

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA EM CENÁRIOS FUTUROS COM VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Carolina de Sousa Martins Arrais

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC)
Grupo de Pesquisa em Comportamento em Transportes e Novas Tecnologias (GCTNT)
Universidade de Brasília, Brasil (UnB)

Pastor Willy Gonzales Taco

Programa de Pós Graduação em Transportes (PPGT)
Grupo de Pesquisa em Comportamento em Transportes e Novas Tecnologias (GCTNT)
Universidade de Brasília, Brasil (UnB)

RESUMO

Os Veículos Autônomos (VA) são hoje uma realidade tecnológica que promete alterar a economia, o modo de vida e o uso do solo urbano e sua popularização suscita questões em relação aos seus impactos na qualidade do ar. O Campus Darcy Ribeiro (CDR) da Universidade de Brasília recebe diariamente em torno de 25mil automóveis que circulam nas suas vias gerando emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Perante o advento dos VA, o objetivo do artigo é avaliar as emissões de GEE no CDR em quatro cenários: Cenário Base 1, ano de 2016 com tráfego de veículos convencionais; Cenário 2, frota composta por VA movidos a gasolina em 2025; Cenário 3, frota composta por 700 VA elétricos em 2025; e, Cenário 4, frota mista, composta por 50% de VA elétricos e 50% de veículos convencionais. A quantificação das emissões nos quatro cenários foi realizada com uso do software SUMO. O cenário que representou menores emissões foi o Cenário 3, representando uma redução de 78% nas emissões relação ao Cenário Base 1. No entanto, o Cenário 2 apresentou uma redução de cerca de 25% nas emissões de GEE em relação ao Cenário Base 1.

ABSTRACT

The Autonomous Vehicles (AV) are nowadays a technological revolution that promises to change the economy, the lifestyle and the use of urban land, and its popularization raises questions regarding the impacts on the air quality. The Darcy Ribeiro Campus (DRC) on the University of Brasilia (Brasilia DF, Brazil) receives around 25 thousand vehicles on its roads every day, producing greenhouse gas (GHG) emissions. With the advent of AV, the aim of this paper its to evaluate the GHG emission in the DRC in three different scenarios: i) 459 conventional vehicles in 2015; ii) 700 gas-powered AV in 2025; and iii) 700 electric AV in 2025 and iv) Mixed fleet, with 350 electric powered AV and 350 gas powered conventional vehicles. The measurement of emissions in the four scenarios was performed using the traffic simulation software SUMO. The scenario that showed the biggest reduction on the emissions is composed of electric AV, scenario iii) presented a 78% reduction comparing with the scenario i). However, the scenario containing gas-powered AVs showed a reduction around 25% in GHG emissions comparing with the scenario i).

1. INTRODUÇÃO

Os impactos do tráfego na qualidade do ar das cidades são amplos e vão desde a saúde e o bem estar (Nunes e Hernandez, 2019) a questões globais, como as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e o consequente aumento da temperatura terrestre. O setor de transportes é significativo em termos de impactos ambientais em escala global, e foi responsável pelas emissões diretas e indiretas de cerca de 7 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente CO₂-eq em 2010 (IPCC, 2014).

Uma das tecnologias que surge no horizonte e que pode afetar significativamente a qualidade do ar nas cidades é o veículo autônomo (VA). O grau de automação dos veículos é definido em 6 níveis, nos níveis 0, 1 e 2 a Inteligência Artificial (IA) intervém na condução humana por meio de avisos e assistência momentânea (nível 0), aceleração ou frenagem, centralização na via ou controle de bordo adaptativo (nível 1), aceleração e frenagem, centralização na via e controle de bordo adaptativo (nível 2). O nível 3 de automação ainda exige condução humana

quando a IA não encontra as condições requeridas. Para o nível 4, os pedais e o volante são facultativos, porém os veículos só operam em condições controladas, sendo aplicáveis como taxis autônomos. O nível último de automação, nível 5, possui as mesmas especificações que o nível 4, porém pode operar em quaisquer condições (SAE International, 2019).

A popularização desta tecnologia implicaria em grandes mudanças no estilo de vida contemporâneo. Além de alterações nas emissões de GEE, a inserção dos VAs no mercado podem resultar em impactos no tráfego e na mobilidade (Fagnant e Kockelman, 2014), no uso do solo (Hawkins e Nurul Habib, 2019) e em impactos econômicos (Berrada e Leurent, 2017). Serviços de transporte por aplicativo já possuem grande aceitação do público, e seus custos podem ser amplamente reduzidos caso substituam a mão de obra condutora por VAs, o que pode levar ao aumento da distância percorrida per capita e aumento no consumo energético (Chen et al., 2019).

Nesse contexto, em um futuro não muito distante da circulação de VAs nas vias de Brasília, o presente estudo desenvolve uma aplicação em pequena escala sobre os efeitos da implementação desta tecnologia no tráfego. Para isto a área simulada neste trabalho foi o sistema viário do Campus Universitário Darcy Ribeiro (CDR) da Universidade de Brasília (Brasília-DF), que se encontra dentro dos limites do Conjunto Urbanístico de Brasília. Trata-se de um polo gerador de viagens significativo, que recebia cerca de 17 mil viagens por dia em 2016, sendo a maioria dessas viagens realizadas em automóveis particulares, seguido por transporte coletivo, bicicletas (compartilhadas/particulares) e em número reduzido, motocicletas (METRÔ-DF, 2017).

