

Quantificação das emissões de gases de efeito estufa evitadas por ônibus elétricos na América Latina: uma metodologia simplificada de avaliação do ciclo de vida

Ana Beatriz Rebouças and André Cieplinski

INTRODUÇÃO

A plataforma E-BUS RADAR acompanha a implementação de ônibus elétricos a bateria (BEB, do inglês *battery electric bus*) e trólebus nos sistemas de transporte público das cidades latino-americanas e suas reduções associadas nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação com modelos convencionais (E-BUS RADAR, 2024). Criada e mantida por membros da parceria Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (ZEBRA), com apoio do Instituto Clima e Sociedade (ICS), a plataforma E-BUS RADAR mapeou 5.068 ônibus elétricos em operação nas frotas de transporte público de 41 cidades em 12 países da América Latina no final de 2023.¹

Este trabalho apresenta uma metodologia desenhada para melhorar a capacidade da plataforma de calcular as emissões de GEE evitadas pela introdução de BEBs nas frotas. A metodologia aplica uma avaliação do ciclo de vida (ACV) para estimar as emissões de GEE de ônibus elétricos e de ônibus equivalentes com motor de combustão interna (ICE, do inglês *internal combustion engine*), levando em conta as emissões de escapamento e as emissões associadas à fabricação do veículo e da bateria, à manutenção e à produção de combustível e eletricidade.

www.theicct.org

communications@theicct.org

[@theicct.org](https://www.theicct.org)

¹ Em dezembro de 2023, os 12 países mapeados pela plataforma E-BUS RADAR eram: Argentina, Barbados, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Guatemala, México, Paraguai, Peru, Uruguai e Venezuela.

Agradecimento: o financiamento para este trabalho foi generosamente fornecido pelo Instituto Clima e Sociedade (ICS).

Por ser uma plataforma ágil e frequentemente atualizada, o E-BUS RADAR requer uma metodologia robusta e flexível, o que, por sua vez, exige a simplificação das premissas. Assim, os ônibus foram classificados em cinco categorias: trólebus de 12-15 m, trólebus acima de 18 m, BEBs de 8-11 m, BEBs de 12-15 m e BEBs acima de 18 m; esta última representa modelos articulados e biarticulados. Para cada categoria de ônibus e cidade, as emissões de fabricação do veículo, manutenção e bateria são estimadas com base em informações técnicas e operacionais, como eficiência energética média, capacidade da bateria, peso e quilômetros percorridos anualmente pelo veículo. Valores específicos de cada país são aplicados às misturas de biodiesel, às intensidades de carbono de diferentes matérias-primas e à rede elétrica.

O objetivo desta metodologia é garantir que o E-BUS RADAR possa fornecer informações atualizadas sobre a implementação de BEBs na América Latina, com estimativas confiáveis do potencial de redução de emissões de seu ciclo de vida.

ESCOPO DO ESTUDO

As emissões de GEE evitadas com a eletrificação das frotas de ônibus são calculadas como a diferença entre as emissões dos ônibus com ICE substituídos e as dos ônibus elétricos implementados. As emissões, que incluem dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), são representadas em gramas de CO₂ equivalente (CO₂e) e baseadas nos fatores de potencial de aquecimento global de 100 anos fornecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2021).

A abordagem de ACV adotada neste estudo considera as emissões de GEE produzidas durante a vida operacional de um ônibus, o que inclui as emissões da fabricação e manutenção (ciclo do veículo), bem como as emissões da produção e do uso de combustível e de eletricidade (ciclo da energia).² A Tabela 1 apresenta as emissões de GEE consideradas no escopo deste estudo.

Tabela 1

Escopo das emissões de GEE consideradas neste estudo

Ciclo	Escopo	Descrição
Emissões do ciclo do veículo	Glíder* e trem de força	Produção do ônibus, incluindo extração e processamento de matéria-prima, fabricação de componentes e montagem do veículo
	Bateria	Produção de conjuntos de baterias, incluindo extração e processamento de matéria-prima, fabricação de componentes e montagem do conjunto de baterias
	Manutenção	Substituição de peças e acessórios no decorrer da vida útil do veículo, incluindo pneus, óleo e líquido de arrefecimento, entre outros
Emissões do ciclo da energia	Combustíveis fósseis	<ul style="list-style-type: none"> Extração, transporte e processamento de petróleo Refino e distribuição de combustível Queima de combustível
	Biocombustíveis	<ul style="list-style-type: none"> Cultivo, transporte e processamento de matérias-primas Produção e distribuição de combustível Emissões da mudança indireta do uso da terra relativa ao cultivo de matéria-prima para biocombustíveis agrícolas
	Eletricidade	Geração de eletricidade (incluindo a infraestrutura da usina), transmissão, distribuição e perdas de carga

* *Glíder* refere-se à carroceria e ao chassi do veículo, sem o trem de força.

² Este estudo segue a mesma abordagem de ACV adotada em Bieker (2021) e O'Connell et al. (2023).

No ciclo do veículo, o cálculo considera as emissões associadas à produção da bateria para ônibus elétricos e as emissões do restante do veículo — *glider* e trem de força — tanto para os ônibus elétricos quanto para aqueles movidos a combustão interna. Esse ciclo também considera as emissões geradas durante a manutenção do ônibus.

O ciclo da energia, seja para o combustível usado pelos ônibus com ICE, seja para a eletricidade usada para carregar os ônibus elétricos, inclui as emissões do poço ao tanque (WTT, do inglês *well-to-tank*), referentes à produção de energia, e as emissões do tanque à roda (TTW, do inglês *tank-to-wheel*), referentes ao uso. As emissões WTT incluem as emissões da extração da fonte de energia, da produção do combustível e da distribuição. As emissões TTW correspondem às emissões do veículo durante a queima do combustível. E as emissões do ciclo completo da energia são chamadas de emissões do poço à roda (WTW, do inglês *well-to-wheel*).

No caso dos biocombustíveis de base agrícola, o ciclo da energia também inclui emissões da mudança indireta do uso da terra (ILUC, do inglês *indirect land-use change*). Essa mudança ocorre quando um aumento da demanda por matéria-prima para biocombustíveis resulta na conversão da terra, deslocando as atividades existentes, como a produção agrícola. As emissões de ILUC são maiores quando o aumento da demanda por biocombustíveis resulta na conversão de terras com alto estoque de carbono que não eram usadas anteriormente para a agricultura.

As emissões associadas à infraestrutura para carregamento de ônibus elétricos ou distribuição de combustível e reciclagem de ônibus não estão incluídas no escopo deste estudo. Foi considerado que elas são semelhantes em diferentes tecnologias ou têm um impacto baixo sobre as emissões totais do ciclo de vida.

COLETA DE DADOS DE ÔNIBUS

Um dos principais desafios da plataforma E-BUS RADAR é a coleta de dados confiáveis sobre as operações de ônibus nas cidades da América Latina. Dados operacionais e informações técnicas dos veículos são necessários para calcular as emissões evitadas, conforme detalhado na Tabela 2. As informações técnicas necessárias incluem o modelo e o fabricante do ônibus, o tamanho do ônibus, a massa do veículo e a capacidade da bateria. As características operacionais dos ônibus incluem o número de veículos em operação por tamanho, a vida útil, a distância anual percorrida e o consumo de energia por quilômetro.

