

# Descarbonização da frota de coleta de resíduos sólidos em São Paulo

André Cieplinski, Ana Beatriz Rebouças, Aviral Yadav e Carmen Araujo

## RESUMO

A descarbonização da frota de caminhões dedicada à coleta de resíduos sólidos na cidade de São Paulo é prevista na Lei nº 16.802 de 2018, aprovada pela Câmara Municipal de São Paulo em janeiro de 2018. Esta lei exige uma redução nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provenientes dos caminhões de coleta de 50% em 2028, e de 100% em 2038, em comparação aos níveis observados em 2016. Emissões de material particulado (MP) e óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), que também afetam qualidade do ar e saúde, devem ser reduzidas em 90% e 80%, respectivamente, até 2028, e 95% para ambos os poluentes até 2038<sup>1</sup>. O alcance destas metas requer a rápida adoção de caminhões coletores com zero ou baixas emissões.

Este estudo compara duas alternativas aos caminhões a diesel, ambas já disponíveis no mercado brasileiro: caminhões elétricos a bateria e a gás natural veicular (GNV), que podem ser movidos a gás natural fóssil ou biometano. Primeiro, comparam-se os custos dos caminhões de coleta a diesel, elétricos e GNV. Essa análise se baseia na estimativa do custo total de propriedade por quilômetro, que considera todos os custos incorridos na aquisição e operação ao longo da vida útil do veículo. Em seguida, comparam-se o impacto ambiental das três tecnologias, analisando suas emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida. Para essa estimativa, são consideradas as emissões produzidas na manufatura do veículo, inclusive das baterias no caso da tecnologia elétrica, e as emissões geradas no uso e produção da energia utilizada pelo veículo, seja combustível ou eletricidade.

Estima-se que caminhões coletores elétricos e a GNV tem custos totais de propriedade 25% e 27% maiores, respectivamente, do que os de um veículo comparável a diesel

1 As metas da Lei No 16.802 (2018) também se aplicam à frota de ônibus de transporte coletivo.

**Agradecimento:** Este estudo foi financiado pela ClimateWorks Foundation. Os autores agradecem aos colegas Anirudh Narla, Pedro Logiodice e Jane O'Malley por suas valiosas contribuições.

[www.theicct.org](http://www.theicct.org)

[communications@theicct.org](mailto:communications@theicct.org)

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

nas condições atuais. Entretanto, reduções nos custos de financiamento dos veículos e aumentos no número de anos de operação podem tornar os caminhões elétricos financeiramente competitivos. O caminhão GNV movido exclusivamente a biometano atinge um custo total por quilômetro muito próximo ao de um caminhão a diesel caso o custo de produção e distribuição do biometano seja 50% menor do que o preço do gás natural fóssil.

Com relação ao impacto ambiental, estima-se que caminhões elétricos e os operados exclusivamente com biometano produzido de aterros sanitários tem emissões do ciclo de vida 70% e 68% menores, respectivamente, do que o de um caminhão a diesel comparável. No entanto, estima-se que um caminhão movido exclusivamente a gás natural de origem fóssil emite 23% a mais do que o diesel devido à menor eficiência do motor e as emissões fugitivas de metano ao longo de seu ciclo de vida.

## DESCRIÇÃO DA FROTA DE CAMINHÕES DE COLETA URBANA DE SÃO PAULO

Os dados sobre a frota de caminhões coletores foram obtidos nos relatórios anuais de emissões da frota, ano 2022, das duas concessionárias responsáveis pela coleta domiciliar no município: Loga (2023) e Ecourbis (2023). Essas empresas são responsáveis pelos serviços de coleta comum, seletiva e de resíduos da saúde nas regiões centro-norte-oeste e sul-leste da cidade de São Paulo, respectivamente<sup>2</sup>.

Características operacionais da frota são apresentadas na Tabela 1. A frota dedicada à coleta residencial e hospitalar conta com 679 veículos, agrupados em quatro categorias. A maioria parte da frota (68%) é composta por caminhões pesados e semi-pesados equipados com compactadores, o tipo utilizados principalmente na coleta domiciliar comum e foco desta análise. Os modelos utilizados e suas quantidades são reportados na Tabela D.1, no Apêndice D. Os acordos contratuais da cidade preveem a substituição dos caminhões coletores com compactadores após cinco anos de uso.

Para facilitar a comparação entre os veículos a diesel e elétrico, converteu-se o consumo de energia apresentado na Tabela 1 de litros de diesel por quilômetro para mega joules por quilômetro<sup>3</sup>. Caminhões equipados com compactadores apresentam o maior consumo de energia entre as quatro categorias operadas na cidade. O consumo médio destes caminhões, que equivale a 0,7 litros de diesel por quilômetro, é ligeiramente maior do que o consumo médio estimado de um ônibus padron com capacidade para 87 passageiros na cidade de São Paulo, de 0,63 L/km (SPTrans, 2023).

2 A prefeitura da cidade, por meio da SPRegula, conta ainda com 6 empresas ou consórcios responsáveis pelos serviços de varrição de ruas que não estão incluídas nesta análise.

3 Foi utilizado um fator de conversão entre joules e litros de diesel de 35.24 MJ/L, considerando diesel B12 (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2022).

**Tabela 1****Características operacionais por categorias de uso**

Combustível	Tipo/uso	Número de veículos	Distância		Consumo de energia
			km/ano	km/ano/veículo	MJ/km
Diesel	Compactador	461	15.504.211	33.631,7	24,84
	Baú/carreta	190	9.205.667	48.197,2	16,50
	Munck	7	190.505	27.215	14,69
	Roll on-roll off/basculante	19	204.662	10.771,7	15,66
Elétrico	Baú	1	29.106	29.106	2,28
<b>Total</b>		<b>678</b>	<b>25.134.151</b>	<b>37.016,4</b>	<b>21,61</b>

## ESPECIFICAÇÕES VEICULARES DAS TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS E CONSUMO DE ENERGIA

Para comparar a viabilidade econômica e o impacto climático de tecnologias alternativas ao caminhão a diesel, identificou-se um veículo a diesel utilizado na coleta municipal e modelos elétricos e a GNV comparáveis. Devido à ausência de dados reais de operação de caminhões elétricos e a GNV, simulou-se o consumo energético dos três veículos, incluindo o consumo associado à compactação dos resíduos.

O caminhão a diesel escolhido como referência é o Volkswagen modelo Constellation 17.230. Apesar de representar uma parcela menor da frota municipal, cerca de 15% dos caminhões compactadores, este modelo possui similares comparáveis tanto elétricos quando a GNV. As especificações deste modelo são apresentadas na Tabela 2.

Para as tecnologias alternativas, consideram-se os modelos BYD eT18 elétrico e Scania P280 a GNV. Ambos possuem dimensões e peso bruto total (PBT) similares ao modelo de referência para operar com um implemento compactador de mesmo volume. O modelo eT18 da BYD substituiu o modelo T8A, que já é utilizado para a coleta de resíduos no Brasil (Corpus Saneamento e Obras Ltda., s.d.). O modelo de caminhão a GNV P280 da Scania foi lançado oficialmente em 2022 e estava sendo testado na frota de caminhão de lixo em São Paulo.

As especificações técnicas dos veículos foram obtidas em Volkswagen (VW; VW, 2023), BYD (2023) e Scania (2020, 2023)<sup>4</sup>. Especificações do implemento de compactação estão disponíveis em Planalto (2023) e Usimeca (2023). Para simular os dois modelos a combustão, utilizou-se uma eficiência energética de 42% para motores a diesel (Yavad, Nara e Delgado, 2023) e de 37,1% para motores a GNV (Ragon e Rodriguez, 2021, p. 18).

<sup>4</sup> Para o caminhão Scania, certos dados como PBT, peso em ordem de marcha e as medidas do caminhão foram obtidos em correspondência direta com a Scania Brasil.

**Tabela 2****Especificação dos caminhões e compactador**

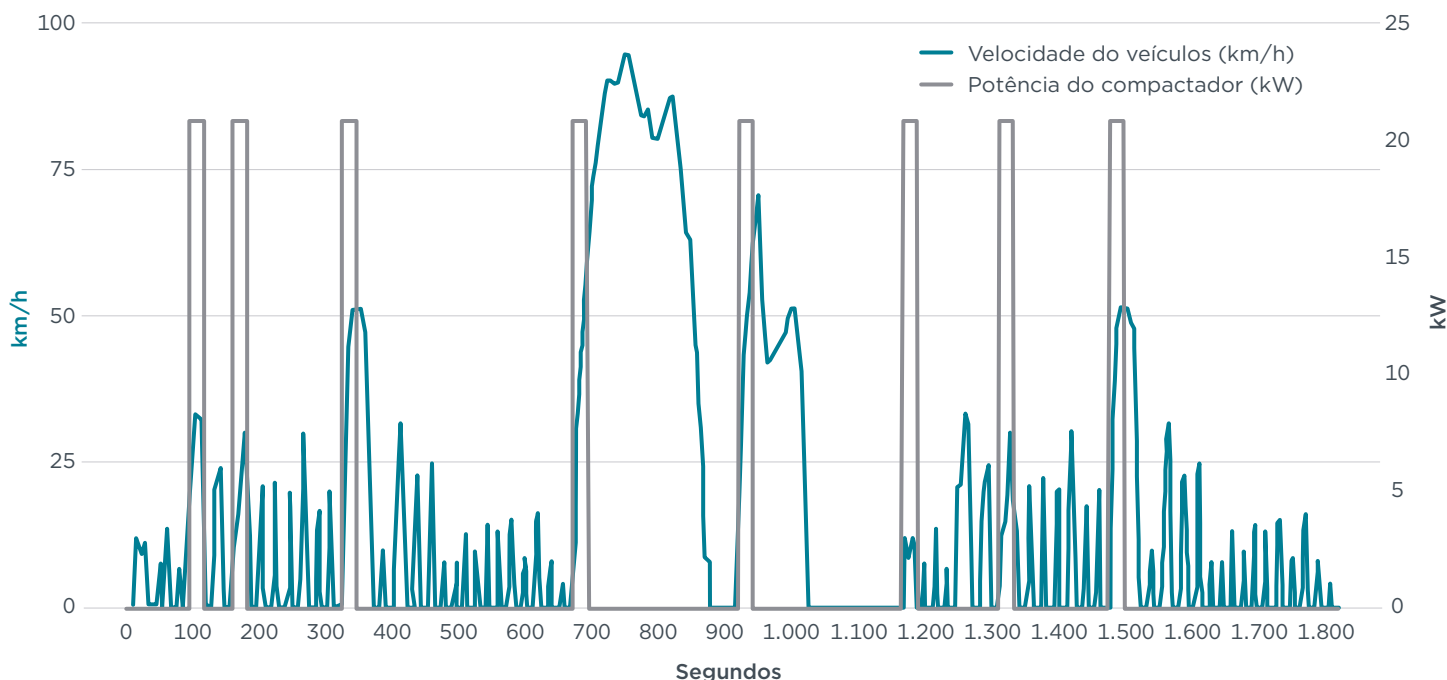
Tecnologia	Unidade	Diesel	Elétrico	Gás
Fabricante		VW	BYD	Scania
Modelo		Constellation 17.230 Euro VI	eT18 21.250	P280 Euro VI
Configuração dos eixos		4x2	4x2	4x2
Comprimento	m	6,06–9,00	8,1	8,97
Largura	m	2,51	2,53	2,5
PBT	kg	16.000	16.000	16.000
Motor		MAN D08 34 230	TZ270XSD	OC09 104/280
Potência máxima	kW	166	180	206
Torque máximo	Nm	850	450	1.400
Bateria	kWh	—	229	—
Carregador	kW	—	CCS2 - DC 100kW	—
Transmissão		Eaton FS-6406A	4RB45	GRS895R
Compactador				
Potência	kW	20,9 (28 cv)		
Ciclo	s	21		
Volume	m <sup>3</sup>	15		

