

BENEFÍCIOS DE TECNOLOGIAS DE ÔNIBUS EM TERMOS DE EMISSÕES DE POLUENTES DO AR E DO CLIMA EM SÃO PAULO

Tim Dallmann

AGRADECIMENTOS

O financiamento para este estudo foi generosamente oferecido pela Pisces Foundation e pela Iniciativa Internacional do Clima (IKI). O autor gostaria de agradecer a Ray Minjares, Cristiano Façanha e Carmen Araujo, pelas discussões e pela revisão deste relatório, e a Meinrad Signer, pela assistência e pelo apoio no desenvolvimento do modelo e na avaliação de tecnologias alternativas de ônibus e combustíveis.

Com apoio do



Ministério Federal Alemão do Meio
Ambiente, Proteção da Natureza e
Segurança Nuclear

com base em uma decisão do Parlamento alemão

International Council on Clean Transportation
1225 I Street NW Suite 900
Washington, DC 20005 USA

communications@theicct.org | www.theicct.org | [@TheICCT](https://twitter.com/TheICCT)

© 2019 International Council on Clean Transportation

SUMÁRIO

Sumário Executivo	iii
Introdução	1
Contexto legal.....	3
Escopo da pesquisa	5
Frota de referência e emissões	6
Frota de referência	6
Metodologia de modelagem das emissões.....	7
Emissões de escapamento de CO ₂ fóssil	9
Emissões de poluentes atmosféricos	10
Opções de tecnologia avançada de motor e combustível.....	12
Tecnologia Euro VI.....	12
Biocombustíveis.....	14
Acionamento elétrico	15
Estratégias de aquisição para alcançar as metas de redução de emissões	16
Evolução da frota com a reorganização do sistema	17
Cenário de aquisição <i>business-as-usual</i>	18
Estratégias de aquisição para alcançar as metas de MP e NO _x	20
Estratégias de aquisição para alcançar as metas de CO ₂ fóssil.....	23
Impactos climáticos das estratégias de aquisição em conformidade com a Lei 16.802.....	27
Avaliação do custo total de propriedade	32
Implicações e perspectivas para pesquisas futuras.....	36
Referências.....	39
Apêndice.....	41

SUMÁRIO EXECUTIVO

Em janeiro de 2018, São Paulo promulgou uma lei modificando um artigo da sua Lei de Mudanças Climáticas que estabelece metas ambiciosas de redução de emissões para a frota de ônibus de transporte coletivo da cidade. A alteração estabelecida pela Lei municipal 16.802 define metas para os prazos de 10 e 20 anos de reduções das emissões de escapamento de dióxido de carbono (CO₂) fóssil e dos poluentes atmosféricos material particulado (PM) e óxidos de nitrogênio (NO_x) em toda a frota. O objetivo principal é eliminar as emissões de CO₂ derivado de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de MP e NO_x em 95%, a partir dos níveis de 2016, até janeiro de 2038.

Com a aprovação da Lei 16.802, São Paulo deu um passo importante em direção à melhoria do desempenho ambiental de sua frota de ônibus de transporte coletivo. Para atingir os objetivos da lei, é necessária a atuação em curto prazo de várias partes interessadas, incluindo a autoridade municipal de transporte, SPTrans, e as operadoras de transporte coletivo, para facilitar a introdução de tecnologias de motor mais limpas e combustíveis não fósseis na frota. O nível de transição tecnológica requerido para alcançar as metas é considerável, sendo necessário um planejamento cuidadoso para garantir que as operadoras de transporte coletivo possam fazer essa transição de forma viável economicamente, mantendo a integridade operacional e a qualidade do serviço.

Com essas necessidades em mente, este documento aborda, do ponto de vista quantitativo, as seguintes questões relativas às transições tecnológicas na frota de ônibus de transporte coletivo em São Paulo:

- » Que magnitude de reduções das emissões é necessária para cumprir as metas estabelecidas pela Lei 16.802?
- » Em que medida as tecnologias alternativas de ônibus de transporte coletivo e combustíveis podem melhorar o desempenho dos ônibus a diesel usados atualmente na frota de São Paulo em termos de emissões?
- » Que estratégias de aquisição de tecnologia são necessárias para atender às metas intermediárias e de longo prazo de redução de emissões de CO₂ fóssil e poluentes atmosféricos estabelecidas na Lei 16.802?
- » Quais são os impactos climáticos das estratégias de aquisição compatíveis com a Lei 16.802, levando em consideração as emissões do ciclo de vida do combustível e os poluentes que não o CO₂?
- » Quais são os custos das tecnologias alternativas de ônibus e combustíveis em comparação com os ônibus convencionais a diesel, considerando todos os custos de propriedade incorridos durante a vida útil desses veículos?

Para abordar essas questões, aplicamos um modelo de custos e emissões de ônibus de transporte coletivo desenvolvido pelo ICCT. O modelo avalia as emissões anuais de poluentes atmosféricos e climáticos e o custo total de propriedade para cenários de aquisição definidos pelo usuário. Em nossa análise, consideramos uma série de tecnologias de motor de ônibus e combustíveis alternativos que podem contribuir para os objetivos da Lei 16.802, incluindo tecnologias Euro VI, biocombustíveis e ônibus com acionamento elétrico.

A modelagem das emissões apresentada neste documento indica que são necessárias transições amplas e de curto prazo para tecnologias de motor mais limpas e combustíveis não fósseis a fim de alcançar as metas de redução de emissões estabelecidas na Lei 16.802. Estimamos que todos os novos ônibus comprados a partir de 2019 devem ter o padrão Euro VI ou melhor desempenho em termos de emissões para diminuir as emissões de MP e NO_x o suficiente para cumprir com as metas

intermediárias de 10 anos. Uma parcela considerável desses ônibus também deve ser livre de combustível fóssil para atender à exigência de redução de emissões de CO₂ fóssil no prazo de 10 anos. Esta parcela é estimada em 60% dos ônibus adquiridos se a transição começar em 2019, devendo aumentar para 70% e 80% se a transição for adiada até 2020 ou 2021, respectivamente. Se a transição para ônibus livres de combustível fóssil for adiada para 2023, é improvável que as metas intermediárias sejam alcançadas sem a retirada de circulação e substituição antecipadas de ônibus que não atingiram sua vida útil de 10 anos. Nosso modelo de aquisição indica que todos os ônibus que entram na frota devem ser livres de combustível fóssil até o início de 2028 para atingir a meta de CO₂ fóssil no prazo de 20 anos.

A Figura ES1 mostra as metas de redução de emissões estabelecidas na Lei 16.802 e exemplifica as reduções esperadas segundo uma estratégia de aquisição de ônibus compatível com os requisitos da emenda à Lei do Clima.

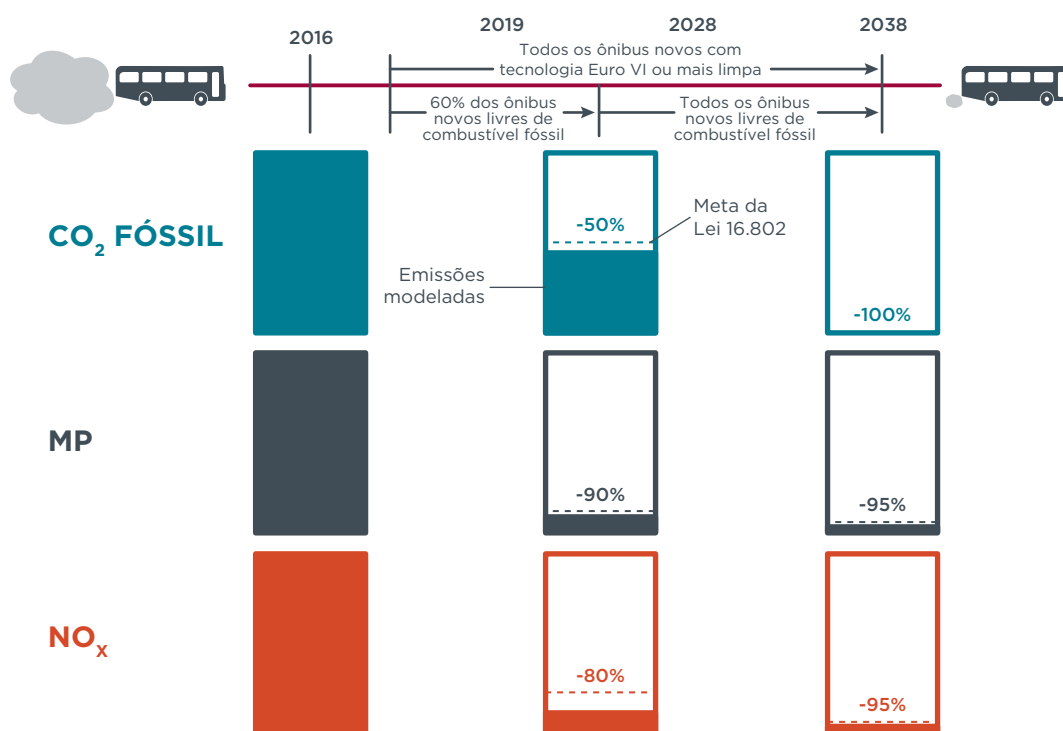


Figura SE1. Visão geral das metas e reduções de emissões estimadas para a frota de ônibus de transporte coletivo de São Paulo segundo um modelo de aquisições compatível com a Lei 16.802.

Como está formulada, a Lei 16.802 dá a entender que apenas são exigidas reduções nas emissões de escapamento de CO₂ fóssil. A lei não regulamenta as emissões de CO₂ do produtor ao consumidor (*upstream emissions*), associadas à produção e distribuição de matérias-primas e combustíveis, nem considera poluentes climáticos além do CO₂, como metano, óxido nitroso e carbono negro. Para certos combustíveis, em particular os biocombustíveis derivados de matérias-primas alimentares, as emissões do produtor ao consumidor podem ser bastante elevadas, e a transição para esses combustíveis pode restringir o alcance das reduções das emissões de poluentes climáticos previstas na lei.

Quando levamos em conta as emissões do ciclo de vida do combustível e os poluentes climáticos que não o CO₂, observamos que uma transição para tecnologias de ônibus com acionamento elétrico de emissão zero proporcionaria os maiores benefícios climáticos entre as tecnologias livres de combustível fóssil consideradas nesta análise. É esperado que as transições para tecnologias de ônibus movidos a etanol e biometano

também reduzam os impactos climáticos da frota de São Paulo, embora não na mesma proporção que os ônibus elétricos.

Quando avaliados à luz do ciclo de vida do combustível, os benefícios em termos de emissões de CO₂ dos ônibus abastecidos com biodiesel à base de soja são mais incertos. Isso se deve principalmente ao risco de emissões elevadas decorrentes de mudanças no uso da terra para biocombustíveis à base de soja. Assim, as transições para ônibus Euro VI abastecidos com biocombustíveis à base de soja, embora tragam alguns benefícios climáticos de curto prazo, por meio do controle das emissões de carbono negro, podem não reduzir significativamente as emissões de CO₂ e o aquecimento associado relativo às práticas atuais de aquisição.

À exceção do ônibus movido a etanol, os custos totais ao longo da vida útil de possuir e operar ônibus de tecnologia alternativa encontram-se dentro de 10% dos custos ao longo da vida útil de um ônibus a diesel P-7. Levando em conta esses custos, estima-se que os ônibus a diesel Euro VI, híbrido diesel-elétrico e elétricos a bateria sejam mais econômicos que os ônibus a diesel P-7. Assim, especialmente no caso dos ônibus elétricos a bateria, as práticas tradicionais de aquisição, que privilegiam as tecnologias com o menor preço de aquisição, podem desfavorecer tecnologias que têm um preço de compra mais alto, mas implicam custos operacionais reduzidos de forma substancial e custos líquidos potencialmente menores ao longo da vida útil. Mudanças nessas práticas e implementação de modelos inovadores de financiamento, que levem em consideração a economia operacional ao longo da vida útil de tecnologias alternativas de ônibus, podem ser necessárias para acelerar a adoção dessas opções tecnológicas.

INTRODUÇÃO

O sistema de transporte público coletivo municipal de São Paulo oferece um serviço vital aos cidadãos. Com mais de 14.000 ônibus operando em 1.340 linhas, é o maior sistema do Brasil e está entre as maiores frotas de ônibus do mundo (SPTrans, 2017). Esse sistema é essencial para a mobilidade urbana em São Paulo, transportando em média 8 milhões de passageiros por dia e contribuindo para reduzir os congestionamentos na cidade.

Hoje, mais de 98% da frota de ônibus de transporte coletivo de São Paulo é movida a diesel. Uma vez que os padrões brasileiros de emissão de poluentes para veículos pesados estão aquém das melhores práticas internacionais, esses ônibus não contam com as melhores tecnologias disponíveis para o controle das emissões dos motores a diesel (Miller & Façanha, 2016). O mais recente inventário de emissões veiculares compilado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017) estima que os ônibus urbanos representam menos de 1% da frota de veículos da região metropolitana de São Paulo, mas respondem por 21% das emissões veiculares de óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). Essas emissões têm impactos sociais importantes, contribuindo para a baixa qualidade do ar e gerando efeitos negativos sobre a saúde humana, incluindo doenças cardíacas, acidentes vasculares cerebrais, câncer de pulmão, asma e doenças pulmonares obstrutivas crônicas. Os ônibus também são uma fonte importante de emissões de poluentes climáticos, incluindo dióxido de carbono (CO_2) e carbono negro, um potente poluente de curta duração que representa aproximadamente 75% do MP emitido por motores a diesel de tecnologia mais antiga (U.S. Environmental Protection Agency, 2012).

