode-se associar este impacto a alguns fenômenos de tráfego, a exemplo da formação de ondas de choque (*traffic-shockwaves*), que podem gerar congestionamentos momentâneos na rede sem causa física aparente, e sim em decorrência das frenagens bruscas ou espaçamentos muito reduzidos entre os veículos, realizados durante o percurso. O impacto também está diretamente relacionado à percepção de segurança do condutor. A semaforização do cruzamento é impeditiva para que a agressividade influencie na execução da rota, pois, ao contrário de cruzamentos em preferência ou com presença de rotatória, não há controle sobre o tempo de espera.

## 4.2 Emissões

A análise de emissões deste trabalho está diretamente ligada à variação de dois parâmetros principais: volumes veiculares e classe de emissão veicular considerada no cenário simulado

Considerou-se a variação de classes PROCONVE para veículos leves e pesados - P1, P4 P7 para pesados e L1, L3, L6 para leves (EU\_0, EU\_2 e EU\_5 no SUMO). Cada classe de emissão sofreu variações nos volumes veiculares, a fim de possibilitar a variação percentual de carros e posterior substituição por ônibus, de forma gradativa, e entendimento deste impacto no fluxo e nas emissões. Iniciou-se as reduções a partir do volume de 100%, reduzindo para 90%,

80%, 70%, 60% e, por fim, ao percentual mínimo de 50% da frota de veículos leves da contagem original.

Nesta seção, cada resíduo de emissão será avaliado de forma individualizada, a fim de possibilitar as comparações do mesmo agente entre diferentes fases PROCONVE e contribuir para a demonstração do impacto da tecnologia veicular e variação de volumes na emissão destes agentes.

#### 4.2.1 Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub>

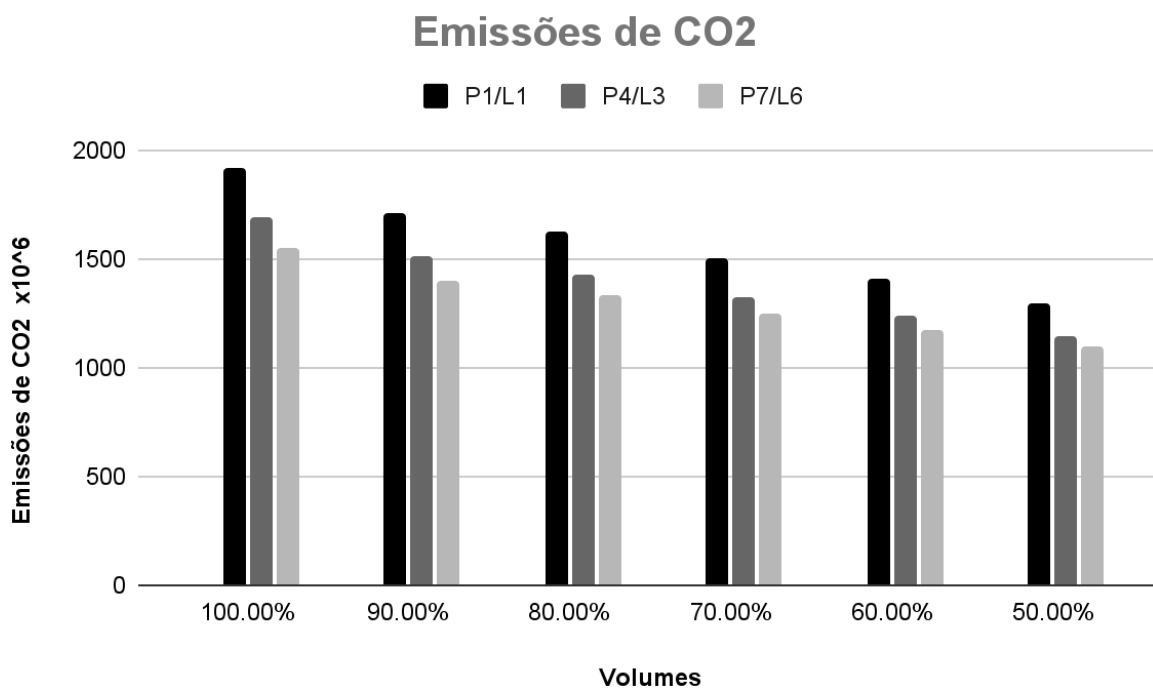
As emissões de Dióxido de Carbono(CO<sub>2</sub>) derivadas da atividade humana são de grande impacto no cenário biológico e atmosférico. Este resíduo, classificado como um Gás de Efeito Estufa (GEE), é de fundamental análise pois têm-se percebido um aumento significativo de suas concentrações na atmosfera, e, cerca de 80% destas emissões são derivadas da queima de combustíveis fósseis. (SCHMALENSEE et. al, 1998).