Para estimar o consumo de energia das tecnologias alternativas em operações atualmente realizadas por caminhões a diesel, são necessários os dados do ciclo de condução da operação atual, que representa o “anda-e-para” típico do veículo em uma certa rota e seu perfil de elevação, e pode ser construído com base em dados de GPS (Lingzhi et al., 2020). No entanto, por ausência de dados reais, adotou-se um ciclo padronizado para caminhões de coleta de resíduos desenvolvidos pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), denominado de *Neighborhood Refuse Truck Cycle* (NREL DriveCat, 2023). As simulações foram realizadas no software Amesim (Siemens, 2023). Desenvolvido para o mercado dos Estados Unidos, o ciclo de condução da NREL reflete condições operacionais diferentes das encontradas em São Paulo. Portanto, buscando melhor representar as condições locais, o consumo simulado dos dois veículos, elétrico e a GNV, foi ajustado, multiplicando o consumo simulado pela razão entre o consumo observado e o consumo simulado do diesel.

O ciclo de condução da NREL não possui informação sobre a atividade de compactação. Segundo informações compartilhadas anonimamente por um fabricante de compactador<sup>5</sup>, para um implemento de 15 m<sup>3</sup>, o uso típico de um compactador com 20,9 kW de potência dura cerca de 4 horas até atingir a capacidade máxima de carga. Neste período o compactador é acionado entre 50 e 80 vezes por períodos de 21 segundos.

O ciclo de condução utilizado neste estudo possui 1.831 segundos, que corresponde a cerca de um oitavo (12,72%) das 4 horas da operação típicas. Portanto, foi adotado um oitavo da média de 65 compactações ao longo de um ciclo de condução de 4 horas, resultando em 8 compactações de 21 segundos cada. Os resultados do ciclo de condução e compactação utilizados são apresentados na Figura 1, que mostra a velocidade do veículo (esquerda) e potência do compactador (direita).

<sup>5</sup> Dados reportados por uma empresa anônima de manufatura do compactador, em conversa telefônica em 2023.

**Figura 1****Ciclo de condução de coleta NREL Neighborhood Refuse Truck Cycle com ativação do compactador justaposta**CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICTT.ORG](https://theicct.org)

Os consumos energéticos simulados dos três caminhões são apresentados na Tabela 3. Os valores são listados em unidades típicas de cada tecnologia e convertidos em unidades comparáveis (MJ/km). Comparando os dados simulados e observados para o modelo a diesel, o consumo energético observado (0,58 L/km) é 24% maior que o consumo simulado (0,46 L/km). O consumo energético ajustado do veículo elétrico (6,3 MJ/km) é cerca de 31% do observado no veículo a diesel (20,4 MJ/km), enquanto o consumo ajustado do caminhão a gás (33,7 MJ/km) corresponde a 165% do diesel.<sup>6</sup>

**Tabela 3****Consumo energético simulado e ajustado**

Tecnologia	Diesel		Elétrico		Gás	
<b>Fabricante</b>	VW		BYD		Scania	
<b>Modelo</b>	Constellation 17.230		eT18 21.250		P280	
<b>Unidade</b>	L/km	MJ/km	kWh/km	MJ/km	kg/km	MJ/km
<b>Consumo simulado (considerando ciclo de condução da NREL)</b>	0,46	16,4	1,40	5,0	0,52	27,1
<b>Consumo observado (para diesel) ou ajustado (para elétrico e GNV)</b>	0,58	20,4	1,74	6,3	0,64	33,7

No caso do elétrico, considerando o consumo estimado de 1,74 kWh/km e a bateria de 229 kWh, a autonomia calculada do caminhão BYD eT18 é de 131 km. Segundo dados reportados na Tabela 1, a distância média anual percorrida por caminhões compactadores na cidade é de 33.632 km. Nos dados fornecidos em Loga (2023) pode-se obter a quilometragem anual percorrida por todos os caminhões da empresa,

<sup>6</sup> Apesar de elevado, o consumo energético simulado do veículo a gás está próximo das estimativas mais eficientes da empresa Loga (SECLIMA-SP, 2023), entre 0,62-0,74 kg/km (1-1,2 m<sup>3</sup>/km), comparadas com um consumo de um veículo a diesel de 0,599 L/km.

o que possibilita verificar a adequação da autonomia deste caminhão elétrico à operação de São Paulo. Os 48 veículos de configuração de eixos 4x2 listados percorrem em média 28.158 km/ano, sendo que três quartos destes percorrem até 40.014 km/ano e a distância máxima observada é de 58.294 km/ano. Portanto, assumindo uma utilização de 6 dias por semana, a distância diária média percorrida seria de 90 km, a do terceiro quartil de 127 km e a máxima de 186 km. Assumindo uma utilização de 7 dias por semana, as mesmas distâncias diárias seriam de 78 km, 111 km e 161 km. Em ambos os casos, a autonomia calculada do caminhão elétrico (131 km) é adequada para a operação média com uma recarga diária, embora seja necessária mais uma recarga por dia para o último quartil de aplicações observados.

## CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

A análise de custo total de propriedade considera os custos de aquisição e operação ao longo do período de utilização dos veículos, medidos pelo custo total de propriedade nivelado (LCOD, do inglês *levelized cost of driving*), calculado como a razão entre valor presente dos custos e o valor presente da distância percorrida (Burnham et al., 2021, p. 17). Os dados utilizados para calcular o custo total de propriedade dos três veículos são apresentados na Tabela 4. A metodologia de cálculo e as premissas adotadas são apresentados em detalhe no Apêndice A.

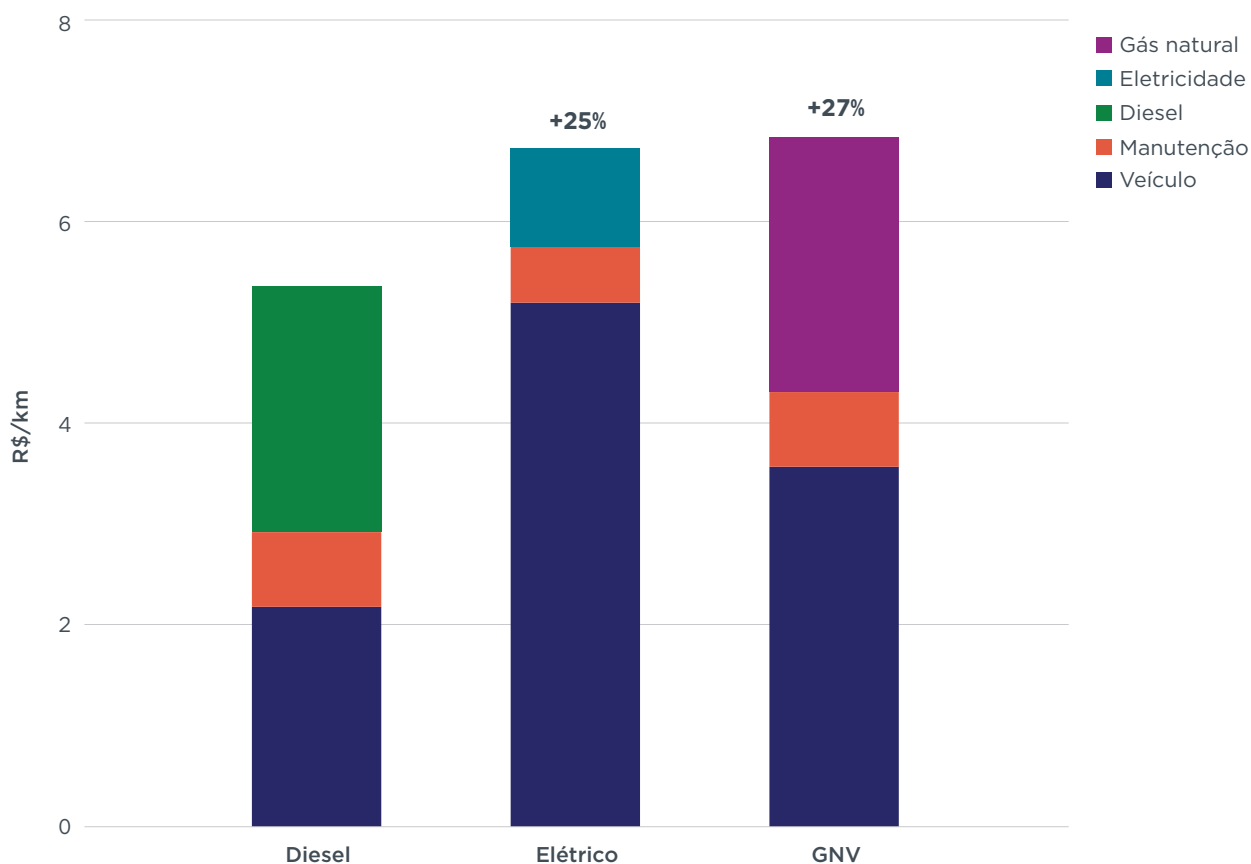
**Tabela 4**  
**Dados de custos e operação, por modelo**