Assim, o objetivo do artigo é avaliar as emissões GEE no CDR da UnB em horário de pico, para um cenário atual (Cenário Base) e compará-las com as emissões provenientes de cenários futuros, onde espera-se o aumento da frota e a possível presença de veículos autônomos e elétricos. O presente trabalho se utiliza de uma ferramenta de microssimulação de tráfego, o SUMO (Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center, 2020) e uma ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida, o OpenLCA (GreenDelta, 2020) para estimar os impactos na qualidade do ar decorrentes do tráfego no cenário atual e em cenários futuros.

Para isto, na seção que se segue serão explicitadas as bases bibliográficas que descrevem as emissões de GEE no setor de transporte e mobilidade, bem como as expectativas para o setor com a inserção dos VA no tráfego e a aplicação da ferramenta de microssimulação de tráfego SUMO na estimativa dos impactos ambientais da inserção dos VA. Em seguida, é descrito o método de construção da rede viária do CDR e dos cenários simulados. Por fim, são apresentados os resultados e conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O Acordo de Paris e as emissões de Gases de Efeito Estufa no setor dos Transportes

Visando limitar o aquecimento terrestre a 1,5°C, os países signatários do Acordo de Paris se comprometeram em reduzir as emissões de acordo com a determinação das Contribuições Nacionais (*Nationally Determined Contributions*, ou NDCs), que são regularmente publicadas e discutidas (UNEP, 2019). O Brasil se comprometeu, na ocasião do Acordo de Paris, em reduzir as suas emissões em 76% em relação a 1990. Os esforços para atingir estes níveis de redução foram considerados insuficientes pelo Climate Action Tracker em 2020. Segundo

este observatório, as ações do país na mitigação das emissões de GEE foram satisfatórias até o ano de 2004 porém vêm decaindo desde então, o que em combinação com uma ainda alta dependência dos combustíveis fósseis e com a diminuição do combate ao desmatamento, coloca o país em atraso no cumprimento da NDC ratificada.

Sob uma ótica de responsabilidades individuais, Baiocchi et al. (2010) indicam que fatores socioeconômicos influenciam as emissões de GEE das famílias, pois as emissões aumentam com a renda, e diminuem em famílias de maior grau de instrução. Sob uma perspectiva de estilo de vida, é possível analisar a relação entre consumo e emissões a partir do cálculo das emissões de GEE per capita. Isto é, por meio do cálculo da intensidade das emissões originadas no ciclo de vida de um produto ou serviço e associação desta intensidade ao consumo dos mesmos. Para um meio de transporte, é o cálculo que se segue (Eq. 1):

$$E = D \times I \quad (1)$$

em que E : Emissões devidas ao uso de meios de transporte;
 D : Distância percorrida por modal (km/passageiros);
 I : Fator de impacto - Intensidade de emissões de GEE do veículo (kg CO₂-eq/km).

O fator de Intensidade de emissões de GEE pode ser calculado por meio da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), uma técnica de levantamento dos aspectos e impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto. O ciclo de vida de um produto ou serviço considerado dentro das fronteiras do sistema objeto da ACV pode compreender os processos e operações desde a extração de matéria prima, a produção, uso e destinação final. As etapas da ACV compreendem, portanto, a definição do escopo e dos limites do sistema, inventário, cálculo e alocação dos impactos a cada etapa do processo produtivo. Os impactos avaliados são relacionados ao uso de recursos naturais, saúde humana ou consequências ecológicas. Softwares como o OpenLCA são ferramentas de cálculo dos fatores de intensidade impactos, e estes são a quantificação dos potenciais de contribuição para: Smog(kg O₃-eq), câncer (CTUh), doenças respiratórias (kg MP_{2.5}-eq), depleção de combustíveis fósseis (MJ), eutrofização (kg N-eq), ecotoxicidade (CTUh), aquecimento global (kg CO₂-eq), depleção da camada de ozônio (kg CFC₋₁₁-eq), e acidificação dos corpos hídricos (kg SO₂-eq).

A Equação 1 descreve um indicador per capita que possibilita estabelecer uma relação entre o grau de industrialização e desenvolvimento econômico dos países, o nível de consumo de seus habitantes e sua relação com a magnitude das emissões anuais dos mesmos. Enquanto estima-se que em 2017 a Finlândia foi responsável pela emissão de 10,4 tCO₂-eq per capita, o Brasil emitiu 2,8 tCO₂-eq per capita neste mesmo ano. O setor de mobilidade é responsável por uma parcela significativa das emissões ligadas ao estilo de vida, representando 2,8 tCO₂-eq das emissões per capita na Finlândia e aproximadamente 0,5 tCO₂-eq no Brasil em 2017 (IGES, 2019). Em média, um brasileiro é responsável pela emissão de 480 kg de CO₂-eq por ano apenas em mobilidade, sendo 2/5 deste montante devido ao uso de carros particulares (devido à sua alta intensidade de emissões de GEE por km rodado) e ao uso do transporte público (devido às grandes distâncias percorridas nos centros urbanos) (Posada e Façanha, 2015).