Nos cenários analisados, percebeu-se que a emissão mais expressiva de CO<sub>2</sub> é dada por veículos operando em ciclo diesel, neste caso, veículos pesados - ônibus e caminhões. Isto ocorre em razão do combustível diesel operar em temperaturas mais altas e, assim, gerar quantidades maiores de CO<sub>2</sub>.

Em relação às proposições de variação entre as normas PROCONVE, percebe-se uma redução significativa de emissões de CO<sub>2</sub> ao longo das fases (quadro 13, Figura 6), cuja ocorrência é justificada em razão das tecnologias mais atuais empregadas.

**Quadro 13:** Emissões de CO<sub>2</sub> na rede  
CO<sub>2</sub>

	100.00%	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
P1/L1	1915.02	1714.20	1623.17	1504.44	1407.31	1298.80
P4/L3	1690.49	1512.83	1431.50	1326.85	1240.58	1142.91
P7/L6	1554.16	1403.03	1336.45	1248.88	1177.83	1095.49

**Figura 6:** Gráfico comparativo de emissões de CO<sub>2</sub>.

Na figura 6 são demonstradas as quantidades de emissões (eixo Y) para cada proporção veicular adotada (eixo X).

Para o cenário de emissões de CO<sub>2</sub>, apesar da substituição de volumes se mostrar uma alternativa positiva para redução nos índices globais da rede, estes ainda mantêm-se em uma ordem de grandeza bastante expressiva. Isto ocorre em razão do aumento de unidades veiculares movidas a diesel, pois estas emitem mais CO<sub>2</sub> se comparadas às emissões por gasolina. Ou seja, a redução de veículos leves é, sim, impactante nos índices, no entanto, parte dela é compensada nas emissões geradas pelos novos veículos a diesel inseridos na rede.

É importante ressaltar que as tecnologias para redução de emissões veiculares devem estar atreladas ao incentivo de uso do transporte coletivo pois, ainda que a substituição do veículo individual pelo ônibus seja benéfica e auxilie nas reduções, os ônibus são agentes poluentes do tráfego, responsáveis por uma parcela significativa das emissões.

#### 4.2.2 Monóxido de Carbono - CO

O Monóxido de Carbono é um gás inodoro e tóxico, produto da combustão incompleta de combustíveis fósseis e, quando inalado, reduz a capacidade do sangue de transportar oxigênio, podendo causar asfixia. Além disso, elevadas concentrações de CO podem aumentar os riscos de doenças cardiovasculares e psicomotoras. (CETESB, 2010).

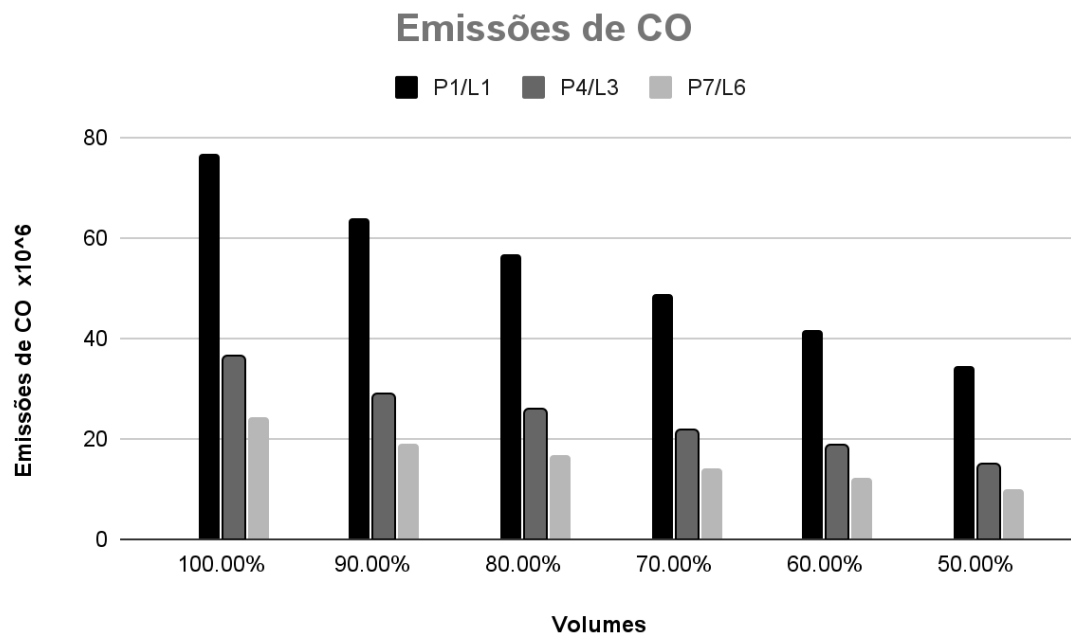
No que tange à análise de tráfego para os cenários considerados (quadro 14, Figura 7),

