

Repad

Revista Estudos e
Pesquisas em Administração

vol. 4, n. 1, Janeiro-Abril/2020



UFMT



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ EM UM SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Camila Padovan da Silva
camilapadovans@hotmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-3081-2064>
Universidade de Brasília
Brasília, Distrito Federal, Brasil

Augusto César de Mendonça Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-0009-9798>
Universidade de Brasília
Brasília, Distrito Federal, Brasil

RESUMO

O crescimento das emissões de poluentes no setor transportes, fruto do incremento da frota de veículos em circulação no país, motivou sobremaneira a elaboração deste trabalho, que se propôs a comparar o consumo de combustível, consumo de energia e emissão de CO₂ equivalente de duas tecnologias alternativas ao uso de combustíveis não renováveis – os ônibus híbridos e elétricos. Foram propostos sete cenários nas rotas do Gama, Ceilândia, Sobradinho, Taguatinga e Jardim Botânico. O estudo propôs três métodos de cálculo que podem ser utilizados para ônibus urbanos. Quanto aos resultados constatou-se que, em termos de emissão de CO₂, o ônibus elétrico tem um potencial poluidor 64,7% menor do que o ônibus movido a diesel. O ônibus híbrido tem o potencial de emitir 23,9% menos CO₂ e consumir 18,8% menos combustível que o convencional. Os resultados mostraram que não houve diferença entre a inserção de novas tecnologias em rotas fora do horário de pico. A partir dos resultados, discute-se a importância da priorização de fontes renováveis na matriz energética brasileira, com vista a uma maior utilização de combustíveis alternativos.

Palavras-chave: Ônibus elétrico. Emissões de gases de efeito estufa. Consumo de combustível. Mobilidade urbana sustentável.

EVALUATION OF THE ENERGY SAVING POTENTIAL AND REDUCING CO₂ EMISSIONS IN A PUBLIC TRANSPORT SYSTEM

ABSTRACT

The growth in emissions of pollutants in the transport sector, due to the increase of the vehicle fleet in the country, greatly motivated the writing of this paper, dedicated to compare the emission of CO₂ equivalent, fuel and energy consumption of hybrid and electric buses. Three scenarios were proposed: BRT, non-segregated route during peak hours and non-segregated route during non-peak hours. The study proposed three calculation methods that can be used for city buses. As for the results it was found that,

in terms of CO₂ emission, the electric bus has a 64,7% lower pollutant potential than the diesel-powered bus. The hybrid bus has the potential to emit 23,9% less CO₂ and consume 18,8% less fuel than the conventional one. The results showed that there was no difference between the insertion of new technologies in route out of the peak hour. From the results, we discuss the importance of prioritizing renewable sources in the Brazilian energy matrix, with a view to greater use of alternative fuels.

Keywords: Electric Buses. Hybrid Buses. GHG Emissions. Fuel Consumption. Sustainable Urban Mobility.

Submetido: 26/12/2019

Aceito: 30/01/2020

Publicado: 31/01/2020

INTRODUÇÃO

O setor de transportes é atualmente o mais importante setor para viabilizar a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Vários países, principalmente os europeus, comprometidos com as metas acordadas de redução dos GEE, estão investindo na propulsão elétrica como a melhor estratégia para tais reduções.

Adicionalmente, nas últimas décadas têm se falado muito a respeito da degradação ambiental, principalmente a respeito da qualidade do ar em grandes centros urbanos (FERNANDES et al., 2015). O sistema de logística e transporte de pessoas gerou uma dependência no transporte rodoviário. Esta dependência tende a aumentar o consumo de energia, provocando um aumento nos problemas de poluição, muitas vezes cumulativo e irreversível como o caso da poluição atmosférica (RIBEIRO, 2001).

Mundialmente, o setor de transportes é o maior desafio para a redução das emissões de CO₂. No Brasil, não é diferente. Em 2015, o setor de transporte respondeu por 49,7% do consumo total de petróleo e em 2014, por 35% do consumo global de energia (IEA, 2012; ORSI et al., 2016). Entre 1970 e 2010, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor de transporte global aumentaram em 250%, uma taxa significativamente maior do que outros setores (IPCC, 2014). Neste contexto, o transporte rodoviário foi majoritariamente responsável pela emissão de 79 % de Monóxido de Carbono (CO), 57% de Óxido de Nitrogênio (NO_x), e 71% dos compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMCOV) e 60 % do material particulado (MP10) das emissões totais do setor (D'AGOSTO, 2015).

A propulsão elétrica tem sido considerada como a melhor opção para atingir metas de redução de CO₂ do setor de transportes, em diversos países. O crescimento da frota de veículos com propulsão elétrica (VE) indica que as próximas décadas serão marcadas pelos impactos de uma frota, provavelmente com menores consumos energéticos e menores emissões de CO₂.

As características das regiões metropolitanas brasileiras, tais como a capital Brasília, fazem com que a queima de combustíveis do setor de transportes seja o maior emissor de GEE, representados pelas emissões CO₂. Portanto, algumas estratégias de redução dos GEE do setor dos transportes nas regiões metropolitanas, podem influenciar fortemente as emissões totais. Alguns exemplos de ações neste sentido, são a implantação de sistemas BRT e a propulsão elétrica dos ônibus coletivos, com tecnologia híbrida (HEB) ou motor

elétrico com baterias (BEB). Contudo, o horizonte de tempo da mudança da frota ainda é longo. Assim, há a necessidade da quantificação dos impactos de tais implantações nos consumos energéticos e emissões de CO₂.

Além disso, a forma de geração de eletricidade é a principal desvantagem dos VE para as matrizes energéticas com baixas participações de energias renováveis. Consequentemente, eles só podem atingir todo o seu potencial de mitigação do aquecimento global se a eletricidade de seu carregamento não for, majoritariamente, de fontes energéticas de origem fóssil (DREIER et al., 2018). Portanto, a situação brasileira é favorável, pois a matriz energética do Brasil é considerada uma das mais renováveis do mundo (EPE, 2017).

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo quantificar e comparar as emissões de CO₂ e o consumo energético gerado por ônibus elétricos (BEB), híbridos (HEB) e à combustão interna (ICB), em dois contextos: operando em um sistema de Bus Rapid Transit (BRT) e em um sistema convencional não segregado. Também foram comparados em horário de pico e fora.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Chester et al. (2010), regiões metropolitanas podem variar até 70% em seu consumo de energia e emissões, dependendo da divisão modal no setor de transportes de passageiros. As variações de consumo de combustível são influenciadas pelas características dos veículos, características das vias, trânsito e o condutor, entretanto, de maneira geral existe uma correlação entre velocidades instantâneas na via e o consumo de combustível, como mostrado por Akcelik (1983). Vários autores publicaram funções semelhantes, tanto dos consumos de combustíveis, quanto da emissão de poluentes veiculares (EL-SHAWARBY; AHN; RAKHA, 2005; PANDIAN; GOKHALE; GHOSHAL, 2009). Semelhantemente, o estudo (ANTP, 1999), também indica tais correlações de consumos de combustível para veículos leves ligeiros e ônibus. Sendo assim, vários autores demonstraram essa forte influência entre velocidades instantâneas e consumos de combustíveis de veículos de transporte urbano. Portanto, tais correlações podem servir como método de avaliação dos consumos de combustível de ônibus urbano, desde que sejam conhecidos os perfis de velocidades dos trajetos.

