

## A eletrificação da frota de ônibus de São Paulo é custo-efetiva?

Estudo do ICCT analisa o desempenho operacional e financeiro da eletrificação de 20 linhas da Transwolff, operadora de ônibus urbanos na cidade de São Paulo. A análise mostra que a eletrificação atenderia às necessidades de deslocamento de uma parcela significativa das linhas operadas por ônibus de tipo básico (12,5 metros) da empresa.

Ao contrário dos veículos a diesel, os ônibus elétricos não emitem óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), material particulado (MP) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de escapamento. Considerando todo o ciclo de vida da fonte energética na estimativa de emissões, observa-se que a transição para uma frota elétrica é uma das formas mais eficientes de reduzir as emissões climáticas do sistema de transportes.

O estudo avalia o custo total de propriedade (TCO, do inglês *total cost of ownership*) da eletrificação das linhas selecionadas. O TCO representa o valor presente líquido dos custos de capital, operação e manutenção em um período. A análise sugere que os custos dos ônibus elétricos se aproximam aos do padron a diesel.

### CONTEXTO

A cidade de São Paulo tem a maior frota de ônibus do Brasil e uma das maiores da América Latina, com cerca de 14 mil veículos em operação. Visando firmar seus compromissos no combate à mudança climática, o município aprovou a Lei nº 16.802 em 2018, determinando a redução de 100% da emissão de escapamento de CO<sub>2</sub> fóssil e de 95% das emissões de MP e NO<sub>x</sub> até 2038.

Para cumprir as metas, os operadores de ônibus da cidade escolheram principalmente ônibus elétricos a bateria. Essa tecnologia tem sido adotada com sucesso em diversos países, reduzindo, ao mesmo tempo, a emissão



APOIO



FINANCIADORES E FACILITADORES



SÓCIOS PRINCIPAIS

de poluentes e o custo de operação. São Paulo tem um projeto-piloto em operação desde 2019, com uma frota de 18 ônibus elétricos a bateria em uma linha da empresa Transwolff.

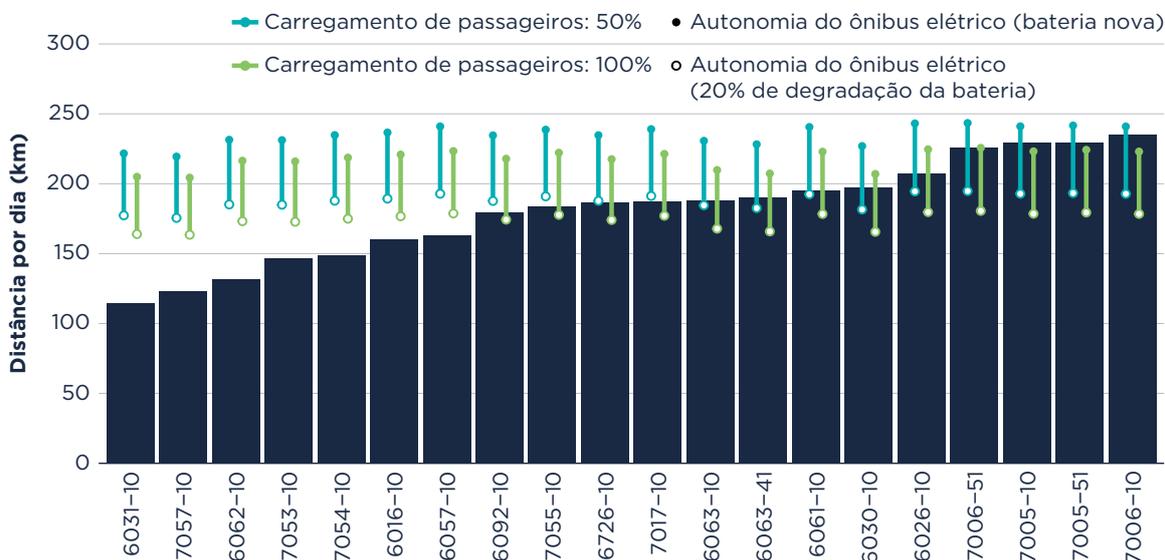
Apesar das dificuldades impostas pela crise sanitária da COVID-19, o município tem reforçado seu comprometimento com a eletrificação da frota. Em julho de 2021, o prefeito divulgou o Programa de Metas 2021-2024 indicando a intenção de entregar ao menos 2.600 ônibus elétricos ao município até o fim do atual mandato.

## ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL

Este estudo considera 20 linhas operadas por 285 ônibus básicos da Transwolff.

Com dados reais de operação, construiu-se um ciclo típico de condução para cada linha, com informações de velocidade e elevação ao longo do trajeto. Com esses ciclos, estimou-se o consumo de energia (eletricidade ou combustível), com o *software* Autonomie, e a autonomia dos elétricos em cada linha.<sup>1</sup>

A Figura 1 compara as distâncias diárias típicas percorridas pelos ônibus a diesel por linha (barras verticais) com a autonomia do ônibus elétrico (segmentos de reta), tanto com bateria nova (círculos fechados) como com degradada (círculos abertos). O segmento de reta verde indica a autonomia



**Figura 1.** Estimativa da autonomia do ônibus elétrico em cada linha comparada com a distância diária típica percorrida por ônibus a diesel (considerando a operação com ar-condicionado e 20% de reserva técnica de bateria)

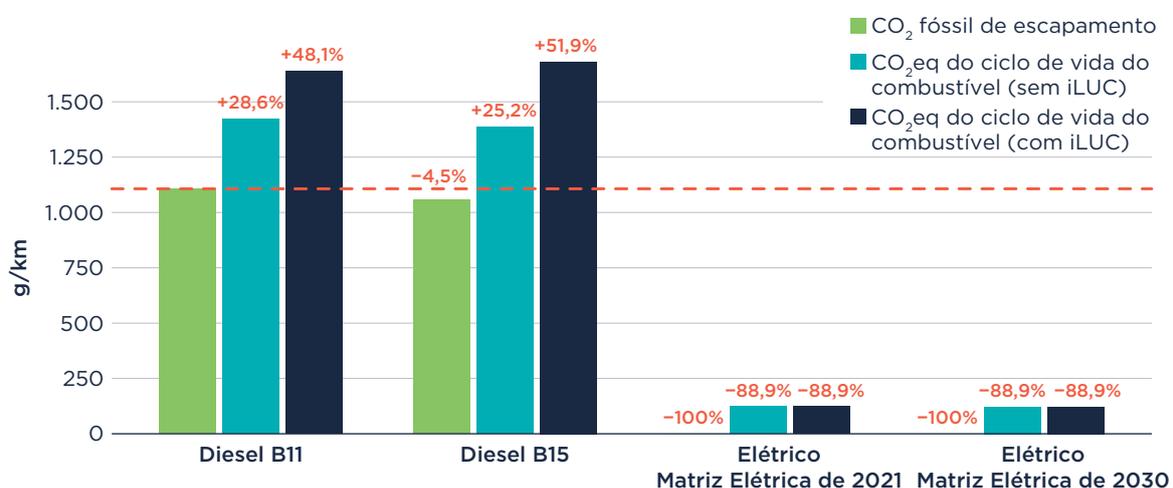
<sup>1</sup> A autonomia representa a distância que o veículo pode percorrer com uma carga completa da bateria.

estimada com carregamento de 100% de passageiros, enquanto o azul considera uma situação com 50% de passageiros.

A figura indica que, mesmo com carregamento constante de 100% de passageiros, a eletrificação é adequada para a maior parte das linhas no início da vida útil da bateria, sem demandar grandes ajustes operacionais.

Algumas estratégias permitem utilizar os elétricos mesmo nas linhas de atividade mais intensa. Uma possibilidade é manter os ônibus com baterias mais novas em linhas mais demandantes e transferir os com baterias mais degradadas para linhas que exigem menos autonomia. Pode-se também realizar recargas intermediárias nos ônibus mais demandados ou adotar ônibus com baterias de maior capacidade nas linhas de maior atividade.

O estudo também avalia o impacto climático da transição tecnológica, estimando as emissões de CO<sub>2</sub>-equivalente (CO<sub>2</sub>eq) no ciclo de vida da fonte de energia de cada alternativa.<sup>2</sup> A Figura 2 compara as emissões de escapamento de CO<sub>2</sub> fóssil com as emissões de CO<sub>2</sub>eq no ciclo de vida do combustível para ônibus a diesel (considerando diesel B11 e B15) e ônibus elétricos a bateria (considerando a matriz elétrica brasileira de 2021 e a planejada para 2030), com e sem as emissões relativas a mudanças indiretas no uso da terra (iLUC).<sup>3</sup>



**Figura 2.** Emissões de escapamento do CO<sub>2</sub> fóssil e de ciclo de vida, com e sem iLUC, do CO<sub>2</sub>eq em g/km para ônibus a diesel (B11 e B15) e elétrico a bateria (considerando a matriz elétrica de 2021 e a planejada para 2030) no caso da linha 6030-10.