percebe-se uma redução expressiva, principalmente entre as fases P1/L1 e P4/L3 - cerca de 52,7%, e as fases P1/L1 e P7/L6 - 68,6%. A justificativa para esta redução está relacionada à evolução de tecnologias veiculares e controle mais rigoroso dos índices permitidos para emissão deste resíduo ao longo das fases, bem como a qualidade do combustível utilizado.

**Quadro 14:** Emissões de CO na rede para cada percentual de tráfego considerado.

	CO					
	100.00%	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
P1/L1	76.81	64.00	56.91	48.90	41.68	34.53
P4/L3	36.30	28.96	25.70	21.78	18.49	15.04
P7/L6	24.13	18.89	16.80	14.20	12.09	9.83

**Figura 7:** Gráfico comparativo de emissões de CO emitidas pelas fases PROCONVE consideradas para cada percentual adotado.



#### 4.2.3 Hidrocarbonetos - HC

Os hidrocarbonetos são a parcela de combustível parcialmente queimado, expelido pelo motor ou como vapor de combustível emitido por diversos pontos do veículo, bem como durante o processo de abastecimento (CETESB, 2021).

Para o cenário de hidrocarbonetos gerado neste estudo (quadro 15, Figura 8), e em razão da limitação anteriormente citada em relação à combinação PC\_G\_EU2, desconsiderou-se as estimativas desta fase (P4/L3) para as análises correspondentes.

Em P1/L1 para P7/L6, comparando as estimativas de emissão para o volume de 100%,

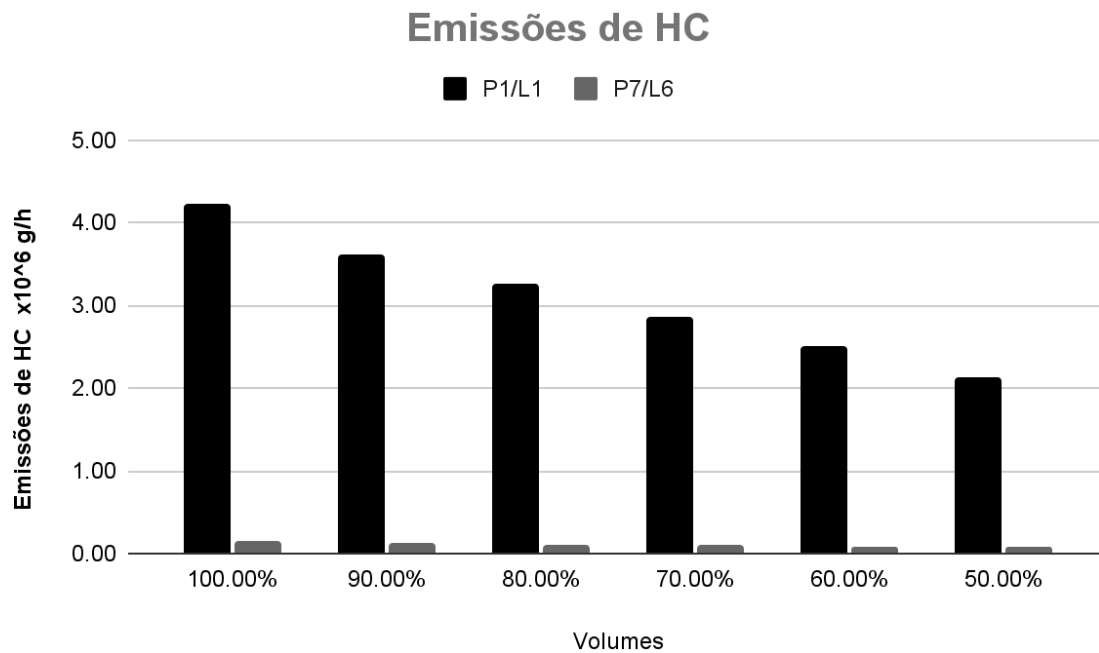
calculou-se uma redução de 96,6% nos montantes emitidos, em decorrência da eficiência expressiva da mudança de veículos com injeção de combustível a carburador para veículos com injeção eletrônica.