Semelhantemente ao que acontece com os consumos de combustível, existe uma correlação direta entre as velocidades instantâneas e as emissões de CO₂. Embora as regiões possam diferir fortemente em seu balanço de emissões, o estudo de Liu et al. (2016) compararam diferentes modos de transporte de passageiros, com mais detalhes em relação ao uso e emissões de energia do ciclo de vida (por exemplo, aeronaves, ônibus, carros). Eles descobriram que o ônibus tem o menor uso de energia e emissões de CO₂. Embora o ônibus tenha o menor impacto, ele ainda emite diretamente no ambiente urbano em que as pessoas vivem. Portanto, as emissões dos ônibus urbanos devem ser reduzidas a fim de se alcançar uma cidade sustentável. Além disso, 85% de energia do total consumido no ciclo de vida, e 86% das emissões totais de CO₂ do ciclo de vida são consumidas e emitidas na fase de operação/uso do ônibus urbano convencional (DREIER et al., 2018).

Tendo em vista os consumos energéticos e emissões de CO₂ dos transportes urbanos, para as próximas décadas, há várias opções com potencial de redução dessas variáveis. A

implementação de sistemas de BRT aumentam as velocidades instantâneas e consequentemente diminuem os consumos e emissões. Adicionalmente, novos equipamentos e sistemas de propulsão também podem ser utilizados em combinação com sistemas de BRT, aumentando o potencial de redução dos consumos energéticos e emissões de CO₂. Devido a isso, muitos estudos buscam analisar o consumo energético e emissões de CO₂, e como as novas tecnologias podem reduzir esse alto impacto direto. A maioria dos estudos analisou ônibus urbanos de dois eixos com diferentes tipos de trem de força (HUO; WU; WANG, 2009; LAJUNEN, 2014; MCKENZIE; DURANGO-COHEN, 2012; RIBAU; SILVA; SOUSA, 2014; XU et al., 2015; ZHANG et al., 2014). Especialmente, a comparação de ônibus urbanos convencionais e híbridos (DREIER et al., 2018; MUNCRIEF et al., 2012). Outros analisam como diferentes tipos de combustíveis podem influenciar nesse impacto ambiental, como biodiesel e gás natural (D'AGOSTO; OLIVEIRA; ASSUMPTÃO, 2014; JANSSEN et al., 2010; SHEEHAN et al., 1998).

Embora uma extensa pesquisa tenha sido realizada para ônibus urbanos para outros países, o Brasil tem uma matriz energética mais renovável, ou seja, menos poluentes. Por isso, não se pode ter um cálculo universal de emissões para o setor de transportes, pois as emissões de gases poluentes variam de acordo com o sistema no qual está inserido, onde contém características intrínsecas a ele (MA et al., 2012).

Assim, este estudo contribui para a literatura científica da seguinte forma:

(i) O estudo preenche a lacuna identificada na literatura científica, comparando diferentes tipos de ônibus urbanos em relação ao uso de energia e emissões de GEE no Brasil. Um estudo de caso (Brasília) é usado para a comparação, levando em consideração as condições de tráfego para as rotas selecionadas. Portanto, uma avaliação abrangente dos diferentes tipos de ônibus urbanos deve ser feita considerando o mesmo contexto, em vez de comparar os resultados de diferentes estudos entre si, pois esses podem diferir significativamente as condições e/ou metodologias e cenários de tráfego utilizados;

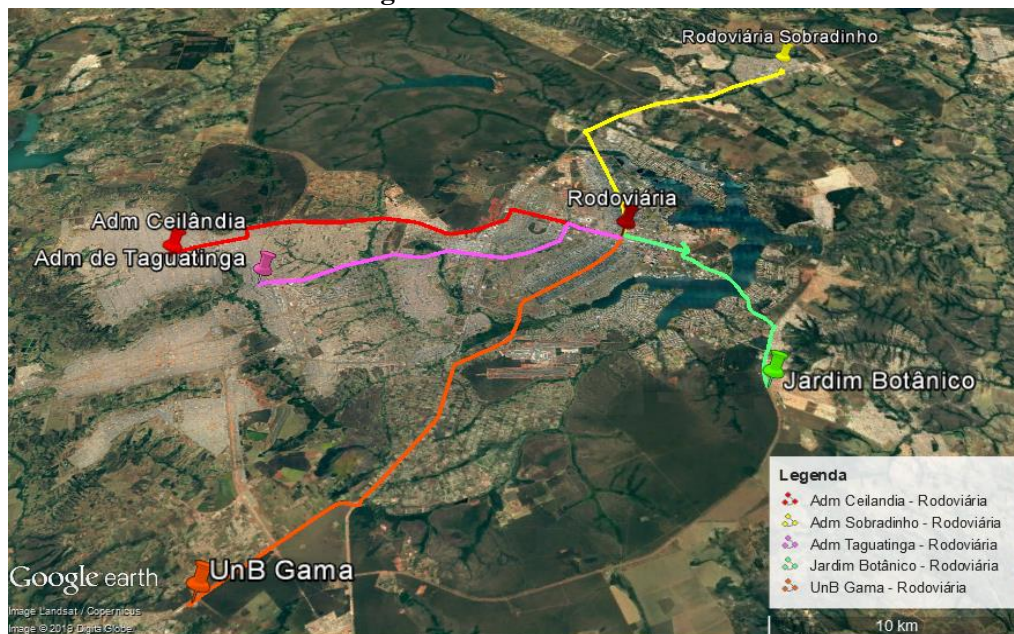
(ii) O estudo também contribui para a ciência dos transportes, fornecendo valores detalhados de uso de energia e estimativas de emissões de GEE, para o caso de Brasília. Assim, os dados podem ser muito úteis ao modelar e analisar novas alternativas para o sistema de transporte da região.