Variável	Unidade	Tecnologia/Fabricante/Modelo			Referência
		Diesel VW	Elétrico BYD	Gás Scania	
		Constellation 17.230	eT18 21.250	P280	
<b>Veículo</b>	R\$	430.863	987.240	705.866	Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE; FIPE, s.d.); BYD (comunicação privada, 2023); Scania (2020, 2023)
<b>Valor residual (após 5 anos)</b>	%	56%	52%	56%	BYD (2023a); BYD (2023b); Xie, Basma e Rodríguez (2023); Basma e Rodríguez (2023); Basma et al. (2023); OLX (s.d.-a, s.d.-b, s.d.-c)
<b>Manutenção</b>	R\$/km	0,74	0,56	0,74	Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul (TCERS; TCERS, 2019), California Air Resources Board (CARB; CARB, 2019)
<b>Preço do combustível</b>	R\$/L, R\$/kWh, R\$/m <sup>3</sup>	4,25	0,56	2,92	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP; ANP, 2023); Secretaria Municipal da Fazenda, Prefeitura Municipal de São Paulo (SMF-SP; SMF-SP, 2023); Comgas (2023)
<b>Distância anual percorrida (VKT, do inglês <i>vehicle kilometers traveled</i>)</b>	km/ano	33.632	33.632	33.632	Ecourbis Ambiental (2023); Loga (2023)
<b>Financiamento</b>					
<b>Entrada</b>	%	15%	15%	15%	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES; BNDES, s.d.-a)
<b>Prazo</b>	meses	60	60	60	
<b>Taxa de juros real</b>	% ao ano	10,4%	10,4%	10,4%	
<b>Tempo de operação</b>	anos	5	5	5	Ecourbis Ambiental (2004); Loga (2004)

Com base nessas premissas, que refletem custos e condições operacionais atuais, o custo total de propriedade para os veículos a diesel, elétrico e a gás natural são apresentados na Figura 2. Os custos por veículo são divididos em três categorias:

preço dos veículos e suas condições de financiamento, custo de manutenção e custos de combustível (diesel, eletricidade e gás natural). Adicionalmente, o fluxo de caixa descontado para cada um dos projetos é apresentado na Figura A3 do Apêndice.

**Figura 2**  
**Custo total de propriedade dos três modelos de caminhões**



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICCT.ORG](https://www.theicct.org)

O veículo a diesel apresenta os menores custos, com 5,39 R\$/km. Para o caminhão elétrico, os custos totais estimados são de 6,76 R\$/km, 25% acima do caminhão a diesel, enquanto o caminhão a gás é 27% mais caro do que o a diesel, com 6,87 R\$/km.

A composição destes custos difere entre os três veículos. Em particular, o caminhão elétrico possui custos operacionais menores e um custo de aquisição maior: Os custos de aquisição e financiamento dos veículos, incluindo valor de revenda, correspondem a 41% do total para o caminhão a diesel, 77% para o elétrico e 52% para o veículo a gás. Já os custos de manutenção respondem por 14%, 8% e 11% do total nos caminhões a diesel, elétrico e a gás, respectivamente.

A redução de custos operacionais no veículo elétrico acontece em função da maior eficiência energética dos motores elétricos, que contam também com frenagem regenerativa. A estimativa de custo por quilômetro da energia para o caminhão elétrico é 60% menor do que para o veículo a diesel. Por outro lado, o custo por quilômetro com energia do caminhão a gás é cerca de 3% maior em comparação ao diesel.

Esta análise tem certas limitações. Em particular, não são considerados os custos de aquisição e instalação da infraestrutura de recarga elétrica, que depende da localização das estações de transbordo; este estudo considera apenas os custos da eletricidade. Nem considera os custos da infraestrutura de transporte, compressão e

abastecimento do gás, uma vez que a maior parte da frota municipal não se locomove até os aterros sanitários.

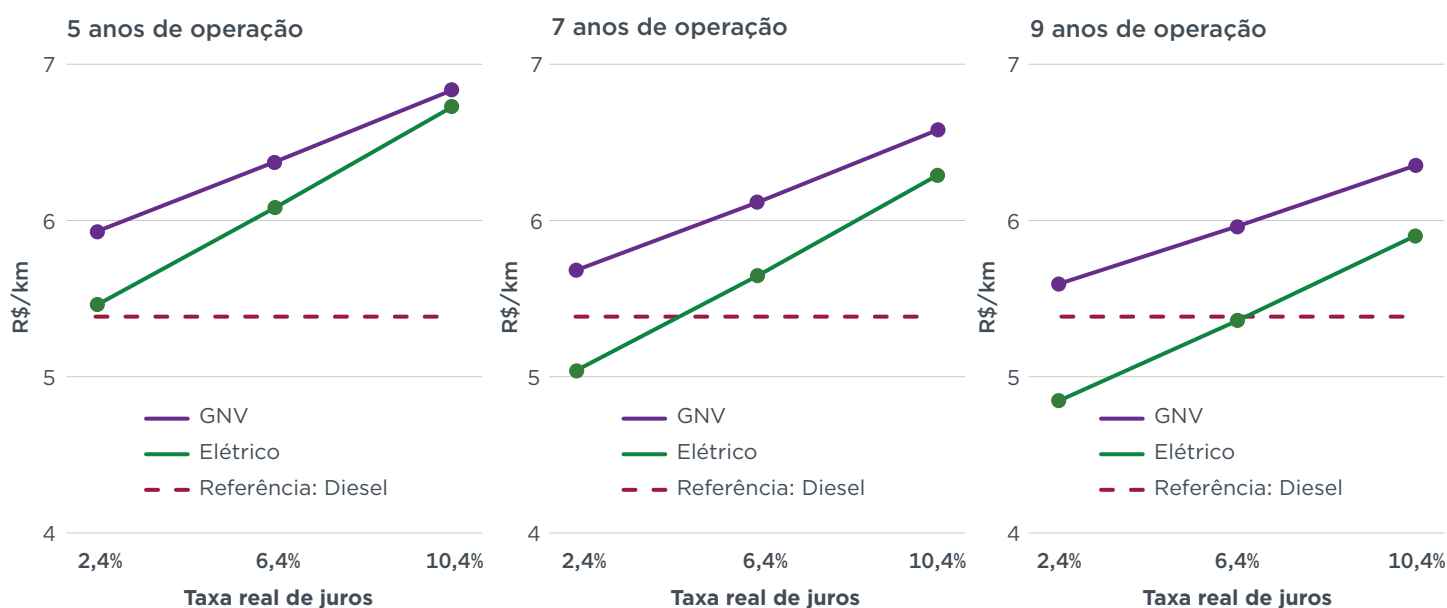
## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

A seguir são analisados cenários alternativos de custo total de propriedade para os caminhões elétrico e GNV, considerando os impactos de variações de certos custos e condições operacionais. Para essa análise de sensibilidade, foram selecionadas as duas variáveis mais suscetíveis a intervenções de políticas públicas: taxas de juros reais aplicadas no financiamento desses veículos (considerando uma taxa base de 10,4% e taxas alternativas de 6,2% e 2,4%) e anos de operação (considerando uma base de 5 anos e alternativas de 7 e 9 anos).

A Figura 3 apresenta o custo total por quilômetro em função da taxa real de juros com 5 (esquerda), 7 (meio) e 9 (direita) anos de operação para os caminhões elétrico (verde) e a GNV (roxo). Considera-se que essas mudanças (redução da taxa de juros e aumento no tempo de operação) seriam aplicadas apenas às tecnologias alternativas, como medidas de incentivo às suas adoções. Portanto, os custos totais estimados em cada caso são comparados com o valor obtido acima para o caminhão a diesel sem essas intervenções, de 5,39 R\$/km, representado pela linha vermelha tracejada.

**Figura 3**

### Análise de sensibilidade do custo total de propriedade nivelado (LCOD)



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICTT.ORG](http://THEICTT.ORG)

Devido ao maior custo fixo e menor custo operacional do caminhão elétrico, reduções nas taxas reais de juros e, portanto, no custo de aquisição dos veículos, tem um impacto maior em seu LCOD. Ao mesmo tempo, aumentos no número de anos de operação reduzem mais o LCOD dos veículos elétrico e a gás, pois distribuem seu custo fixo comparativamente maior ao longo de mais anos e quilômetros.

Por exemplo, assumindo 7 anos de operação e uma redução nas taxas de juros reais de 10,4% para 6,4%, observa-se um LCOD do elétrico 5% superior (5,65 R\$/km) ao do diesel. Com uma redução de juros reais para 2,4% e 7 anos de operação, o custo total por km do caminhão elétrico é 7% menor (5,03 R\$/km) do que o do diesel base. Com 9 anos de operação e juros reais de 6,4%, tem-se um LCOD 1% menor que o do caminhão a diesel. E com os mesmos 9 anos de operação a juros reais de 2,4% o LCOD do elétrico



é 10% menor que o do diesel. Além destas análises de sensibilidade, a Tabela C.1 apresenta uma análise de sensibilidade estendida, que considera variações nos preços da eletricidade e do gás.

Para o caminhão a GNV, a combinação de 9 anos de operação e uma taxa real de juros de 2,4% resulta em um LCOD 4% superior (5,60 R\$/km) ao do diesel. Como apresentado na Tabela C.1, os resultados do caminhão a GNV são altamente sensíveis às mudanças no preço do combustível: Assumindo 5 anos de operação e uma taxa real de juros de 10,4% como no caso base, é possível atingir um LCOD apenas 4% superior ao diesel, se no lugar do gás natural de origem fóssil fosse utilizado um biometano com custo 50% menor do que o do gás fóssil, de cerca de 1,46 R\$/m<sup>3</sup>.

## EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CICLO DE VIDA

Os custos de aquisição e operação de novas tecnologias devem ser avaliados em conjuntos com sua capacidade de reduzir emissões. Com relação a poluentes climáticos, a Lei 16.802 de 2018 estabelece metas de redução de emissões de escapamento de CO<sub>2</sub> fóssil. Estabelece ainda que a escolha de combustíveis e fontes de energia devem considerar a maximização da redução de emissões em todo o ciclo de vida do combustível ou fonte de energia a ser adotado dentro de custos aceitáveis. Porém, em contraste com as metas de redução de emissões de escapamento, não há metas específicas para emissões no ciclo de vida.

Como discutido em Dallmann (2019), considerar apenas as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil de escapamento não permite avaliar adequadamente os impactos climáticos das tecnologias e combustíveis. As emissões geradas ao longo da cadeia de produção do combustível ou energia elétrica, e no processo de manufatura do veículo, podem corresponder a uma parcela significativa das emissões do ciclo de vida. Além disso, há outros gases de efeito estufa além do CO<sub>2</sub>, como o metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que não são regulados pela Lei 16.802 mas são gerados da produção ao uso dos combustíveis e veículos.

Esta seção desenvolve uma estimativa das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida dos caminhões de coleta da cidade de São Paulo. Utilizando uma metodologia baseada em Bieker (2021) e O'Connell et al. (2023), são contabilizados os poluentes climáticos gerados na produção do veículo e da bateria, além da produção e uso do combustível e da eletricidade. O objetivo dessa análise é identificar quais tecnologias e fontes de energia trazem as maiores reduções de gases de efeito estufa para essa aplicação.

A análise considera os modelos de caminhões descritos na Tabela 3 com um período de operação de 5 anos e uma distância anual percorrida de 33.632 km. Quanto aos combustíveis, para o caminhão convencional a diesel considera-se o diesel B12, comercializado no país entre abril de 2023 e março de 2024 e que conta com 12% de biodiesel na sua composição. Para o modelo elétrico, considera-se a matriz de geração de eletricidade do Brasil atual e projeções da composição da matriz elétrica até 2027. Para o veículo GNV, analisa-se suas emissões quando movido a gás natural de origem fóssil, como também a biometano gerado a partir dos resíduos dos aterros sanitários.

## CICLO DO VEÍCULO

No ciclo do veículo, as emissões associadas ao processo de sua fabricação, desde a extração da matéria prima até sua montagem, são referidas como o *glider* e *power train*. Esse conjunto corresponde a todo o veículo exceto a bateria no caso dos elétricos, cujas emissões são calculadas separadamente. O ciclo do veículo também

inclui as emissões de manutenção dos caminhões. A descrição detalhada das variáveis consideradas no ciclo do veículo é apresentada na Tabela B1, no Apêndice B. A Tabela 5 apresenta as premissas e referências adotadas para as emissões do ciclo do veículo.

**Tabela 5**

**Premissas de emissões de gases de efeito de estufa, ciclo do veículo**

Variável	Tecnologia de motor	Valor	Unidade	Referência
<b>Manufatura do veículo (glider e power train)</b>	Diesel	6,6	kgCO <sub>2</sub> e/kg	Scania (2021) e O’Connell et al. (2023)
	Gás	7,0		
	Elétrico	6,6		
<b>Manutenção</b>	Diesel	27,6	gCO <sub>2</sub> e/km	Hill et al. (2020)
	Gás	22,3		
	Elétrico	46,4		
<b>Bateria (LFP-Grafite)</b>	Elétrico	58	kgCO <sub>2</sub> e/kWh	O’Connell et al. (2023), Bieker (2021), Wang et al. (2020) e Hill et al. (2020)

## CICLO DO COMBUSTÍVEL E ELETRICIDADE

As emissões geradas no ciclo do combustível e da eletricidade, ou emissões do “poço à roda” (WTW, do inglês *well-to-wheel*), incluem as emissões de escapamento geradas na queima dos combustíveis, denominadas de emissões do “tanque à roda” (TTW, do inglês *tank-to-wheel*), além das emissões associadas à produção do combustível ou da eletricidade, ou emissões do “poço ao tanque” (WTT, do inglês *well-to-tank*). A Tabela B2 no Apêndice B detalha as categorias adotadas na estimativa de emissões de cada fonte de energia considerada neste estudo.

Para combustíveis fósseis, a análise considera as emissões geradas na extração do petróleo ou do gás natural e no processamento, refino, distribuição e queima dos combustíveis. As emissões de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O geradas na combustão incompleta de biocombustíveis e combustíveis fósseis também são incluídas, bem como as emissões fugitivas de CH<sub>4</sub>, que ocorrem durante a extração, processamento e distribuição do gás natural.

Para os biocombustíveis, o estudo considera as emissões geradas no cultivo das biomassas energéticas (no caso do biodiesel) e na coleta dos resíduos (no caso do biometano), no seu processamento e transporte, além da produção e distribuição do biocombustível. Para contabilizar as emissões da produção do biodiesel brasileiro, considera-se o mix de mercado de 2021. Segundo Barros (2022), 82,2% do biodiesel do Brasil foi derivado do óleo de soja, 12,8% de óleo de sebo, 2,1% de óleo de cozinha e 2,9% de óleo de palma.

A Tabela 6 apresenta os fatores de emissão adotados para os combustíveis fósseis e biocombustíveis, do modelo *Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation* (GREET; Wang et al., 2022)<sup>7</sup>. O modelo GREET inclui créditos de emissão de CO<sub>2</sub> para combustíveis derivados de material biogênico, refletindo uma convenção entre o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*; 2023) e os principais agentes regulatórios, segundo a qual o CO<sub>2</sub> emitido durante a combustão biogênica é capturado pelo crescimento da biomassa de reposição no curto prazo.

<sup>7</sup> As propriedades físicas dos combustíveis são apresentadas na Tabela B4.

**Tabela 6****Resumo dos fatores de emissão**

Fatores de emissão g (CO <sub>2</sub> e/MJ)							
Tecnologia	Combustível	Substrato	GWP	WTT	TTW	Crédito de emissões de CO <sub>2</sub>	WTW
Diesel	Diesel B12	Mix do mercado	100	14,55	75,70	-8,02	82,23
Gás	GNV	Gás fóssil	100	14,92	57,37	—	72,29
Gás	Biometano	Aterro sanitário	100	10,63	57,37	-56,31	11,68

Para o biodiesel produzido a partir da soja, a análise inclui as emissões indiretas do uso da terra (ILUC, do inglês *indirect land-use change*), que ocorrem com a conversão de terras agrícolas para produção de biomassas energéticas, motivada indiretamente pela demanda por biocombustíveis. Utilizou-se o valor *default* adotado pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, 2022) em seu programa CORSIA para o caso de biocombustíveis produzidos a partir da soja brasileira (27 gCO<sub>2</sub>e/MJ).

Neste estudo, as emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O são convertidas em CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) utilizando os fatores de potencial de aquecimento global (GWP, do inglês *global warming potential*) definidos no 6º relatório de avaliação do IPCC (Smith et al., 2021). O GWP define o quanto um gás de efeito estufa contribui para o aquecimento global, tendo como base o CO<sub>2</sub>. Convencionalmente, as emissões são estimadas considerando um GWP de 100 anos. As propriedades físicas dos combustíveis adotadas para as conversões, incluindo massa específica e conteúdo energético, são apresentadas na Tabela B3, e os potenciais de aquecimento global adotados no estudo são descritos na Tabela B4.

Não foram encontrados valores de referência para emissões fugitivas de CH<sub>4</sub> na cadeia do gás natural no Brasil. Portanto, adotou-se como premissa o valor *default* do modelo GREET, de 1% em volume (Burnham, 2018). O metano é um gás de efeito estufa com alto potencial de aquecimento global, com efeito 29 vezes mais potente que o CO<sub>2</sub> em 100 anos e 82 vezes em 20 anos (Tabela B4). Portanto, mesmo em baixos níveis tem impacto climático significativo. Em uma análise de sensibilidade, inclui-se o cenário com GWP 20 para analisar o impacto de curto prazo de gases de efeito estufa de curta duração, como o metano, nas emissões de caminhões movidos a gás de origem fóssil. Os fatores de emissão para essa análise são apresentados na Tabela B5.

Os fatores de emissão da eletricidade, reportados na Tabela 7, consideram a geração, transmissão e distribuição da matriz elétrica brasileira entre 2023 e 2027, além das perdas de energia ao longo dessa cadeia. A projeção da composição da matriz elétrica é estimada a partir dos cenários futuros de geração de eletricidade da International Energy Agency (IEA; IEA, 2022). Considera-se o cenário mais conservador para o Brasil, o Cenário “Stated Policy”, com fatores de emissão maiores para os anos considerados neste estudo do que os reportados em EPE (2022), aqui apresentados para comparação.

**Tabela 7**

**Resumo da composição da matriz elétrica brasileira das projeções da IEA (Cenário “Stated Policy”) e da EPE para os anos analisados nesse estudo (2023 a 2027)**

IEA - Cenário “Stated Policy”			EPE - Projeção 2032			
Ano	Fóssil (%)	Renovável (%)	Fator de emissão (gCO <sub>2</sub> e/kWh)	Fóssil (%)	Renovável (%)	Fator de emissão (gCO <sub>2</sub> e/kWh)
2023	15%	85%	143,9	11%	89%	99,4
2024	14%	86%	134,4	10%	90%	89,9
2025	12%	88%	124,9	9%	91%	80,5
2026	11%	89%	115,5	7%	92%	71,0
2027	10%	90%	106,0	6%	93%	61,5
Média	—	—	124,9	—	—	80,4