Para a fase P7, comparando o volume de 50% contra 100%, percebe-se que houve redução de 53,33% nas estimativas de emissão de HC. (quadro 15)

**Quadro 15 - Emissões de HC na rede para cada percentual de tráfego considerado**

	HC					
	100.00%	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
P1/L1	4.22	3.61	3.27	2.87	2.50	2.13
P7/L6	0.15	0.12	0.11	0.10	0.09	0.07

**Figura 8:** Gráfico comparativo de emissões de HC emitidas pelas fases PROCONVE consideradas para cada percentual adotado.



#### 4.2.4 Material Particulado - MP

Segundo a agência de proteção ambiental dos EUA, a *Environmental Protection Agency* - EPA, o material particulado é definido como qualquer massa que é coletada em um filtro de exaustão do veículo/máquina após um determinado ciclo de operação. Embora este material particulado seja emitido tanto por veículos movidos a gasolina quanto a diesel, o segundo gera maiores quantidades em massa deste material. (MMA, 2020)

Abaixo são apresentados os montantes de emissão de material particulado encontrados para cada percentual de tráfego adotado e fase PROCONVE correspondente (quadro 16). Na

Figura 8, têm-se uma representação visual desses montantes, de forma que fica ainda mais clara a redução expressiva de emissão de MP nas fases subsequentes.

**Quadro 16** - Emissões de MP na rede para cada percentual de tráfego considerado

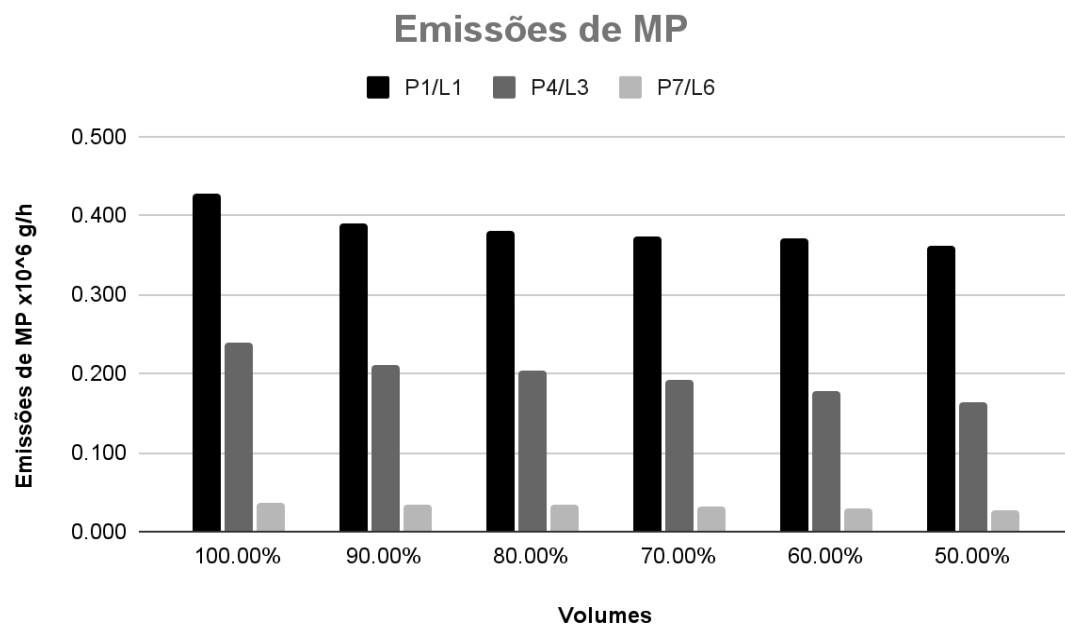
	MP					
	100.00%	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
P1/L1	0.429	0.390	0.381	0.374	0.372	0.361
P4/L3	0.240	0.210	0.204	0.192	0.178	0.165
P7/L6	0.037	0.034	0.033	0.031	0.029	0.027

Para os cenários adotados, percebe-se uma redução bastante expressiva entre as fases consideradas (Figura 8), principalmente entre P1/L1 e P7/L6, cuja redução no material particulado foi cerca de 91,37%.

No que diz respeito ao impacto de flutuação dos volumes veiculares, combinado à tecnologias desenvolvidas, ao comparar os cenários P1/L1 - 100% e P7/L6 - 50%, encontrou-se uma redução ainda maior, de 93,71%.