Tabela 2

Dados necessários para cada cidade latino-americana com ônibus elétricos implementados para a estimativa de emissões evitadas

Categoria	Variáveis	Fonte
Características do veículo	<ul style="list-style-type: none">Tamanho do ônibus (m), massa do veículo (kg)Fabricante e modelo do ônibusCapacidade da bateria (kWh) para ônibus elétricos	<ul style="list-style-type: none">Publicações oficiais das cidadesDocumentos técnicos fornecidos pelos fabricantes de ônibus
Características operacionais	<ul style="list-style-type: none">Vida útil (anos), distância anual percorrida (km), consumo de energia (L/km para ICE e kWh/km para elétrico), ar-condicionado (sim ou não)Tamanho da frota: número de ônibus de cada tamanho	<ul style="list-style-type: none">Artigos de mídia

A Tabela 2 também descreve as fontes de dados usadas para essas variáveis. Foram adotadas informações oficiais sempre que disponíveis, complementadas com dados das características técnicas dos ônibus fornecidas pelos fabricantes. No entanto,

as informações oficiais nem sempre estão disponíveis para os ônibus elétricos implementados em todas as cidades latino-americanas incluídas na plataforma. Para aumentar a representatividade regional da plataforma, são usados dados operacionais coletados de artigos da mídia. Somente os ônibus elétricos em operação nos sistemas de transporte público estão incluídos no banco de dados. Não foram considerados aqueles usados em frotas particulares ou para fins de teste ou demonstração.

Dados técnicos e operacionais detalhados sobre ônibus elétricos estão disponíveis em 11 cidades: São Paulo (BRA), Curitiba (BRA), Cidade do México (MEX), Guadalajara (MEX), Santiago (CHL), Las Condes (CHL), La Reina (CHL), Valparaíso (CHL), Bogotá (COL), Medellín (COL) e Cali (COL). Para as outras cidades, há menos dados disponíveis em detalhe; as informações mínimas coletadas são normalmente o número de ônibus elétricos adquiridos, o tamanho do ônibus e o fabricante e, às vezes, também o modelo. Informações adicionais são necessárias para calcular as emissões, como o peso do ônibus, o consumo de energia e a distância anual percorrida. Para cidades com lacunas de dados, as informações são preenchidas usando valores médios para ônibus de tamanho semelhante em diferentes cidades do mesmo país. Se não há informações específicas disponíveis para um determinado país, é adotada uma média da região.

CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS E VEICULARES

A Tabela 3 resume as características médias adotadas para cada categoria de ônibus. Foram coletados dados sobre as características operacionais e veiculares dos ônibus elétricos em 11 cidades do Brasil, do Chile, da Colômbia e do México em 2023, que estão resumidos na Tabela A1 do apêndice. Os dados específicos das cidades são agregados por país e tamanho do ônibus; as médias são usadas para preencher as informações ausentes de outras cidades, conforme descrito na seção anterior. A Tabela 3 detalha os valores médios da capacidade da bateria e do peso do ônibus por categoria do veículo, considerando os dados coletados. Foi adotada a capacidade de passageiros e a massa média dos passageiros de 65,306 kg do caso de São Paulo (Prefeitura de São Paulo, 2018b).

Tabela 3
Especificações médias do veículo

Tipo	Tamanho (m)	Capacidade de passageiros	Capacidade da bateria (kWh)	Massa do <i>glider</i> e do trem de força (kg)	
				Elétricos	ICE
BEB	8-11	61	248	8.987	6.016
BEB	12-15	87	335	14.880	11.429
BEB	+18	129	533	24.133	18.800
Trólebus	+18	129	152	20.000	18.800
Trólebus	12-15	87	30	10.318	10.318

Os dados sobre as características operacionais dos ônibus estão resumidos na Tabela 4, que apresenta as médias da América Latina. São listados os valores médios de tempo de operação de BEBs (anos), distância anual percorrida (km/ano), consumo de energia de BEBs (kWh/km e MJ/km) e consumo de energia equivalente a diesel (MJ/km) para os cinco tipos e tamanhos de ônibus considerados nesta análise. Os valores específicos de cada país usados para obter essas médias estão apresentados na Tabela A1 no apêndice. Embora observemos variações, na maioria dos casos, elas são limitadas aos quatro países para os quais coletamos dados. Para distâncias anuais percorridas em todos os países por ônibus de todos os tipos e tamanhos, a variação máxima é de cerca de 33%, de 60.000 a 80.000 km/ano, com uma média de 67.029

km e um desvio-padrão de 7.464 km. O consumo de energia varia entre 1,24 e 1,5 kWh/km entre BEBs de 12-15 m, e entre 0,77 e 0,98 kWh/km para BEBs menores, de 8-11 m. Variações mais significativas são observadas entre modelos diferentes. Por exemplo, os trólebus com grandes baterias de íon-lítio implementados no México consomem cerca de 44% menos energia do que modelos mais antigos no Brasil, na Colômbia e no Chile.

Tabela 4

Características operacionais médias dos veículos

Tipo	Tamanho	Tempo de operação (anos)	Distância anual (km/ano)	Consumo de energia kWh/km (MJ/km)	Consumo de energia equivalente ao diesel (MJ/km)
BEB	8-11	15	62.554	0,92 (3,31)	12,4
BEB	12-15	15	67.296	1,36 (4,90)	18,5
BEB	+18	15	71.384	1,76 (6,34)	25,8
Trólebus*	+18	15	80.000	1,74 (6,26)	27,4
Trólebus	12-15	15	66.384	3,28 (11,81)	19,5

* Coletamos dados de trólebus com mais de 18 m apenas na Cidade do México. Esses são modelos mais novos, com baterias grandes, e, portanto, têm mais eficiência energética do que os trólebus comuns de 12 a 15 m identificados em outros países da região.

EMISSÕES DE FABRICAÇÃO, MANUTENÇÃO E RECICLAGEM DE VEÍCULOS E BATERIAS

Os valores do peso do ônibus e da capacidade da bateria são usados para calcular as emissões da fabricação e reciclagem do veículo e da bateria. As emissões de manutenção são uma função da quilometragem anual percorrida e dos anos de operação. Para *gliders* e trens de força elétricos a bateria e movidos a combustão interna, foi aplicado um fator de emissão fixo de 6,6 kg CO₂e/kg (O’Connell et al., 2023). Foi presumido que todos os veículos são equipados com baterias LFP-Graphite (fosfato de ferro e íons de lítio) com emissões equivalentes a 58 kg CO₂e/kWh (Bieker, 2021) e densidade de bateria de 0,14 kWh/kg (Basma et al., 2021). A metodologia pressupõe uma duração de projeto fixa de 15 anos para BEBs com uma substituição de bateria após o sétimo ou oitavo ano de operação. Assim, o cálculo considera as emissões equivalentes à fabricação de um BEB e duas baterias. Para manter o mesmo período de análise dos ônibus com ICE, que normalmente são operados por 10 anos, a ferramenta considera as emissões equivalentes à fabricação de 1,5 ônibus com ICE.