Dada a importância da frota de transporte público coletivo para a mobilidade em São Paulo, bem como seu impacto desproporcional na poluição por veículos motorizados, os investimentos em ônibus são uma estratégia-chave de longo prazo para atender às metas ambientais e de sustentabilidade da cidade. Mudanças nos combustíveis e nas tecnologias da frota de ônibus visam ao duplo objetivo de melhorar a qualidade do serviço prestado aos usuários do sistema e reduzir as emissões de poluentes nocivos à qualidade do ar na cidade.

Infelizmente, as políticas para acelerar a transição para combustíveis e tecnologias de ônibus de transporte coletivo mais limpos se mostraram amplamente ineficazes até o momento. A Lei de Mudanças Climáticas de São Paulo, aprovada em 2009, determinou uma redução de 10% ao ano no número de ônibus urbanos movidos a combustíveis fósseis, com uma meta final de 100% da frota livre de combustíveis fósseis até 2018 (Cidade de São Paulo, 2009). Constatou-se que essas metas eram excessivamente ambiciosas, e os objetivos originais do programa praticamente não foram atingidos; hoje, menos de 2% da frota da cidade opera com combustíveis não fósseis. Com relação aos ônibus de transporte coletivo, a lei não impôs restrições aos poluentes associados ao aquecimento climático, como o CO_2 .

Diante do fracasso em fazer qualquer progresso real para atingir as metas da Lei de Mudanças Climáticas, bem como da crescente pressão dos cidadãos e da sociedade civil para lidar com essas falhas, a Câmara Municipal de São Paulo aprovou uma emenda à lei em 2017, que foi transformada em lei pelo prefeito João Doria em janeiro de 2018 (Cidade de São Paulo, 2018). A Lei 16.802 estabelece metas ambiciosas, tanto intermediárias como de longo prazo, de redução de emissões de poluentes pela frota de ônibus de transporte coletivo da cidade. Ela difere da estrutura da lei anterior, que na prática apenas determinava uma mudança nos combustíveis usados na frota. Foram estabelecidas metas para as emissões de poluentes atmosféricos e climáticos, com o objetivo final de eliminar as emissões de CO_2 derivado de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de MP e NO_x em 95%, a partir dos níveis de 2016, até janeiro

de 2038. A lei não impõe limites às emissões de CO₂ a partir de combustíveis não fósseis. Neste documento, quantificamos como essa característica da lei pode limitar a descarbonização da frota de ônibus.

A implementação da Lei 16.802 vai exercer grande influência na evolução da frota de ônibus de transporte público coletivo de São Paulo. As metas definidas na lei não podem ser atingidas com as tecnologias de motor e os combustíveis usados atualmente; serão necessárias transições para tecnologias de motor mais limpas e combustíveis não fósseis. As operadoras de transporte coletivo vão precisar desenvolver estratégias de aquisição de longo prazo para planejar essas transições e garantir o cumprimento das metas de redução de emissões.

Há diversas opções de tecnologia alternativa de motor e combustível disponíveis comercialmente, que oferecem vários graus de melhoria de emissões em comparação com os ônibus a diesel atualmente usados na frota de São Paulo. Motores a diesel e gás natural comprimido (GNC) certificados para padrões de emissão livres de fuligem (equivalentes a Euro VI ou US 2010) podem reduzir significativamente as emissões de MP e NO_x, e ônibus híbridos e biocombustíveis podem contribuir para as metas de redução das emissões de CO₂. Os ônibus elétricos a bateria não geram emissões de escapamento e, dada a grande porcentagem da eletricidade produzida a partir de energia hidrelétrica no Brasil, oferecem potencial para amplas reduções na emissão de CO₂ ao longo do ciclo de vida.

O principal objetivo deste documento é investigar quantitativamente até que ponto, e com que velocidade, essas opções de tecnologia alternativa de ônibus de transporte coletivo e combustível vão precisar ser incorporadas à frota de São Paulo para cumprir o disposto na Lei 16.802. Para isso, apresentamos os resultados de um estudo de modelagem que avaliou as reduções de emissões que podem ser alcançadas em diversos cenários de longo prazo de aquisição de ônibus. Como a viabilidade financeira dos contratos de concessão é algo importante a considerar, também avaliamos os custos ao longo da vida útil das tecnologias alternativas usando uma abordagem de custo total de propriedade. Os resultados aqui apresentados fornecem à autoridade de transporte coletivo de São Paulo, a SPTrans, e às operadoras de transporte coletivo na cidade uma melhor compreensão do grau e do ritmo da transição tecnológica a ser feita para atingir as metas da Lei 16.802.

CONTEXTO LEGAL

A Lei 16.802 foi publicada no Diário Oficial da Cidade de São Paulo em 18 de janeiro de 2018 (Cidade de São Paulo, 2018). As disposições regulatórias chaves na lei são as metas intermediárias e de longo prazo de redução de emissões de escapamento de poluentes. Essas metas, mostradas na Tabela 1, exigem que as operadoras de transporte coletivo reduzam as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x de suas frotas de ônibus em 50%, 90% e 80%, respectivamente, dentro de 10 anos a partir da vigência da lei.¹ Já no prazo de 20 anos, as emissões de CO₂ fóssil devem estar eliminadas da frota, e as emissões de NO_x e MP devem estar reduzidas em 95%. Em ambos os casos, as reduções das emissões são avaliadas em relação às emissões totais das frotas regulares em 2016.

Note-se que a Lei 16.802 é neutra quanto à tecnologia, o que proporciona às operadoras de transporte coletivo maior flexibilidade em suas decisões sobre as transições de tecnologia dos ônibus e combustível.

Tabela 1. Metas de redução das emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x adotadas na Lei 16.802

Poluente	Ao final de 10 anos (janeiro de 2028)	Ao final de 20 anos (janeiro de 2038)
CO ₂ fóssil	50%	100%
MP	90%	95%
NO _x	80%	95%

As metas de redução se aplicam apenas às emissões de escapamento, excluindo aquelas associadas à produção e distribuição de matérias-primas e combustíveis. Isso significa que, para o CO₂, apenas as emissões derivadas da combustão de combustíveis fósseis nos motores de ônibus são consideradas no escopo da lei. As emissões do produtor ao consumidor podem responder por uma parcela significativa das emissões do ciclo de vida, em particular para biocombustíveis, por isso a exclusão dessas emissões é capaz de mascarar, inteira ou parcialmente, o verdadeiro impacto climático das opções de tecnologia alternativa de ônibus de transporte coletivo e combustível.² A lei especifica que as emissões do ciclo de vida devem ser consideradas na escolha de fontes de energia e combustível; porém, não há requisitos legais para fazê-lo. Além disso, a lei não impõe restrições às emissões de poluentes climáticos que não o CO₂, como os gases de efeito estufa (GEE) metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Os impactos potenciais de omitir no texto da lei as emissões do produtor ao consumidor e as emissões de poluentes climáticos que não o CO₂ serão discutidos adiante.

Outras disposições da lei também são dignas de nota:

- » **Substituição da frota:** a lei não exige a retirada de circulação ou o sucateamento antecipado dos ônibus a diesel. Em vez disso, requer uma transição gradual da frota, de forma que tecnologias mais limpas sejam introduzidas à medida que os ônibus usados atualmente chegarem ao final de sua vida útil (em geral, de 10 anos).
- » **Priorização da expansão da frota de trólebus:** a infraestrutura de recarga existente para trólebus elétricos está subutilizada. A lei afirma que a expansão da frota de

¹ Além das operadoras de transporte coletivo, a Lei 16.802 se aplica às empresas de coleta de lixo. Neste documento, focamos na avaliação do impacto dessa lei nas frotas de transporte público coletivo.

² As emissões de escapamento de CO₂ fóssil são, de fato, zero para ônibus que usam 100% de misturas de biocombustíveis e para tecnologias elétricas, como ônibus elétricos a bateria.

trólebus deve ser priorizada a fim de que se aproveite completamente a capacidade da infraestrutura atual.

- » **Estabelecimento de um programa de acompanhamento e um comitê gestor:** a lei designa um programa de acompanhamento responsável por fazer avaliações anuais do progresso das frotas individuais em direção às metas de redução de emissões. Além disso, cabe ao programa avaliar, a cada cinco anos, o nível em que as metas de redução estão estabelecidas. O comitê gestor deve ser composto por representantes do governo municipal, das operadoras de transporte coletivo, das empresas de coleta de lixo e das organizações da sociedade civil.
- » **Avaliação:** a Administração Municipal é responsável por definir as métricas e os métodos utilizados para os cálculos das emissões, em conformidade com as abordagens adotadas tipicamente pelas autoridades ambientais.
- » **Relatório:** as operadoras de transporte coletivo devem apresentar um relatório anual de emissões especificando a quilometragem, o consumo de combustível e as emissões totais anuais de poluentes e GEE de cada veículo de suas frotas.
- » **Impactos nos contratos de concessão:** a lei determina que a aquisição de tecnologias alternativas de motor e combustíveis deve ser feita de modo a manter o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão. Em outras palavras, qualquer custo incremental associado à implementação de tecnologias alternativas de motor e combustíveis deve ser abordada nesses contratos.

O último dos itens acima tem especial relevância, uma vez que a cidade passa atualmente por um processo de reorganização e otimização de seu sistema de transporte público, incluindo licitações abertas para os contratos de concessão para a operação diária do sistema. Em São Paulo, como acontece na maioria das cidades brasileiras, a operação do sistema de transporte público coletivo é delegada a entidades privadas, por meio de concessão ou permissão. A autoridade municipal de transporte coletivo, SPTrans, é responsável pelo gerenciamento do sistema e pela supervisão das concessionárias. Essa reorganização terá impacto em muitas facetas do sistema de transporte coletivo, incluindo o número e a distribuição de linhas, os lotes de concessão e o tamanho e a atividade da frota.

O processo de licitação para concessão mais recente em São Paulo começou em dezembro de 2017, com a publicação de uma minuta do edital de licitação para consulta pública. O aviso do edital de publicação foi divulgado em abril de 2018, após o período de consulta. Em 8 de junho de 2018, o Tribunal de Contas do Município suspendeu a licitação, citando irregularidades no edital. A administração da cidade respondeu às questões levantadas pelo tribunal, e o processo licitatório foi retomado em 6 de dezembro de 2018 (Prefeitura de São Paulo Mobilidade e Transportes, 2018). Até a data da publicação deste estudo, há incertezas com relação à data para encerramento do processo licitatório.

ESCOPO DA PESQUISA

As metas de redução de emissões estabelecidas na Lei 16.802 e a medida de sua aplicação vão determinar tanto a velocidade como o grau com que vai ser preciso introduzir as tecnologias de motor limpas de ônibus de transporte coletivo e os combustíveis não fósseis na frota de São Paulo. O nível de transição tecnológica requerido para alcançar as metas é considerável, sendo necessário um planejamento cuidadoso para garantir que as operadoras de transporte coletivo possam fazer essa transição de forma viável economicamente, mantendo a integridade operacional e a qualidade do serviço.

Com essas necessidades em mente, este documento aborda, do ponto de vista quantitativo, as seguintes questões relativas às transições tecnológicas na frota de ônibus de transporte público coletivo de São Paulo:

- » Que magnitude de reduções das emissões é necessária para cumprir as metas estabelecidas na Lei 16.802?
- » Em que medida as tecnologias alternativas de ônibus de transporte coletivo e combustíveis podem melhorar o desempenho dos ônibus a diesel usados atualmente na frota de São Paulo em termos de emissões?
- » Que estratégias de aquisição de tecnologia são necessárias para atender às metas intermediárias e de longo prazo de redução de emissões de CO₂ fóssil e poluentes atmosféricos estabelecidas na Lei 16.802?
- » Quais são os impactos climáticos das estratégias de aquisição compatíveis com a Lei 16.802, levando em consideração as emissões do ciclo de vida do combustível e os poluentes que não o CO₂?
- » Quais são os custos das tecnologias alternativas de ônibus e combustíveis em comparação com os ônibus convencionais a diesel, considerando todos os custos de propriedade incorridos durante a vida útil desses veículos?

Para responder a essas questões, aplicamos um modelo de custos e emissões de ônibus de transporte coletivo desenvolvido pelo ICCT. O modelo foi elaborado usando dados detalhados da atual frota de ônibus a diesel de São Paulo, incluindo informações sobre distribuição por tipo de ônibus e idade, atividade anual do ônibus e consumo de combustível, preço de compra do ônibus, custos de combustível e custos de manutenção (por exemplo, pneus, lubrificantes, peças e acessórios). Realizou-se uma revisão da literatura para complementar esse conjunto principal de dados de São Paulo com informações semelhantes para os ônibus de tecnologia alternativa. O modelo avalia as emissões anuais de poluentes atmosféricos e climáticos e o custo total de propriedade para cenários de aquisição definidos pelo usuário.

A seguir, primeiramente apresentamos as estimativas de emissões para a frota de ônibus de São Paulo em 2016, que é o ano tomado como referência para as reduções exigidas pela Lei 16.802. Em seguida, descrevemos as opções de tecnologia de motor de ônibus e combustíveis alternativos que podem contribuir para os objetivos dessa lei. Os resultados da modelagem para as reduções de emissões alcançáveis em cenários alternativos de aquisição de longo prazo são então apresentados, com foco nas estratégias projetadas em conformidade com a Lei 16.802. Além disso, exploramos os impactos climáticos das estratégias de aquisição compatíveis com a Lei 16.802 levando em conta os poluentes que não o CO₂ e as emissões do ciclo de vida do combustível. Por fim, detalhamos as metodologias e os resultados de uma avaliação do custo total de propriedade das despesas de capital e operacionais incorridas ao longo da vida útil para tecnologias de ônibus de transporte coletivo a diesel e alternativas.