Dentre as tecnologias fundamentais a serem citadas, cuja adoção influenciou diretamente nestas reduções, têm-se: o uso de filtros manga, catalisadores de oxidação e aditivos no combustível.

**Figura 8:** Gráfico comparativo de emissões de MP emitidas pelas fases PROCONVE consideradas para cada percentual adotado.



#### 4.2.5 Óxido de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>

Óxidos de nitrogênio são formados quando ocorre a queima de combustível em altas

temperaturas e pressão, o que ocasiona um rearranjo de  $N_2$  e  $O_2$  atmosférico, que resultam em  $NO_x$ . Seu impacto à saúde humana é causa, principalmente, de problemas respiratórios.

No que diz respeito ao ciclo motor empregado, quando comparadas as taxas de emissão por veículos ciclo diesel e Otto, percebe-se uma maior concentração de  $NO_x$  em diesel, e isso ocorre em razão da temperatura de combustão do diesel se dar em temperaturas maiores, o que causa a oxidação de nitrogênio a alta temperatura.

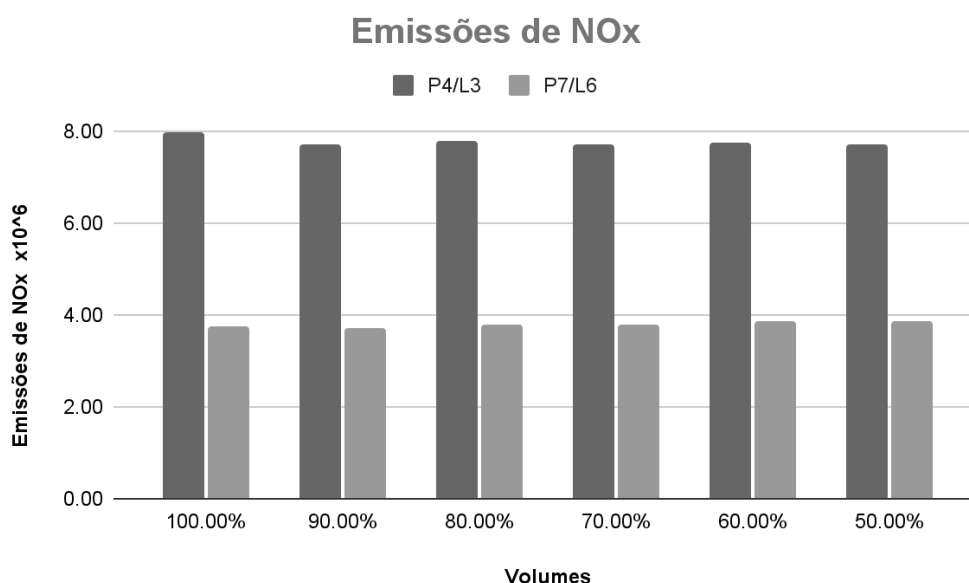
Para os percentuais de tráfego considerados (Figura 9), percebe-se uma significativa redução entre as fases P4/L3 e P7/L6, calculada em 52,7%. Dentre os parâmetros que podem justificar as variações de  $NO_x$  estão o desenvolvimento de novas tecnologias dos queimadores de combustível, recirculação dos gases de combustão e adição de catalisador.

Nas emissões de  $NO_x$ , percebe-se um fenômeno distinto entre as fases PROCONVE consideradas (quadro 17): em P4/L3 há uma redução de emissões diretamente proporcional ao fluxo, enquanto em P7/L6 há uma leve flutuação, com tendência a aumento. Uma razão possível é que, embora o fluxo de veículos leves tenha reduzido, o aumento de veículos pesados não compensou de forma a impactar significativamente nos índices de emissões globais da rede, em função da expressiva emissão dos óxidos de nitrogênio dos ônibus.

**Quadro 17** - Emissões de  $NO_x$  na rede para cada percentual de tráfego considerado

	NOX					
	100.00%	90.00%	80.00%	70.00%	60.00%	50.00%
P4/L3	7.97	7.71	7.78	7.71	7.76	7.70
P7/L6	3.77	3.71	3.79	3.79	3.85	3.85

**Figura 9:** Gráfico comparativo de emissões de  $NO_x$  emitidas pelas fases PROCONVE consideradas para cada percentual adotado.



#### 4.2.6 Cenários com frota de ônibus 100% elétricos

Para fins de verificação do impacto das emissões derivadas da atividade realizada por ônibus, propuseram-se cenários considerando este modo com veículos operantes exclusivamente movidos à eletricidade.