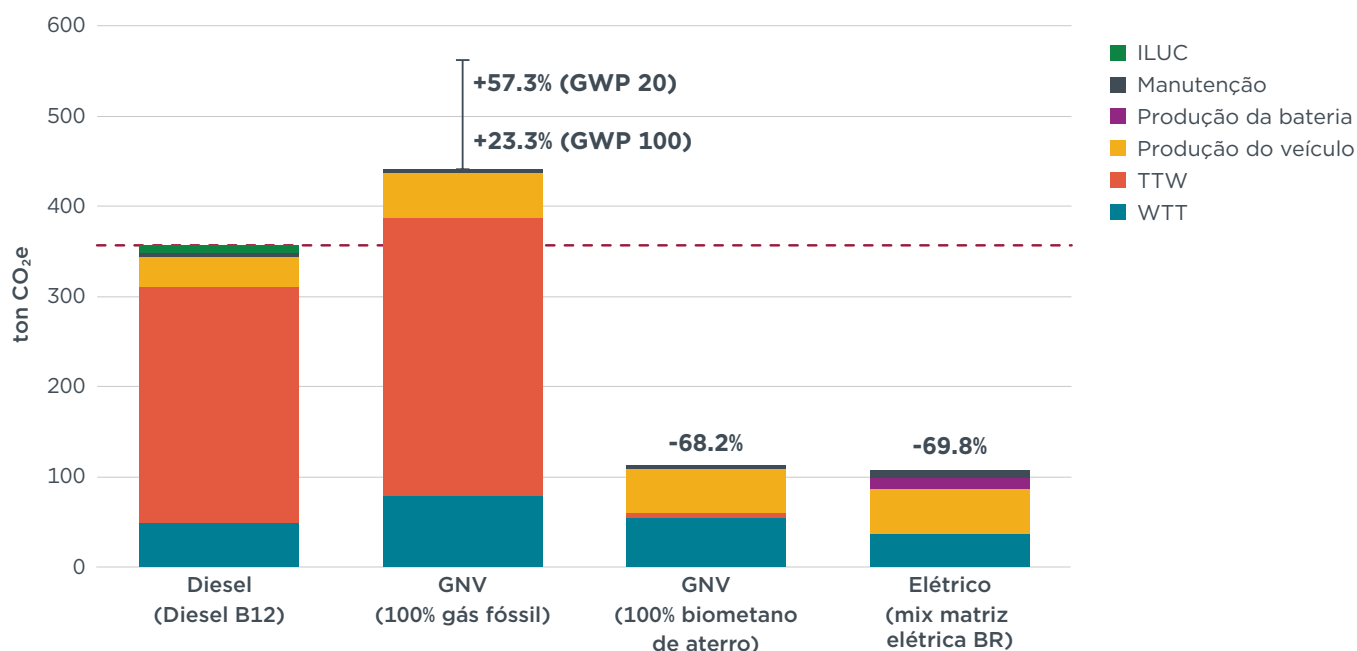
## EMISSÕES DO CICLO DE VIDA DOS CAMINHÕES DE COLETA

Considerando as especificações veiculares e características operacionais, juntamente com os fatores de emissão dos ciclos dos veículos e dos combustíveis e eletricidade, calculou-se as emissões do ciclo de vida para uma operação de cinco anos dos caminhões a diesel, gás e elétrico.

A Figura 4 apresenta as emissões do veículo a diesel, a gás utilizando gás natural fóssil, a gás utilizando biometano de aterro sanitário, e elétrico. As barras são compostas pelas emissões de produção dos combustíveis ou eletricidade (WTT), de queima dos combustíveis (TTW), de manufatura dos veículos e da bateria para o elétrico, de manutenção e de ILUC para o diesel. As emissões são estimadas considerando um potencial de aquecimento global de 100 anos (GWP 100), com uma barra de erro representando as emissões adicionais para o caminhão a gás caso se considerasse o potencial de 20 anos (GWP 20). A linha horizontal tracejada vermelha representa as emissões do diesel, usado como base para a comparação das alternativas.

**Figura 4**

**Emissões do ciclo de vida dos caminhões de coleta de resíduos**



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICTT.ORG](http://THEICTT.ORG)

Os resultados indicam um alto potencial de mitigação de emissões do caminhão elétrico, que produz emissões no ciclo de vida 69,8% menores que o equivalente a diesel. A eficiência dos motores elétricos, que para a mesma distância percorrida requerem cerca de um terço da energia necessária por um motor a diesel, e o baixo fator de emissão da matriz elétrica brasileira são responsáveis pelo alto potencial de mitigação desta tecnologia. O uso de biometano de aterros sanitários leva a emissões estimadas do ciclo de vida 68,2% menores do que as computadas para o caminhão a diesel, principalmente devido a captura do metano que seria emitido pelos aterros na atmosfera. O fator de emissão do biometano é cerca de 80% menor do que o do gás natural fóssil.

De fato, os resultados apontam para o risco de um aumento das emissões caso seja utilizado gás natural fóssil no veículo a gás, devido à menor eficiência do seu motor e ao fator de emissão do gás fóssil que, ao se considerar emissões fugitivas de metano, supera o do diesel. No caso de GWP 100, as emissões do caminhão a gás fóssil são 23,3% maiores que as do equivalente a diesel. Esse aumento é ainda mais expressivo ao se analisar o potencial de aquecimento das emissões em 20 anos: nesse caso, o metano tem um impacto quase 3 vezes maior do que em 100 anos (ver Tabela B4 e B5) e as emissões do caminhão a gás fóssil seriam cerca de 57,3% maiores do que as do caminhão a diesel.

## CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo avaliou as perspectivas para a frota de coleta de resíduos sólidos na cidade de São Paulo em relação ao custo total de propriedade e às emissões no ciclo de vida, comparando caminhões a diesel com veículos elétricos e a GNV. Para cumprir as metas estabelecidas na Lei Nº 16.802 de 2018, de reduzir em 50% as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil de escapamento até 2028 e em 100% até 2038, será necessário substituir a tecnologia convencional por novas tecnologias veiculares ao longo dos próximos anos. A obrigatoriedade do contrato atual de substituir caminhões de 5 anos fornece uma janela de oportunidade para a descarbonização desta frota, pois permite uma rápida introdução de novas tecnologias.

A análise apresentada sugere que os veículos elétricos e a GNV (quando abastecido exclusivamente com biometano) tem um potencial para promover reduções expressivas nas emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida. Por outro lado, estimou-se que veículos a GNV abastecidos com gás natural fóssil emitem mais do que os caminhões a diesel utilizados atualmente. Embora os caminhões elétricos e a GNV tenham custos totais superiores aos dos caminhões a diesel utilizados atualmente, variações nas características operacionais, em custos de financiamento e dos veículos e de preços dos combustíveis têm o potencial de viabilizar estas tecnologias alternativas.

Tendo em vista a necessidade de reduzir drasticamente as emissões da frota de coleta de São Paulo nos próximos anos, os resultados apresentados acima suportam as seguintes conclusões:

**Incentivos e mudanças operacionais poderiam reduzir o custo total de propriedade de caminhões de coleta elétricos e estimular sua adoção.** Uma combinação de taxas de juros reduzidas com mais anos de operação por veículo pode equacionar a atual diferença no custo total de propriedade entre veículos elétricos e a diesel. Segundo a análise de sensibilidade desenvolvida, uma redução na taxa real de juros de 10,4% para 2,4% resultaria em custos por quilômetro para o caminhão elétrico 1% maiores do que no caminhão a diesel, enquanto uma combinação da extensão da operação de 5 para 9 anos e uma redução da taxa real de juros de 10,4% para 6,4% traria custos por quilômetro 1% menores. O aumento dos anos de operação pode ser operacionalizado diretamente pelo município, em seus acordos com as concessionárias. Enquanto isso, reduções nas taxas reais de juros para a aquisição de caminhões elétricos podem ser

obtidas por meio das linhas de crédito para financiamento da mobilidade verde no âmbito do fundo clima (BNDES, s.d.-b), ou via acesso direto da prefeitura à fundos internacionais para a descarbonização, como já realizado para a frota de ônibus de São Paulo (Petrocilo, 2023).

Entretanto, será importante aumentar a oferta de modelos elétricos, principalmente de caminhões de configuração 6x2 (com peso bruto total de 23 t) que compõe a maioria da frota paulistana de caminhões de coleta. Além disso, o dimensionamento da infraestrutura de recarga deve garantir a disponibilidade destes veículos em operações de diversos turnos por dia.

**Para reduzir as emissões da frota de coleta, o gás natural de origem fóssil não deve ser considerado como uma opção de descarbonização e nem como um combustível de transição.** Caminhões de coleta movidos exclusivamente a gás natural de origem fóssil são mais prejudiciais ao clima do que os caminhões convencionais a diesel, gerando emissões de gases de efeito estufa 23,3% maiores no ciclo de vida. Os investimentos necessários para a produção e distribuição de gás, assim como a aquisição dos veículos, são altos, e só trariam benefícios climáticos caso a frota fosse movida exclusivamente a biometano. Caso o biometano não esteja disponível no volume necessário, isso pode trazer dependência em gás natural de origem fóssil. Há também riscos de *lock-in* tecnológico, ou seja, desses investimentos e da reestruturação de infraestrutura e operação dificultarem ou até impossibilitarem novos investimentos em tecnologias que podem ser mais efetivas.