FROTA DE REFERÊNCIA E EMISSÕES

As exigências de redução de emissão de poluentes feitas na Lei 16.802 são definidas como reduções percentuais relativas às emissões totais pelas frotas regulares no ano de referência, 2016. Nesta seção, revisamos as características da frota de ônibus de transporte público coletivo de São Paulo tomada como referência e apresentamos as estimativas de suas emissões para os poluentes regulados pela Lei 16.802—CO₂ fóssil, MP e NO_x. Com base nessas estimativas, calculamos a magnitude das reduções de emissões necessárias para alcançar as metas intermediárias e de longo prazo estabelecidas pela lei. Salvo indicação em contrário, todos os dados usados nesta seção foram obtidos dos relatórios anuais publicados pela SPTrans, que detalham as características operacionais e financeiras da frota de ônibus de transporte público coletivo (SPTrans, 2017).

FROTA DE REFERÊNCIA

Em 2016, a frota era composta por 14.703 ônibus, distribuídos em oito tipos. A Tabela 2 exhibe detalhes da frota tomada como referência. Os tipos mais comuns de ônibus eram míni, básico e padron, que, com os midiônibus, também tinham as mais elevadas taxas de utilização, medidas pela média anual de quilômetros percorridos por veículo (VKT). As estimativas de VKT aqui apresentadas representam as corridas programadas, que geram receita. Não há dados disponíveis sobre corridas improdutivas, por exemplo, quando um ônibus se desloca para ou a partir de um terminal ou estação sem estar transportando passageiros.

Tabela 2. Características, tamanho da frota e atividade anual por tipo de ônibus da frota de referência do transporte público coletivo municipal de São Paulo (2016)

Tipo de ônibus	Comprimento do veículo (m)	Número de assentos (#)	Capacidade total de passageiros (#)	Número de ônibus na frota (#)	Atividade anual programada (milhões de km/ano)	Atividade anual programada por ônibus ^a (km/ano/ônibus)
Miniônibus	8,4 - 9,0	20	35	3.585	251	70.100
Midiônibus	9,6 - 11,5	25-33	54-68	1.616	114	70.400
Básico	11,5 - 12,5	35	74	2.972	215	72.200
Padron ^b	12,5	32	87	3.583	259	72.300
Padron (15m)	15,0	38	110	203	13	61.800
Articulado	18,3	37	129	1.344	86	63.600
Articulado (23m)	23,0	54	174	990	64	64.700
Biarticulado	≤ 27,0	53	198	209	8	36.600

^aCalculada dividindo-se a atividade anual programada para um dado ônibus pelo número de ônibus do respectivo tipo na frota.

^bA frota de referência inclui, ainda, 201 trólebus elétricos, não mostrados na tabela. A atividade anual para trólebus é estimada em 51.800 km/ano/ônibus.

Conforme mostrado na Figura 1, 99% da frota de referência é movida a diesel. Os ônibus de tecnologia alternativa usados naquele momento incluíam trólebus elétricos, responsáveis pelo restante da frota. A frota a diesel estava dividida de forma mais ou menos igual entre ônibus certificados pelos padrões de emissões PROCONVE P-5 e P-7. Os padrões PROCONVE são os padrões nacionais de emissão para veículos pesados e limitam a quantidade de poluição que pode ser emitida pelos veículos novos vendidos no país. Os padrões brasileiros são baseados no programa regulatório correspondente na Europa, e os padrões P-5 e P-7 são equivalentes, em geral, ao Euro III e ao Euro V, respectivamente. A União Europeia implementou padrões Euro VI mais rigorosos, que reduzem significativamente os limites de emissão de poluentes em relação ao Euro V

e introduzem procedimentos de teste mais rigorosos, que dão suporte a um melhor controle das emissões no mundo real.

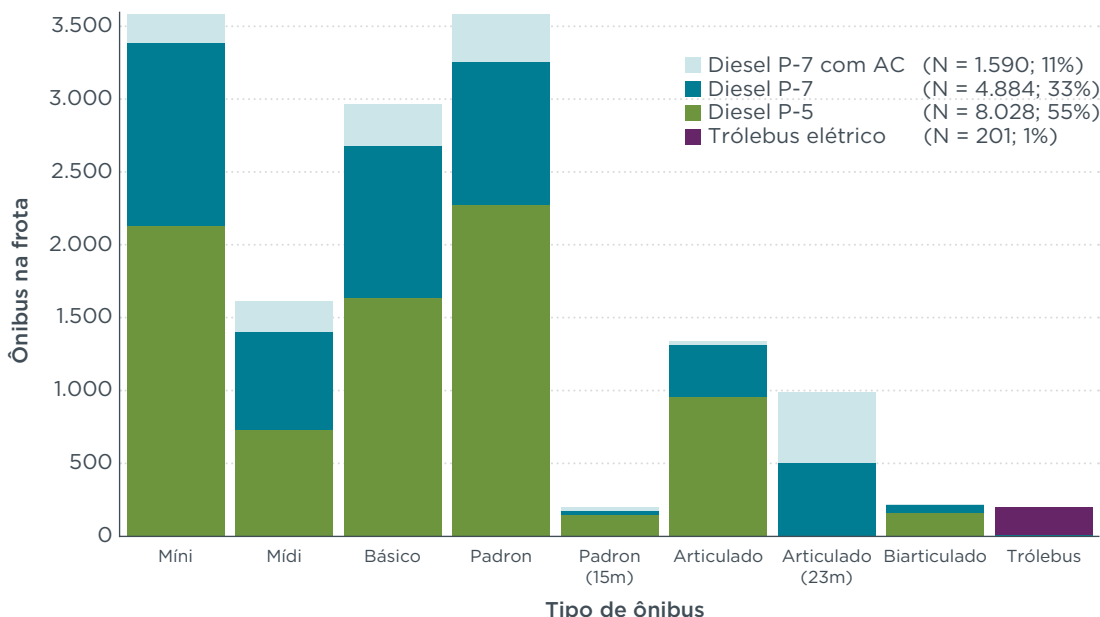


Figura 1. Composição da frota de ônibus de transporte coletivo municipal de São Paulo em 2016 por tipo de ônibus e nível de controle de emissões.

O PROCONVE P-7 está em vigor desde 2013. Recentemente, o Brasil anunciou a próxima fase dos padrões PROCONVE para veículos pesados, P-8, que seguem o padrão Euro VI e serão implementados a partir de 2022 para novos modelos de caminhões e ônibus e, em 2023, para todos os modelos (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2018). O teor correspondente de enxofre no diesel, de 10 partes por milhão (ppm), exigido pelo Euro VI, já está amplamente disponível na cidade de São Paulo.

Aproximadamente 25% dos ônibus a diesel P-7 na frota de 2016 eram equipados com ar-condicionado. A idade média da frota era de 5,9 anos.

METODOLOGIA DE MODELAGEM DAS EMISSÕES

As emissões de escapamento de CO₂ fóssil e poluentes atmosféricos para a frota de referência foram avaliadas usando um modelo de custos e de emissões de ônibus de transporte coletivo desenvolvido pelo ICCT. O modelo calcula as emissões anuais históricas e futuras de CO₂ fóssil da frota de São Paulo ($E_{CO_2,TP}$, unidades de milhão de toneladas/ano) usando a seguinte equação:

$$E_{CO_2,TP} = \sum_{b,e,f} EC_{b,e} \times EF_{CO_2,f} \times VKT_{b,e,f} \times 10^{-12} \quad (1)$$

em que b, e e f se referem a tipo de ônibus, tecnologia do motor e tipo de combustível, respectivamente. $EC_{b,e}$ é o consumo de energia de um dado tipo de ônibus e tecnologia do motor, expresso em unidades de quilowatt-hora por quilômetro (kWh/km). O consumo de energia reflete a quantidade de energia necessária para mover o ônibus por uma unidade de distância, bem como para alimentar itens auxiliares, como ar-condicionado e iluminação. Para ônibus alimentados por motores de combustão interna, o consumo de energia é diretamente proporcional ao consumo de combustível. $EF_{CO_2,f}$ é o fator de emissão de escapamento de CO₂ fóssil para um determinado combustível em unidades de g/kWh e é uma medida das emissões de CO₂ fóssil em motores de combustão interna. Para o diesel de petróleo, assume-se o EF_{CO_2} como 270 g/kWh

(Argonne National Laboratory, 2018). De acordo com a Lei do Clima, que visa eliminar as emissões de CO₂ apenas de combustíveis fósseis, o EF_{CO₂} para biocombustíveis e eletricidade é considerado zero. Finalmente, VKT_{b,e,f} é a atividade anual para todos os ônibus de mesmo tipo, tecnologia de motor e tipo de combustível, expressa em km/ano.

Avaliamos as emissões de escapamento dos poluentes atmosféricos MP (E_{MP}, toneladas/ano) e NO_x (E_{NO_x}, toneladas/ano) aplicando as equações a seguir:

$$E_{MP} = \sum_{b,e,f} EF_{MP,b,e} \times VKT_{b,e,f} \times 10^{-6} \tag{2}$$

$$E_{NO_x} = \sum_{b,e,f} EF_{NO_x,b,e} \times VKT_{b,e,f} \times 10^{-6} \tag{3}$$

em que EF_{MP,b,e} e EF_{NO_x,b,e} são os fatores de emissão de MP e NO_x de um dado tipo de ônibus e tecnologia de motor, expressos em g/km.

Sempre que possível, os dados usados na modelagem de emissões para a frota de referência foram obtidos diretamente da SPTrans. Esses dados incluem a atividade anual (Tabela 2) e o consumo de combustível (Tabela 3) por tipo de ônibus (SPTrans, 2017). Valores separados de consumo de combustível são reportados para ônibus equipados com ar-condicionado.

Tabela 3. Consumo de combustível e energia por ônibus a diesel operando em São Paulo

Tipo de ônibus	Sem ar-condicionado		Com ar-condicionado	
	Consumo de combustível (L/100 km)	Consumo de energia (kWh/km)	Consumo de combustível (L/100km)	Consumo de energia (kWh/km)
Miniônibus	30	3,0	35	3,5
Midiônibus	40	4,0	47	4,7
Básico	46	4,6	53	5,3
Padron	55	5,5	63	6,3
Padron (15m)	65	6,5	75	7,5
Articulado	71	7,1	80	8,0
Articulado (23m)	75	7,5	85	8,5
Biarticulado	80	8,0	90	9,0

Os valores de consumo de combustível relatados pela SPTrans foram convertidos em consumo de energia usando o menor valor de aquecimento para combustível a diesel com baixo teor de enxofre relatado pelo Centro de Dados de Combustíveis Alternativos do Departamento de Energia dos Estados Unidos (128,488 Btu/gal). Disponível em: www.afdc.energy.gov/fuels/fuel_properties.php.

Os valores do fator de emissão de escapamento de CO₂ fóssil para o combustível usado na frota de referência de ônibus a diesel são calculados assumindo que todos os ônibus usam combustível B7, uma mistura de 93% de diesel de petróleo e 7% de biodiesel por volume, que era a especificação comercial do diesel em 2016. Desde então, o Brasil aumentou o nível da mistura de biodiesel nos combustíveis a diesel para 10%. Os níveis de mistura de biodiesel para combustível a diesel comercial devem aumentar para 15% até 2023 (Conselho Nacional de Política Energética, 2018). Em nossa análise, assumimos que todo biodiesel é produzido a partir de óleo de soja, que é a matéria-prima mais usada na produção brasileira de biodiesel (Ministério de Minas e Energia, 2017).

Os fatores de emissão de poluentes atmosféricos são extraídos do banco de dados *Handbook Emission Factors for Road Transport* (HBEFA) (2017). O HBEFA relata os fatores de emissão de poluentes para três tipos de ônibus urbanos—mídi, padrão e articulado—por tecnologia do motor e nível de controle de emissões. Os fatores de

emissão de MP e NO_x usados nesta análise constam no apêndice. Outras fontes de fator de emissão foram consideradas, no entanto, nenhuma forneceu o mesmo grau de cobertura de tecnologia alternativa e tipos de combustível que o banco de dados do HBEFA. Por exemplo, o edital de licitação de concessão inclui uma metodologia proposta para o cálculo de emissões de ônibus, incluindo fatores de emissão de poluentes atmosféricos (Prefeitura de São Paulo Mobilidade e Transportes, 2018). Todavia, os fatores de emissão de MP e NO_x são relatados apenas para os ônibus a diesel certificados pelos padrões P-5 e P-7, não havendo dados para motores a diesel de tecnologia avançada (Euro VI) ou motores alternativos e tipos de combustível. Embora sejam suficientes para o cálculo de emissões da frota de referência, de 2016, esses dados não são adequados para a avaliação dos impactos das transições para tecnologias de motor e combustíveis mais limpos.

EMISSÕES DE ESCAPAMENTO DE CO_2 FÓSSIL

As estimativas das emissões de escapamento de CO_2 fóssil da frota de referência são mostradas na Figura 2, com barras coloridas e hachuradas que diferenciam as contribuições por tecnologia de ônibus. As emissões da frota de São Paulo em 2016 foram calculadas em 1,24 milhão de toneladas de CO_2 /ano. Com base nessa estimativa, as emissões anuais de CO_2 fóssil na frota devem ser reduzidas em 0,62 milhão de toneladas/ano para cumprir a meta de redução em 50% em relação à frota de referência no prazo de 10 anos. Para cumprir a meta final de CO_2 fóssil, o uso de combustíveis fósseis precisa ser totalmente eliminado nos próximos 20 anos.