As emissões de manutenção são baseadas nos fatores de emissão de manutenção para ônibus urbanos de 12 m de Hill et al. (2020), que é de 52,4 gCO₂e por quilômetro percorrido pelo veículo (vkm) para ônibus a diesel e 67,5 gCO₂e/vkm para ônibus elétricos.

EMISSÕES RELACIONADAS A COMBUSTÍVEL E ELETRICIDADE

As emissões do ciclo de combustível e eletricidade incluem os GEE gerados pela produção e pelo consumo da energia usada pelo veículo, seja ela combustível fóssil, biocombustível ou eletricidade. As emissões do ciclo de energia incluem as emissões WTT, que correspondem àquelas geradas durante a produção de combustível e eletricidade, e as emissões TTW, que são as de escapamento, geradas durante a queima do combustível.

A Tabela 5 mostra os dados de intensidade de GEE adotados para os principais combustíveis usados pelos ônibus com ICE na América Latina. Foram utilizados os

dados de emissões de CO₂e do modelo GREET (ANL, 2022), considerando os valores reportados para um horizonte de potencial de aquecimento global de 100 anos. No caso dos biocombustíveis, as emissões não biogênicas de GEE são consideradas nas emissões TTW.

Tabela 5

Emissões WTT, TTW e WTW do modelo GREET (em gCO₂e/MJ)

Matéria-prima	WTT	TTW	WTW
Biodiesel de soja	17,31	4,63	21,94
Biodiesel de palma	29,87	4,63	34,50
Biodiesel de sebo	15,51	4,63	20,14
Biodiesel de óleo de cozinha usado	14,89	4,63	19,52
Diesel fóssil	15,75	75,66	91,41

O modelo GREET usa a intensidade de carbono da rede elétrica como um dado de entrada para definir as emissões WTT. Esses valores são baseados na rede elétrica dos Estados Unidos, que tem uma intensidade de carbono de 466,5 gCO₂e/kWh. A rede elétrica dos Estados Unidos tem um fator de intensidade de carbono semelhante ao do Chile (416,9 gCO₂e/kWh). Foi realizada uma análise de sensibilidade e foram calculadas as emissões WTT do GREET, supondo uma rede 100% descarbonizada. As diferenças entre as emissões WTT para os biocombustíveis considerados neste estudo variam entre 2 e 4 gCO₂e/MJ, a depender da matéria-prima. Essa diferença não causaria uma mudança significativa nos resultados, e foram adotados os mesmos fatores de emissão WTT para todos os países.

A parcela da mistura de biodiesel por país provém do modelo Roadmap do ICCT (2022). Dos 12 países da América Latina com ônibus elétricos em sua frota, quatro têm uma mistura obrigatória de biodiesel no diesel, conforme apresentado na Tabela 6.³ As participações das matérias-primas do biodiesel foram obtidas dos relatórios anuais de biocombustíveis de 2022 produzidos pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos sobre o Brasil, a Argentina, o Peru e a Colômbia (USDA, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d). As participações de matérias-primas foram calculadas usando dados de 2021.

³ Além desses quatro países, o Uruguai tinha uma determinação de mistura de biodiesel de 5% até 2021. No entanto, o país foi excluído dessa lista porque essa determinação foi cancelada em novembro de 2021, após a publicação da Lei nº 19.996 <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programas/agrocombustibles>.

Tabela 6

Misturas de biodiesel no diesel, participação de matérias-primas e participação de biodiesel importado por país

	Participação do biodiesel	Matéria-prima				Percentual de importação	Origem das importações
		Óleo de soja	Gordura animal (sebo)	Óleo de cozinha usado	Óleo de palma		
Brasil	12%	82,2%	12,8%	2,1%	2,9%	0,0%	-
Argentina	9,60%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-
Peru	3,84%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	51,0%	Espanha (41%), Indonésia (30%), Malásia (21%), Holanda (8%)
Colômbia	0,40%	0,0%	0,0%	5,2%	94,8%	0,0%	

Também foram adicionadas emissões de ILUC para biocombustíveis de base agrícola. Essas emissões são estimadas com modelos econômicos que medem a mudança líquida no uso da terra globalmente e são combinadas com um fator de emissão para estimar os impactos associados das emissões de GEE. As emissões de ILUC são específicas do local, pois dependem das características econômicas e dos padrões comerciais da região. A Tabela 6 mostra que o biodiesel nos cinco países considerados é produzido principalmente no mercado interno, exceto no Peru, onde 51% dele é importado.

Para o biodiesel produzido a partir de óleo de soja no Brasil e na Argentina, foram adotados os fatores de ILUC para combustíveis derivados de soja no Brasil desenvolvidos como parte do Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) (International Civil Aviation Organization, 2020). Embora o CORSIA seja um programa de contabilização de carbono para a aviação internacional, os fatores de ILUC foram considerados aplicáveis à esta análise porque eles correspondem à cadeia de suprimento de matérias-primas para biocombustíveis; nesse contexto, quase não há diferença entre as cadeias de suprimento da soja usada para produzir biodiesel ou combustível de aviação sustentável. No Peru, para a parcela de biodiesel de palma importada da Indonésia e da Malásia, também foram adotados os valores de ILUC do CORSIA. O CORSIA não inclui fatores de ILUC para palmeiras cultivadas no Brasil, no Peru e na Colômbia, e não se identificou na literatura modelagens semelhantes para essas matérias-primas. Devido a essa limitação, suas emissões de ILUC foram consideradas iguais a zero – uma abordagem conservadora, pois subestima o cálculo das emissões evitadas com a introdução de BEBs e trólebus.

A Tabela 7 mostra as intensidades de carbono de ILUC consideradas para esta análise. Os dois modelos econômicos aplicados para estimar as emissões de ILUC no CORSIA são o GTAP-BIO e o GLOBIOM. Neste estudo, foram aplicados ambos os valores para estimar uma faixa de variação para as emissões.

Tabela 7

Valores de emissão de ILUC do CORSIA para combustíveis derivados de soja e palma no Brasil, na Malásia e na Indonésia

Região	Matéria-prima	gCO ₂ e/MJ	
		GTAP-BIO	GLOBIOM
Brasil	Óleo de soja	22,5	117,9
Malásia e Indonésia	Óleo de palma (lagoa aberta/fechada)	34,6	60,2

Fonte: International Civil Aviation Organization (2020)

As emissões TTW são zero para trólebus e BEBs, pois eles não produzem emissões de escapamento. Já suas emissões WTT dependem das fontes de energia usadas para gerar eletricidade. Foram adotados os valores de intensidade de GEE de 2021 para a produção de eletricidade da Ember Climate (2021), obtidos da plataforma Our World in Data.⁴

A Tabela 8 apresenta a intensidade de carbono da produção de eletricidade em 2021 para os países mapeados no E-BUS RADAR. Esses dados são estáticos e ignoram a adoção futura de fontes de energia renováveis, que podem reduzir a intensidade de carbono das emissões WTT dos ônibus elétricos durante sua vida útil. Assim, as intensidades de carbono de 2021 foram multiplicadas pelas reduções percentuais projetadas no cenário de Políticas Declaradas da Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, 2022). Projeções individuais de intensidade de carbono são fornecidas para Brasil e México, e uma única projeção de crescimento é feita para os outros países da América Latina. A Figura 1 apresenta as projeções de variação da intensidade de carbono adotadas para Brasil, México e outros países nesta análise, oferecendo um exemplo das intensidades de carbono projetadas para o Brasil, o México, o Chile e a Colômbia.