Os GEE já citados são emitidos no setor dos transportes pelos veículos a combustão em conjunto com outra categoria de poluentes, os poluentes climáticos de curta duração (*Short*

Lived Climate Pollutants), ou SLCPs (Scovronick et al., 2015). O carbono negro por exemplo, é um SLCP componente do Material Particulado (MP), emitido por motores a combustão. A redução da concentração dos SLCP na atmosfera pode ser muito significativa para um objetivo de limitar o aquecimento global a 2°C até o fim do século, e também para reduzir os gastos em saúde pública decorrentes da poluição do ar (Bowerman et al., 2013).

Há uma correlação entre as mudanças climáticas e questões de saúde pública. As atividades dos setores energético, agricultura, transportes e habitação são as mais representativas em emissões de GEE e de poluentes atmosféricos responsáveis, respectivamente, pelo aumento da temperatura terrestre e por gastos em saúde pública. Estima-se mais de 90% da população urbana mundial esteja exposta a altas concentrações de poluentes atmosféricos como o carbono negro, metano e ozônio, sendo a poluição do ar a segunda maior causa de mortes não declaradas do mundo. Somente o setor de transportes e mobilidade seria o responsável por 25% do particulado (MP) emitido nos centros urbanos. A reversão deste quadro está sob o poder dos Estados e o cumprimento das NDC por meio de políticas públicas resultaria em significativas economias em saúde pública (World Health Organization, 2018).

2.2. Previsões para o Setor de Transportes com o Advento dos Veículos Autônomos

A diminuição dos impactos ambientais em termos de poluição atmosférica e emissões de GEE no setor dos transportes depende fortemente da diminuição da dependência dos combustíveis fósseis. A partir de uma Avaliação de Ciclo de Vida de veículos em Nova York (EUA), Chester e Horvarth (2009) concluíram que um sedan convencional movido a gasolina emite aproximadamente 400 g de CO₂-eq a cada milha viajada, enquanto um ônibus movido a diesel emite pouco mais de 300 g CO₂-eq por milha, já um ônibus movido a eletricidade emite cerca de 50 g CO₂-eq por milha percorrida.

Além disso, não há consenso sobre os impactos no consumo energético decorrentes da inserção dos veículos autônomos no mercado. Wadud, MacKenzie e Leiby (2016) indicam que a automação dos veículos pode não alterar significativamente o consumo de energia no setor, mas pode facilitar a inserção de tecnologias no mercado automotivo que venham a afetar significativamente o consumo de energia e conseqüentemente, as emissões.

Anderson et al. (2016) assumem a incerteza quanto aos impactos dos VA no consumo energético e indicam uma provável queda nas emissões, devido a acelerações e desacelerações mais suaves durante a condução dos VA e à possibilidade do emprego de energias alternativas. Quanto ao consumo de combustível por VA movidos à combustão, Chen et al. (2019) indicam, a partir da análise de quatro cenários construídos com informações a respeito da frota de veículos particulares nos EUA, do uso dos veículos e sua eficiência energética, que o consumo de combustíveis pós automação da frota é muito variável, com potencial de redução em 40% no cenário otimista e aumento de 30% no cenário pessimista. Os autores ressaltam ainda, que em comparação com o tráfego em autoestradas, a inserção dos VA no tráfego urbano está mais próxima do cenário otimista por otimizar as acelerações e desacelerações, o que implica em diminuição do uso de combustíveis.

A redução das emissões nas frotas compostas por VA depende de um equilíbrio delicado entre capacidade das vias e velocidade dos veículos. Enquanto o aumento na capacidade das vias pode reduzir as emissões do tráfego, um aumento no limite de velocidade causaria efeito contrário. Deste modo, a comunicação veículo a veículo em controle de bordo cooperativo,

assim como a determinação de limites de velocidade otimizados em função dos impactos ambientais são cruciais para redução das emissões (Hwang e Song, 2020). Ainda, o controle de bordo cooperativo entre VA pode reduzir o consumo de combustível e em consequência as emissões. Mas, esse tipo de controle de bordo pode também denotar acelerações mais altas em comparação com os veículos convencionais, causando o efeito de aumento das emissões (Mahdinia et. al., 2020).

Cenários de redução dos impactos ambientais ligados ao estilo de vida necessitam de uma combinação entre três alternativas: A redução absoluta do consumo, a mudança de tecnologias ou o aumento da eficiência energética (Lacroix, 2018). A construção de tais cenários é complexa e deve levar em conta o surgimento de novas tecnologias em mobilidade e transportes, que levam a novos comportamentos de consumo. Por exemplo, compartilhamento de veículos por meio de aplicativos de caronas pode ser indicado como uma opção de redução das emissões individuais (Salo e Nissinen, 2017), enquanto o uso de aplicativos de prestação de serviços de transporte individual sob demanda por aplicativo de celular pode ser responsável pelo aumento da quilometragem per capita percorrida anualmente (NTU, 2019).

A previsão para o futuro na mobilidade urbana é a presença de veículos elétricos e autônomos no tráfego, o que representa criação de novos mercados e oportunidades econômicas. No entanto, o advento da Inteligência Artificial e as promessas que a popularização dos VA representa suscitam questões a respeito do papel destas tecnologias na redução das emissões de poluentes para o alcance das metas de mitigação do Efeito Estufa. A falta de regulação dessa tecnologia pode aumentar a dependência dos carros, expandir a duração do horário de pico, intensificando o tráfego e caso a circulação dos VA não seja otimizada, pode haver um aumento da pressão por estacionamentos e veículos percorrendo grandes distâncias sem passageiros. A saída para a prevenção destas problemáticas seria o incentivo ao compartilhamento de veículos (European Federation for Transport and Environment AISBL, 2019).