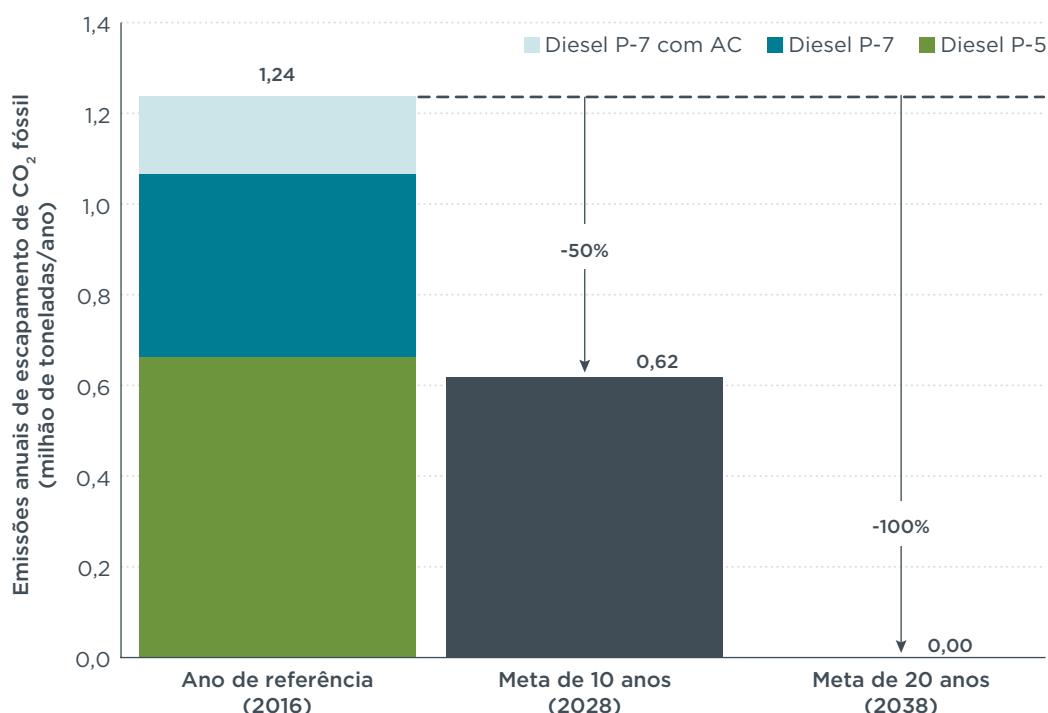


Figura 2. Emissões de escapamento de CO_2 fóssil para a frota de referência de ônibus de transporte coletivo do município de São Paulo e metas intermediária e final de redução. Os trólebus na frota de referência não emitem CO_2 fóssil, por isso não foram incluídos aqui. Dados de emissões desagregados por tipo de ônibus encontram-se no apêndice.

A partir da Equação 1, há várias maneiras de reduzir as emissões de CO_2 fóssil da frota: (1) diminuindo a atividade anual da frota, (2) fazendo a transição para ônibus com motores e transmissores mais eficientes e, assim, reduzindo o consumo de energia e (3) aumentando o uso de combustíveis que não geram emissões de escapamento de CO_2 fóssil. Em termos práticos, o potencial de redução de emissões para a atividade anual

reduzida é limitado pela necessidade de manter o serviço programado para a frota em toda a rede de transporte. E, como os ônibus estão entre as formas mais eficientes de transporte coletivo urbano (por passageiro-quilômetro), um maior investimento na atividade de ônibus é uma estratégia-chave para descarbonizar o setor de transportes. Nesse sentido, as grandes reduções de emissões exigidas pela Lei 16.802 devem vir, principalmente, das transições para tecnologias de motor mais eficientes e combustíveis não fósseis.

EMISSIONES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A Figura 3 apresenta as estimativas para as emissões anuais dos poluentes atmosféricos MP e NO_x da frota de referência, bem como os limites de emissões projetados que a frota precisa atingir para cumprir a Lei 16.802. Os ônibus a diesel P-5 são a principal fonte de emissões de poluentes atmosféricos da frota de referência, respondendo por 55% da quilometragem percorrida pela frota, além de 81% das emissões de MP e 65% das emissões de NO_x. O impacto desproporcional das emissões da frota a diesel P-5 decorre dos elevados fatores de emissão de MP e NO_x, associados a seus motores a diesel de tecnologia antiga. Dessa forma, as estratégias de revisão da frota devem priorizar a substituição desses ônibus mais antigos e poluidores por alternativas de baixa emissão.

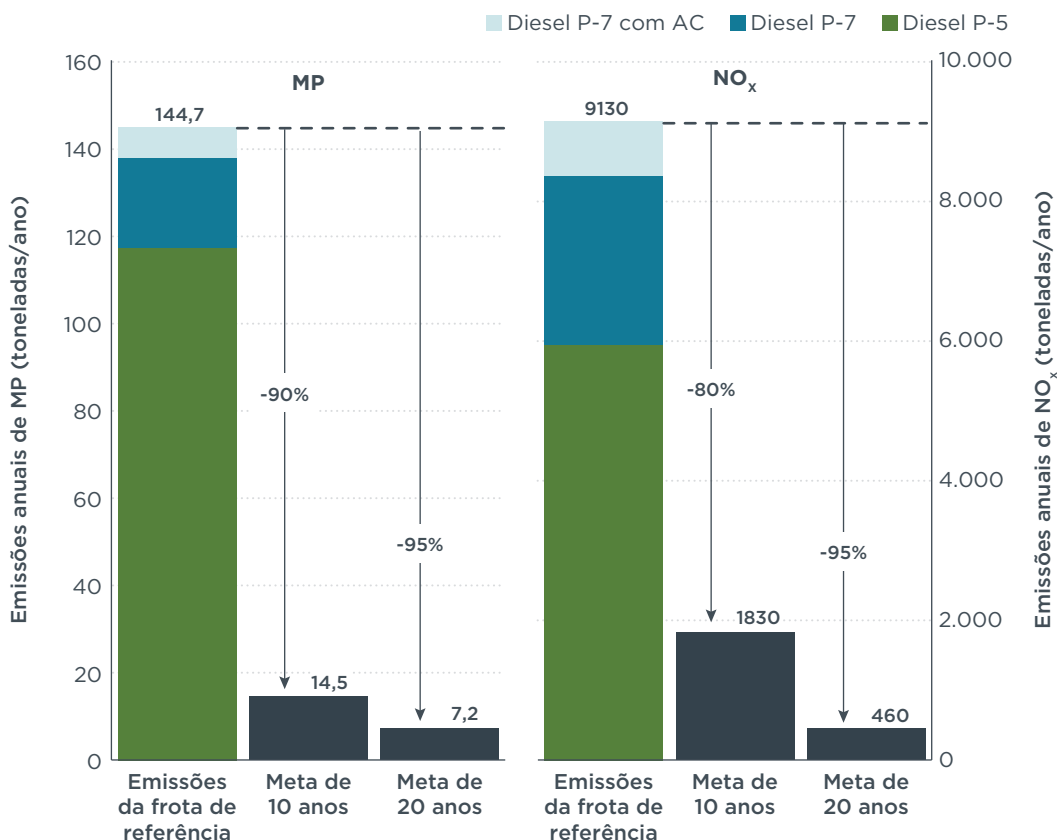


Figura 3. Emissões de MP e NO_x da frota de referência de ônibus de transporte coletivo municipal de São Paulo. As estimativas das metas de redução de emissões intermediária e final são mostradas para cada poluente. Os trólebus elétricos na frota de referência não emitem MP e NO_x. Dados de emissões desagregados por tipo de ônibus encontram-se no apêndice.

Embora tenham desempenho melhor que o dos ônibus a diesel P-5 em termos de emissões, os ônibus a diesel P-7 ainda são responsáveis por uma parcela considerável das emissões de NO_x e, em menor grau, MP da frota de referência. Notavelmente, as emissões de MP e NO_x dos ônibus a diesel P-7 na frota de referência ultrapassam as

metas de redução projetadas para o prazo de 10 anos. Isso implica que a substituição dos ônibus a diesel P-5 por ônibus certificados pelas atuais normas brasileiras para veículos pesados, PROCONVE P-7, não vai ser suficiente para atingir as metas de redução de emissões de poluentes atmosféricos estabelecidas na Lei 16.802. Serão necessárias transições para tecnologias de ônibus que melhorem substancialmente o desempenho dos ônibus a diesel P-7 em termos de emissões. Como a Lei 16.802 exige que a maior parte da redução ocorra nos primeiros 10 anos de sua implementação, essas transições precisam ocorrer com relativa rapidez.

OPÇÕES DE TECNOLOGIA AVANÇADA DE MOTOR E COMBUSTÍVEL

A análise da frota de referência apresentada na seção anterior sugere que as práticas atuais de aquisição (*i.e.*, a substituição de ônibus a diesel P-5 por ônibus a diesel P-7) não vão ser suficientes para alcançar as metas de redução de emissões estabelecidas na Lei 16.802. Serão necessárias transições para tecnologias de motor mais limpas e combustíveis não fósseis. Nesta seção, identificamos um conjunto de tecnologias alternativas de ônibus de transporte coletivo e combustíveis que emitem menos MP, NO_x e CO₂ fóssil que os ônibus a diesel P-5 ou P-7 movidos a combustível B7—portanto, capazes de contribuir para o cumprimento da Lei 16.802.

TECNOLOGIA EURO VI

Como explicado anteriormente, a fase atual dos padrões de emissão no Brasil para veículos pesados, PROCONVE 7, está atrasada em relação às melhores práticas internacionais. Os padrões P-7 brasileiros equivalem, em geral, aos padrões europeus Euro V. Reconhecendo a necessidade de um controle melhor das emissões prejudiciais de motores de veículos pesados, a União Europeia implementou os padrões Euro VI em 2013, introduzindo medidas importantes que resultaram em um desempenho significativamente melhor, em termos de emissões, dos motores de veículos pesados certificados com esses padrões. Isso inclui limites mais rigorosos para as emissões de poluentes, a introdução de ciclos de testes de certificação que representam melhor as condições reais de condução, incluindo exigências de partida a frio, requisitos para o teste de conformidade em serviço e períodos estendidos de durabilidade (Chambliss & Bandivadekar, 2015).

Importa afirmar que os padrões Euro VI introduziram um número-limite de emissões de partículas que exigiu o uso de tecnologias mais eficazes para controlar as emissões de MP por motores a diesel, o filtro de particulados (DPF). O Euro VI também reforçou as medidas antiadulteração para sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) usados para controlar as emissões de NO_x, o que é especialmente relevante para o Brasil, onde brechas na regulamentação P-7 levaram a emissões de NO_x superiores às esperadas por veículos certificados para este padrão (Façanha, 2016).

A eficácia dos padrões Euro VI no controle das emissões de motores de veículos pesados a diesel é demonstrada na Figura 4, que exibe os fatores de emissão de MP e NO_x para ônibus urbanos a diesel de tamanho padrão em três níveis de controle de emissões. Estima-se que o fator de emissão de MP para os ônibus Euro VI seja 91% mais baixo do que para os ônibus Euro V e 97% mais baixo do que para os ônibus Euro III. Reduções similares são relatadas para o fator de emissão de NO_x na Euro VI em relação aos estágios anteriores de controle de emissões. As reduções relativas de emissões mostradas aqui para os ônibus a diesel Euro VI também refletem as reduções que podem ser esperadas de outras tecnologias de motor certificadas pelas normas Euro VI, como motores a GNC, quando comparadas aos ônibus a diesel Euro III ou V. É importante notar que a magnitude das reduções de emissões oferecida pelas tecnologias Euro VI é apenas ligeiramente inferior à oferecida pelas tecnologias de emissão zero, como os ônibus elétricos a bateria.

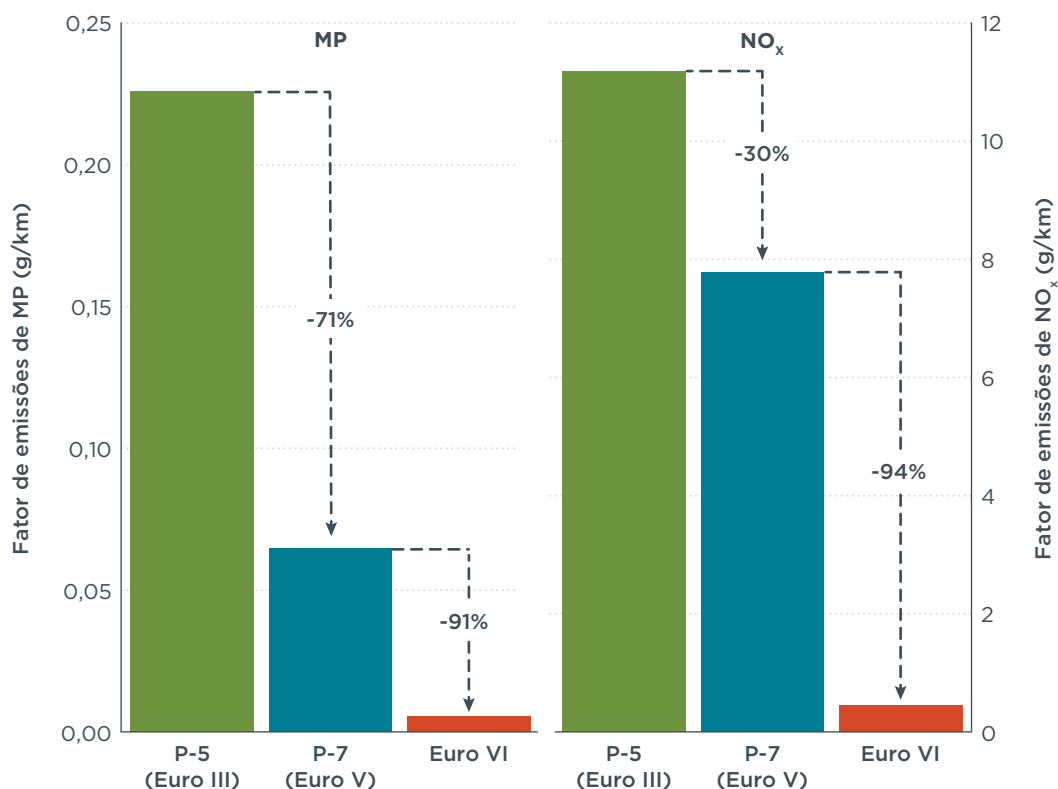


Figura 4. Fatores de emissão de MP e NO_x para ônibus urbanos a diesel de tamanho padrão por nível de controle de emissões. Os níveis para ônibus a diesel Euro VI e as reduções relativas às fases anteriores de emissão refletem outras tecnologias de motor com certificação Euro VI (e.g., híbrido diesel-elétrico e GNC). Dados provenientes do HBEFA (2017).