Tabela 8
Intensidade de carbono da eletricidade por país em 2021

País	Intensidade de carbono da eletricidade (gCO ₂ e/kWh)
Argentina	357,8
Barbados	644,9
Brasil	158,6
Chile	416,9
Colômbia	181,7
Equador	136,1
Guatemala	313,0
México	399,9
Paraguai	25,5
Peru	228,6
Uruguai	147,3
Venezuela	189,4

Fonte: Ember Climate (2021)

⁴ Intensidade de carbono da eletricidade, da plataforma Our World in Data, disponível em <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>.

Figura 1

Projeções de intensidade de carbono da rede elétrica como porcentagem (parte superior) e em gCO₂e/kWh para países selecionados (parte inferior)



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO THEICT.ORG

CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE EVITADAS

Esta seção descreve como os dados apresentados acima são aplicados para calcular as emissões do ciclo de vida evitadas com a introdução de BEBs. As equações a seguir detalham o cálculo das emissões evitadas por um BEB.

O k subscrito indica o tamanho e o tipo do BEB e de seu correspondente com ICE, conforme listado na Tabela 3. Os países e as cidades são especificados pelo i e j subscritos, respectivamente. Para ônibus a diesel, a análise considera os impactos ambientais do biodiesel produzido a partir de diferentes culturas (c). Dado o nível de incerteza e variação para calcular a intensidade de carbono das emissões de ILUC, apresentamos os valores de emissões mais baixos e mais altos dos dois modelos considerados: GTAP e GLOBIOM (International Civil Aviation Organization, 2019). Essas duas opções para emissões de ILUC são indicadas pelo l subscrito.

ÔNIBUS COM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

A Equação 1 é usada para calcular as emissões do ciclo de vida dos ônibus com ICE, divididas entre fabricação do veículo e manutenção, produção de combustível, e consumo de combustível ou emissões de escapamento. A massa do glider e do trem de força ($Mass$) foi calculada como o peso bruto do veículo (GVW) líquido de sua capacidade de passageiros, (CAP) (dados disponíveis na Tabela 3) multiplicada pela massa média de passageiros $\kappa = 65.306 \text{ kg}$ (Prefeitura de São Paulo, 2018b) (Equação 2). As emissões do ciclo do veículo ($E_{vehicle}^{ICE}$) representam as emissões da fabricação do veículo e as emissões de manutenção ao longo de sua vida útil. A massa do veículo foi multiplicada pelo parâmetro fixo de emissões de fabricação de $6,6 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$ (O'Connell et al., 2023) (α) e por 1,5, já que foram considerados 15 anos de operação, e foi presumido que os ônibus com ICE são normalmente usados por 10 anos. As emissões de manutenção são estimadas multiplicando seu fator de emissão de $52,4 \text{ gCO}_2\text{e/km}$ (Hill et al., 2020) (τ^{ICE}) por anos de operação e quilômetros percorridos anualmente.

$$E_{vehicle}^{ICE}_{ijk} = \underbrace{\alpha \cdot 1.5 \cdot Mass_k^{ICE}}_{\text{Produção do veículo}} + \underbrace{\tau^{ICE} \cdot Y \cdot VKT_{ij}}_{\text{Manutenção do veículo}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$Mass_k^{ICE} = GVW_k^{ICE} - k \cdot Cap_k \quad (\text{Equação 2})$$

As emissões WTT da produção de combustível dependem de se/quais fatores de ILUC estão incluídos (Equação 3) e da intensidade de carbono (ψ) da produção de combustível (Equação 4). Os fatores de ILUC considerados neste estudo estão apresentados na Tabela 7. A intensidade de carbono da produção de combustível (ψ) é uma função da porcentagem do biodiesel misturado ao diesel (ρ_{bd}), da porcentagem de cada biomassa (ρ_{crop}) usada para produzir o biodiesel e das intensidades de carbono da produção de combustível para o diesel fóssil (ψ^{diesel}) e o biodiesel ($\psi^{biodiesel}$) que representam as emissões relacionadas a extração de matéria-prima, transporte, distribuição e processos industriais. As informações sobre a mistura de biodiesel em cada país, incluindo a parcela do biodiesel e da matéria-prima, estão detalhadas na Tabela 6. As intensidades de carbono da produção de combustível estão apresentadas na Tabela 5. A Equação 5 calcula as emissões da produção de combustível (E_{fuel}^{WTT}) multiplicando a intensidade de carbono de sua produção (ψ) pela demanda total de combustível, que é uma função dos quilômetros percorridos anualmente pelos veículos (VKT), dos anos de operação (Y), e do consumo de energia do veículo (ϵ^{ICE} , em MJ/km). Os dados operacionais médios (quilômetros percorridos anualmente, anos de operação e consumo de energia) constam na Tabela 4, e os valores específicos de cada país são detalhados na Tabela A1 no apêndice.

$$ILUC_{ci} = \begin{cases} \min (ILUC_C^{GTAP}, ILUC_C^{GLOBIOM}) \\ \max (ILUC_C^{GTAP}, ILUC_C^{GLOBIOM}) \end{cases} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\psi_{ij} = \left(\rho_{bd}_{it} \sum_c \rho_{crop_{cit}} \cdot (\psi_C^{biodiesel} + ILUC_{ci}) \right) + (1 - \rho_{bd}_{it}) \cdot \psi^{diesel} \quad (\text{Equação 4})$$

$$E_{fuel_WTT}_{ijkl}^{ICE} = \psi_{ij} \cdot \varepsilon_{jk}^{ICE} \cdot Y_t \cdot VKT_{ij} \quad (\text{Equação 5})$$

A etapa final é calcular as emissões de escapamento, também conhecidas como emissões TTW. Sua intensidade de carbono (Equação 6) também depende das misturas de biodiesel (ρ_{bd}), da porcentagem de cada biomassa (ρ_{crop}), da sua composição de biomassa (ω^{diesel}) e do biodiesel ($\omega^{biodiesel}$). A multiplicação da intensidade de carbono (ω) pela eficiência energética do veículo (ε^{ICE}), pelos anos de operação (Y), e pelos quilômetros percorridos anualmente (VKT) resulta nas emissões totais de combustão, ou TTW (E_{fuel_TTW}) (Equação 7). As informações sobre a mistura de biodiesel estão na Tabela 6, e a intensidade de carbono das emissões de escapamento é apresentada na Tabela 5. Os dados operacionais estão detalhados na Tabela 4 e na Tabela A1 no apêndice.

$$\omega_{it} = \left(\rho_{bd}_{it} \sum_c \rho_{crop_{cit}} \cdot \omega_C^{biodiesel} \right) + (1 - \rho_{bd}_{it}) \cdot \omega^{diesel} \quad (\text{Equação 6})$$

$$E_{fuel_TTW}_{ijk}^{ICE} = \omega_{it} \cdot \varepsilon_{jk}^{ICE} \cdot Y \cdot VKT_{ij} \quad (\text{Equação 7})$$

As emissões totais do ciclo de vida de um ônibus a combustão interna típico (Equação 8) são a soma dos três componentes explicados acima.

$$E_{ijkl}^{ICE} = E_{vehicle}_k^{ICE} + E_{fuel_TTW}_{ijk}^{ICE} + E_{fuel_WTT}_{ijkl}^{ICE} \quad (\text{Equação 8})$$

ÔNIBUS ELÉTRICOS

Para os BEBs e trólebus, foram somadas as emissões do ciclo do veículo, incluindo a produção do *glider* e do trem de força, a fabricação da bateria e as emissões de manutenção, àquelas geradas na produção, transmissão e distribuição de eletricidade.