METODOLOGIA

As maiores concentrações de Polos Geradores de Viagens (PGVs) em Brasília (DF) estão no Plano Piloto e em Taguatinga. Por isso, optou-se por adotar a Rodoviária do Plano Piloto (RPP) como destino final de todas as viagens utilizadas nesse estudo. A consolidação e intensificação do uso residencial em regiões como Taguatinga e Ceilândia, com muita população e poucas oportunidades de trabalho, fez com que essas duas regiões fossem escolhidas como rotas no Eixo Oeste (PDTT/DF, 2019). A região do Gama, rota Sul, é a 6ª em número populacional de Brasília. A rota Norte, Sobradinho, é o eixo mais populoso da região, ficando em 7º lugar na colocação geral de densidade populacional de Brasília. O eixo Leste é constituído pelas várias unidades de conservação, configuram zonas com potencial de inibição do processo de urbanização. Contudo, o Jardim Botânico é um importante corredor de passagem, de regiões como São Sebastião, por isso foi selecionado para estudo no Eixo Leste (PDTU/DF, 2011).

O presente trabalho comparou os consumos energéticos e emissões de CO₂ de veículos de transporte coletivo de Brasília (DF). Para tal, foram escolhidas essas cinco rotas, conforme Figura 1.

Figura 1. Rotas escolhidas.



Fonte. Autoria própria a partir do PDTU/DF (2011)

A Tabela 1 mostra as características das rotas utilizadas:

Tabela 1. Características das Rotas Utilizadas

ROTAS	CORES	CARACTERÍSTICAS	DIST. ^[1]
Norte	Amarelo	Rodoviária de Sobradinho – RPP	17,6 km
Sul	Alaranjado	Campus Gama/Universidade de Brasília – RPP	26 km
Leste	Verde	Região comercial do Jardim Botânico – RPP	14,7 km
Oeste	Vermelho	Administração da Ceilândia - RPP	14,4 km
	Rosa	Administração de Taguatinga - RPP	12,4 km

Fonte. Autoria própria a partir do PDTU/DF (2011)

Nota. [1] Medido com GPS MAP 60CSx

Para fins de comparação, esse estudo propõe sete cenários: A, rota de via segregada (BRT) no trecho do Gama; B, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho do Gama; C, rota de via não segregada, fora do horário de pico, no trecho do Gama; D, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho de Ceilândia; E, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho de Sobradinho; F, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho de Taguatinga; G, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho do Jardim Botânico.

Condições, veículo e ciclos de condução

Para o levantamento experimental das velocidades dos ônibus (ciclo de condução), foram feitas viagens para cada uma das linhas de ônibus que circulam entre os pontos de origem e destino, nos horários de 07h30 e 9h00, caracterizando as velocidades nos horários de pico. Somente o cenário C não se encaixa no horário de pico, mas foi realizado no turno matutino. As velocidades instantâneas foram medidas com um

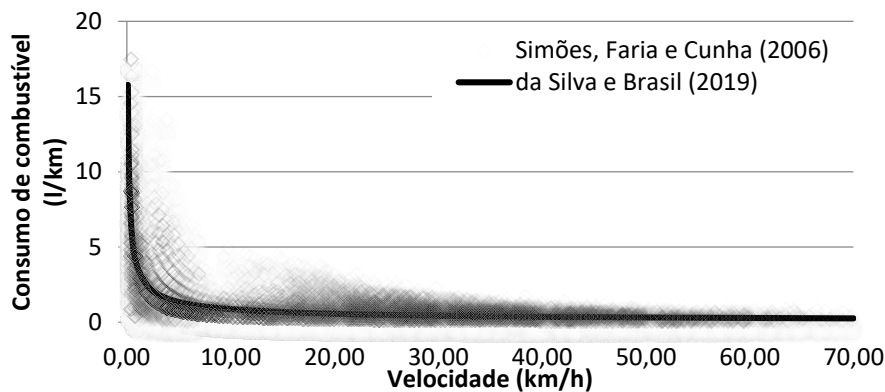
GPS MAP 60CSx, em frequência de aquisição de 1 Hz. Já que o presente trabalho pretende comparar os ganhos energéticos em vias não segregadas e sistema BRT (segregadas), foram realizadas as medições de velocidades nas rotas típicas, em ambos cenários: linhas de ônibus em faixas exclusivas e linhas convencionais junto ao trânsito.

A frota de ônibus de Brasília foi analisada, sendo composta, em sua maioria, por ônibus com cerca de 11-12 metros de comprimento e 15-18 toneladas. O combustível usado foi o Diesel com baixo teor de enxofre, em conformidade com a qualidade ANP do combustível. O veículo Euro IV, ou Fase do PROCONVE P6, foi o padrão utilizado para os ônibus a diesel testados durante o período de estudo. Nesse horário a taxa de ocupação dos veículos foi de 60% a 70%.

Consumo de combustível

O cálculo dos consumos de combustível para os ICB, no presente trabalho, foi feito através de dados disponibilizados de um estudo experimental realizado (SIMÕES; FARIAS; CUNHA, 2006) em Lisboa, Portugal, com ônibus EURO IV, no período da manhã, nos horários de pico e fora, conforme a Figura 2. A linha preta corresponde à função de correlação do consumo de combustível e velocidades para os ônibus convencionais proposta.

Figura 2. Função proposta da correlação do consumo de combustível com a velocidade.

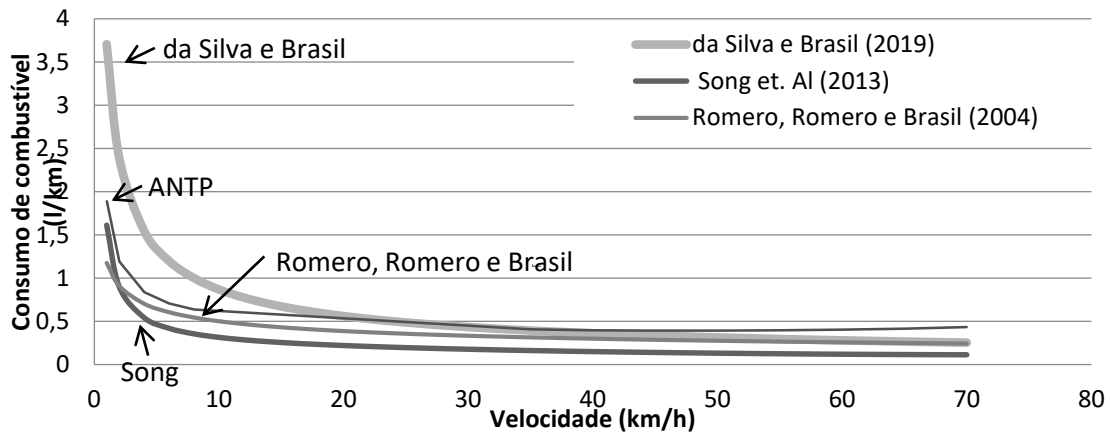


Fonte. Autoria própria a partir de Simões, Farias e Cunha (2006)

A partir dos experimentos realizados por Simões, Farias e Cunha (2006) foi possível obter uma correlação matemática do consumo de combustível em função da velocidade instantânea nas vias. A função proposta foi comparada com estudos já existentes para verificar sua robustez, conforme Figura 3.