Os motores Euro VI são eficazes no controle das emissões de carbono negro, um importante poluente climático de vida curta. Até 75% do MP emitido por motores a diesel de tecnologia mais antiga contém carbono negro. No entanto, os motores Euro VI reduzem as emissões de carbono negro do diesel em 99%, principalmente através da aplicação de um filtro de particulados. Embora não exija reduções no carbono negro, a Lei 16.802 gera benefícios climáticos de curto prazo ao estabelecer limites nas emissões de MP para toda a frota.

Dado o desempenho consideravelmente melhor em termos das emissões de MP e NO_x das tecnologias de motor Euro VI em relação aos motores a diesel P-5 e P-7 e o nível das exigências de redução de emissões no prazo de 10 anos para esses poluentes determinado na Lei 16.802, as tecnologias Euro VI devem ser priorizadas nas estratégias de aquisição de curto prazo das operadoras de transporte coletivo. A recente adoção dos padrões PROCONVE P-8 para ônibus e caminhões pesados no Brasil significa que todos os novos ônibus adquiridos para a frota de São Paulo devem ter desempenho de emissões Euro VI até 2023. Uma questão-chave que abordamos nesta análise é se a introdução precoce das tecnologias Euro VI, antes do lançamento das normas P-8, na frota de São Paulo vai ser necessária para alcançar as metas de redução de emissões de MP e NO_x da Lei 16.802.

Embora a transição para as tecnologias de motor Euro VI ofereça um caminho claro para atingir as metas de redução de emissões de poluentes atmosféricos da Lei 18.602, enquanto forem usados combustíveis fósseis para alimentar esses motores, o progresso na redução das emissões de CO₂ fóssil será limitado. Melhorias na eficiência energética do motor e hibridização podem diminuir o consumo de combustível da frota e contribuir para a meta intermediária de redução de emissões de CO₂ fóssil em 50%. No entanto, é improvável que melhorias de eficiência bastem para alcançar as reduções de emissões

necessárias para atingir essa meta. Por exemplo, estimamos que o consumo de energia de um ônibus híbrido diesel-elétrico Euro VI equipado com ar-condicionado seja apenas 15% menor do que o de um ônibus a diesel P-5 ou P-7 sem ar-condicionado (Tabela 4). Outras tecnologias de motor Euro VI proporcionam ainda menos benefícios em termos de eficiência em relação às tecnologias de motor da frota de referência.

Dessa forma, a incorporação de combustíveis que não geram emissões de escapamento de CO₂ fóssil precisa ser significativamente maior para atingir as metas de 10 anos. É claro que, no longo prazo, toda a frota deve ser livre de combustíveis fósseis para alcançar a meta estabelecida para o prazo de 20 anos de 100% de redução nas emissões de CO₂ fóssil.

Tabela 4. Consumo energético de ônibus de transporte coletivo urbano por tecnologia do motor (ônibus de tipo padron)

Tecnologia do motor	Consumo energético (kWh/km) ^a	Premissa	Fonte dos dados
Diesel P-5 e P-7	5,5	Conforme relatado pela SPTrans	SPTrans, 2017
Diesel P-7 com ar-condicionado	6,3	Conforme relatado pela SPTrans	
Diesel Euro VI	6,0	-5% em relação ao diesel P-7 com ar-condicionado	Dallmann, Du, & Minjares, 2017
Híbrido diesel-elétrico Euro VI	4,8	-20% em relação ao diesel Euro VI	
Biodiesel/diesel renovável Euro VI Etanol Euro VI	6,0	Equivalente ao diesel Euro VI	
GNC Euro VI	6,6	+10% em relação ao diesel Euro VI	
Elétrico a bateria	1,8	-70% em relação ao diesel Euro VI	

^aAssume-se que todos os ônibus Euro VI e elétricos a bateria têm ar-condicionado

BIOCOMBUSTÍVEIS

Existem várias opções de combustível para ônibus urbanos de transporte coletivo que não emitem CO₂ fóssil, incluindo biocombustíveis, em motores de combustão interna, e eletricidade, em ônibus elétricos a bateria ou trólebus.³ Até certo ponto, os biocombustíveis já estão sendo usados em ônibus de transporte coletivo que operam em São Paulo. Buscando promover o uso de biocombustíveis, o governo brasileiro estabeleceu metas de mistura de biodiesel para o combustível diesel comercial vendido no país (Lei Federal 13.263/2016). Como mencionado acima, o óleo de soja é a matéria-prima predominante do biodiesel no Brasil, representando 76% da produção em 2016 (Ministério de Minas e Energia, 2017). Entre 2016 e 2018, o nível de mistura do volume de biodiesel para o diesel comercial aumentou de 7% (B7) para 10% (B10) (Biofuels International, 2018). É esperado que o nível de mistura aumente ainda mais, em 1% ao ano, até 2023, quando o teor de biodiesel chegará a 15% (B15).

Além disso, foram realizados programas-pilotos em São Paulo para avaliar o uso do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, bem como maiores percentuais de mistura de biodiesel (B20) em ônibus de transporte coletivo. Por fim, o biometano produzido a partir da digestão anaeróbica de matérias-primas de biomassa ou de gás de aterro

³ O hidrogênio usado em ônibus elétricos a célula de combustível é mais uma alternativa livre de carbono fóssil. Não consideramos essa opção de tecnologia diretamente em nossa análise porque ela ainda não atingiu o mesmo nível de maturidade tecnológica que outras opções de ônibus de transporte coletivo. No entanto, a longo prazo, à medida que for sendo desenvolvida, espera-se que essa tecnologia ofereça uma opção elétrica de emissão zero viável às operadoras de transporte coletivo. Embora as tecnologias de ônibus elétricos a célula de combustível de hidrogênio não sejam analisadas diretamente aqui, as conclusões deste documento sobre as transições para alternativas de combustível não fóssil são aplicáveis a elas.

sanitário e usado em motores a GNC fornece outra opção de biocombustível às operadoras de transporte coletivo.

Como explicado acima, por definição os biocombustíveis não geram emissões de escapamento de CO₂ fóssil e, portanto, podem contribuir significativamente para o cumprimento da Lei 16.802. Entretanto, as reduções das emissões de escapamento de CO₂ fóssil não necessariamente equivalem a menores impactos climáticos, em particular se estiverem sendo desconsideradas as reduções de emissões ao longo do ciclo da vida do combustível. As emissões decorrentes da produção desses combustíveis e de suas matérias-primas podem ser significativas. Isso vale especialmente para os biocombustíveis à base de matérias-primas alimentares, como o biodiesel de óleo de soja, em que as emissões associadas à mudança no uso da terra podem superar as reduções de emissões de escapamento de CO₂ obtidas com a transição para esses combustíveis.

ACIONAMENTO ELÉTRICO

Ônibus com acionamento elétrico de emissão zero, como os ônibus elétricos a bateria e os trólebus elétricos, são mais uma alternativa livre de carbono fóssil para as operadoras de transporte coletivo. As vendas globais de ônibus elétricos a bateria estão crescendo rapidamente, à medida que esta tecnologia é desenvolvida e comercializada mais amplamente (Bloomberg New Energy Finance, 2018). Até o momento, grande parte desse crescimento está centrada na China, onde as políticas ambientais e industriais aceleraram as transições para essa tecnologia (Asian Development Bank, 2018). Todavia, um número crescente de cidades em outras regiões também está tomando providências para incorporar ônibus elétricos de emissão zero em suas frotas. Por exemplo, Londres, Paris e Los Angeles assumiram compromissos políticos com a transição para frotas de ônibus elétricos de emissão zero. Além disso, o estado da Califórnia está elaborando uma norma para definir os requisitos para a aquisição de ônibus de emissão zero por operadoras de transporte coletivo (CARB, 2018).

No contexto da Lei 18.602, os ônibus elétricos de emissão zero oferecem potencial para reduções substanciais nas emissões de poluentes atmosféricos e climáticos da frota de São Paulo (Slowik, Araujo, Dallmann, & Façanha, 2018). Esses ônibus não geram emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x. Conforme mostrado na Tabela 4, os ônibus elétricos a bateria têm benefícios significativos em termos de eficiência em comparação aos ônibus a diesel, GNC ou híbridos. Além disso, devido à alta proporção de eletricidade gerada por fontes hidrelétricas no Brasil, a intensidade de emissões de CO₂ do ciclo de vida para a eletricidade que alimenta esses ônibus é relativamente baixa em comparação com regiões com redes elétricas de maior intensidade de carbono (Dallmann, Du, & Minjares, 2017). Vários projetos-pilotos e de demonstração de ônibus elétricos vêm sendo executados em São Paulo.

Os trólebus têm uma longa história de uso no sistema de transporte coletivo municipal de São Paulo e, similarmente, oferecem uma alternativa elétrica de emissão zero às operadoras de transporte coletivo na cidade. A rede de infraestrutura de recarga de trólebus existente em São Paulo está subutilizada. Como será discutido a seguir, a expansão da frota de trólebus em São Paulo, de forma a aproveitar totalmente a capacidade da infraestrutura existente, é exigida na Lei 16.802 e no edital de licitação de concessão.

ESTRATÉGIAS DE AQUISIÇÃO PARA ALCANÇAR AS METAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES

Nesta seção, apresentamos os resultados da modelagem de emissões para vários cenários de aquisição, em longo prazo, de ônibus para a frota de transporte coletivo municipal de São Paulo. As emissões calculadas de CO₂, MP e NO_x para cada cenário de aquisição são contrastadas com as metas de redução da Lei 16.802 para os prazos de 10 e 20 anos a fim de avaliar o grau e o ritmo da transição tecnológica necessária para cumprir a lei.

A modelagem das emissões para cenários de aquisição em longo prazo segue as Equações 1-3, com emissões de poluentes da frota calculadas para cada ano do período de 2016 a 2040. As estimativas anuais de emissões para 2027 e 2037 são comparadas com as emissões do ano de referência, 2016, a fim de avaliar o cumprimento das metas de redução. A estrutura do modelo implica que as estimativas para 2027 e 2037 representam as emissões nas datas previstas para o alcance das metas de 10 e 20 anos— janeiro de 2028 e janeiro de 2038, respectivamente. A Tabela 5 sintetiza as opções de tecnologia de motor e combustível consideradas em nosso modelo.

Tabela 5. Opções de tecnologia de motor de ônibus de transporte coletivo e combustível consideradas na modelagem das emissões

Tecnologia de motor e transmissão	Combustível	Matéria-prima do combustível
Diesel Euro VI	Diesel B10-B15 ^a	Petróleo/óleo de soja
	Diesel B20	Petróleo/óleo de soja
	Biodiesel (B100)	Óleo de soja
	Diesel renovável (R100) ^b	Óleo de soja
Híbrido diesel-elétrico Euro VI	Diesel B10-B15 ^a	Petróleo/óleo de soja
GNC Euro VI	GNC fóssil	Gás natural fóssil
	Biometano	Gás de aterro sanitário
Etanol Euro VI	ED95 ^c	Cana-de-açúcar
Ônibus elétrico a bateria	Eletricidade	Mix de eletricidade da rede nacional para 2016

^a Assume-se que o diesel comercial tenha 7% de mistura de biodiesel em 2016, 8% em 2017, 10% em 2018, 11% em 2019, 12% em 2020, 13% em 2021, 14% em 2022 e 15% em 2023 e assim por diante. As emissões de CO₂ para misturas de diesel de petróleo e biodiesel são calculadas usando índices de mistura volumétrica e densidades de energia dos respectivos combustíveis.

^b O diesel renovável é um combustível líquido de hidrocarboneto derivado de matérias-primas de biomassa. Ele pode ser produzido de diversas maneiras—hidrotratamento de gorduras ou óleos, gaseificação de biomassa seguida de síntese de Fischer-Tropsch, pirólise de biomassa, ou produção biológica de um óleo de hidrocarboneto. Nesta análise, consideramos o diesel renovável produzido através do hidrotratamento de uma matéria-prima de óleo de soja. O diesel renovável difere do biodiesel, que é um combustível líquido feito de alquil ésteres de ácidos graxos produzidos em um processo de transesterificação a partir de matérias-primas como óleo vegetal, gordura animal ou óleo residual. As propriedades químicas do diesel renovável são mais semelhantes às do diesel de petróleo que às do biodiesel.

^c O combustível ED95 consiste de 95% de etanol e 5% de aditivos, que funcionam como melhoradores de ignição e lubrificantes.

Para modelar a substituição da frota e a introdução de novas tecnologias, seguimos as disposições da Lei 16.802 e assumimos que os ônibus são substituídos após 10 anos de uso por ônibus de tipo semelhante. Exceções a esse modelo são retiradas de circulação antecipadas e compras adicionais exigidas para alcançar o tamanho projetado da frota e as mudanças de composição previstas nos planos de reorganização do sistema da SPTrans.