Para as emissões do ciclo do veículo ($E_{vehicle}^{BEB}$), primeiro foi subtraída a massa da capacidade máxima de passageiros e da bateria do peso bruto do veículo para obter a massa do glider e do trem de força (Equação 9). A massa máxima dos passageiros é novamente calculada multiplicando-se a capacidade de passageiros do ônibus (CAP) (detalhada na Tabela 3) e a massa média dos passageiros (κ) de 65,306 kg (Prefeitura de São Paulo, 2018b). A massa da bateria é o produto da capacidade da bateria ($Batt$, em kWh) e o inverso da densidade da bateria (δ , em kWh/kg). A capacidade da bateria e a massa do veículo e do trem de força conforme o tipo de ônibus são apresentadas na Tabela 3. Além disso, a densidade da bateria adotada é de 0,14 kWh/kg (Basma et al., 2021). Emissões de fabricação e manutenção para um BEB típico ($E_{vehicle}^{BEB}$) (Equação 10) são calculadas como a soma das emissões da produção do veículo, da bateria e da manutenção, considerando 15 anos de duração do projeto. As emissões associadas à produção do veículo são calculadas multiplicando a massa do trem de força e do *glider* ($Mass^{BEB}$) e o mesmo parâmetro fixo de 6,6 kg CO₂e/kg (O'Connell et al., 2023) considerado para os ônibus com ICE (α), multiplicando ainda os quilômetros percorridos durante a vida útil (VKT) apresentados na Tabela 4 e na Tabela A1 no apêndice, pela intensidade de carbono específica da manutenção do BEB de 67,5 gCO₂e/vkm (τ^{BEB}) (Hill et al., 2020) e pelas emissões equivalentes a dois conjuntos de baterias, considerando uma troca de bateria no meio da operação. As emissões de

um conjunto de baterias são o produto da capacidade da bateria ($Batt$, em kWh) e da intensidade de carbono da bateria de 58 kg CO₂e/kWh (η) (Bieker, 2021).

$$Mass_k^{BEB} = GVW_k^{BEB} - \frac{1}{\delta} \cdot Batt_k^{BEB} - \kappa \cdot Cap_k \quad (\text{Equação 9})$$

$$E_vehicle_{ijk}^{BEB} = \underbrace{\alpha \cdot Mass_k^{BEB}}_{\text{Produção do veículo}} + \underbrace{\eta \cdot 2 \cdot Batt_k^{BEB}}_{\text{Bateria}} + \underbrace{\tau^{BEB} \cdot Y \cdot VKT_{ij}}_{\text{Manutenção do veículo}} \quad (\text{Equação 10})$$

As emissões WTT de BEBs e tróibus (E_energy_WTT) (Equação 11) são uma função da intensidade das emissões da rede elétrica em 2021 (ρ), suas reduções projetadas na intensidade de carbono para cada ano (Φ_{it}), os anos de operação (Y), o consumo de energia (ε^{BEB}), que inclui perdas de carga, e os quilômetros percorridos ao longo da vida útil (VGT). As emissões e projeções da rede elétrica estão detalhadas na Tabela 8 e na Figura 1. O consumo de energia e os quilômetros percorridos ao longo da vida são informados na Tabela 4 e na Tabela A1 no apêndice.

$$E_energy_WTT_{ijk}^{BEB} = \sum_{t=t_0}^{t_0+Y} P_i \cdot \Phi_{it} \varepsilon_{jk}^{BEB} \cdot VKT_{ij} \quad (\text{Equação 11})$$

As emissões totais do ciclo de vida de um BEB típico são apresentadas na Equação 12.

$$E_{ijk}^{BEB} = E_vehicle_{ijk}^{BEB} + E_energy_WTT_{ijk}^{BEB} \quad (\text{Equação 12})$$

EMISSÕES EVITADAS

As emissões do ciclo de vida evitadas por um BEB ou tróibus típico são calculadas como a diferença entre as emissões dos ônibus movidos a combustão interna e elétricos a bateria para veículos semelhantes (k) no mesmo país (i) e cidade (j) (Equação 13).

$$\Delta E_{ijk} = E_{ijk}^{ICE} - E_{ijk}^{BEB} \quad (\text{Equação 13})$$

A multiplicação das emissões evitadas pelo número de ônibus elétricos implementados e a soma por tipo/tamanho do ônibus e cidade resultam em emissões evitadas em nível nacional (Equação 14).

$$\Delta E_i^{Country} = \sum_j \sum_k N_{ijk} \cdot \Delta E_{ijk} \quad (\text{Equação 14})$$