Os valores da função proposta por ANTP (1999); Romero, Romero e Brasil (2004) e Song et al. (2013) são bastante coincidentes para velocidades maiores que 15 km/h, mas divergem para velocidades menores.

Figura 3. Relação entre velocidade e consumo de combustível para o ônibus.



Fonte. Autoria própria a partir de ANTP (1999); Romero, Romero e Brasil (2004); Song et al.(2013).

Contudo, estudos experimentais (ANTUNES, 2009; FREY et al., 2007; SIMÕES; FARIAS; CUNHA, 2006) indicam que é preciso existir uma correlação mais universal que contemple as velocidades mais elevadas, mas especialmente as velocidades abaixo de 15 km/h (Figura 2). A equação (1) representa a correlação de consumo para todas as condições de velocidades, proposta pelo estudo, para ICB.

$$\text{Cons}_{\text{Bus}} = 3,7072 \cdot V^{-0,629} \quad (1)$$

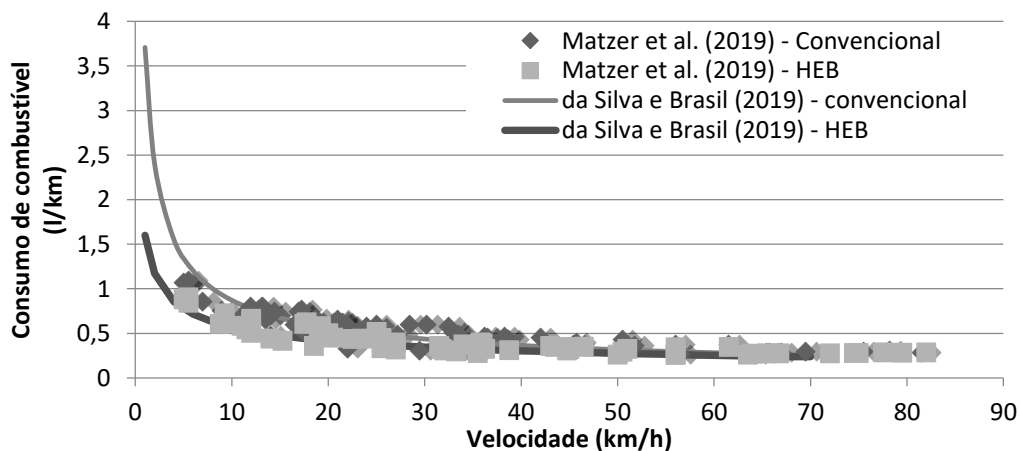
Onde:

Cons_{Bus} = Consumo de combustível para os ônibus convencionais (l/km);

V = Velocidade do veículo (km/h).

Para o cálculo do consumo de combustível dos HEB, foram levantados dados do estudo de Matzer et al. (2019). A Figura 4 mostra os dados levantados pelo estudo citado, comparando-os com as funções determinadas por esse estudo.

Figura 4. Consumo de combustível para ônibus convencional e híbrido



Fonte. Autoria própria a partir de Matzer et al. (2019).

A partir da robustez conferida, a equação (2) traz em valores o consumo de combustível em função da velocidade, para os ônibus híbridos.

$$\text{Cons}_{\text{HEB}} = 1,6 \cdot V^{-0,45}$$

(2)

Onde:

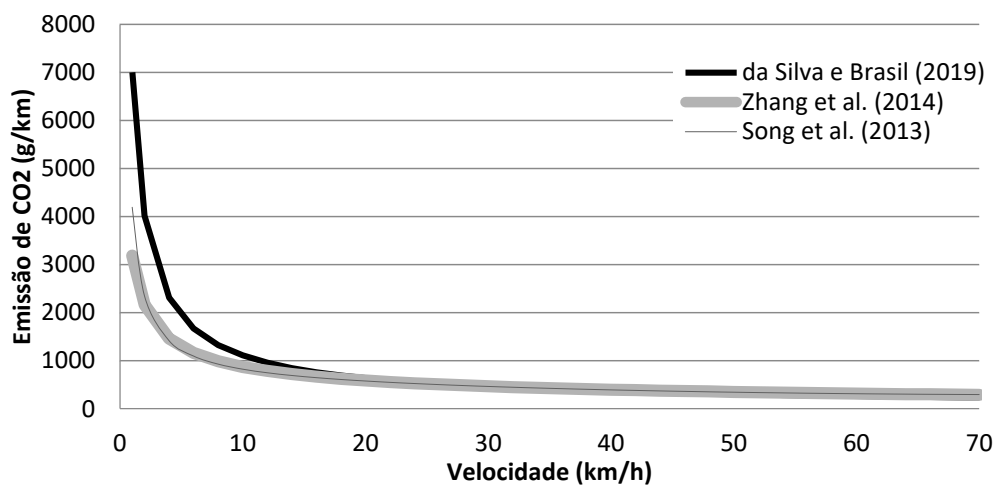
Cons_{HEB} = Consumo de combustível para ônibus híbridos (l/km);

V = Velocidade do veículo (km/h).

Emissões de CO₂

A mesma metodologia aplicada acima, para determinação da função de correlação para o consumo de combustível, foi repetida para as emissões de CO₂. Assim, antes de propor uma função de emissão de CO₂, houve o cuidado de manter a mesma simetria obtida entre as funções de correlação de consumo de combustível entre de Song et al. (2013) e o presente trabalho. Posteriormente, estendeu-se a mesma simetria para uma função de emissão de CO₂. Por fim, foi possível comparar com os estudos de Song et al. (2013) e Zhang et al.(2014), conforme Figura 5.

Figura 5. Correlação entre velocidade e emissão de CO₂



Fonte. Autoria própria a partir de Song et al. (2013); Zhang et al. (2014).

Assim como para a Figura 2, para velocidades menores que 15 km/h, as equações propostas por Song et al. (2013) e Zhang et al. (2014) resultam em valores ligeiramente menores que aquelas propostas no presente trabalho. Portanto, igualmente ao anteriormente proposto para os consumos de combustível, a equação (3) será aplicada nesse estudo como proposta para as emissões de CO₂ em função das velocidades instantâneas para os ICB.

$$E_{\text{CO}_2} = 7000 \times V^{-0,8} \tag{3}$$

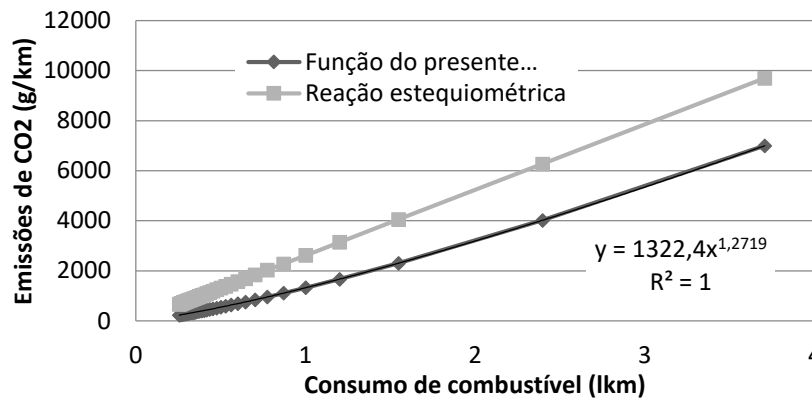
Onde:

E_{CO_2} = Massa de poluente para ônibus convencionais (g/km);

V = Velocidade do veículo (km/h).