2.3. O SUMO na quantificação dos impactos dos Veículos Autônomos no tráfego e no Meio Ambiente

A simulação de tráfego se apresenta como uma boa maneira de estimar as consequências de cenários futuros, sendo uma poderosa ferramenta para o planejamento. Em um contexto norte-americano, estimou-se, por meio da simulação de tráfego, que cada Veículo Autônomo Compartilhado (VAC) pode substituir 11 veículos particulares convencionais. Neste cenário a distância percorrida pelos veículos aumentaria em 10%, porém as emissões totais seriam diminuídas, em decorrência do aumento da eficiência na condução e de uma mudança na matriz energética para veículos movidos a eletricidade (Fagnant e Kockelman, 2014).

Um estudo feito em um cenário onde os veículos convencionais de Berlim são substituídos por VACs incluiu fatores comportamentais tais como o tempo de espera, ou o tempo de caminhada até o ponto de espera, e concluiu que um VAC substituiria dez veículos convencionais em um serviço de alta qualidade e alta demanda (Bischoff e Maciejewski, 2016).

Dentre as ferramentas para simulação de tráfego, tem-se o SUMO (Simulation of Urban Mobility). Este é um software de livre acesso para microssimulação de tráfego, que permite o uso de grandes redes na simulação demandando pouco processamento e facilita a simulação

de vários modos de transporte (Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center, 2020). O SUMO já foi aplicado na construção de modelos de comunicação cooperativa veículo com veículo para um tráfego mais fluido (Fernandes e Nunes, 2010), na estimativa de impactos ambientais do uso de energias alternativas (Flitsch et al., 2017) e em conjunto com outros softwares de simulação na estimativa da exposição humana ao particulado nas proximidades de uma via (Zavala-Reyes, et al., 2017).

Para avaliar os impactos de uma mobilidade urbana compartilhada, autônoma e elétrica, Alazzawi et al. (2018) utilizaram o SUMO acoplado com a interface TraCI para processamento de dados de origem e destinação derivados dos telefones celulares dos habitantes de Milão (Itália) na simulação de cenários compostos por taxis autônomos compartilhados. Os parâmetros avaliados foram o tempo de espera, a relação densidade e fluxo de tráfego e as emissões de particulado. Calcularam também a parcela crítica de taxis autônomos na frota de Milão para o alcance de um tráfego livre de congestionamento. O SUMO constitui, portanto, poderosa ferramenta de planejamento, com aplicações múltiplas.

3. MÉTODO

3.1. Delimitação da Área de Estudo

O Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília possui 400 hectares, mais de 500 mil m² de área construída onde circulam diariamente mais de 50 mil pessoas por dia, entre professores, alunos, técnicos e prestadores de serviços (Universidade de Brasília, 2020). Seus arredores constituem uma região bem equipada em infraestrutura urbana: passam pelo CDR 27 km de rodovias, 68 km de vias e 29 km de ciclovias, todos em bom estado de conservação. Além das atividades educacionais, a região possui atividades econômicas diversas: hospitais, clubes, centros desportivos, empresas públicas e privadas além de zonas habitacionais. Quanto à cobertura do solo, além das zonas urbanas consolidadas, a vegetação cobre boa parte da Universidade, em áreas verdes, jardins e até mesmo regiões de vegetação nativa. Em termos de infraestrutura, existem equipamentos urbanos de suporte à mobilidade, como por exemplo, as ciclovias e estações de bicicletas compartilhadas.



Figura 1: Localização do Campus Darcy Ribeiro no Plano Piloto de Brasília.

A Pesquisa de Mobilidade Urbana do Metrô-DF realizada em 2016 (METRÔ-DF, 2017) considerou uma área de 7,33 ha que engloba todos os prédios do Campus. Diariamente, o CDR, recebia em 2016 o fluxo de 50mil pessoas que se deslocavam nos mais diversos meios de transporte. Segundo dados de Aruwajoye (2016), 45% dos deslocamentos com direção ao CDR foram realizados por veículos convencionais (automóveis), muitos dos quais tinham somente um ocupante.

3.2. Cenários de Simulação no CDR da UnB

Para alcançar o objetivo de avaliar os impactos ambientais da inserção de Veículos Autônomos no tráfego, a rede viária do CDR foi construída no ambiente de simulação a partir da aplicação OSM (Open Street Map) Web Wizard, considerando quatro cenários que foram construídos a partir de diferentes frotas. Apenas veículos particulares foram inseridos nestes cenários. Os dois primeiros cenários são compostos por veículos movidos a gasolina sendo que no Cenário 2 os veículos são autônomos. A frota no Cenário 3 é composta por veículos autônomos elétricos e no Cenário 4, metade da frota são veículos autônomos elétricos (VAEs), e a outra metade veículos convencionais movidos a gasolina. A mesma rede viária foi utilizada na simulação de todos os cenários. Na Figura 2 apresenta-se o fluxograma do método utilizado.