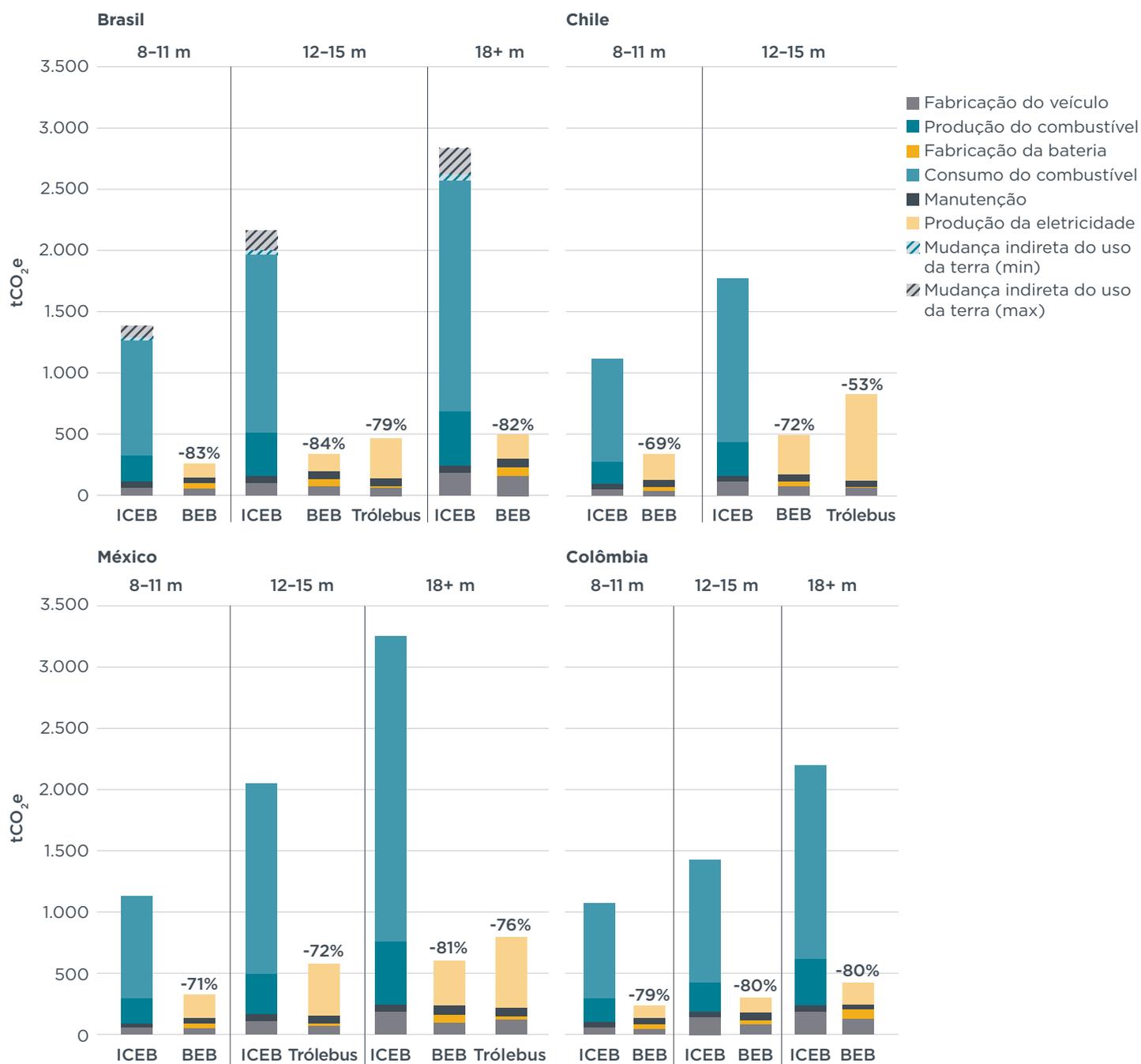
Por fim, ao somar todas as emissões evitadas por tipo e tamanho de ônibus, cidade e país, foi possível calcular as emissões evitadas por ano. As emissões de fabricação equivalentes a um veículo são alocadas no primeiro ano de operação para BEBs e ônibus com ICE; além disso, as emissões de fabricação relativas à metade de um veículo são incluídas no décimo ano para ônibus com ICE. As emissões da bateria, exclusivas dos ônibus elétricos, para os dois conjuntos de bateria são atribuídas ao primeiro e ao oitavo anos, na metade da vida útil projetada para o ônibus elétrico. As emissões WTT dos ônibus elétricos variam ao longo do tempo, de acordo com as projeções de intensidade de carbono da rede apresentadas na Figura 1. As emissões de todas as outras fontes — WTT para ônibus com ICE, TTW, de manutenção e de ILUC — são distribuídas uniformemente por todos os anos de operação, uma vez que se considera também que a intensidade energética e a VKT são uniformes ao longo do tempo.

RESULTADOS

Esta seção apresenta um exemplo dos resultados que podem ser obtidos com a metodologia desenvolvida acima. A Figura 2 mostra as emissões de GEE do ciclo de vida

dos ônibus com ICE e elétricos nos quatro países latino-americanos com as maiores frotas de ônibus elétricos da região: Brasil, Chile, México e Colômbia. As emissões representadas correspondem à vida útil de ônibus de diferentes tamanhos: 8-11 m, 12-15 m e mais de 18 m. Os modelos mostrados em cada país são aqueles dos quais acessamos informações detalhadas, como apresentado na Tabela 3 e na Tabela A1. Essa amostra não representa necessariamente todos os modelos de ônibus elétricos em operação nesses países. O gráfico também mostra a composição do total de emissões de GEE por fonte: fabricação do *glider* e do trem de força, fabricação da bateria, manutenção, produção do combustível, consumo do combustível, produção de eletricidade, e ILUC mínima e máxima. Os números na parte superior das barras para as emissões dos ônibus elétricos mostram a redução percentual das emissões de GEE em relação a ônibus com ICE comparáveis.

Figura 2
Comparação das emissões de GEE do ciclo de vida de ônibus com motor de combustão interna, ônibus elétricos a bateria e trólebus no Brasil, no Chile, no México e na Colômbia



Nota: ICEB = ônibus com motor de combustão interna; BEB = ônibus elétrico a bateria

Os resultados mostram que as emissões de GEE do ciclo de vida dos ônibus elétricos a bateria são 71% a 84% menores que as dos ônibus movidos a combustão interna. Embora haja variações entre os países, a maior eficiência energética dos motores elétricos resulta em reduções notáveis de GEE em países com redes de eletricidade com baixa intensidade de carbono, como Brasil e Colômbia, e naqueles com relativamente mais combustíveis fósseis na geração de eletricidade, como México e Chile. As diferenças nas emissões entre países para modelos de ônibus semelhantes são uma função das características operacionais, como as distâncias anuais percorridas e a eficiência energética.

Para o tamanho de ônibus mais comum, de 12 m a 15 m, os BEBs têm emissões de ciclo de vida 72% a 84% menores que as dos ônibus com ICE. Foi estimado que as emissões totais do ciclo de vida dos BEBs em um período de 15 anos sejam de 305 tCO₂e no Brasil, 558 tCO₂e no Chile e 323 tCO₂e na Colômbia. As emissões de ônibus com ICE de tamanho semelhante nos mesmos países são estimadas em 1.970, 1.964 e 1.587 tCO₂e, respectivamente. A análise também mostra que as emissões do ciclo de vida dos BEBs articulados com mais de 18 m são 80% a 82% inferiores às dos ônibus com ICE comparáveis. Atualmente disponíveis no Brasil, na Colômbia e no México, suas emissões totais estimadas de GEE durante o ciclo de vida são de 451 tCO₂e, 486 tCO₂e e 505 tCO₂e, respectivamente.

A análise mostra também que os sistemas de ar-condicionado têm impacto significativo no consumo de energia e, portanto, nas emissões. Os BEBs articulados acima de 18 m que circulam na Cidade do México não têm ar-condicionado, o que resulta em um consumo médio de energia de 1,10 kWh/km (Miaja et al., 2022), enquanto os BEBs de tamanho semelhante no Brasil e na Colômbia consomem 2,0 kWh/km e 1,90 kWh/km, respectivamente. No entanto, o menor consumo de energia é compensado pela maior intensidade de carbono da rede elétrica do México, resultando em reduções percentuais semelhantes de GEE.

Modelos menores, medindo entre 8 m e 11 m, com e sem ar-condicionado, estão disponíveis em todos os quatro países e emitem de 69% a 83% menos GEE em seus ciclos de vida em comparação com os ônibus com ICE.

Esta análise identificou, ainda, que outras características do modelo também afetam as emissões totais do ciclo de vida. Por exemplo, os trólebus modernos adotados no México têm baterias maiores e maior consumo de energia em comparação com os BEBs. Os trólebus de 12 m a 15 m da Cidade do México têm baterias de 128 kWh e um consumo de 1,46 kWh/km, comparável aos BEBs de tamanho semelhante no Brasil (1,39 kWh/km), no Chile (1,50 kWh/km) e na Colômbia (1,24 kWh/km). Estima-se que modelos mais antigos de trólebus presentes no Brasil e no Chile consumam cerca de 3,3 kWh/km. As emissões de GEE do ciclo de vida dos trólebus são 79% menores no Brasil, 53% menores no Chile e 72% menores no México do que as dos ônibus com ICE comparáveis.

CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

A metodologia desenvolvida neste trabalho estima as emissões de GEE evitadas com a implementação de ônibus elétricos em cidades latino-americanas. Para avaliar as emissões de GEE do ciclo de vida dos ônibus elétricos e de combustão interna, foram aplicados valores específicos de cada país para a intensidade de carbono da produção de eletricidade, do uso de biocombustível e de culturas agrícolas. Também foram coletados dados operacionais e de veículos específicos a cada país (Brasil, Chile,

Colômbia e México), incluindo tamanho da bateria, massa do veículo, consumo de energia e quilometragem percorrida anualmente.

Para a aplicação dessa metodologia na plataforma E-BUS RADAR, os dados usados podem ser ampliados para incluir estimativas mais precisas para outros países e modelos e, quando não houver dados específicos de cada país, podem ser aplicados os valores médios da América Latina. Para modelos de ônibus semelhantes, observamos valores de consumo de energia comparáveis entre os países, portanto, as médias latino-americanas devem oferecer boas aproximações. No entanto, sempre que há diferenças significativas na especificação do modelo — como os trólebus modernos com baterias de íon-lítio maiores ou os BEBs articulados sem ar-condicionado observados na Cidade do México —, o uso das médias da América Latina pode resultar em superestimação ou subestimação das emissões do ciclo de vida dos ônibus elétricos.

Atualmente, o E-BUS RADAR acompanha a implementação de BEBs em 12 países latino-americanos. Este estudo apresentou com mais detalhes as emissões de GEE evitadas nos quatro países com as maiores frotas de BEBs da América Latina: Brasil, Chile, Colômbia e México. Os resultados mostram um potencial de mitigação notável da implementação desses ônibus. As emissões de GEE do ciclo de vida dos ônibus elétricos nesses quatro países são 71% a 84% inferiores às emissões dos ônibus com ICE. Foi observado um potencial maior de mitigação de emissões em países com redes de eletricidade de baixa emissão, como o Brasil e a Colômbia. Um potencial de mitigação significativo também é observado em países com relativamente mais combustíveis fósseis usados na geração de eletricidade, como México e Chile, principalmente devido à maior eficiência energética dos veículos elétricos.

As emissões do ciclo de vida dos modelos de BEB de 12 m a 15 m são 72% a 84% menores do que as dos ônibus com ICE comparáveis. Os BEBs articulados de mais de 18 m reduzem as emissões totais em 80% a 82%, enquanto os BEBs menores, de 8 m a 11 m, têm emissões de GEE 69% a 83% menores do que as dos ônibus com ICE. Por fim, os trólebus no Brasil, Chile e México reduzem as emissões em 79%, 53% e 72%, respectivamente.

A metodologia apresentada neste trabalho foi desenvolvida para representar a implementação de ônibus elétricos em qualquer país da América Latina e para ser capaz de estimar as emissões do ciclo de vida mesmo com informações limitadas sobre as características operacionais, ainda que em detrimento de estimativas precisas quando faltam dados específicos do país. Futuros aprimoramentos da metodologia se beneficiariam de uma maior granularidade nos modelos de ônibus elétricos considerados, bem como de dados específicos de cada país sobre as distâncias médias percorridas anualmente.

REFERÊNCIAS

- Acevedo, H., Pettigrew, S., & Delgado, O. (2023). *The technology development plan as a tool for the transition to electric buses in the city of Bogotá D.C.* International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/technology-development-plan-transition-to-electric-buses-bogota-dc-dec23/>
- Argonne National Laboratory. (2022). The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model (GREET) (Versão 2022). <https://greet.es.anl.gov/index.php>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). ABNT NBR 1557: *Transportes - Especificações técnicas para a fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros*. [Norma Técnica Brasileira.] Rio de Janeiro, Brasil.
- Basma, H., Beys, Y., & Rodríguez, F. (2021). *Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/battery-electric-tractor-trailers-in-the-european-union-a-vehicle-technologyanalysis/>
- Batista, M., & Bastos, P. (2023). El modelo de negocio de Bogotá para la implementación de buses eléctricos. C40. Transformative Urban Mobility Initiative. https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2023/05/El-modelo-de-negocio-de-Bogota-para-la-implementacion-de-buses-electrico_ES.pdf
- Becerra, L., & Galarza, S. (2022). Costo total de propiedad: buses eléctricos en el nuevo modelo de negocios del transporte público de Santiago de Chile. Centro Mario Molina. <https://theicct.org/publication/costo-total-de-propiedad-buses-electricos-en-el-nuevo-modelo-de-negocios-del-transporte-publico-de-santiago-de-chile/>
- Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/>
- Bueno C., & Delgado, O. (2022). Estrategia para el despliegue de flota eléctrica en la empresa Flota Nueva Villa em la Ciudad de Medellín. The International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/hdv-latam-estrategia-despliegue-flota-electrica-empresa-flota-nueva-villa-medellin-apr22/>
- Castillo, M., Galarza, S., Rivera, J. C., García, F., Lefèvre, B., Camós, G., Bertossi, F., & Cruz, P. (2021). Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos: lecciones de Cali, Colombia. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Desafios-operacionales-y-soluciones-a-la-integracion-de-buses-electricos-lecciones-de-Cali-Colombia.pdf>
- Dina. [n.d.]. Ridder E: Chasis. <https://dina.com.mx/fichas/riddere.pdf>
- E-BUS RADAR: Electric Buses in Latin America. (2024). E-buses in operation in Latin America [database]. <https://www.ebusradar.org>.
- Ember Climate. (2021). Data Methodology. <https://ember-climate.org/app/uploads/2022/07/Ember-Electricity-Data-Methodology.pdf>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022). *Descarbonização do setor de transporte rodoviário*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf
- Eufrasio, A.B.R., Delgado, O., & Rozenfeld, T. (2022). Análise da implementação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo. <https://theicct.org/publication/ze-hvs-na-paulo-brazil-mar22/>
- Eufrasio, A.B.R., Daniel, J., & Delgado, O. (2023). *Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/brazil-hvs-zebra-operational-analysis-electric-bus-sao-paulo-feb23/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2019). Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México. Especificación técnica número SI-DTR-8502692. Especificación técnica para trolebuses nuevos. https://www.ste.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Licitacion%20PpAT/ET%20Trolebuses%202019_6.pdf
- Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Helms, H., ... & Bauen, A. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA*, DG Climate Action. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-09/2020_study_main_report_en.pdf
- International Civil Aviation Organization. (2020). *CORSIA Supporting Document - CORSIA Eligible Fuels Life Cycle Assessment (LCA) Methodology*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf
- International Council on Clean Transportation (2022). Roadmap Model Documentation (v. 1.9). <https://theicct.github.io/roadmap-doc/>
- International Energy Agency. (2022). Global energy and climate model. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model>