2 A estimativa das emissões de ciclo de vida transforma as emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em CO<sub>2</sub>eq, considerando o potencial de aquecimento global de cada gás.

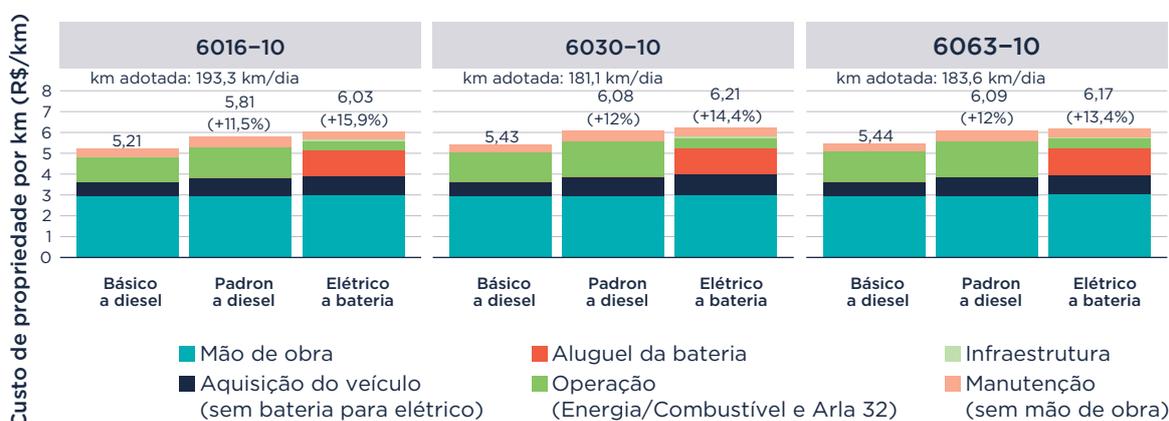
3 Emissões iLUC ocorrem quando uma maior demanda pelo biocombustível impacta as culturas de alimento, convertendo terras não agrícolas em terras cultiváveis.

Os resultados apontam que, considerando as emissões do ciclo de vida e outros poluentes climáticos, as emissões de CO<sub>2</sub>eq dos ônibus elétricos a bateria são significativamente menores que as dos ônibus a diesel. Além de reduzir em 100% as emissões de escapamento, essa alternativa gera cerca de 90% menos emissões de CO<sub>2</sub>eq na sua produção, distribuição e uso em comparação ao CO<sub>2</sub> fóssil de escapamento dos ônibus a diesel com combustível B11.

## ANÁLISE FINANCEIRA

A análise financeira considera a mesma amostra de 20 linhas operadas por ônibus básico da Transwólf, selecionadas na etapa anterior. Comparam-se os custos de um ônibus básico a diesel com tecnologia P7 e duas tecnologias alternativas—um ônibus a diesel padron P7 e um elétrico a bateria –, todos equipados com ar-condicionado. Nessa análise, utilizam-se dados de custos fornecidos pela SPTrans e adota-se o consumo de energia estimado com o *software* Autonomie para cada tecnologia em cada linha.

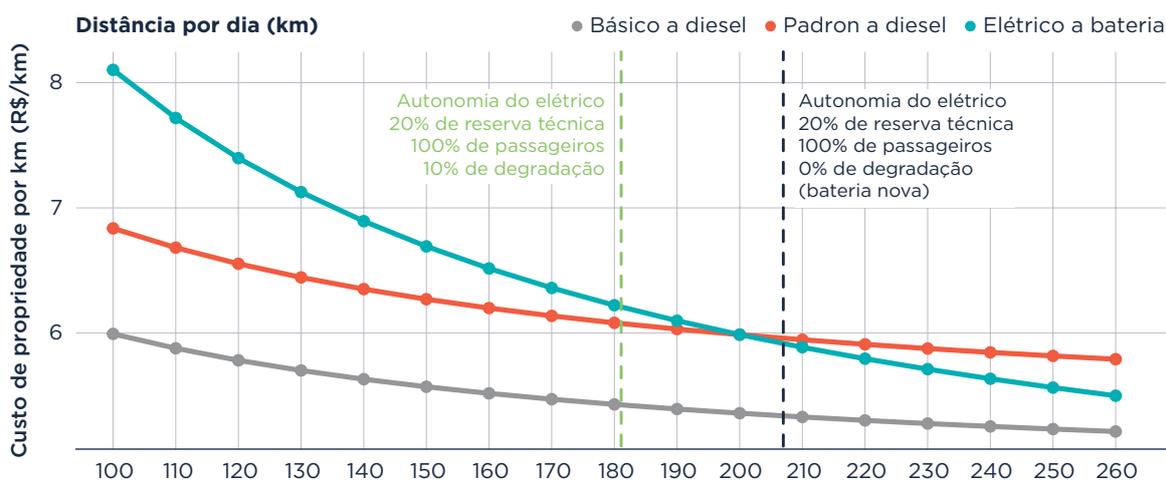
A Figura 1 apresenta, para 3 das 20 linhas analisadas, o TCO por quilômetro (TCO/km) de um ônibus básico a diesel e das duas tecnologias alternativas.<sup>4</sup> É mostrada a linha que teve a menor estimativa de TCO/km para o ônibus básico (6016-10), a que atualmente opera os ônibus elétricos (6030-10) e a que tem a maior estimativa de TCO/km para o ônibus básico (6063-41).