##### 4.2.6.1 100% da frota de veículos leves e ônibus elétricos

Para as estimativas considerando 100% da frota de veículos elétricos e 100% dos volumes veiculares de carros, movidos à gasolina, obtiveram-se os seguintes montantes para emissões.

**Quadro 18** - Emissões geradas por frota composta por 100% de ônibus elétricos

	<b>Classe de Emissão</b>	<b>P4</b>	<b>L3</b>
	<b>Volume de tráfego</b>	<b>Volume de caminhões leves a 100%</b>	<b>Volume de veículos de passageiros a 100%</b>
<b>Agente poluente *10<sup>6</sup> (g/h)</b>	<b>CO</b>	0.066	35.610
	<b>CO<sub>2</sub></b>	60.213	1074.409
	<b>HC</b>	0.018	0.000
	<b>MP</b>	0.009	0.150
	<b>NOX</b>	0.630	1.466

Na frota composta por ônibus elétricos (quadro 18), é possível perceber que as emissões de CO<sub>2</sub> permanecem em montante bastante expressivo, apesar da redução significativa quando comparada à cenários que incluem ônibus. Isto ocorre pois, embora as emissões de CO<sub>2</sub> por parte de veículos pesados sejam maiores em montante, o volume veicular de carros na rede é muito superior, e, por esta razão, os montantes expressivos se mantêm, no entanto mostra um potencial de reduções para o caso de substituição de tecnologia das outras classes de veículos.

## 5. Considerações Finais

Concluiu-se, através de análises quantitativas, que a substituição modal pode sim auxiliar na dinâmica ambiental e de tráfego nas cidades, através da redução nos índices de emissões e parâmetros de tráfego que impactam o fluxo de veículos nas cidades. Percebe-se a importância das fases PROCONVE nas emissões veiculares, que se tornaram cada vez mais restritivas às massas permitidas, bem como o impacto às emissões de tráfego e à saúde humana,



referente às questões de desenvolvimento tecnológico empregadas ao longo do tempo.

Quanto ao ferramental SUMO, apesar de figurar como um conjunto de aplicações gratuitas, mostrou-se robusto e completo, com capacidades essenciais para o trabalho desenvolvido, principalmente no que diz respeito aos modelos integrados à ferramenta, com a possibilidade de ajuste de múltiplos parâmetros simultaneamente. Outro ponto positivo em relação à ferramenta é a documentação de conteúdo bastante abrangente, disponível no *website* do desenvolvedor, cujas referências foram de extrema importância ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Em relação às medidas de desempenho de tráfego, especialmente nas análises referentes ao parâmetro de *car-following* e consequente impacto na formação de fila e tempos de viagem, é clara a sua influência. Percebe-se que a agressividade do condutor, refletida através de seu estilo de direção, impacta nas percepções de segurança dos usuários da rede como um todo, e sua análise pode também ser relacionada às emissões de tráfego, ao associar o estilo de direção com velocidades e acelerações executadas pelo condutor ao longo do tempo, sendo estes dois parâmetros citados as principais variáveis diretas para emissões e comportamento.

No que tange à análise de emissões, percebe-se que alguns cenários são mais vantajosos que outros. Por exemplo, quando se trata de emissões de  $\text{NO}_x$ , tanto para o cenário com melhorias em tecnologia veicular, quanto referente à redução de volumes veiculares, observou-se uma redução pouco expressiva, pois, com o aumento de veículos pesados na rede, obtêm-se uma compensação entre as emissões “salvas” pela substituição de veículos leves. Esta situação ocorre de forma similar para o  $\text{CO}_2$ , cuja emissão apresenta redução, porém com taxas menos expressivas.

Em relação aos cenários de emissão veicular, embora a ferramenta permita a variação entre as normas Euro, ainda há particularidades, especialmente em combinações de fase + poluente, que em alguns casos tornou-se limitada e, portanto, gerou necessidade de desconsiderar dados referentes a classes específicas. Outro ponto a ser destacado é a limitação para variação de tecnologia veicular para ônibus e motocicletas na versão do SUMO utilizada, cuja estimativa de emissões necessitou de adaptações e desconsideração, respectivamente.

Ainda que as reduções no volume veicular e as adoções de medidas mais restritivas para a manufatura de veículos sejam de grande contribuição para as reduções de emissão veicular, ainda há muitos desafios. Embora a necessidade de deslocamentos tende a expandir cada vez mais, é de extrema importância que a previsão das demandas seja feita considerando a adoção de medidas que propiciem seu uso de forma sustentável.