A quantificação dos veículos em horário de pico foi embasada no estudo de Aruwajoye (2016), que chegou à conclusão de que o horário de pico no CDR acontece entre 07h00 e 08h00, com 459 veículos em circulação na região e também estimou o tamanho da frota no Campus no período de uma década. A previsão para 2025 é de aumento de 52,47% na frota de veículos particulares circulando no CDR, portanto foram considerados 700 veículos circulando no campus nos Cenários 2, 3 e 4 para o horário de pico em 2025.

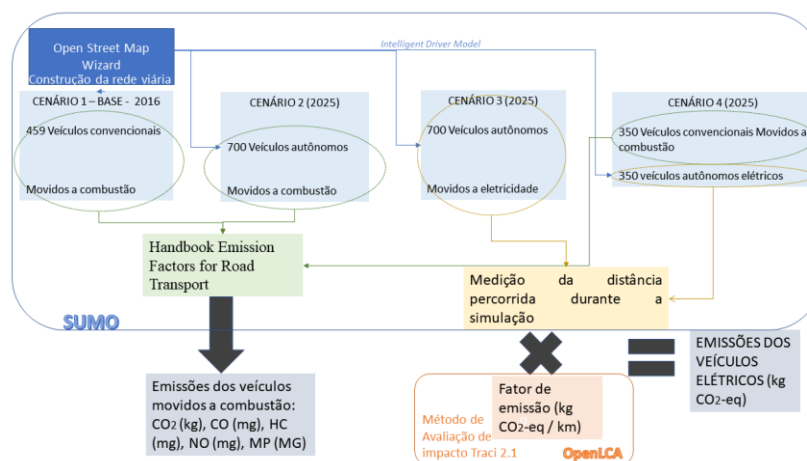


Figura 2: Fluxograma do método.

Por meio de pesquisas de mercado e entrevistas com especialistas, Bertonecello e Wee (2015) indicam que a partir de 2020 os consumidores estariam mais dispostos a utilizar a tecnologia dos VA e até 2030, 50% das vendas de veículos serão veículos autônomos. Assim, baseadas nessas informações para o Cenário 4, 50% da frota inserida é autônoma e 50% convencional. O SUMO possui parâmetros para modelar o estilo de condução dos veículos, o tamanho da frota e os caminhos percorridos. O *Through Traffic Factor* (TTF) é diretamente proporcional à quantidade de veículos que entram e saem nos limites da simulação. Para os cenários deste

estudo, o TTF dos veículos foi minimizado, pois a natureza das atividades desenvolvidas no campus exige que seus frequentadores venham de outras regiões de Brasília e passem várias horas na região. Outros parâmetros importantes são o *Action Step Length*, o *tau*, e o *sigma*. O *actionStepLength* e o *tau* definem o tempo de reação do motorista, pois a simulação no SUMO se dá em incrementos, pré definidos em um segundo, onde a cada intervalo o condutor toma as decisões necessárias para acelerar, desacelerar ou trocar de faixa. Definir o *Action Step Length* diferente de 1s desassocia o intervalo de tomada de decisão do incremento pré definido da simulação. O *sigma* é um parâmetro que define o grau de perfeição da condução, onde 0 denota condução perfeita (Flitsch et al., 2017). Para a simulação da condução dos veículos autônomos, foi implementado o modelo de controle de bordo *Intelligent Driver Model (IDM)*, que reproduz uma comunicação veículo a veículo por meio de ajustes destes parâmetros da simulação (Kesting et al., 2010).

Para a estimativa de emissões dos veículos movidos a combustão, foram gerados arquivos baseados no Handbook Emission Factors for Road Transport (Environmental Protection Agencies of Germany, 2020), a partir da simulação dos cenários. Foi realizada uma estimativa de emissão dos seguintes GEE: Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Material Particulado (MP). Importante ressaltar que a estimativa de emissões no sumo leva em consideração veículos movidos a gasolina, no padrão europeu. Para este estudo foi escolhido o modelo de veículo mais atual e menos poluente. Nos Cenários 3 e 4, a intensidade das emissões em CO₂ equivalente (CO₂-eq) por km rodado em um veículo elétrico foi calculada a partir do uso do OpenLCA com a base de dados EcoInvent 3.6 e método de alocação de impactos TRACI 2.1. Esse fator de impacto foi então multiplicado pela distância percorrida por cada um dos veículos elétricos para cálculo do impacto decorrente do cenário completo (Figura 3).