Para calibrar a função de emissão de CO₂, tanto para o veículo convencional (ICB), quanto para o HEB foi feita uma abordagem de avaliação dos valores de emissão da CO₂ em função do consumo de combustível, e compará-los com os mesmos valores caso a reação do Diesel fosse uma reação estequiométrica (Fig. 6). Portanto, observa-se que determinar as emissões de CO₂, assumindo uma reação estequiométrica, superestima as emissões. Assim, as funções para as emissões de CO₂ do ICB e HEB, propostas pelo presente estudo, seguem a Figura 6 e equação (4).

Figura 6. Correlação do consumo de combustível e emissões de CO₂ para ônibus.



Fonte. Autoria própria a partir de Song et al. (2013)

Assim, a equação (4) determina a a função utilização para o cálculo das emissões de CO₂ para os ônibus híbridos.

$$E_{CO2HEV} = 1322,4 \times Cons_{Bus}^{1,2719} \tag{4}$$

Onde:

E_{CO2HEV} = Massa de poluente para ônibus híbridos (g/km);

$Cons_{Bus}$ = Consumo de combustível (l/km).

Emissão de CO₂ do veículo elétrico

Com o objetivo de comparar as emissões dos BEB com os ICB e HEB, foram levantadas as séries históricas das emissões de CO₂ da matriz elétrica brasileira e da região Centro-Oeste (SEEG, 2019). O fator de emissão máximo da matriz brasileira, em 2015, foi de 108,23tonCO₂/GWh, contudo, em novembro de 2018 o fator de emissão atingiu o mínimo de 43,68tonCO₂/GWh. No Distrito Federal, os fatores da matriz elétrica anuais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Fator de emissão anual para o Distrito Federal

Ano	Geração de eletricidade (GWh)	Emissões CO ₂ (t)	tCO ₂ /GWh
2009	5129910,041	394945560	76,99
2010	4688445,229	384274617	81,96
2011	4213584,966	362586881	86,05
2012	3723073,596	346906482	93,18
2013	3212198,255	317780406	98,93
2014	2690039,665	267571394	99,47

2015	2158810,186	197612315	91,54
2016	1628173,188	133485254	81,98
2017	1088084,952	92345471	84,87
2018	541402,5434	41286516	76,26

Fonte. Autoria própria a partir de SEEG (2019)

Para o cálculo das emissões do ônibus elétrico o fator de emissão máximo, para o Centro-oeste, é o de 2014, 99,47tonCO₂/GWh, e o mínimo é o de 2018, 76,26 tonCO₂/GWh. Esses valores foram os utilizados nesse estudo.

Consumo energético

Para se estimar o consumo energético do ICB e HEB foram utilizados a densidade do diesel, 0,84 kg/l, e o seu poder calorífico inferior, 11,76 kWh/kg, como valores referência, conforme equação (5) (ANP, 2018).

$$E = \text{Cons}_{\text{Bus}} \times \rho_{\text{diesel}} \times \text{PCI} \tag{5}$$

Onde:

E = Energia consumida (kWh/km);

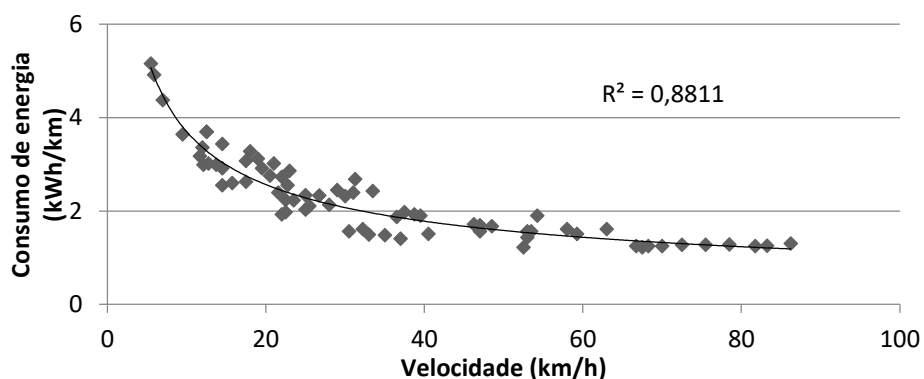
Cons_{Bus} = Consumo de combustível (l/km);

ρ_{diesel} = Densidade do diesel (kg/l);

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/kg).

Para determinar o consumo de energia do BEB, foram utilizados dados do estudo de Matzer et al. (2019). A Figura 7 mostra o consumo de energia específico para um BEB com metade da capacidade de carga e uma massa bruta do veículo (GVM) de mais de 18 toneladas.

Figura 7. Correlação entre a velocidade e o consumo energético para os BEB.



Fonte. Autoria própria a partir de Matzer et al. (2019)

Assim, a equação (6) determina o consumo de energia, para os BEB, em função da sua velocidade instantânea.

$$E_{\text{BEB}} = 12,457 \times V^{-0,527} \tag{6}$$

Onde:

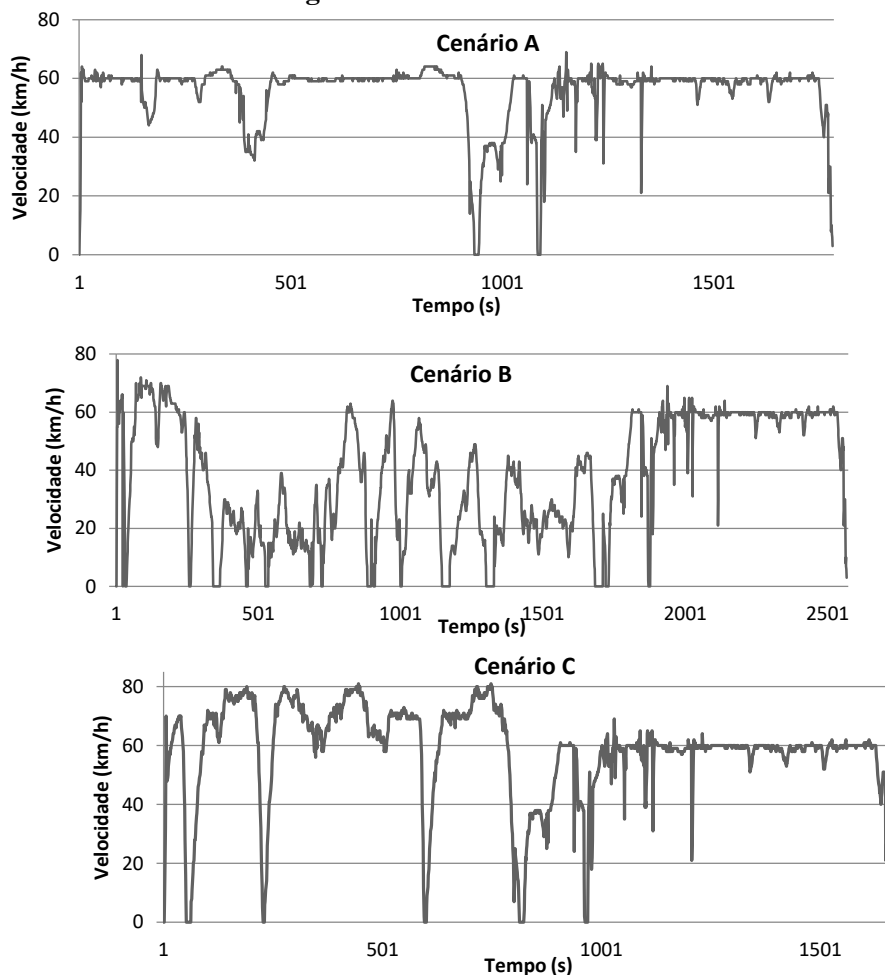
E_{BEB} = Energia consumida pelo ônibus elétrico (kWh/km);

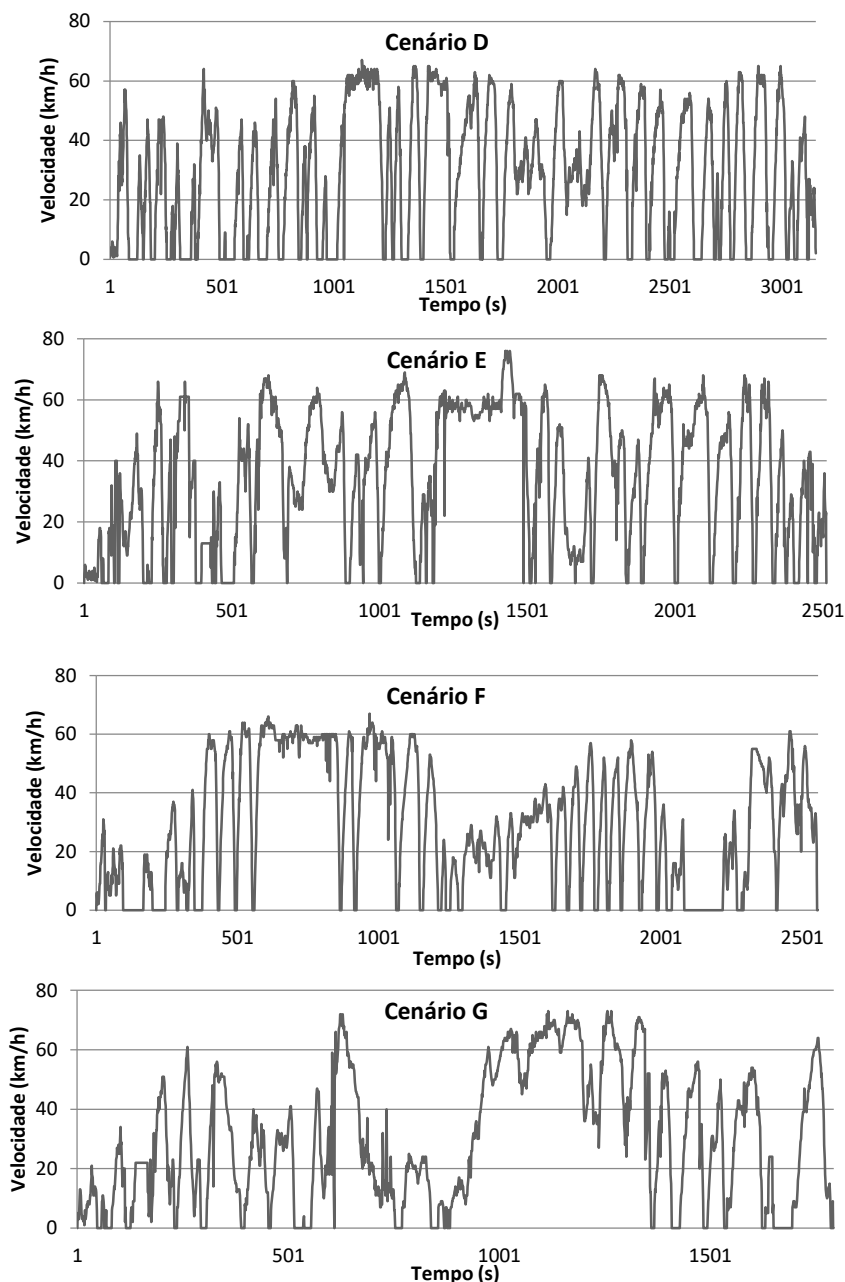
V = velocidade do veículo (km/h).

RESULTADOS

O GPS registrou o desempenho do ônibus nas rotas selecionadas, conforme Figura 8.

Figura 8. Velocidades instantâneas





Fonte. Elaborado pelos autores (2019)

A Tabela 3 mostra os resultados detalhados, de cada cenário proposto, para o consumo de energia, dado em kWh/km; as emissões de CO₂, em gCO₂/km; consumo de combustível, em L/km. As colunas 5, 6, 12,13, 14 e 19 mostram o Gap - Gap (%) ¹ – onde é dado o percentual de variação daquelas variáveis (HEB e BEB) comparada com os ICB. Enquanto as colunas 7, 15 e 16, mostram o Gap - Gap (%) ² – que mostra o percentual de variação da variável BEB comparada com os HEB.