**Uma descarbonização custo-efetiva da frota de coleta de São Paulo com caminhões a gás depende da disponibilidade de biometano a custos equivalentes à metade do preço de distribuição do gás natural de origem fóssil.** Logo, seria necessário garantir o uso exclusivo de biometano produzido nos aterros sanitários do município. A maior parte dos caminhões da frota de São Paulo tem nas estações de transbordo seu ponto final, de modo que seria necessário transportar o biometano até o ponto de abastecimento sem emissões adicionais. Também é fundamental reduzir (ou melhor, eliminar) as emissões fugitivas de metano na captura e transporte do gás. Devido ao alto potencial de aquecimento global deste gás, oitenta vezes superior à massa equivalente de CO<sub>2</sub> 20 anos após as emissões, pequenos vazamentos no transporte e abastecimento podem reduzir significativamente seu benefício ambiental.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Preços de distribuição de combustíveis. Acesso em 29 de agosto de 2023, de <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos-de-distribuicao-de-combustiveis>
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (s.d.-a). *BNDES Finame BK aquisição e comercialização*. Acesso em 05 de setembro de 2024, de <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finame-bk-aquisicao-comercializacao>
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. (s.d.-b). *Fundo Clima – logística de transporte, transporte coletivo e mobilidade verde*. Acesso em 5 de setembro de 2024, de <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima/fundo-clima-logistica-transporte-coletivo-mobilidade-verde>
- Barros, S. (2022). *Biofuels annual: Brazil (Report No. BR2022-0047)*. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual\\_Sao%20Paulo%20ATO\\_Brazil\\_BR2022-0047.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_BR2022-0047.pdf)
- Basma, H., & Rodriguez, F. (2023). *The European heavy-duty vehicle market until 2040: analysis of decarbonization pathways*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/hdv-europe-decarb-costs-jan23/>
- Basma, H., Buysse, C., Zhou, Y. & Rodriguez, F. (2023). *Total cost of ownership of alternative powertrains technologies for class 8 long-haul trucks in the United States*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/tco-alt-powertrain-long-haul-trucks-us-apr23/>
- 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/>
- Burnham, A., Gohlke, D., Rush, L., Stephens, T., Zhou, Y., Delucchi, M. A., Birky, A., Hunter, C., Lin, Z., Ou, S., Xie, F., Proctor, C., Wiryadinata, S., Liu, N., & Bloor, M. (2021). *Comprehensive total cost of ownership quantification for vehicles with different size classes and powertrains*. Argonne National Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1780970>
- Burnham, A. (2018). *Updated natural gas pathways in the GREET1\_2018 model*. Argonne National Laboratory. [https://greet.es.anl.gov/publication-update\\_ng\\_2018](https://greet.es.anl.gov/publication-update_ng_2018)
- BYD. (2023a). *Caminhões 100% elétricos BYD: eT7 12.220 e eT18 21.250*. <https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/12/Folder-et7-et18-2022-compactado-1.pdf>
- BYD. (2023b). *eT3 Manutenção e garantia*. <https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/08/Livro-ManualManutencaoGarantia-BYDeT3-Jun2022-Interativo.pdf>
- California Air Resources Board. (2019). *Advanced clean trucks total cost of ownership discussion document: Preliminary draft for comment*. [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/190225tco\\_ADA.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-06/190225tco_ADA.pdf)
- Companhia de Gás de São Paulo. (2023). *Tarifas*. Acesso em 29 de agosto de 2023, de <https://www.comgas.com.br/minha-conta/tarifas>.
- Corpus Sanemanto e Obras Ltda. (s.d.). *A população aprova caminhão de lixo elétrico da Corpus!* [Comunicado de imprensa]. Acesso em 18 de agosto de 2024, de <https://corpus.com.br/populacao-aprova-caminhao-de-lixo-eletrico/>
- Dallman, T. (2019). *Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/beneficios-de-tecnologias-de-onibus-em-termos-de-emissoes-de-poluente-do-ar-e-do-clima-em-sao-paulo/>
- Ecurbis Ambiental.(2023). *Relatório anual de emissões da frota: Ano 2022*. [https://capital.sp.gov.br/web/secretaria\\_executiva\\_de\\_mudancas\\_climaticas/w/participacao\\_social/conselhos\\_e\\_orgaos\\_colegiados/comfrotasp/352702](https://capital.sp.gov.br/web/secretaria_executiva_de_mudancas_climaticas/w/participacao_social/conselhos_e_orgaos_colegiados/comfrotasp/352702)
- Ecurbis Ambiental. (2004). *Termo de compromisso ambiental*. [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/spregula/TCA\\_2007\\_\\_\\_EcoUrbis-compactado.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/spregula/TCA_2007___EcoUrbis-compactado.pdf)
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022). *Descarbonização do setor de transporte rodoviário: Intensidade de carbono das fontes de energia (Nota técnica EPE/DPG/SDB/2022/03)*. [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](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)
- Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas. (s.d.). *Preços de veículos automotores*. Acesso em 28 de agosto de 2023, de <https://veiculos.fipe.org.br>
- Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Heims, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Abdalla, N., Jöhrens, J., Cotton, E., German, L., Harris, A., Haye, S., Sim, C., Bauen, A. & Ziem-Milojevic, S. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fueled vehicles through LCA*. <https://data.europa.eu/doi/10.2834/91418>

- Howarth, R. W., Santoro, R., & Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations: A letter. *Climatic Change*, 106, 679-690. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0061-5>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2021 – The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- International Civil Aviation Organization. (2022). CORSIA default life cycle emissions values for CORSIA eligible fuels. [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA\\_Eligible\\_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20June%202022.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20June%202022.pdf)
- International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Jin, L., Delgado, O., Gadepalli, R., & Minjares, R. (2020). *Strategies for deploying zero-emission bus fleets: Development of real-world drive cycles to simulate zero-emission technologies along existing bus routes*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/strategies-for-deploying-zero-emission-bus-fleets-development-of-real-world-drive-cycles-to-simulate-zero-emission-technologies-along-existing-bus-routes/>
- Lei No 16.802, de 17 de janeiro de 2018, <https://www.saopaulo.sp.leg.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>
- Logística Ambiental de São Paulo. (2004). *Termo de compromisso ambiental*. [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/spregula/TCA\\_\\_\\_Loga-.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/spregula/TCA___Loga-.pdf)
- Logística Ambiental de São Paulo. (2023). *5ª Relatório anual de emissões da frota, ano-referência: 2022*. [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/governo/secretaria\\_executiva\\_de\\_mudancas\\_climaticas/arquivos/comfrota/relatorio\\_emissao\\_gases/22-23/Relat%C3%B3rio%20de%20emiss%C3%A3o%202022%20-%20Limpeza%20Urbana%20/Relat%C3%B3rio\\_de%20Invent%C3%A1rio\\_de\\_Emiss%C3%B5es\\_22\\_23\\_LOGA.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/governo/secretaria_executiva_de_mudancas_climaticas/arquivos/comfrota/relatorio_emissao_gases/22-23/Relat%C3%B3rio%20de%20emiss%C3%A3o%202022%20-%20Limpeza%20Urbana%20/Relat%C3%B3rio_de%20Invent%C3%A1rio_de_Emiss%C3%B5es_22_23_LOGA.pdf)
- National Renewable Energy Laboratory DriveCAT. (2023). *NREL Neighbourhood Refuse Truck Cycle*. [www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool](http://www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool)
- OLX. (s.d.-a). *VW 17230 2017/2018 constellation crm 4x2 – compactador lixo único dono*. Acesso em 28 de agosto de 2023, de <https://www.olx.com.br/>
- OLX. (s.d.-b). *VW 17230 constellation crm 4x2 – compactador*. Acesso em 28 de agosto de 2023, de <https://www.olx.com.br/>
- OLX (s.d.-c). *VW 17230 constellation crm 4x2 – compactador*. Acesso em 28 de agosto de 2023, de <https://www.olx.com.br/>
- O’Connell, A., Pavlenko, N., Bieker, G. and 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/>
- Petrocilo, C. (2023, 6 de setembro). Prefeitura de SP faz empréstimo bilionários para comprar ônibus elétricos. *Folha de S. Paulo*. <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2023/09/prefeitura-de-sp-faz-emprestimo-bilionario-para-comprar-onibus-eletricos.shtml>
- Planalto Indústria Mecânica. (2023). *Ecolix modelo*. <https://www.planaltoindustria.com.br/files/ecolix-104750.pdf>
- Ragon, P., & Rodríguez, F. (2021). *CO<sub>2</sub> emissions from trucks in the EU: An analysis of the heavy-duty CO<sub>2</sub> standards baseline data*. International Council on Clean Transportation. [https://theicct.org/publication/CO<sub>2</sub>-emissions-from-trucks-in-the-eu-an-analysis-of-the-heavy-duty-co2-standards-baseline-data/](https://theicct.org/publication/CO2-emissions-from-trucks-in-the-eu-an-analysis-of-the-heavy-duty-co2-standards-baseline-data/)
- Rebouças, A. B., Daniel, J. & Delgado, O. (2022). *Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/brazil-hvs-zebra-analise-operacion-onibus-eletricos-sao-paulo-nov22/>
- Scania. (2020). *Caminhões scania movidos a gás: a energia do amanhã, hoje* [Comunicado de imprensa]. [https://www.scania.com/content/dam/www/market/br/pdfs1/especificacoes/caminhoes/00087-2020\\_caminhoes\\_a\\_gas\\_Low.pdf](https://www.scania.com/content/dam/www/market/br/pdfs1/especificacoes/caminhoes/00087-2020_caminhoes_a_gas_Low.pdf)
- Siemens. (2023). *Simcenter AMESim software*. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/systems-simulation/amesim/>
- Secretaria Municipal do Clima, Prefeitura Municipal de São Paulo. (2023, 31 de agosto). *28ª reunião ordinária do Comfrota* [Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=MeMxzuWrEpw>
- Secretaria Municipal da Fazenda, Prefeitura Municipal de São Paulo. (2023). *Financiamento da eletrificação da frota de ônibus de São Paulo: Anexo C – Justificativa dos preços que compõem a remuneração dos veículos elétricos*. Documentos obtidos via lei de acesso à informação.
- SPTrans. (2023). *Instrução técnica 11: metodologia para cálculos das emissões de poluentes*. <https://www.sptrans.com.br/media/13527/instrucao-tecnica-emissao-poluentes.pdf>



- Smith, C., Nicholls, Z. R. J., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., Palmer, M. D., & Watanabe, M. (2021). The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul. (2019). *Orientação técnica serviços de coleta de resíduos sólidos domiciliares: projeto, contratação e fiscalização*. [https://tcers.tc.br/repo/orientacoes\\_gestores/Coleta-de-Residuos-Solidos.pdf](https://tcers.tc.br/repo/orientacoes_gestores/Coleta-de-Residuos-Solidos.pdf)
- Usimeca. (2023). *Alpha*. [https://www.usimeca.com.br/wp-content/uploads/2022/07/Usimeca-ALPHA-Leaflet\\_LR.pdf](https://www.usimeca.com.br/wp-content/uploads/2022/07/Usimeca-ALPHA-Leaflet_LR.pdf)
- Volkswagen Caminhões e Ônibus. (2023). *Especificações técnicas: VW Constellation 17.230*. <https://d1qeql1yyyqyq8.cloudfront.net/67e94974-ddda-41fc-8286-3e08e139f9ab.pdf>
- Wang, M., Elgowainy, A., Lu, Z., Bafana, A., Benavidez, P., Burnham, A., Cai, H., Dai, Q., Gracida, U., Hawkins, T., Jaquez, P., Kelly, J., Kwon, H., Lee, U., Liu, X., Ou, L., Sun, P., Winjobi, O., Xu, H., Yoo, E., Zaimes, G., & Zang, G. (2020, 9 de outubro). *Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model® (2020 .Net)*. [Software de computador]. <https://doi.org/10.11578/GREET-Net-2020/dc.20200913.1>
- Wang, M., Elgowainy, A., Lee, U., Baek, K. H., Bafana, A., Benavides, P. T., Burnham, A., Cai, H., Cappello, V., Chen, P., Gan, Y., Gracida-Alvarez, U. R., Hawkins, T. R., Iyer, R. K., Kelly, J. C., Kim, T., Kumar, S., Kwon, H., Lee, K., & Zaimes, G. . (2022). *Summary of expansions and updates in GREET® 2022*. Argonne National Laboratory. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1891644>
- Xie, Y., Basma, H. & Rodriguez, F. (2023). *Purchase costs of zero-emission trucks in the United States to meet future Phase 3 GHG standards*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/03/cost-zero-emission-trucks-us-phase-3-mar23.pdf>

## APÊNDICE A: DADOS E METODOLOGIA

Este apêndice descreve em detalhes a metodologia utilizada para calcular o custo total de propriedade nivelado (LCOD) das três tecnologias e os dados utilizados na análise.