Para trabalhos futuros, sugere-se i) análises com auxílio de outras ferramentas de

simulação, de modo a entender suas potencialidades e sensibilidade, ii) verificação das emissões veiculares com o uso de outros modelos de emissão e conjuntos de fatores, a fim de contemplar as emissões advindas de motocicletas e diferentes gerações tecnológicas de ônibus. Visto que esta pesquisa abordou os índices de emissão de material particulado gerados pelo processo de exaustão, sugere-se também a iii) análise da suspensão de material particulado resultantes da atividade de frenagem através do resíduo de uso de pastilhas de freio, bem como iv) análise de resíduos gerados pelo conjunto pneu+superfície e, por fim v) aplicação da metodologia utilizada em um trecho de estudo distinto.

Analisando especificamente o cenário brasileiro, percebe-se uma necessidade urgente de políticas que incentivem ainda mais o uso do transporte coletivo e não motorizado, de forma a auxiliar nas reduções de congestionamentos e melhorar a qualidade do ar nos ambientes urbanos. É essencial que a mobilidade urbana seja planejada de forma inteligente, de maneira sustentável, segura, acessível, funcional e limpa, de forma que as cidades sejam ambientes saudáveis para se viver, reduzindo assim o ruído interno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, D. R. C. (2003) **Comparação das simulações de tráfego dos modelos Saturn e Dracula**. Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BARCELÓ, Jaume. **Fundamentals of Traffic Simulation**. Barcelona: Springer-Verlag New York, 2010

BIEKER-WALZ, L., BEHRISCH, M., JUNGHANS, M, GIMM, K (2017) **Evaluation of car-following-models at controlled intersections**. In: ESM 2017 European Simulation and Modelling Conference, 31, pp. 247-251. European Simulation and Modelling Conference, 25.-27.Okt. 2017, Lissabon, Portugal. ISBN 978-492859-00-6.

BRAUN, S; APPEL, L. G; SCHMAL, M. (2003) **A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras**.

CARVALHO, M.A.S. (2012) **Avaliação de um motor de combustão interna Cielo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia.

CETESB. **Qualidade do ar: poluentes**. 2021.

CETESB. **Proconve**. 2021.

CETESB. (2015) **PLANO DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE FONTES ESTACIONÁRIAS GUIA DE MELHOR TECNOLOGIA PRÁTICA DISPONÍVEL FONTES DE COMBUSTÃO**.

CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo, 2019**.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Congresso. Senado. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 490, de 16 de Novembro de 2018**. Brasília, DF, Seção 1, p. 153.

DIAS, H.L.F. (2014) **Análise da modelagem integrada da emissão de poluentes atmosféricos provenientes de veículos transportadores de carga em área urbana**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará

Dias, H.L.F., Bertoncini, B.V., de Oliveira, M.L.M., Cavalcante, F.S.A. and Lima, E.P. (2017) **‘Analysis of emission models integrated with traffic models for freight transportation study in urban areas’**, Int. J. Environmental Technology and Management, Vol. 20, Nos. 1/2, pp.60–77.

DIAS, H.L.F. (2018) **Methodology for air pollution impact assessment of low emission zones in urban areas of brazil - The case study of Fortaleza**. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará

DLR - German Aerospace Center. **SUMO User Documentation**. 2021.

DLR - German Aerospace Center. **HBEFA3-based**. 2021.

DLR - German Aerospace Center. **Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes**. 2021.

DLR - German Aerospace Center. **Car-Following Models**. 2021.

EIONET - European Environment Information And Observation Network. (2020) **Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environmental integration in the EU: TERM 2000 Occupancy rates**. Copenhagen: EEA.

ERDMANN, J. (2014) **SUMO’s Lane-Changing Model**. Disponível em: [https://elib.dlr.de/102254/1/Springer-SUMOs\\_Lane\\_changing\\_model.pdf](https://elib.dlr.de/102254/1/Springer-SUMOs_Lane_changing_model.pdf).

FERNANDES, F. O; BELTRÃO, T.G.P. (2018) **O uso da microssimulação na alocação do tráfego na área crítica de um polo gerador de viagens: Um estudo de caso do IFG – Campus Goiânia**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

FILHO, M.A.V., (2019) **Estudo da implantação de um binário em uma região da cidade de Joinville utilizando o software de simulação SUMO**. Curso de Engenharia de Transportes e Logística, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina.

GARCIA, G. F., (2018) **O planejamento da cidade e a mobilidade urbana, uma combinação sustentável**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília.