**Figura 3.** Estimativa do custo total de propriedade por quilômetro e por componente de custo para 3 linhas

<sup>4</sup> Como quilometragem diária, adotou-se a autonomia dos ônibus elétricos em cada linha em um cenário menos otimista, com 10% de degradação da bateria.

Enquanto o ônibus básico apresenta o menor TCO por quilômetro, o valor observado para o ônibus elétrico é próximo ao do padron a diesel, porém ligeiramente maior (de 1% a 5% superior, a depender da linha). Para todas as tecnologias avaliadas, cerca de 50% dos custos estão associados à mão de obra. O custo de operação representa apenas cerca de 7,5% do TCO do ônibus elétrico—para os veículos a diesel, esse valor é em torno de 25%. Essa vantagem no custo operacional do elétrico praticamente compensa seu custo mais elevado de aquisição e de aluguel da bateria, que correspondem a cerca de 35% do TCO por quilômetro.



**Figura 4.** Análise de sensibilidade para o TCO de cada tecnologia na linha 6030-10, considerando diferentes cenários de quilometragem diária média percorrida

O reduzido custo de operação dos ônibus elétricos ressalta uma de suas principais características: suas vantagens em relação às alternativas a diesel são acentuadas pela utilização mais intensa dos veículos. A Figura 4 indica que, à medida que a distância diária aumenta, a redução do TCO/km é mais acentuada para o ônibus elétrico do que para as outras tecnologias.

Para avaliar o efeito de variações nos dados de entrada, são feitas análises de sensibilidade. Observa-se que os preços dos ônibus elétricos e das baterias oneram o TCO da alternativa elétrica e isso se deve, em parte, aos estágios de maturação das tecnologias. Enquanto a tecnologia a diesel já é consolidada no mercado brasileiro, usufruindo dos benefícios de uma ampla competição entre fabricantes, ganhos de escala na produção e nacionalização de muitos componentes, a tecnologia elétrica é incipiente, com um mercado que busca se estruturar no país.

Observa-se também que o TCO dos ônibus a diesel é muito sensível a variações no preço do combustível, pois o custo operacional representa cerca de um quarto dos custos totais dos veículos de combustão interna. Com isso, o custo de operar um ônibus a diesel torna-se muito volátil. O mesmo não acontece para o ônibus elétrico, cuja operação representa menos de 10% do TCO.

## CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou, em uma amostra de 20 linhas operadas na cidade de São Paulo, que a eletrificação da frota de ônibus atenderia às necessidades de deslocamento e ao compromisso de reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e climáticos, com custos competitivos em relação ao de ônibus padron a diesel.

Os resultados reforçam a conclusão de que um planejamento adequado da eletrificação da frota, com uma avaliação detalhada de cada linha, pode facilitar a transição tecnológica, realçando as vantagens das alternativas elétricas e aumentando seus benefícios para toda a sociedade.

### Detalhes da publicação

**Título:** Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo

**Autor:** Ana Beatriz Rebouças, Tales Rozenfeld e Oscar Delgado

**Download:** <https://theicct.org/publication/ze-hvs-sao-paulo-brazil-mar22/>

**Contato:** [ab.reboucas@theicct.org](mailto:ab.reboucas@theicct.org)



APOIO



FINANCIADORES E FACILITADORES



SÓCIOS PRINCIPAIS