EVOLUÇÃO DA FROTA COM A REORGANIZAÇÃO DO SISTEMA

A modelagem de emissões de longo prazo para a frota de ônibus de São Paulo deve considerar as mudanças na rede de transporte previstas segundo o plano de otimização do sistema proposto pela SPTrans no recente edital de licitação de concessão (Prefeitura de São Paulo Mobilidade e Transportes, 2018). A reorganização do sistema vai ocasionar mudanças no tamanho, na composição (*i.e.*, distribuição dos ônibus por tipo) e na atividade da frota, que vão influenciar as emissões e, conseqüentemente, o progresso no cumprimento das metas de redução de emissões, independentemente de quaisquer mudanças nas tecnologias de motor ou nos combustíveis.

Para nossa modelagem, assumimos que a composição da frota após a reorganização do sistema vai seguir as projeções incluídas no edital de licitação de concessão lançado pela SPTrans. A Figura 5 compara essa composição com a da frota de referência. Com a reorganização do sistema, o tamanho total da frota deve diminuir de 14.703 para 12.994 ônibus. Os níveis de serviço vão ser mantidos colocando em circulação tipos de ônibus com capacidade de transportar um número maior de passageiros. Por exemplo, os ônibus míni e básico vão ser menos usados, ao passo que o uso de ônibus mídi, padron e articulado deve crescer. A frota de trólebus está projetada para aumentar em 25 ônibus, a fim de aproveitar plenamente a infraestrutura de recarga existente. Uma nova infraestrutura de recarga seria necessária para expandir ainda mais a rede de trólebus.

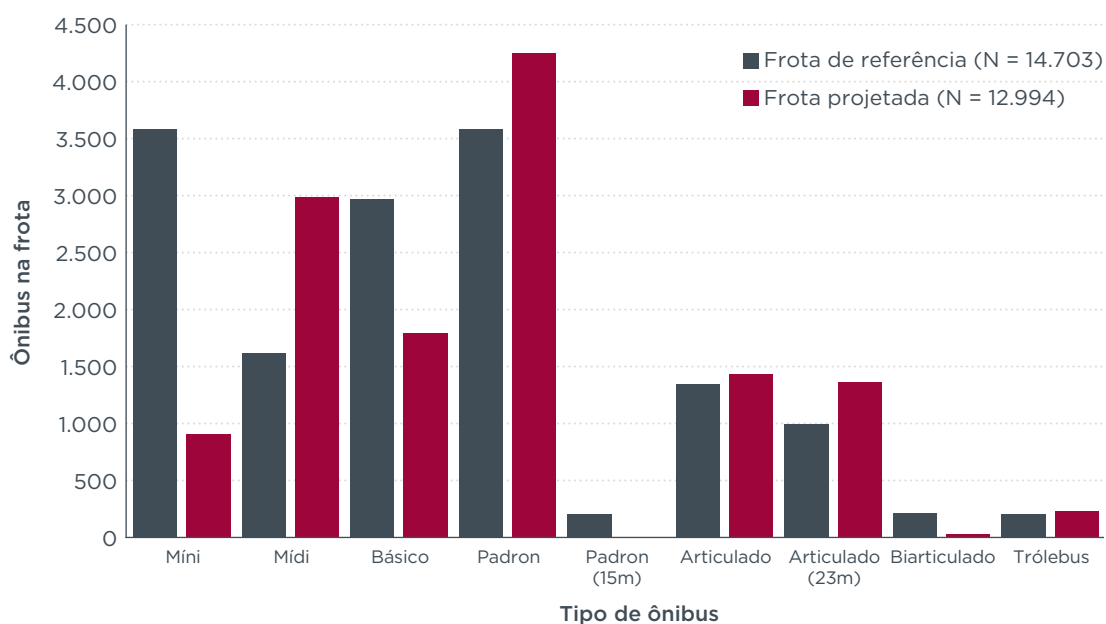


Figura 5. Composição da frota projetada com a reorganização do sistema em comparação com a da frota de referência. Os rótulos dos dados mostram uma mudança no número de cada tipo de ônibus com a reorganização do sistema.

A atividade total da frota, expressa em quilometragem programada anual, deve diminuir aproximadamente 10% com a reorganização e otimização do sistema. A Figura 6 mostra projeções para a atividade anual de cada tipo de ônibus utilizado na frota de São Paulo, em comparação com a atividade da frota de referência. Dada a ênfase nos ônibus de maior capacidade no plano de reorganização do sistema, a atividade relativa também muda para tipos de ônibus maiores. Essa dinâmica é refletida no aumento não apenas da atividade total, por exemplo, dos ônibus articulados, mas também da atividade por veículo para esses tipos de ônibus, que é mostrada no gráfico menor da Figura 6. Não só vai haver mais ônibus destes tipos na frota, mas cada ônibus vai ser mais usado, em média, a cada ano.

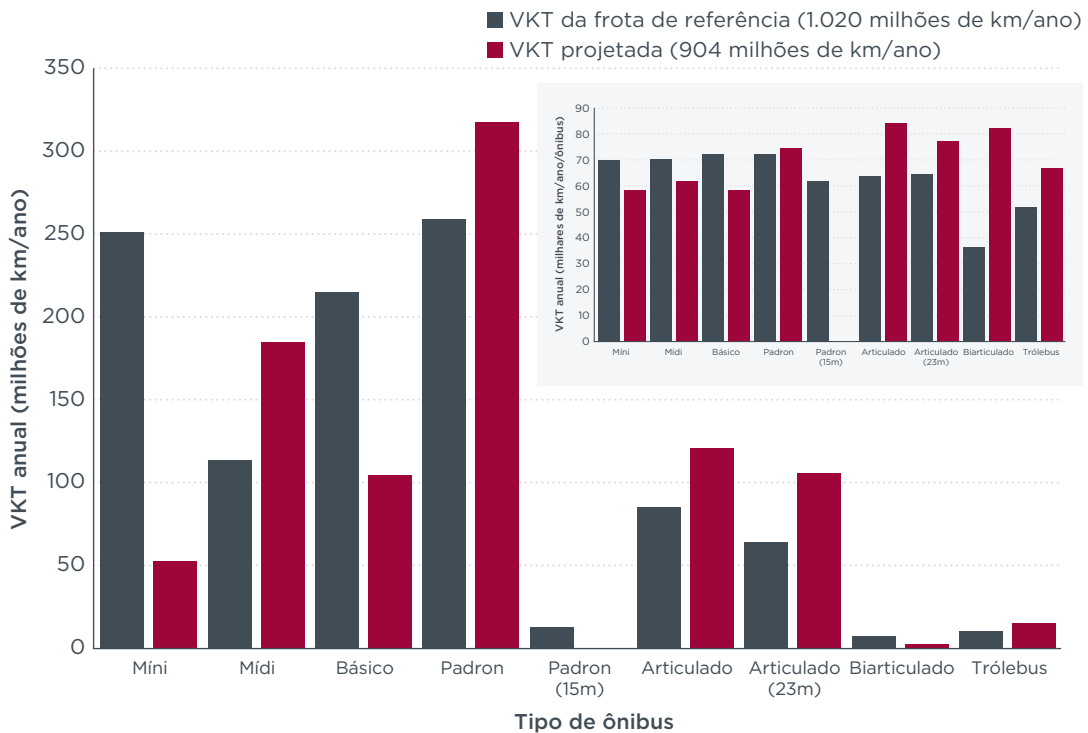


Figura 6. Atividade anual projetada por tipo de ônibus após a reorganização do sistema em comparação com a atividade da frota de referência. O gráfico menor mostra a atividade por veículo para cada tipo de ônibus.

Em nosso modelo, assumimos que a reorganização do sistema vai acontecer por fases em um período de três anos, de 2019 a 2021, com a composição da frota em 2022 e as projeções correspondentes de atividade incluídas no edital de licitação de concessão. As alterações no número de ônibus de cada tipo na frota são modeladas para ocorrer linearmente ao longo do período de transição de três anos, com a retirada antecipada de circulação ou as compras adicionais de ônibus aplicadas quando necessário para chegar ao tamanho final da frota projetada.

CENÁRIO DE AQUISIÇÃO *BUSINESS-AS-USUAL*

O cenário de aquisição de referência, ou *business-as-usual* (BAU), pressupõe que todos os novos ônibus da frota têm motores a diesel certificados pelos padrões nacionais de emissão vigentes no ano da compra—PROCONVE P-7 para 2017-2022 e P-8 (Euro VI) a partir de 2023. Em nossa modelagem, assumimos que todos os ônibus usam combustível diesel comercial e são responsáveis pelos aumentos esperados nos níveis de mistura de biodiesel (B10 a B15 no período de 2018 a 2023). Finalmente, assumimos que cada novo ônibus está equipado com ar-condicionado, seguindo as exigências estabelecidas no edital de licitação da concessão.

Os resultados da modelagem de emissões para o cenário de aquisição BAU são apresentados na Figura 7, com o painel superior exibindo a evolução tecnológica da frota de 2016 a 2040 e o painel inferior mostrando as mudanças correspondentes nas emissões anuais de CO₂ fóssil, MP e NO_x em relação a 2016. Mostramos as mudanças relativas das emissões anuais em vez da magnitude absoluta para comparar mais diretamente com as metas de redução impostas pela Lei 16.802, que são indicadas em cores no painel inferior da Figura 7.

As estimativas de emissões para o cenário BAU sugerem que uma transição para os ônibus a diesel Euro VI a partir de 2023, quando as normas P-8 estiverem totalmente

implementadas, não vai gerar reduções suficientes de emissões de NO_x e MP para atingir as metas de 10 anos estabelecidas na Lei 16.802. Para este cenário, estimamos que, considerando as mudanças projetadas no tamanho e na atividade da frota, as emissões de MP e NO_x na data prevista para o alcance da meta de 10 anos vão ser, respectivamente, 75% e 56% inferiores às emissões de 2016. Essas reduções de emissões ficam abaixo da meta da Lei 16.802 de 90% para MP e de 80% para NO_x . A longo prazo, a transição para as tecnologias de motor Euro VI em toda a frota proporciona uma redução de emissões suficiente para atingir as metas de 20 anos. Esses resultados indicam que São Paulo vai precisar fazer a transição para ônibus P-8/Euro VI, ou com desempenho melhor em termos de emissões, antes da implementação dos padrões nacionais P-8 para alcançar as metas intermediárias de redução de emissões da Lei 16.802.

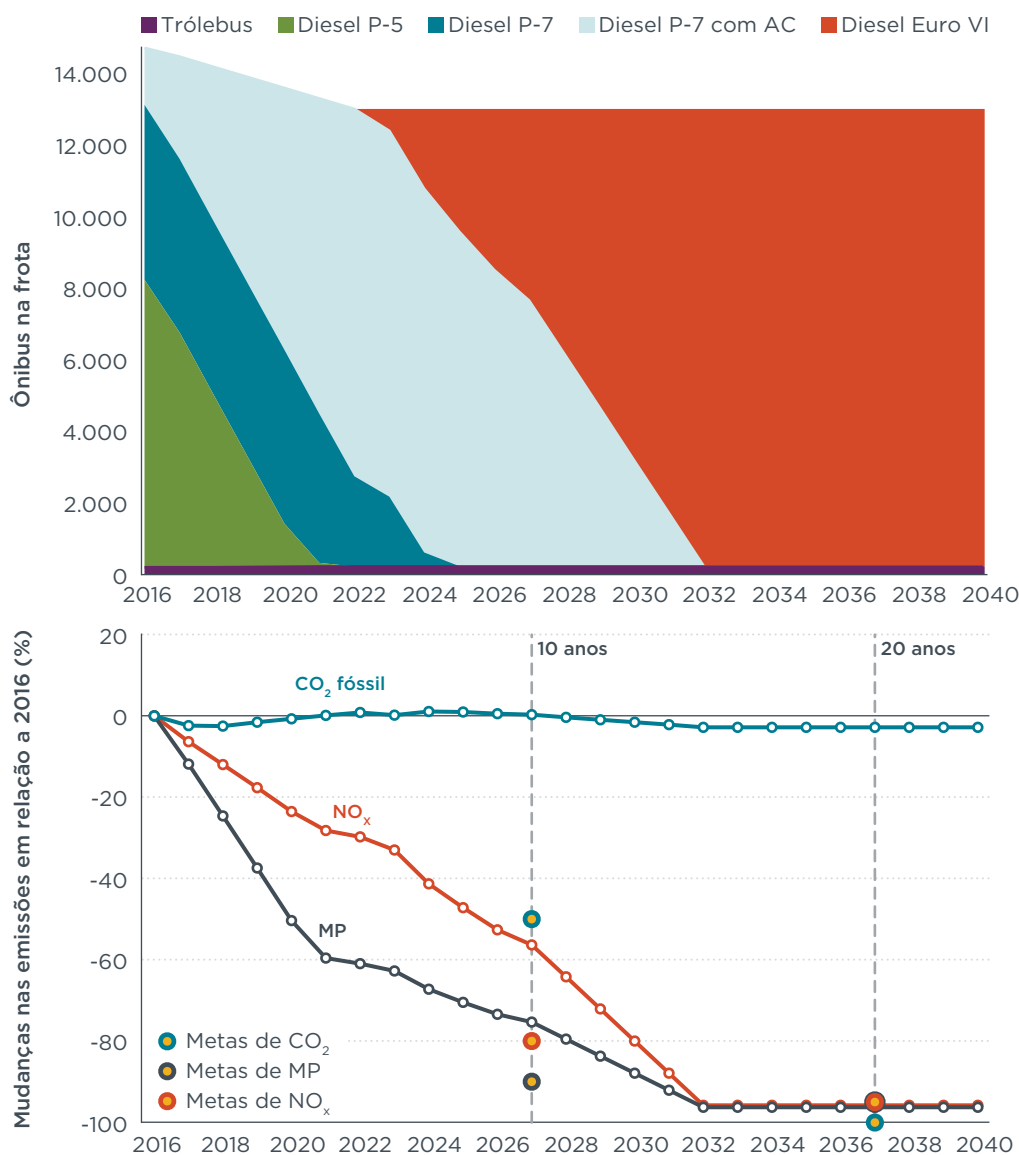


Figura 7. Mudanças projetadas na composição da frota (painel superior) e nas emissões (painel inferior) para o cenário de aquisições BAU.