Para cada um dos três veículos ( $i$ ), compilou-se o preço de aquisição e suas condições de financiamento ( $P$ ), seu valor residual ao final da operação ( $Res$ ), o custo anual de manutenção ( $M$ ), o custo anual dos combustíveis ( $C$ ), a distância anual percorrida ( $VKT$ ) e o tempo de operação em anos ( $T$ ), e aplicamos uma taxa de desconto anual ( $d$ ) fixa de 10% ao ano. Os valores estão listados na Tabela 4.

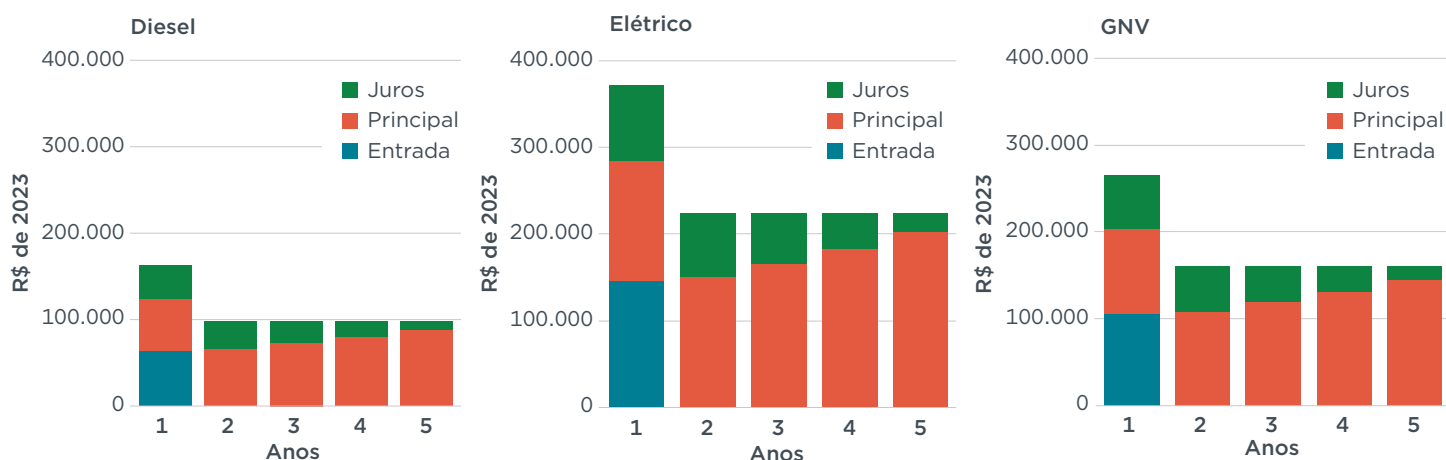
$$LCOD_i = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{P_{i,t} + C_{i,t} + M_{i,t} + Res_{i,t}}{(1+d)^{t-1}}}{\sum_{t=1}^T \frac{VKT_t}{(1+d)^{t-1}}}$$

Os preços dos veículos BYD eT18 e Scania P280 foram obtidos em correspondência direta com os fabricantes, enquanto o preço listado na tabela FIPE (s.d.) foi considerado para o caminhão Volkswagen. Como o caminhão modelo VW Constellation 17.230, utilizado na frota de São Paulo, foi recentemente substituído pelo modelo Constellation 17.210, com motorização Euro VI, utilizou-se o preço de venda do modelo 17.210.

O valor total dos veículos é financiado em condições similares às disponíveis para o Finame BK aquisição e comercialização (BNDES, 2023). Utilizou-se a taxa fixa do BNDES para financiamentos de 60 a 84 meses (TFB84), de 11,17% ao ano, acrescida de uma taxa do BNDES de 1,25% ao ano e de uma taxa do agente financeiro de 2% ao ano (inferior a taxa máxima do agente financeiro permitida de 3% ao ano). Por fim, como a presente análise utiliza os preços fixos de 2023, descontou-se a inflação acumulada pelo índice nacional de preços ao consumidor amplo dos últimos doze meses (julho 2022–junho 2023), de 3,99% ao ano. O resultado é uma taxa de juros real de 10,4% ao ano.

A Figura A1 apresenta as condições de pagamento dos três veículos distribuídas entre valor de entrada (pago à vista e equivalente a 15% do preço de aquisição), juros e principal. As parcelas de juros e principal são determinadas de forma que os pagamentos anuais sejam fixos ao longo dos 5 anos de financiamento. Nas análises de sensibilidade com 7 e 9 anos de operação, considerou-se um período de financiamento de 7 anos.

**Figura A1**  
**Condições de financiamento**



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICTT.ORG](http://THEICTT.ORG)

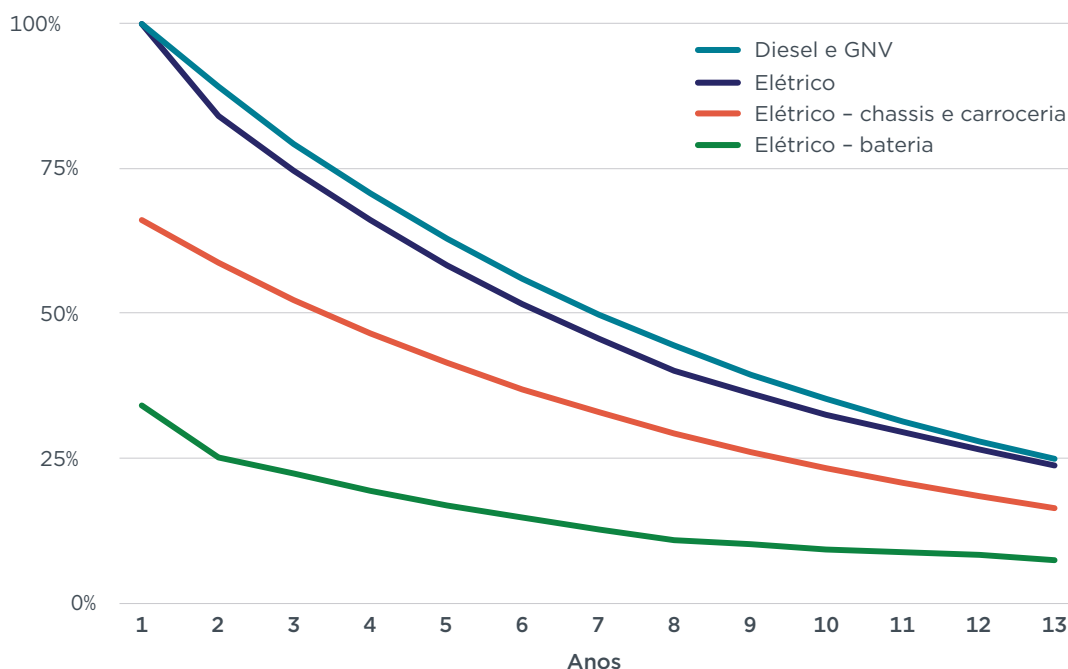
Os cálculos do custo total de propriedade também consideram o valor de revenda dos três veículos. Para os dois veículos a combustão são adotadas taxas de depreciação anual fixas de 11% sobre o valor residual dos veículos (a cada ano é deduzido 11% sobre o valor do veículo no ano anterior). Este valor foi escolhido para que o valor residual do caminhão a diesel ao final do quinto ano seja similar a valores observados hoje para caminhões com 5 anos de uso e quilometragem similar (OLX, s.d.-a, s.d.-b, s.d.-c). Assim, ao final do quinto ano de uso tem-se um valor residual de R\$ 241.001 para o caminhão a diesel e de R\$ 394.822 para o caminhão a gás, ambos equivalentes a 56% do preço de aquisição.

Para o veículo elétrico, considerou-se separadamente o valor residual do chassi e carroceria do veículo (ao qual é aplicada a mesma taxa de depreciação dos veículos a gás e diesel) e da bateria. Para esta última, primeiro determinou-se o valor da bateria em 34% do preço do veículo, em linha com caminhões elétricos similares (Xie, Basma & Rodríguez, 2023, p. 28). Em seguida, é necessário estimar o estado de saúde da bateria após 5 anos de uso. Veículos BYD tem uma durabilidade estimada das baterias de 500.000 km com 60% de saúde da bateria (BYD, 2023a, 2023b). Portanto, aproximando a degradação por uma relação linear nos quilômetros rodados, após 5 anos e cerca de 170.000 quilômetros, 87% da capacidade inicial da bateria ainda estaria disponível. A perda de 13% da capacidade é equivalente à calculada por Basma e Rodríguez (2023, p. 23) após 5 anos de uso.

Assim, a capacidade da bateria ao final do quinto ano é de 87% ou 198 kWh. Utilizou-se os dados de Xie, Basma e Rodriguez (2023, p. 7) para projetar uma redução de 33% no custo do kWh de baterias até 2028 (5º ano), 44% até 2030 e 47% até 2032. Considerou-se ainda uma redução de valor no kWh de baterias usadas. Segundo Basma e Rodriguez (2023), o valor de mercado estimado para uma bateria com degradação de 13% após 5 anos de uso equivale a 43% de seu valor inicial. Assim, aplicou-se uma redução de 17% no preço de revenda de um kWh de 2028 para obter o preço de um kWh usado em 2028. Os valores residuais estimados para a bateria são, portanto, de 43% em 2028, 32% em 2030 e 27% em 2032, em relação do seu preço original.

A Figura A2 apresenta os valores residuais dos três veículos e da bateria em relação a seus custos de aquisição em 2023.