Tabela 3. Resultados dos cenários analisados

1	Energia (kWh/km)			Emissões de CO ₂ (gCO ₂ /km)										Consumo de combustível (L/km)				
	ICB	HEB	BEB	Gap (%)1			ICB	HEB	BEB		Gap (%)1		Gap (%)2		ICB	HEB	Gap (%)1	
				HEB	BEB	Gap (%)2			HEB	BEB	Gap (%)1	Gap (%)2						
													2018	2014				2018
Cenário A	2,9	2,6	1,5	11,2	48,7	42,2	277,9	238,4	113,1	147,6	14,2	59,3	46,9	52,6	38,1	0,29	0,26	11,2
Cenário B	3,4	2,9	1,7	16,1	50,4	40,8	351,0	278,1	130,0	169,6	20,8	63,0	51,7	53,3	39,0	0,35	0,29	16,1
Cenário C	2,8	2,5	1,4	10,3	48,4	42,5	264,0	229,2	142,2	109,0	13,2	46,1	58,7	38,0	52,5	0,28	0,25	10,3
Cenário D	3,6	2,99	1,78	17,2	50,7	40,5	372,9	290,9	135,6	176,8	22,0	63,6	52,6	53,4	39,2	0,37	0,30	17,2
Cenário E	3,4	2,83	1,67	15,6	50,2	41,0	340,8	272,2	127,5	166,2	20,1	62,6	51,2	53,2	38,9	0,34	0,29	15,6
Cenário F	3,9	3,13	1,88	18,8	51,3	40,0	405,6	308,6	143,1	186,7	23,9	64,7	54,0	53,6	39,5	0,39	0,32	18,8
Cenário G	3,6	2,98	1,78	17,7	50,9	40,3	378,4	291,6	135,6	176,9	22,9	64,2	53,2	53,5	39,3	0,37	0,30	17,7
Média	3,4	2,8	1,7	-	-	-	341,5	272,7	132,4	161,8	-	-	-	-	-	0,3	0,3	-

Fonte. Elaborado pelos autores (2019)

As colunas 2, 3 e 4 apresentam os valores específicos do consumo de energia, em kWh/km. Os resultados mostraram que os ônibus híbridos e elétricos consomem significativamente menos energia que os convencionais. Valores similares de consumo energético foram apresentados na literatura (LAJUNEN, 2014; MUNCRIEF et al., 2012). Os resultados mostraram uma redução no consumo energético dos HEB em relação ao ICB, de até 18,8%, cenário F. Mostrou também uma redução de até 50,9% dos BEB em relação ao ICB, para o cenário G. Além disso, uma redução na utilização do BEB em relação aos HEB de até 42,5%, para o cenário C. Os valores médios do consumo energético para o ICB foi de 3,4 kWh/km; para o HEB foi de 2,8 kWh/km; e, por fim, o do BEB foi de 1,7 kWh/km.

As colunas 8, 9, 10 e 11 mostram as emissões de dióxido de carbono (CO₂), em gCO₂/km, para cada cenário analisado. Lembrando, que as colunas 10 e 11 são os valores mínimos e máximos, respectivamente, das emissões dos BEB, para a região do Centro-Oeste brasileiro. Em todos os cenários, o BEB obteve melhores resultados, emitindo menos poluente. Entre os cenários analisados, o cenário F mostrou os números mais elevados de emissões de CO₂ por quilometro rodado. Para o cenário A, o HEB, em comparação ao ICB, reduziu em 14,2% as emissões. E nesse cenário houve as maiores reduções percentuais com a implantação de ônibus elétricos e híbridos. Essa redução pode chegar até 64,7%, com a implantação dos BEB em relação aos ICB. As colunas 15 e 16 mostram a variação das emissões do BEB em relação ao HEB. E a maior variação foi de 53,6%, para o cenário F. As emissões de CO₂ médio para os cenários analisados foi de 341,5 gCO₂/km, para os ICB; de 272,7 gCO₂/km, para os HEB; e 132,4 gCO₂/km, o mínimo emitido em 2018, e 161,8 gCO₂/km, o máximo emitido em 2014, para os BEB.

As colunas 17 e 18 mostram o consumo de combustível, em l/km, para cada cenário analisado. Em todos os cenários, o HEB obteve melhores resultados, consumindo menos combustível. O cenário que houve a maior economia no consumo de combustível foi o cenário F, com uma redução de 18,8%. E por último, houve uma economia de 10,3% para o cenário C. Mesmo com uma menor economia entre os veículos analisados no cenário C, esse cenário foi o que consumiu menos combustível em valores totais. Isso se dá, pois a velocidade é exponencialmente responsável pelo consumo de combustível. Assim, quanto maior a velocidade média do percurso, menor o consumo de combustível. Isso pode ser visto na Figura 4, que para velocidade elevadas esse consumo é constante e baixo. Valores similares foram apresentados na literatura (ZHANG et al., 2014).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs funções matemáticas simples e uma metodologia para direta estimativa dos consumos energéticos e emissões de CO₂ de ônibus urbanos, com propulsão convencional, híbrida e elétrica com baterias, comprando-os em situações de sistema BRT, sem vias segregadas, com ou sem trânsito.

Historicamente, os ônibus de transporte público recebem substancial atenção, no que diz respeito às emissões urbanas. Os resultados da simulação mostram claramente que a eficiência energética do ônibus urbano pode ser significativamente melhorada por hibridização e eletrificação. Essa melhoria depende fortemente do grau de eletrificação, portanto, quanta energia elétrica pode ser usada para a operação do sistema. Os BEB e HEB apresentaram menor consumo de combustível, menor emissões e consumo energético, sendo o primeiro o mais benéfico.

Além disso, para todos os casos foi possível observar que o ciclo de condução e o fato da rota ser segregada ou não, influenciam substancialmente nos valores dos consumos, para os horários de pico. Porém não houve grandes variações nos consumos e emissões entre o cenário A e C, pois devido às velocidades mais elevadas, não faria muita diferença se houvesse a inserção de veículos elétricos e híbridos fora do horário de pico.

O ônibus elétrico mostrou sua capacidade de reduzir o consumo energético em até 51,3%. Além disso, emite 64,7% menos que os ICB, para o cenário F. Para os híbridos, as emissões de CO₂ podem ser reduzidas em até 23,9%, enquanto o consumo energético e de combustível podem ser reduzidos em até 18,8%.

Os resultados positivos dos veículos elétricos e híbridos na dimensão ambiental sustentam a necessidade de políticas de incentivo ao uso dessa tecnologia no sentido de contribuir para uma redução dos impactos ambientais, relacionados a emissões de gases de efeito estufa, no setor de transportes. No caso do transporte público de passageiros, os ônibus elétricos, menos poluentes e com menor custo de manutenção, podem ser uma alternativa de transporte eficiente para cidades mais limpas.

Nessa perspectiva, mais estudos incluindo o ciclo de vida para essas rotas deveriam ser realizados para o entendimento detalhado do comportamento quanto o consumo energético, de combustível e emissões de poluentes dos cenários e tecnologias analisadas. Além disso, Para trabalhos futuros sugere-se a análise econômica de investimentos para a troca da frota, analisando a fundo se há a possibilidade de se ter um cenário de sustentabilidade no sistema de transportes de Brasília. Contribuindo, assim, para embasar as futuras decisões dos gestores e operadoras.

REFERÊNCIAS

AKCELIK, R. Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic Management. **Australian Road Research Board**, v. 1983-4, n. 1, p. 56, 1983. Disponível em: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=195997>.

ANP. **Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores**. . [s.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/anuario-2019-fatores-de-conversao.pdf>.