Observamos que a estratégia de aquisição BAU não altera significativamente as emissões de CO_2 fóssil da frota de São Paulo. Alguns benefícios em termos de emissões são obtidos com o decréscimo de VKT no sistema reorganizado e o uso de misturas de maior percentual de biodiesel (B15). No entanto, eles são compensados pelo aumento do uso de ar-condicionado em toda a frota. A energia adicional de

combustível necessária para alimentar sistemas de ar-condicionado faz aumentar o consumo de energia desses ônibus em relação aos ônibus a diesel sem ar-condicionado, que compunham a maior parte da frota de referência (ver Tabela 4). É necessária uma ampla mudança para tecnologias de motor mais eficientes e, mais importante, combustíveis livres de carbono fóssil para atender às metas de redução de emissões de CO₂ fóssil nos prazos de 10 e 20 anos.

ESTRATÉGIAS DE AQUISIÇÃO PARA ALCANÇAR AS METAS DE MP E NO_x

Os resultados do cenário de aquisição BAU sugerem que as operadoras de transporte coletivo em São Paulo vão precisar se antecipar aos padrões nacionais para adquirir tecnologias Euro VI para suas frotas de ônibus. A maior parte das reduções de emissões de MP e NO_x exigidas pela Lei 16.802 deve ocorrer nos dez primeiros anos de implementação da lei. As decisões de aquisição de tecnologia no curto prazo vão influenciar fortemente a capacidade da frota de cumprir a lei, já que os ônibus comprados nos próximos anos ainda vão estar em circulação na data prevista para o alcance das metas de 10 anos. Há o risco de São Paulo não conseguir cumprir as metas de 10 anos para MP e NO_x se as transições para tecnologias Euro VI forem adiadas até a implementação, em 2023, dos padrões nacionais P-8.

Para investigar melhor o impacto do *timing* das transições para Euro VI na capacidade da frota de São Paulo de atender às metas de emissões de MP e NO_x da Lei 16.802, modelamos quatro cenários de aquisição em que tal transição ocorre, no mínimo, em 2019 ou é adiada para os anos seguintes, até 2022. Para cada cenário, assumimos que todos os novos ônibus adquiridos, a começar do ano de transição, são ônibus a diesel certificados de acordo com padrões de emissões equivalentes ao Euro VI. Consideramos que as compras anteriores ao ano de transição são de ônibus a diesel P-7, e que o número total de novos ônibus na frota é o mesmo em cada cenário. Os resultados são comparados com o cenário BAU, onde a transição para Euro VI começa em 2023.

Embora apliquemos os fatores de emissão de MP e NO_x para os ônibus a diesel a fim de modelar o desempenho das emissões Euro VI, os resultados representam outras tecnologias com certificação Euro VI, como motores a biodiesel ou GNC. É esperada alguma variação nas emissões entre as tecnologias Euro VI, mas a magnitude da redução de emissões em relação aos ônibus a diesel P-5 e P-7 da frota de referência deve ser semelhante.

A Figura 8 mostra as estimativas das emissões de MP e NO_x em 2027 da frota de ônibus para cada cenário de aquisição Euro VI. Essas estimativas representam as emissões ao final dos primeiros dez anos da implementação da Lei 16.802. As linhas tracejadas mostram o nível estimado da meta de redução de emissões de cada poluente no prazo de 10 anos. Estes resultados indicam que é necessária uma transição para tecnologias de motor Euro VI (ou mais limpas) até no máximo 2019 para atingir o nível de reduções de emissões compatível com a meta de 10 anos de MP. A meta de NO_x de 10 anos é alcançada com aquisições Euro VI a partir de 2019 ou 2020. Isso significa que, com as práticas usuais de substituição da frota, é improvável que as metas de MP e NO_x sejam cumpridas se a transição para Euro VI for adiada para 2020 ou mais tarde. Tal atraso exigiria medidas adicionais, como a retirada precoce de circulação do veículo (*i.e.*, aos 9 anos de uso ou antes), a fim de cumprir as metas de redução de emissões.

É importante ressaltar que, para os cenários em que as transições para Euro VI ocorrem em 2021, 2022 ou 2023, as emissões de MP e NO_x provenientes apenas dos ônibus a diesel P-7 presentes na frota em 2027 excedem os limites projetados pela Lei 16.802. Isso significa que, mesmo que ônibus elétricos de emissão zero fossem adquiridos nesses cenários, em lugar dos ônibus Euro VI, as metas de redução de emissões ainda não seriam atingidas.

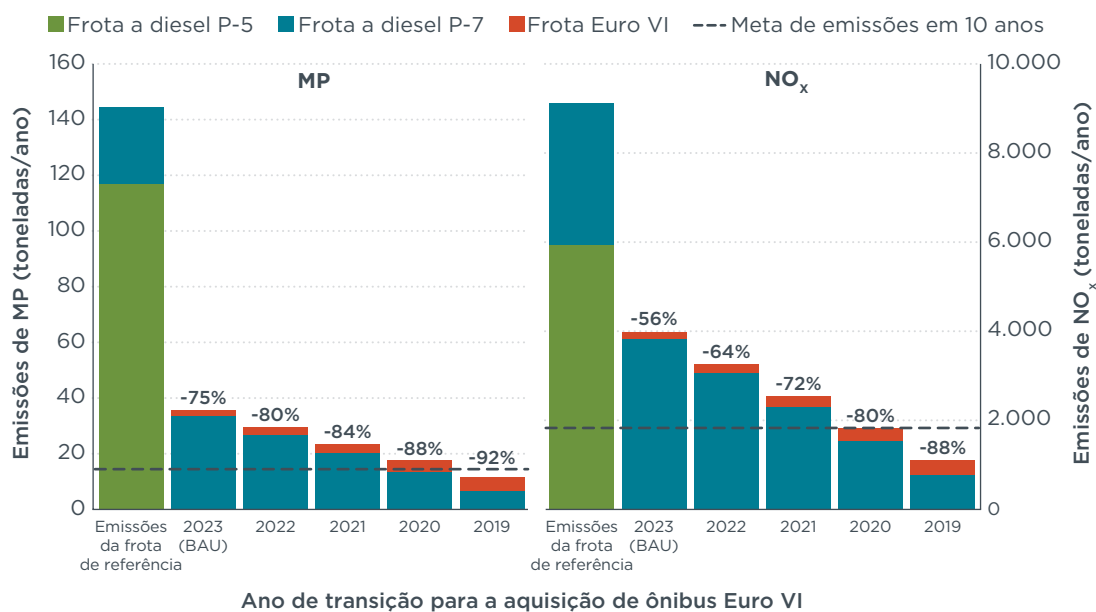


Figura 8. Estimativas das emissões de MP e NO_x para a frota de ônibus de transporte coletivo de São Paulo nos cenários de aquisição de transição para Euro VI. As estimativas de referência correspondem às emissões de 2016. As estimativas para 2027 são mostradas em cinco cenários, supondo-se que 100% dos novos ônibus têm desempenho de emissões equivalente ao padrão Euro VI a partir de 2023, 2022, 2021, 2020 ou 2019.

A conclusão de que é necessária uma transição para as tecnologias de motor Euro VI em 2019 para atingir as metas de redução de emissões de MP e NO_x é fundamentada no uso de fatores de emissão relatados na base de dados HBEFA. No recente edital de licitação de concessão, a SPTrans recomendou o uso de fatores de emissão alternativos para os ônibus a diesel P-5 e P-7. Esses fatores de emissão são derivados de estimativas publicadas em um inventário nacional de emissões de veículos automotores preparado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011). Como o MMA não reporta fatores de emissão para outras tecnologias de motor de ônibus, não utilizamos essas estimativas em nossa modelagem básica. No entanto, vale a pena considerar se a fonte de dados do fator de emissão influencia nossas conclusões sobre o cronograma necessário para as transições para Euro VI da frota de ônibus de São Paulo. Para tanto, repetimos nossa análise de emissões dos cinco cenários de aquisição usando estimativas de fator de emissão para os ônibus a diesel P-5 e P-7 informados no edital de licitação da concessão, complementados com as estimativas do HBEFA para as tecnologias Euro VI. Os resultados dessa avaliação são apresentados na Tabela 6, que mostra as reduções de emissões de MP e NO_x no prazo de 10 anos para cada cenário estimado usando as duas fontes de dados.

Há pouca diferença nas reduções de emissões estimadas usando os fatores de emissão do MMA para os ônibus a diesel P-5 e P-7 em comparação com a análise de base. Em cada caso, a Lei 16.802 é cumprida apenas por meio de uma transição para Euro VI a partir de 2019. Atrasos na aquisição dessas tecnologias de emissão mais baixa dificultam o alcance das grandes reduções de emissões na frota exigidas pela Lei 16.802.

Tabela 6. Reduções de emissões de MP e NO_x ao final do período de 10 anos de implementação em cinco cenários de aquisição Euro VI, calculadas usando duas fontes de dados de fator de emissão. As células com sombreado indicam cenários que atendem às metas de redução no prazo de 10 anos.

Ano da transição para Euro VI	Fatores de emissão do HBEFA		Fatores de emissão do MMA ^a	
	MP	NO _x	MP	NO _x
2023	-75%	-56%	-76%	-65%
2022	-80%	-64%	-79%	-71%
2021	-84%	-72%	-83%	-76%
2020	-88%	-80%	-87%	-82%
2019	-92%	-88%	-91%	-88%

^a Os fatores de emissão Euro VI não são fornecidos no conjunto de dados do MMA e, portanto, são considerados equivalentes aos relatados na base de dados do HBEFA.

A Figura 9 mostra a evolução tecnológica da frota e as estimativas de redução de emissões para o cenário de aquisições em que todos os ônibus comprados a partir de 2019 têm motor a diesel Euro VI e usam combustível diesel comercial. Este cenário alcança reduções suficientes nas emissões de MP e NO_x para atender às metas intermediárias e de longo prazo estabelecidas na Lei 16.802. No entanto, como aconteceu no cenário BAU, o uso continuado de motores a diesel alimentados por misturas de combustível compostas predominantemente por combustíveis fósseis não melhora as emissões de CO₂ fóssil da frota. Para cumprir as metas de redução de emissões de CO₂ fóssil, a transição para tecnologias de motor Euro VI deve ser acompanhada de uma mudança para combustíveis não fósseis.

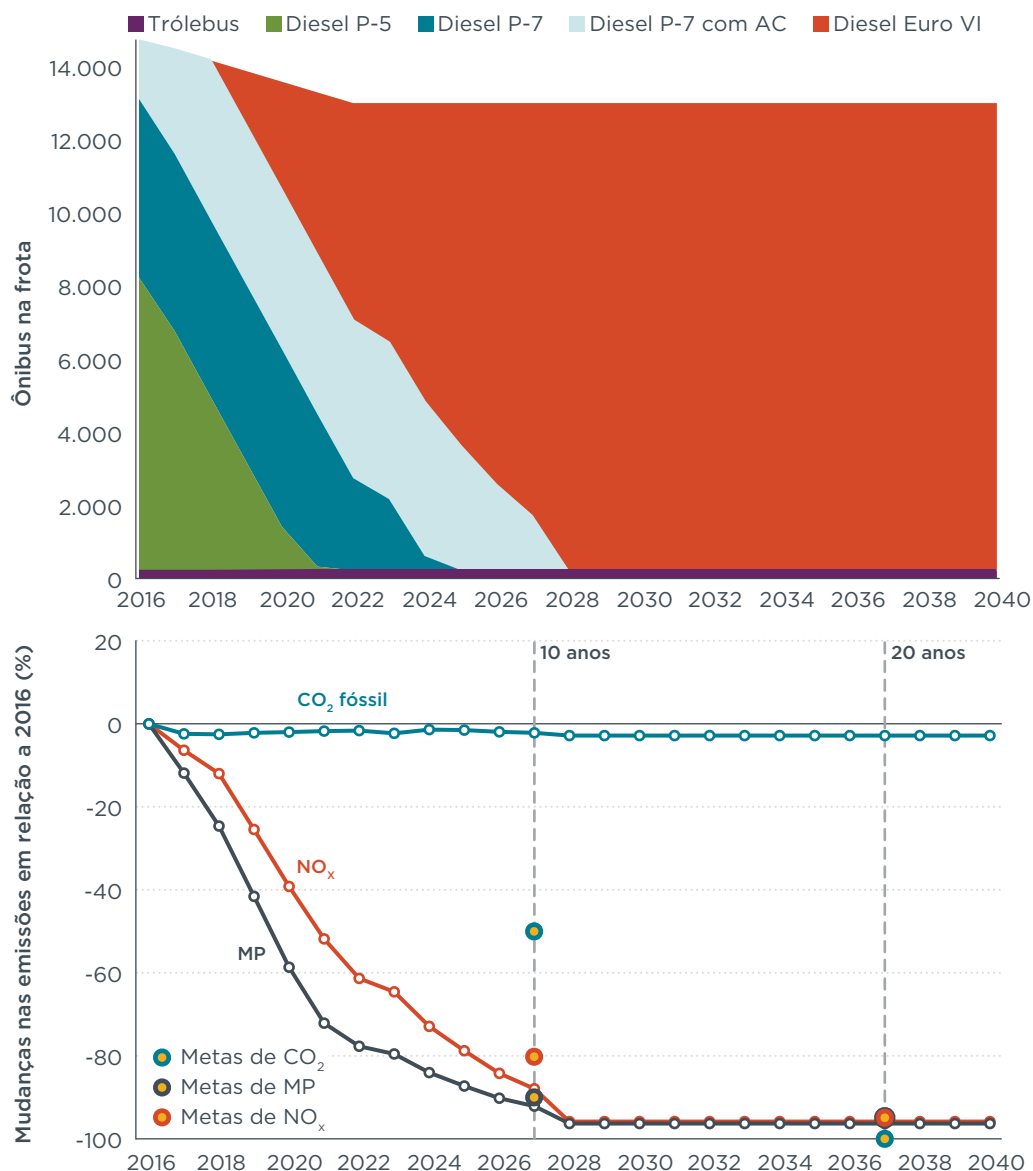


Figura 9. Mudanças projetadas na composição da frota (painel superior) e nas emissões (painel inferior) para um cenário de aquisições em que todos os novos ônibus a partir de 2019 são a diesel Euro VI equipados com ar-condicionado e usam combustível diesel comercial.