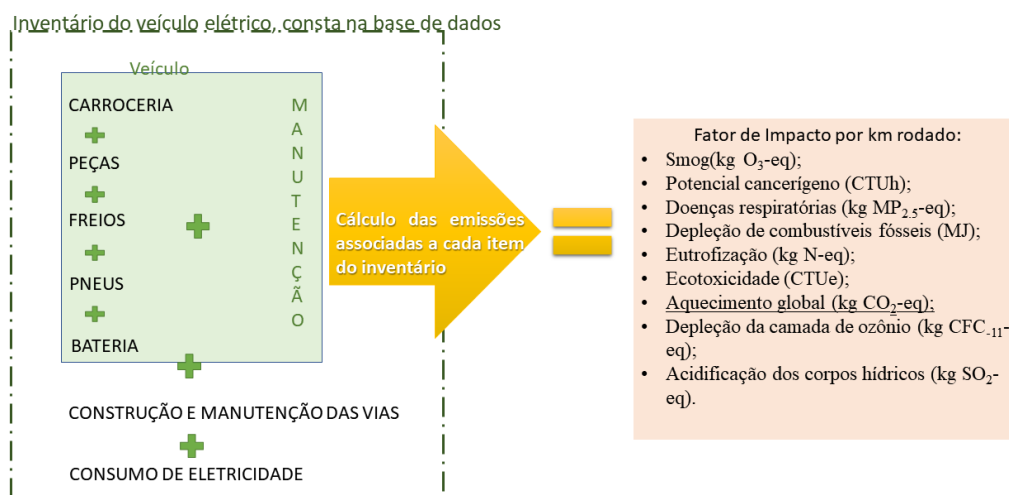


Figura 3: Inventário de ciclo de vida do veículo elétrico na base de dados EcoInvent 2.1 e alocação de impactos no OpenLCA. Este estudo utilizará apenas o fator de impacto relacionado ao aquecimento global (kg CO₂-eq/km).

A seguir serão apresentados e comparados os impactos relacionados ao potencial de aquecimento global dos Cenários 1 e 2 em CO₂ e dos Cenários 3 e 4 em CO₂-eq, assim como os impactos relacionados a doenças respiratórias (mg de MP), eutrofização (mg NO) e consumo de combustível (ml) para os Cenários 1 e 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentadas as emissões acumuladas dos gases de efeito estufa medidas pelo SUMO em cada incremento de 1 segundo da simulação. A Figura 4 apresenta o comparativo do CO₂ emitido pela frota em cada cenário, sendo que as emissões dos veículos elétricos são representadas em equivalente de dióxido de carbono. Os resultados indicam que há uma grande perspectiva de redução nas emissões entre os Cenários 1 e 2, que contam com a mesma matriz energética. O Cenário 2 apresenta uma frota duas vezes maior que o Cenário 1 e ainda assim suas emissões são 25,26% menores, pois a frota do mesmo é composta por VA. A frota no Cenário 2 implementa o modelo de navegação *Intelligent Driver Model*, o que implica acelerações e frenagens suaves e conseqüente redução no consumo de combustível, logo redução nas emissões.

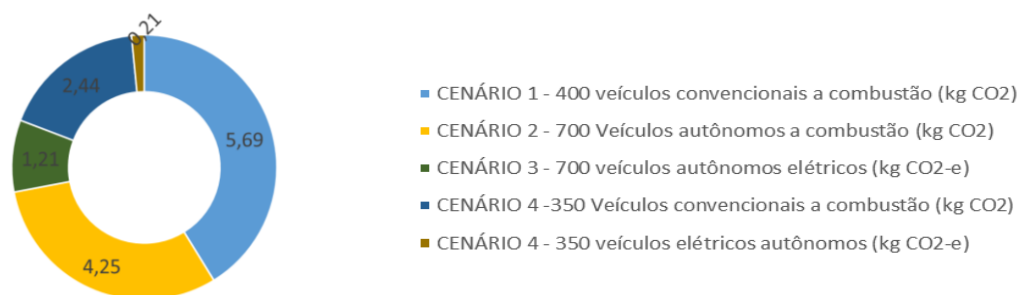


Figura 4: Emissões de CO₂ e CO₂-eq nos quatro cenários em quilogramas.

As emissões dos veículos elétricos são apresentadas em CO₂-eq. Para estes, o consumo energético de cada veículo elétrico foi multiplicado por um fator de intensidade de emissões em equivalente de dióxido de carbono (CO₂-eq), calculado com o auxílio do OpenLCA. A medida CO₂-eq foi estabelecida para fins de comparação e diz respeito ao potencial de aquecimento global dos GEE. Trata-se de um fator de conversão entre a quantidade emitida do GEE em questão e a quantidade de CO₂ equivalente ao mesmo potencial de aquecimento global (Eurostat, 2019). Importante ressaltar que, mesmo com o aumento da frota para os Cenários futuros 2, 3 e 4, nos cenários em que a frota é movida a eletricidade há uma drástica redução nas emissões.

Na Figura 5 são apresentadas as emissões acumuladas de outros GEE para os Cenários 1 e 2. Para os outros GEE as emissões referentes ao Cenário 1 também são superiores às do Cenário 2, devido à otimização da condução na frota autônoma.

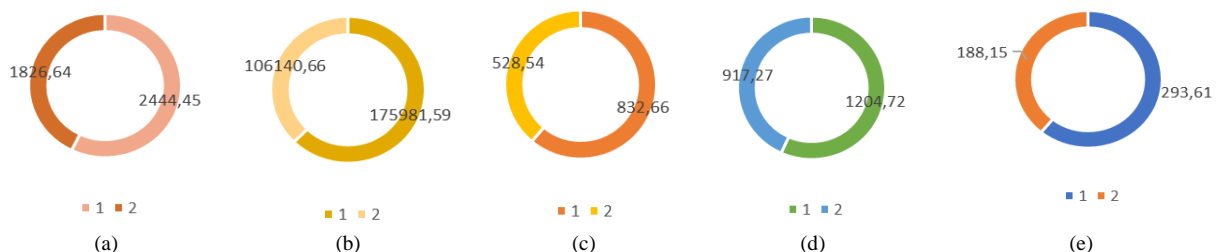


Figura 5: a) Consumo de combustível nos Cenários 1 e 2 em mililitros; b) Emissões de Monóxido de Carbono em mg; c) Emissões de Hidrocarbonetos em mg; d) Emissões de Óxidos de Nitrogênio; e) Emissões de material particulado (MP) em mg.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho correspondeu à expectativa de estimativa dos impactos da inserção dos Veículos Autônomos no tráfego do CDR para cenários de aumento da frota e de mudanças na fonte de energia dos veículos. Conforme o indicado na bibliografia, as emissões relacionadas à rodagem de veículos elétricos são inferiores às emissões dos veículos movidos à combustão, e isto pode ser verificado na simulação dos cenários descritos neste artigo. Observou-se ainda ao comparar os Cenários 1 e 2 uma redução nas emissões devida à condução mais suave (sem acelerações e desacelerações bruscas) dos VA.