- Ley n.º 19.996, *Agrocombustibles* [relacionada a Lei n.º 18.195]. (2021). Uruguay Ministerio de Industria, Energía y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programas/agrocombustibles>
- Miaja, G.G., Acevedo, H., Jiménez, C., Pineda, L., & Delgado, O. (2022). *Analysis of electric bus performance monitoring in Mexico City*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-analisis-desempeno-buses-electricos-cdmx-dec22/>
- Miaja, G.G., Jiménez, C., Acevedo, H., Pineda, L., & Delgado, O. (2023). Consumo energético de autobuses eléctricos articulados para distintos niveles de carga em el BRT de la Ciudad de México. <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-consumo-energetico-busescdmx-nov22/>
- Muñoz, C. M., Borges, L., Martínez, J. E., Vieira, L., Perpetuo, R., Corradi, R., Díaz, B., González, A., Vélez, J., & Camacho, L. (2023). Estudio de caso: Medellín, Colombia. Movilidad urbana y transición a los buses eléctricos. ICLEI – Local Governments for Sustainability. Transformative Urban Mobility Initiative. <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2023/08/casestudy-medellin-colombia-esp-vf.pdf>
- O'Connell, A., Pavlenko, N., Bieker, G., e Searle, S. (2023). *A comparison of the life cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23/>
- Pettigrew, S., Acevedo, H., & Delgado, O. (2023). *Charging Infrastructure for zero-emissions buses - strategies in Bogotá, Colombia*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/charging-infrastructure-for-zero-emissions-buses-strategies-in-bogota-colombia/>
- Pineda, L., Jimenez, C., & Delgado, O. (2022). Estrategia para el despliegue de flota eléctrica en el Sistema de corredores de transporte público de pasajeros de la Ciudad de México “Metrobús”: Líneas 3 y 4. *International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/publication/mexico-latam-hdv-zebra-mar22/>
- São Paulo Transportes S.A. (2021). *Manual dos padrões técnicos dos veículos de tração elétrica*. <https://www.sptrans.com.br/media/12303/02-manual-dos-padrones-tecnicos-dos-veiculos-tração-elétrica-novembro-2021-na-2-assinado.pdf>
- São Paulo. Prefeitura Municipal. (2018a). *Anexo 4.5. Política tarifária: metodologia de remuneração do serviço de transporte coletivo por ônibus da cidade de São Paulo*. https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/transportes/edital2018/001_ESTRUTURna/ANEXO-IV_POLITICA_TARIFARIA/4_5_METODOLOGIA_REMUNERACAO.pdf
- São Paulo. Prefeitura Municipal. (2018b). *Anexo 5.1.1. Manual dos padrões técnicos dos veículos*. https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/transportes/edital2018/001_ESTRUTURAL/ANEXO-V_MANUAIS/5-1-1_MANUAL-DOS-PADROES-TECNICOS-DOS-VEICULOS.pdf
- Union Internationale des Transports Publics. (2020). *Bus tender structure report 2020: Annex IV*. <https://www.uitp.org/publications/bus-tender-structure-report-2020/>
- Urbanização de Curitiba S.A. (2023). *Comissão especial de análise de chamamentos públicos da URBS*. Relatório técnico dos testes operacionais do chamamento público para a demonstração de ônibus elétricos em Curitiba. Edital 001/2022. <https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2024/02/URBS-report.pdf>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2022a). *Brazil Biofuels Annual 2022*. <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-9>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2022b). *Argentina Biofuels Annual 2022*. <https://www.fas.usda.gov/data/argentina-biofuels-annual-7>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2022c). *Peru Biofuels Annual 2022*. <https://fas.usda.gov/data/peru-biofuels-annual-5>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2022d). *Colombia Biofuels Annual 2022*. <https://www.fas.usda.gov/data/colombia-biofuels-annual-8>
- Yutong. (2024). ZK5120C: Autobús eléctrico. <https://www.yutong.mx/products/ZK5120C.shtml>

APÊNDICE

A Tabela A1 fornece as características médias operacionais e do veículo para ônibus elétricos e trólebus em quatro países da América Latina em 2023 e seus ônibus equivalentes a diesel. Esses dados foram obtidos de informações públicas fornecidas pelas autoridades de transporte das cidades e pelos fabricantes de ônibus (Dina, n.d.; Gobierno de la Ciudad de México, 2019; Prefeitura de São Paulo, 2018a; São Paulo Transportes S.A., 2021; Urbanização de Curitiba S.A., 2023; Yutong, 2024); de estudos anteriores desenvolvidos como parte da iniciativa ZEBRA (Acevedo et al, 2023; Batista & Bastos, 2023; Becerra & Galarza, 2022; Bueno & Delgado, 2022; Castillo et al., 2021; Eufrazio et al., 2022; Eufrazio et al., 2023; Miaja et al, 2022; Miaja et al., 2023; Muñoz et al., 2023; Pettigrew et al., 2023; Pineda et al., 2022); e de comunicação direta da equipe local do ICCT com autoridades de transporte e operadoras de ônibus.

Tabela A1

Características operacionais e do veículo em cada país

País	Tipo de ônibus elétrico	Tamanho do ônibus	Bateria	Peso vazio - Elétrico	Peso do glider - elétrico	Peso vazio - Diesel equivalente	Distância anual	Consumo de energia - Elétrico	Consumo de combustível - Diesel equivalente	Consumo de combustível - Diesel equivalente
		m	kWh	kg	kg	kg	km/y	kWh/km	L/km	MJ/km
BRA	BEB	8-11	270	8.987	7.058	6.016	72.768	0,92	0,4	12,4
BRA	BEB	12-15	364	15.145	12.544	10.318	72.768	1,39	0,6	19,4
BRA	BEB	+18	531	28.465	24.676	18.800	72.768	2,01	0,7	25,1
BRA	Trólebus	12-15	30	10.318	10.104	10.318	72.768	3,28	0,6	19,4
MEX	BEB	8-11	243	8.987	7.251	6.016	60.000	0,77	0,4	12,4
MEX	BEB	+18	507	19.800	16.179	18.800	80.000	1,10	0,8	27,4
MEX	Trólebus	12-15	128	12.600	11.686	12.000	70.000	1,46	0,6	19,5
MEX	Trólebus	+18	152	20.000	18.914	18.800	80.000	1,74	0,8	27,4
COL	BEB	8-11	243	8.987	7.251	6.016	60.000	0,98	0,4	12,4
COL	BEB	12-15	284	14.350	12.325	13.650	60.000	1,24	0,5	15,9
COL	BEB	+18	564	24.133	20.104	18.800	60.000	1,91	0,7	25,1
COL	Trólebus	12-15	30	10.318	10.104	10.318	60.000	3,28	0,6	19,4
CHL	BEB	8-11	243	8.987	7.251	6.016	60.000	0,98	0,3	12,4
CHL	BEB	12-15	324	14.880	12.566	11.429	60.000	1,50	0,6	19,5
CHL	BEB	+18	533	24.133	20.326	18.800	71.384	1,96	0,7	25,8
CHL	Trólebus	12-15	30	10.318	10.104	10.318	60.000	3,28	0,6	19,5



www.theicct.org

communications@theicct.org

[@theicct.org](https://www.instagram.com/theicct.org)

icct
CONSELHO INTERNACIONAL
DE TRANSPORTE LIMPO