ANTP. Redução das Deseconomias Urbanas Com a Melhoria do Transporte Público. **Revista dos Transportes Públicos**, 1999. Disponível em: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/057A84C9-76D1-4BEC-9837-7E0B0AEAF5CE.pdf.

ANTUNES, G. N. **Energy and environmental monitoring of alternative fuel vehicles**. 2009. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2009.

CHESTER, M. V.; HORVATH, A.; MADANAT, S. Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions. **Atmospheric Environment**, 2010. DOI 10.1016/j.atmosenv.2009.12.012. .

D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

D'AGOSTO, M. D. A.; OLIVEIRA, C. M.; ASSUMPÇÃO, F. D. C. Alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro: uma análise utilizando Inventário de Ciclo de Vida (ICV). **TRANSPORTES**, 2014. DOI 10.14295/transportes.v22i1.736. .

DREIER, D.; SILVEIRA, S.; KHATIWADA, D.; FONSECA, K.V.O.; NIEWEGLOWSKI, R.; SCHEPANSKI, R. Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2018. DOI 10.1016/j.trd.2017.10.015. .

EL-SHAWARBY, I.; AHN, K.; RAKHA, H. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2005. DOI 10.1016/j.trd.2004.09.002. .

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017**. 2017. DOI 620.9:553.04(81). .

FERNANDES, V. A.; D'AGOSTO, M.A.; OLIVEIRA, C.; ASSUMPÇÃO, F.C.; DEVEZA, A.C.P. Eco-driving: uma ferramenta para aprimorar a sustentabilidade do transporte de resíduos urbanos. **Revista Transportes**, 2015. DOI 10.14295/transportes.v23i2.773. .

FREY, H. C.; ROUPHAIL, N.; ZHAI, H.; FARIAS, T.L.; GONÇALVES, G. Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 4, p. 281-291, 2007. DOI 10.1016/j.trd.2007.03.003. .

HUO, H.; WU, Y.; WANG, M. Total versus urban: Well-to-wheels assessment of criteria

pollutant emissions from various vehicle/fuel systems. **Atmospheric Environment**, 2009. DOI 10.1016/j.atmosenv.2008.12.025. .

IEA. **Tracking Clean Energy Progress 2013. Technology**. [s.l.: s.n.], 2012.

IPCC. **AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. . [s.l.: s.n.], 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf.

JANSSEN, R.; RUTZ, D.; HOFER, A.; MOREIRA, J.; SANTOS, S.; COELHO, S.; VELAZQUEZ, S. Bioethanol as sustainable bus transport fuel in Brazil and Europe. **18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, France**, n. May, p. 3–7, 2010. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Dominik_Rutz/publication/228822792_BIOETHANOL_AS_SUSTAINABLE_BUS_TRANSPORT_FUEL_IN_BRAZIL_AND_EUROPE/links/0deec518a515f9e5da000000.pdf%0Ahttp://web.etaflorence.it/uploads/media/V4.3.12_paper.pdf

LAJUNEN, A. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2014. DOI 10.1016/j.trc.2013.10.008. .

LIU, H.; XU, Y. ; STOCKWELL, N.; RODGERS, M.; GUENSLER, R. A comparative life-cycle energy and emissions analysis for intercity passenger transportation in the U.S. by aviation, intercity bus, and automobile. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2016. DOI 10.1016/j.trd.2016.08.027.

MA, H.; BALTHASAR, F.; TAIT, N.; RIERA-PALOU, X.; HARRISON, A. A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. **Energy Policy**, 2012. DOI 10.1016/j.enpol.2012.01.034.

MATZER, C.; WELLER, K.; DIPPOLD, M.; LIPP, S.; RÖCK, M.; REXEIS, M.; HAUSERBERGER, S. **Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1**. . [s.l.: s.n.], 2019.

MCKENZIE, E. C.; DURANGO-COHEN, P. L. Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2012. DOI 10.1016/j.trd.2011.09.008. .

MUNCRIEF, R. L.; CRUZ, M.; NG, H.; HAROLD, M. Impact of auxiliary loads on fuel economy and emissions in transit bus applications. 2012. **Anais [...]**. [s.l.: s.n.], 2012. DOI 10.4271/2012-01-1028.

ORSI, F.; MURATORI, M.; ROCCO, M.; COLOMBO, E.; RIZZONI, G. A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. **Applied Energy**, 2016. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.02.039. .

PANDIAN, S.; GOKHALE, S.; GHOSHAL, A. K. Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2009. DOI 10.1016/j.trd.2008.12.001. .

PDTT/DF. **Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do Distrito Federal – PDTT/DF – Relatório Final**. . Brasília/ DF: [s.n.], 2019. Disponível em: http://www.metro.df.gov.br/?page_id=40044.

PDTU/DF. **PDTU/DF – Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do DF e entorno.** . Brasília/ DF: [s.n.], 2011.

RIBAU, J. P.; SILVA, C. M.; SOUSA, J. M. C. Efficiency, cost and life cycle CO2 optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. **Applied Energy**, 2014. DOI 10.1016/j.apenergy.2014.05.015. .

RIBEIRO, S. K. **Transporte sustentável: alternativas para ônibus urbanos.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

ROMERO, S. M. A.; ROMERO, R. R. da; BRASIL, A. C. de M. Influência do congestionamento e modo de condução, nas velocidades, consumos e emissões de um ônibus urbano. **TRANSPORTES**, v. 12, n. 2, jul. 2004. DOI 10.14295/transportes.v12i2.137. .

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa.** . [s.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg/>.

SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRABOSKI, M.; SHAPOURI, H. Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus A Joint Study Sponsored by. **National Renewable Energy Laboratory US Department of Energy US Department of Agriculture**, 1998. DOI 10.2172/658310. .

SIMÕES, A. .; FARIAS, T. L.; CUNHA, F. J. GISFROT II - Impact of an Integrated Drivers Training and Monitorization Scheme on Fleet Performance: a Case Study of Rodoviaria de Lisboa, SA. 2006. **Anais [...]**. [s.l.]: AET Papers Repository, 2006.

SONG, Y. Y.; YAO, E.J.; ZUO, T.; LANG, Z.F. Emissions and fuel consumption modeling for evaluating environmental effectiveness of ITS strategies. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, 2013. DOI 10.1155/2013/581945.

XU, Y.; GBOLOGAH, F.; LEE, D.Y.; LIU, H.; RODGERS, M.O.; GUENSLER, R. Assessment of alternative fuel and powertrain transit bus options using real-world operations data: Life-cycle fuel and emissions modeling. **Applied Energy**, 2015. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.04.112.

ZHANG, S.; WU, Y.; LIU, H.; HUANG, R.; YANG, L.; LI, Z.; FU, L.; HAO, J. Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses in Beijing. **Applied Energy**, 2014. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.09.017.