**Figura A2**  
**Valor residual dos veículos e da bateria**



Considerou-se o preço de distribuição do diesel no município de São Paulo em julho de 2023 (ANP, 2023). O preço base considerado para o gás natural é igual à tarifa específica para frotas no Estado de São Paulo (Comgas, 2023). O preço da eletricidade é considerado igual ao preço pago pela frota piloto de ônibus elétricos da cidade de São Paulo, ajustado pelo índice de preços ao consumidor (FIPE, s.d.), contratado no mercado livre de fontes renováveis (SMF-SP, 2023).

A distância anual percorrida é mantida igual para os três veículos e corresponde à média da distância percorrida por caminhões compactadores na frota da cidade (ver Tabela 2).

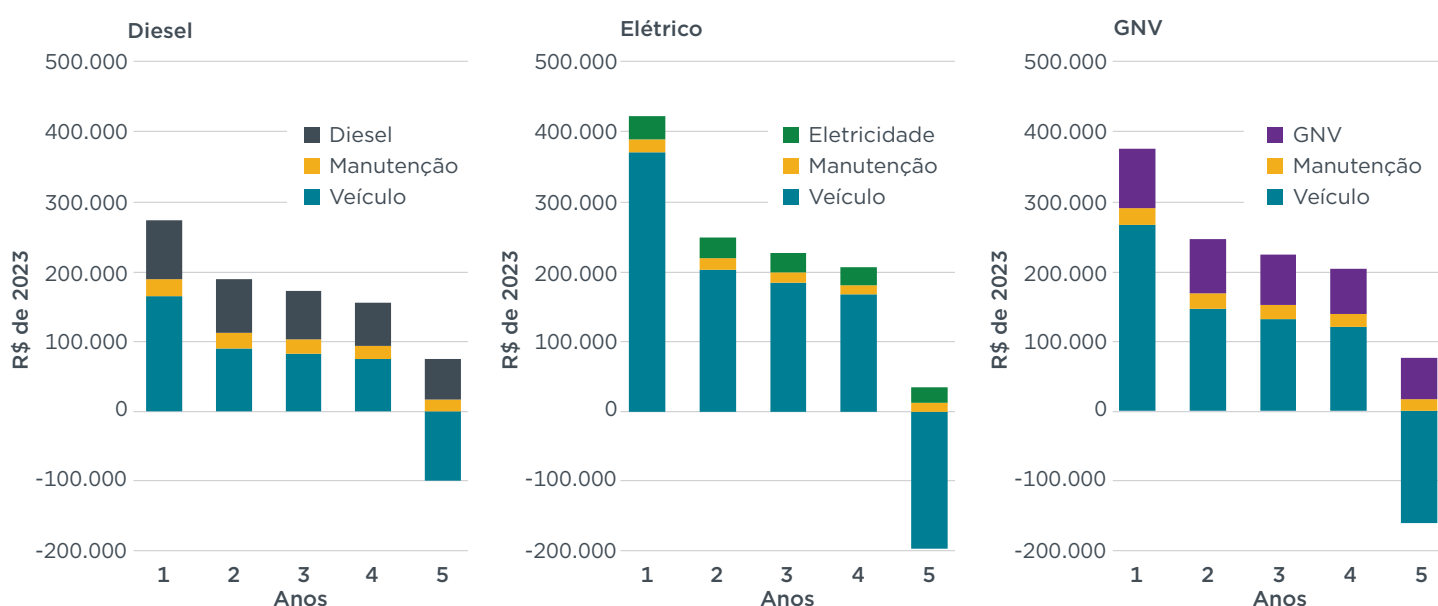
Na ausência de dados primários sobre os custos de manutenção em São Paulo, buscou-se dados que refletem os custos de operação de caminhões de coleta no Brasil. O custo de manutenção por quilômetro foi obtido em TCERS (2019, p. 84). Os custos de manutenção para os veículos a gás e elétrico foram calculados em proporção ao valor do veículo a diesel, utilizando a relação entre os custos de manutenção de caminhões coletores-compactadores das duas tecnologias em comparação ao diesel (CARB, 2019). Os custos de manutenção finais do caminhão a gás são assumidos iguais ao diesel, enquanto os custos de manutenção do caminhão elétrico é 25% menor.

Por fim, a Tabela A1 lista as variações utilizadas para a análise de sensibilidade apresentada na Figura 3.

**Tabela A1**  
Variações utilizadas na análise de sensibilidade

Custo	Unidade	Variações
Preço do veículo	R\$	-30%, +30%
Manutenção	R\$/km	-30%, +30%
Preço do combustível	R\$/L, R\$/kWh, R\$/m³	-50%, -25%, +25%, +50%
Tempo de uso	anos	5, 7, 9
Taxa de juros real	% ao ano	2,4%, 6,4%, 10,4%

**Figura A3**  
Fluxo de caixa descontado do custo total de propriedade



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICCT.ORG](https://www.theicct.org)

## APÊNDICE B. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Este apêndice descreve as definições e suposições usadas para estimar as emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de caminhões de coleta de resíduos em São Paulo.

**Tabela B1**

**Descrição das categorias adotadas na estimativa de emissões do ciclo do veículo**

Categoria	Descrição
<i>Glíder e power train</i>	Produção do veículo, incluindo a extração e processamento de matéria-prima; manufatura e montagem
Bateria	Produção dos pacotes de bateria, incluindo a extração e processamento de insumos; produção de célula de bateria e montagem do pacote
Manutenção	Substituição de partes e acessórios do veículo em serviço, incluindo pneus, escapamento, aditivos e óleo

**Tabela B2**

**Descrição das categorias adotadas na estimativa de emissões de cada fonte de energia**

Categoria	Descrição
Combustíveis fósseis	Extração, processamento e transporte do petróleo ou gás natural; refino e distribuição do combustível; emissões fugitivas de CH <sub>4</sub> ; queima dos combustíveis, incluindo as emissões de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O
Biocombustíveis	Cultivo de biomassa vegetal ou coleta dos resíduos; processamento e distribuição do combustível; emissões associadas à ILUC; emissões de CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O produzidas a partir da queima dos combustíveis nos veículos
Eletricidade	Geração, transmissão e distribuição da eletricidade; perdas de carregamento

**Tabela B3**

**Propriedades físicas dos combustíveis (EPE, 2022)**

Combustível	Massa Específica	Poder Calorífico Inferior	Conteúdo Energético
	Líquidos: kg/L Gasosos: kg/m <sup>3</sup>	MJ/kg	Líquidos: MJ/L Gasosos: MJ/m <sup>3</sup>
Biodiesel	0,88	37,68	33,16
Diesel A	0,84	42,29	35,52
GNV	0,74	49,79	36,84
Biometano	0,76	48,25	36,67

**Tabela B4**

Potenciais de aquecimento global adotados no estudo (Smith et al., 2021)

Poluente	GWP 100	GWP 20
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub> (fóssil)	29,8	82,5
CH <sub>4</sub> (não-fóssil)	27,2	80,8
N <sub>2</sub> O	273	273

**Tabela B5**

Fatores de emissão adotados para análise das emissões considerando GWP 20

Tecnologia	Combustível	Substrato	GWP	Fatores de emissão (CO <sub>2</sub> e/MJ)			
				WTT	TTW	Crédito de emissões de CO <sub>2</sub>	WTW
Gás	GNV	Gás fóssil	20	30,65	64,33	-	94,98

## APÊNDICE C. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

**Tabela C1**

**Análise de sensibilidade estendida do custo total de propriedade nivelado (variação percentual em relação ao cenário base do caminhão a diesel)**

Anos de operação	Taxa de juros real	Elétrico					GNV				
		Preço eletricidade (R\$/kWh)					Preço gás (R\$/m <sup>3</sup> )				
		0,28 (-50%)	0,42 (-25%)	0,56	0,69 (+25%)	0,83 (+50%)	1,46 (-50%)	2,19 (-25%)	2,92	3,65 (+25%)	4,38 (+50%)
5	10%	16%	21%	25%	30%	35%	4%	16%	27%	39%	51%
5	6%	4%	9%	13%	18%	22%	-5%	7%	19%	30%	42%
5	2%	-8%	-3%	1%	6%	10%	-13%	-1%	10%	22%	34%
7	10%	8%	13%	17%	22%	26%	-1%	11%	23%	34%	46%
7	6%	-4%	0%	5%	9%	14%	-10%	2%	14%	26%	37%
7	2%	-16%	-11%	-7%	-2%	2%	-18%	-6%	6%	17%	29%
9	10%	1%	5%	10%	14%	19%	-5%	7%	18%	30%	42%
9	6%	-10%	-5%	-1%	4%	9%	-13%	-1%	11%	23%	34%
9	2%	-19%	-15%	-10%	-6%	-1%	-20%	-8%	4%	16%	28%

## APÊNDICE D. DESCRIÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS DE COLETA RESIDENCIAL E HOSPITALAR EM SÃO PAULO

**Tabela D1**

**Frota dedicada à coleta residencial e hospitalar em São Paulo**

Marca	Modelo	Número de veículos
Ford	Cargo 1119	5
Ford	Cargo 2423	1
JAC	IEV1200T	1
Mercedes	311 Sprinter Caminhão	7
Mercedes	313 Sprinter Caminhão	1
Mercedes	415 Sprinter Caminhão	8
Mercedes	415 Sprinter Furgão	4
Mercedes	416 Sprinter Caminhão	12
Mercedes	Atego 1719	1
Mercedes	Atego 1729	102
Mercedes	Atego 2426	2
Volkswagen	10.160	5
Volkswagen	11.180	22
Volkswagen	15.190 WORKER	5
Volkswagen	17.190	2
Volkswagen	17.230	70
Volkswagen	17.250	4
Volkswagen	17.260	30
Volkswagen	17.280	71
Volkswagen	17.320	1
Volkswagen	19.360	7
Volkswagen	24.260	238
Volkswagen	25.360	25
Volkswagen	3.150 Delivery Express	41
Volkswagen	5.150	12
Volkswagen	Robust Simples	1
<b>Total</b>		<b>678</b>





[www.theicct.org](http://www.theicct.org)

[communications@theicct.org](mailto:communications@theicct.org)

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

**icct**  
THE INTERNATIONAL COUNCIL  
ON CLEAN TRANSPORTATION