A redução nas emissões dos Gases de Efeito Estufa decorrentes da simulação de um cenário composto por veículos autônomos movidos a gasolina observada neste estudo mesmo com o aumento da frota, deve ser confrontada com estudos que levem em consideração um amplo contexto, que considere aspectos comportamentais, econômicos e tecnológicos da utilização de VAs para o caso brasileiro e especificamente de Brasília

A simulação do tráfego composto por VAs pode apresentar reduções ainda maiores nas emissões em um ambiente de simulação que leve em consideração o compartilhamento de veículos e esse cenário também deve ser simulado para previsão de prováveis cenários futuros. Com o atual sucesso de serviços de transporte individual a demanda por aplicativos e a possível baixa nos seus preços, caso estes substituam a mão de obra humana pela Inteligência Artificial para condução de seus veículos, a adesão pode aumentar, intensificando o tráfego, e aumentando as emissões.

Neste trabalho foi avaliada apenas a operação dos veículos a combustão, não foram tomadas em consideração as emissões decorrentes da cadeia produtiva, e seria necessário, portanto, uma Avaliação de Ciclo de Vida que incluísse nos limites de seu sistema todos processos de fabricação, distribuição, comercialização e operação dos veículos para chegar a conclusões mais abrangentes a respeito dos impactos ambientais derivados de cenários formados por VA, sejam eles elétricos ou movidos a combustão. A automatização do transporte de mercadorias é possível e também deve ser avaliada sob a ótica dos impactos ambientais para o planejamento da redução das emissões no setor de transportes.

Finalmente, considerando o contexto atual em que a humanidade enfrenta um novo desafio, pós-pandemia COVID-19, o comportamento da mobilidade e as opções que se apresentam de uma micromobilidade mais presente e a imobilidade resultado do teletrabalho, ensino remoto, telemedicina, sugerem a necessidade de novos estudos, que contemplem esta situação. Será que a previsão de aumento de veículos apresentada no artigo para os cenários futuros se confirmará? Qual o tempo em que os VAs serão implantados? Haverá uma desaceleração ou aceleração do processo? É muito cedo para tecer possibilidades, mas percebe-se a necessidade de ampliar as pesquisas neste sentido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alazzawi, S., Hummel, M., Korrdt, P., Sickenberger, T., Wieseotte, C., e Wohak, O. (2018). *Simulating the Impact of Shared, Autonomous Vehicles on Urban Mobility – a Case Study of Milan*. 2, 94–76. <https://doi.org/10.29007/2n4h>
- Anderson, J., Kalra, N., Stanley, K., Sorensen, P., Samaras, C., e Oluwatola, O. (2016). *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*. In *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*. <https://doi.org/10.7249/tr443-2>
- Aruwajoye, A. O. (2016). *Previsão da demanda de transporte no ampus Darcy Ribeiro da Universidade de*