HANAPPELL, R, **AIP Conference Proceedings 1871, 060001 (2017)**; <https://doi.org/10.1063/1.4996530> Published Online: 16 August 2017

HAUSBERGER, S. (2009) **Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3**. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology.

- HAUSBERGER, S; KRAJZEWICZ, D. (2014) **Deliverable 4.2 - Extended Simulation Tool PHEM coupled to SUMO with User Guide**. Colombo project.
- KRZYZANOWSKI, M. (2005) **Health effects of transport-related air pollution: summary for policy-makers**. WHO EUROPE.
- KRAJZEWICZ, D., ERDMANN, J., BEHRISCH, M. e BIEKER, L. **Recent development and applications of SUMO – Simulation of Urban MObility**. International Journal On Advances in Systems and Measurements. Berlim – Alemanha, v. 5, n. 3 & 4, p. 128-138, 2012.
- IBGE. **Frota de Veículos de 2020: Joinville, Santa Catarina, Brasil**. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/joinville/pesquisa/22/28120>.
- LEAL, T., CONSONI, F. L., (2021) **Emissões dos Poluentes dos Veículos: impactos dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/ CONLEG/Senado.
- LIEBERMAN, E.; RATHI, A. K. **Traffic Simulation**. Em: GARTNER, N.; MESSER, C.M.; RATHI, A. K. (Eds.) (1997) The revised monograph on traffic flow theory. EUA: Federal Highway Administration. Cap. 10.
- MANVILLE, M; TAYLOR, B; SHOUP, D. (2021) **Traffic Congestion: Three Big Questions, Three Short Answers**. UCLA Institute of Transportation Studies
- MATHEW, T. V. (2019) **Microscopic Traffic Simulation: lecture notes in transportation systems engineering. Lecture Notes in Transportation Systems Engineering**. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Governo Federal do Brasil (org.). **Poluentes Atmosféricos**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidadessustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>.
- MONDSCHHEIN, A; OSMAN, T; TAYLOR, B. D; THOMAS, T. (2015) **Congested Development A Study of Traffic Delays, Access, and Economic Activity in Metropolitan Los Angeles..** UCLA Institute of Transportation Studies
- PANIS et al, (2006). **“Modelling Instantaneous Traffic Emission and the Influence of Traffic Speed Limits”**.Em: Science Direct.
- QUIRINO, F.P., (2020) **Modelagem das Emissões de Poluentes Atmosféricos Oriundos da Atividade de Transporte Coletivo por Ônibus – Estudo de Caso em São Paulo, SP**. Curso de Engenharia de Transportes e Logística, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina.
- RODRIGUES, F. et. al (2008) **Avaliação da Influência da Divisão Modal na Operação do Tráfego em Centros Urbanos**. In: PLURIS
- RONALDO, A., ISMAIL, M.T, (2012). **Comparison of the two microsimulation software AIMSUM & SUMO for highway traffic modelling**. Department of Science and Technology ,Linköping University
- SCHMALENSEE, R., STOKER, T.M., JUDSON R.A.; **World Carbon Dioxide Emissions:**

1950–2050. *The Review of Economics and Statistics* 1998; 80 (1): 15–27. doi: <https://doi.org/10.1162/003465398557294>

SOUZA, V. V. (2016) **Uso da simulação microscópica para a avaliação do tempo de viagem de sistemas de transporte público por ônibus em corredores de tráfego misto**, Departamento de Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Ceará

TANIGUCHI, E., THOMPSON, R. G., YAMADA. (2014) **Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics**, Department of Urban Management, Kyoto University

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por sua bondade infinita e inspiração durante os momentos difíceis.

Aos meus pais, Laura e Marco, por sua generosidade, fé e incentivo durante minha trajetória e ao meu irmão Ricardo, por sua amizade, paciência e suporte incondicionais. Vocês são o amor da minha vida, sou muito abençoada por ter vocês.

À minha avó e madrinha Isabel, por toda a sua doçura, amor e carinho infinitos.

Ao meu avô Moasyr (*in memoriam*), por acreditar em mim e me guiar, hoje, ao lado de Deus.

À minha avó Heloisa, por contribuir na minha alma curiosa, corajosa e alegre.

Ao meu orientador, Professor Helry, por sua paciência, humanidade e zelo durante a caminhada universitária. Obrigada por acreditar no meu potencial e me incentivar durante os últimos meses.

Aos professores do CTJ que contribuíram de forma grandiosa na minha formação.

Aos amigos que fiz durante a trajetória universitária.

A todos os colegas que um dia me estenderam a mão em ajuda.