- Brasília (Vol. 15). Universidade de Brasília.
- Baiocchi, G., Minx, J., e Hubacek, K. (2010). The Impact of social factors and consumer behavior on carbon dioxide emissions in the United Kingdom. *Journal of Industrial Ecology*, 14(1), 50–72. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00216.x>
- Berrada, J., e Leurent, F. (2017). Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicles: A State of the Art. *Transportation Research Procedia*, 27, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.077>
- Bertoncello, M., e Wee, D. (2015). Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world. *McKinseyCompany*, (June), 1–6.
- Bischoff, J., e Maciejewski, M. (2016). Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. *Procedia Computer Science*, 83(Ant 2016), 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.121>
- Bowerman, N. H. A., Frame, D. J., Huntingford, C., Lowe, J. A., Smith, S. M., e Allen, M. R. (2013). The role of short-lived climate pollutants in meeting temperature goals. *Nature Climate Change*, 3(12), 1021–1024. <https://doi.org/10.1038/nclimate2034>
- Chen, Y., Gonder, J., Young, S., e Wood, E. (2019). Quantifying autonomous vehicles national fuel consumption impacts: A data-rich approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 122(November 2017), 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.10.012>
- Chester, M., e Horvarth, A. (2009). Life-cycle Energy and Emissions Inventories for Motorcycles, Diesel Automobiles, School Buses, Electric Buses, Chicago Rail, and New York City Rail. In *Ensemble*. <https://doi.org/10.11436/mssj.15.250>
- Climate Action Tracker. (2020). Climate Action Tracker. Acesso em 21 de Junho de 2020. Disponível em: <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/>
- Environmental Protection Agencies of Germany, S. and A. (n.d.). HBEFA Introduction. Acesso em 12 de Agosto de 2020. Disponível em: <https://www.hbefa.net/e/index.html>
- European Federation for Transport and Environment AISBL. (2019). *Less (cars) is more: how to go from new to sustainable mobility*. Disponível em: <https://www.transportenvironment.org/publications/less-cars-more-how-go-new-sustainable-mobility>
- Eurostat. (2019). Glossaire:Équivalent dioxyde de carbone. Acesso em 28 de Junho de 2020. Disponível em : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent/fr#:~:text=L' quivalent dioxyde de carbone,de carbone ayant le même
- Fagnant, D. J., e Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001>
- Fernandes, P., e Nunes, U. (2010). Platooning of autonomous vehicles with intervehicle communications in SUMO traffic simulator. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (May 2014), 1313–1318. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625277>
- Flitsch, C., Pfoser, S., Neubauer, M., e Schaeue, O. (2017). Investigating the application of an alternative fuel technology – A scenario-based simulation approach to analyze environmental impacts. *Towards Simulation for Autonomous Mobility*, 29–40. Disponível em: http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/projekte/sumo/Proceedings_SUMO2017.pdf
- GreenDelta. (2020). Open LCA. Disponível em: <http://www.openlca.org/>
- Hawkins, J., e Nurul Habib, K. (2019). Integrated models of land use and transportation for the autonomous vehicle revolution. *Transport Reviews*, 39(1), 66–83. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1449033>
- Hwang, H., e Song, C. K. (2020). Changes in air pollutant emissions from road vehicles due to autonomous driving technology: A conceptual modeling approach. *Environmental Engineering Research*, 25(3), 366–373. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.117>
- IGES. (2019). *1.5 Degree Lifestyles: Targets and options for reducing lifestyle carbon footprints*. Disponível em: <https://www.iges.or.jp/en/pub/15-degrees-lifestyles-2019/en>
- Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center. (2020). SUMO User Documentation. Disponível em: June website: <https://sumo.dlr.de/docs/index.html>
- IPCC. (2014). CLIMATE CHANGE SYNTESIS REPORT AR5. In *ipcc*. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00575-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3)
- Kesting, A., Treiber, M., e Helbing, D. (2010). Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1928), 4585–4605. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0084>
- Lacroix, K. (2018). Comparing the relative mitigation potential of individual pro-environmental behaviors. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1398–1407. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.068>

- Mahdinia, I., Arvin, R., Khattak, A., e Ghiasi, A. (2020). Safety, Energy, and Emissions Impacts of Adaptive Cruise Control and Cooperative Adaptive Cruise Control. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, 2674, 253–267.
- METRÔ-DF. (2017). *PLANO DE DESENVOLVIMENTO DO TRANSPORTE PÚBLICO SOBRE TRILHOS DO DISTRITO FEDERAL (PDTT/DF)*.
- NTU. (2019). *Estudo do impacto potencial do transporte por aplicativo no transporte público por ônibus*. 1–51. Disponível em: <http://files.antp.org.br/antpnoticias/estudo-do-impacto-do-transporte-por-aplicativo-no-transporte-publico-por-onibus--antp.pdf>
- Nunes, A., e Hernandez, K. D. (2019). Autonomous Vehicles and Public Health: High Cost or High Opportunity Cost? *Driverless Taxi Cost*. Disponível em: 10.31234/osf.io/6e94h
- Posada, F., e Façanha, C. (2015). *Brazil Passenger Vehicle Market Statistics*. (October). Disponível em: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil PV Market Statistics Report.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil_PV_Market_Statistics_Report.pdf)
- SAE International. (2019). Levels of driving automation. Disponível em: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>
- Salo, M., e Nissinen, A. (2017). *Consumption choices to decrease personal carbon footprints of Finns*.
- Scovronick, N., Dora, C., Fletcher, E., Haines, A., e Shindell, D. (2015). Reduce short-lived climate pollutants for multiple benefits. *The Lancet*, 386(10006), e28–e31. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)61043-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)61043-1)
- UNEP. (2019). Emissions Gap Report 2019. In *Emissions Gap Report 2019*. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30797/EGR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Universidade de Brasília. (2020). Campus Darcy Ribeiro. Disponível em: <http://www.unb.br/campi/brasilia-darcy-ribeiro?menu=424>
- Wadud, Z., MacKenzie, D., e Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- World Health Organization. (2018). *Cop24 Special Report: Health and Climate Change*. Disponível em: <https://www.who.int/globalchange/publications/COP24-report-health-climate-change/en/#:~:text=The three aims of this,between climate change and health.etext=Recommendations for UNFCCC negotiators and,impacts of this global challenge>.
- Zavala-Reyes, I. Y. H.-P. J. C., López-Ramírez, P., Diego-Ayala, U., Rosas, I., e Jazcilevich, A. (2017). Use of SUMO to assess human exposure and intake to PM2.5 near motorways: Preliminary Results. *Towards Simulation for Autonomous Mobility*, 63–70. Disponível em: https://www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/projekte/sumo/Proceedings_SUMO2017.pdf

Carolina de Sousa M. Arrais (csmarraais@gmail.com)

Pastor Willy Gonzales Taco (pwgtaco@gmail.com)

Programa de Pós-Graduação em Transportes, Universidade de Brasília (www.transportes.unb.br)

Grupo de Pesquisa Comportamento em Transportes e Novas Tecnologias (<http://gctnt.unb.br/>)

Campus Darcy Ribeiro, Edifício SG-12, 1º andar – Brasília, DF, Brasil