ESTRATÉGIAS DE AQUISIÇÃO PARA ALCANÇAR AS METAS DE CO₂ FÓSSIL

Na seção anterior, afirmamos que uma transição para tecnologias de motor Euro VI ou mais limpas a partir de 2019 é necessária para atender às metas de redução de emissões de MP e NO_x estabelecidas na Lei 16.802. Entretanto, se esses ônibus forem movidos a combustíveis fósseis, o progresso em direção às metas de CO₂ fóssil será limitado. Nesta seção, consideramos até que ponto as tecnologias de motor mais eficientes e os combustíveis não fósseis são necessários para que a frota de São Paulo atinja as metas intermediária e de longo prazo de redução de emissões de CO₂ fóssil.

Como ponto de partida, consideramos em que medida a tecnologia de motor e as combinações de combustível analisadas em nosso modelo podem melhorar o desempenho de emissões de CO₂ fóssil das tecnologias de ônibus e combustíveis usados na frota de referência. A Figura 10 apresenta nossas estimativas das emissões de escapamento de CO₂ fóssil por tecnologias alternativas de motor de ônibus de transporte coletivo e combustíveis em comparação com as emissões de ônibus a diesel P-5 ou P-7 usando combustível B7. Os

resultados são apresentados para um ônibus tipo padron e indicam a mudança relativa por quilômetro nas emissões que pode ser esperada da substituição de um ônibus a diesel da frota de referência por uma tecnologia alternativa (ANL, 2018).

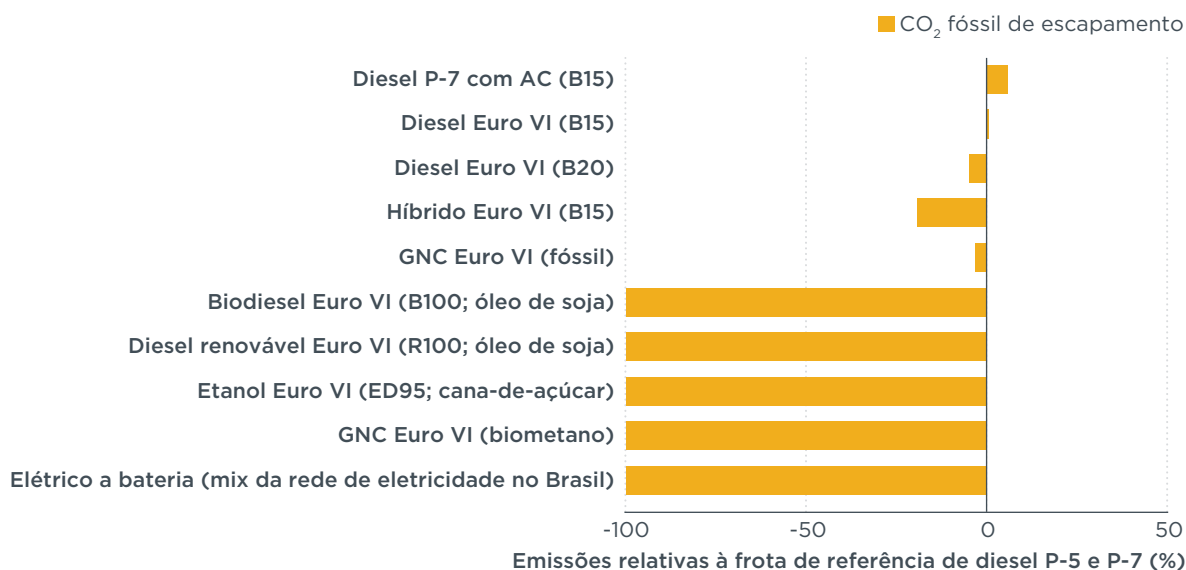


Figura 10. Mudanças nas emissões de escapamento de CO₂ fóssil (g/km) para alternativas de motor de ônibus de transporte coletivo urbano e combinações de combustível em relação aos ônibus a diesel P-5 e P-7 utilizando combustível B7. Os resultados são mostrados para um ônibus padron, embora estes dados também sejam representativos de outros tipos de ônibus na frota de São Paulo. Assume-se que todas as tecnologias de ônibus Euro VI e elétricos a bateria são equipadas com ar-condicionado.

Várias conclusões podem ser tiradas dessa comparação de tecnologias:

- » O uso de ar-condicionado nos ônibus a diesel P-7 abastecidos com combustível B15 aumenta as emissões de CO₂ fóssil em 6% em relação aos ônibus a diesel da frota de referência quando expressas em g/km. Os ônibus a diesel Euro VI oferecem benefícios em termos de eficiência em comparação com aqueles a diesel P-5 e P-7, embora a substituição de um ônibus a diesel P-5 ou P-7 da frota de referência (sem ar-condicionado) por um a diesel Euro VI, equipado com ar-condicionado e movido a combustível B15, não mudaria significativamente as emissões de CO₂ fóssil por quilômetro.
- » Os ônibus a diesel Euro VI usando maior porcentagem de misturas de biodiesel (B20), a GNC Euro VI usando combustível fóssil e híbridos diesel-elétrico Euro VI oferecem reduções de emissões de CO₂ relativamente baixas em relação aos ônibus a diesel P-5 e P-7 da frota de base, variando de 3% a 20%. Essas tecnologias não proporcionam grandes reduções de emissões de CO₂ fóssil, que são necessárias para cumprir a Lei 16.802.
- » Cinco combinações de tecnologia de motor e combustível não geram emissões de escapamento de CO₂ fóssil: ônibus elétricos a bateria; ônibus a diesel Euro VI usando 100% de misturas de diesel renovável ou biodiesel; ônibus a etanol Euro VI; e ônibus a GNC Euro VI abastecidos com biometano.

Esses resultados implicam que será necessária uma mudança significativa para tecnologias de motor e combustíveis sem emissões de escapamento de CO₂ fóssil para atingir a meta de redução de 50% nas emissões da frota de ônibus de transporte coletivo no prazo de 10 anos. Para alcançar as metas de MP e NO_x, todos os ônibus adquiridos a partir de 2019 provavelmente vão precisar ter um desempenho de emissões Euro VI ou melhor. Uma porcentagem desses novos ônibus também deve ser livre de combustível fóssil. Conforme já detalhado, essas opções incluem motores a combustão interna certificados de acordo com padrões de emissões equivalentes a Euro VI e

abastecidos com biocombustíveis ou ônibus elétricos de emissão zero. No modelo de substituição da frota aplicado em nossa análise, todos os novos ônibus a partir de 2028 têm de ser livres de combustível fóssil para atingir a meta de redução de 100% nas emissões de escapamento de CO₂ fóssil no prazo de 20 anos.

Na Figura 11, exemplificamos um cenário em que as metas de redução de emissões da Lei 16.802 são atendidas por meio da aquisição, em curto prazo, de tecnologias de motor a diesel Euro VI e livres de combustível fóssil e de uma transição completa para tecnologias livres de combustível fóssil a partir de 2028. Neste cenário, assumimos que 60% dos novos ônibus da frota entre 2019 e 2027 são livres de combustível fóssil e que 40% são a diesel Euro VI, utilizando combustível diesel comercial. Esse modelo de aquisição resulta em um total de 6.770 ônibus livres de combustível fóssil operando na frota no início de 2028 e uma frota 100% livre de combustível fóssil até o início de 2038. Nesse caso, as reduções estimadas de emissões dos dois poluentes atmosféricos, assim como do CO₂ fóssil, em toda a frota são suficientes para cumprir a Lei 16.802.

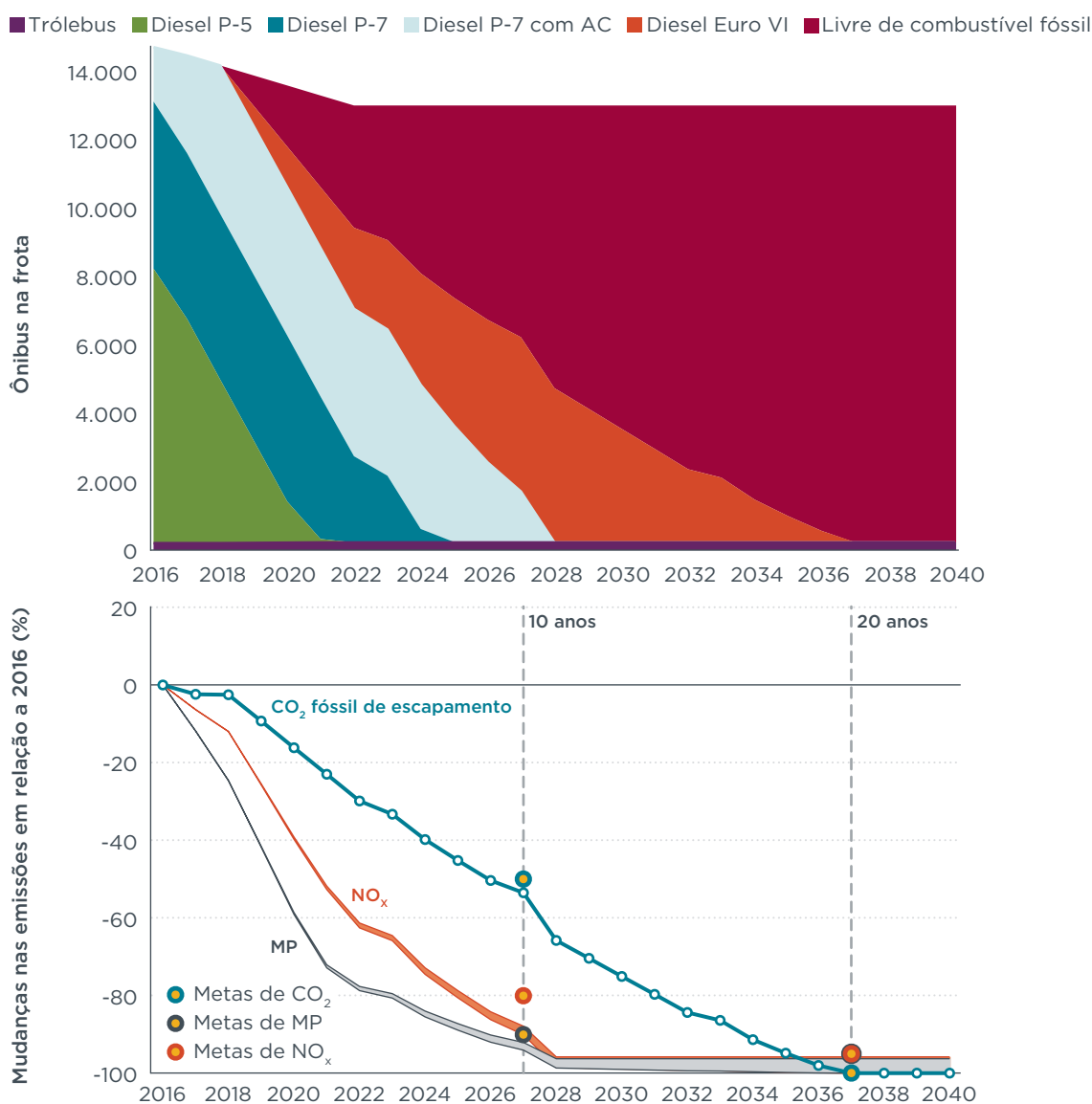


Figura 11. Mudanças projetadas na composição da frota (painel superior) e nas emissões (painel inferior) para um cenário de aquisições em que as metas de redução intermediária e final são alcançadas por meio da aquisição, em curto prazo, de tecnologias de ônibus a diesel Euro VI e livres de combustível fóssil e da transição completa, em longo prazo, para a aquisição de ônibus livres de combustível fóssil. Para as reduções de emissões de MP e NO_x, o intervalo de estimativas reflete o desempenho ligeiramente melhor das opções de ônibus elétricos a bateria de emissão zero em comparação com os motores a combustão interna com certificação Euro VI.

Se a transição para a aquisição de ônibus livres de combustível fóssil for adiada para além de 2019, vai ser preciso que uma porcentagem maior de novos ônibus na frota a cada ano seja livre de combustível fóssil. Por exemplo, se a transição for adiada para 2020, estimamos que 70% dos novos ônibus entre 2020 e 2027 terão de ser livres de combustível fóssil. Da mesma forma, o adiamento para 2021 exigiria que cerca de 80% dos novos ônibus fossem livres de combustível fóssil entre 2021 e 2027. Por fim, nossa modelagem indica que, se o início da aquisição de ônibus livres de combustível fóssil for adiado para 2022, 95% das compras entre 2022 e 2027 deverão ser de ônibus livres de combustível fóssil para atingir a meta de CO₂ fóssil no prazo de 10 anos. Se essa transição for adiada ainda mais, será difícil alcançar as metas sem a retirada de circulação e a substituição antecipadas de ônibus que ainda não cumpriram sua vida útil de 10 anos. Essas conclusões estão resumidas na Figura 12, que mostra o número total de novos ônibus na frota para estratégias de aquisição de combustíveis não fósseis.

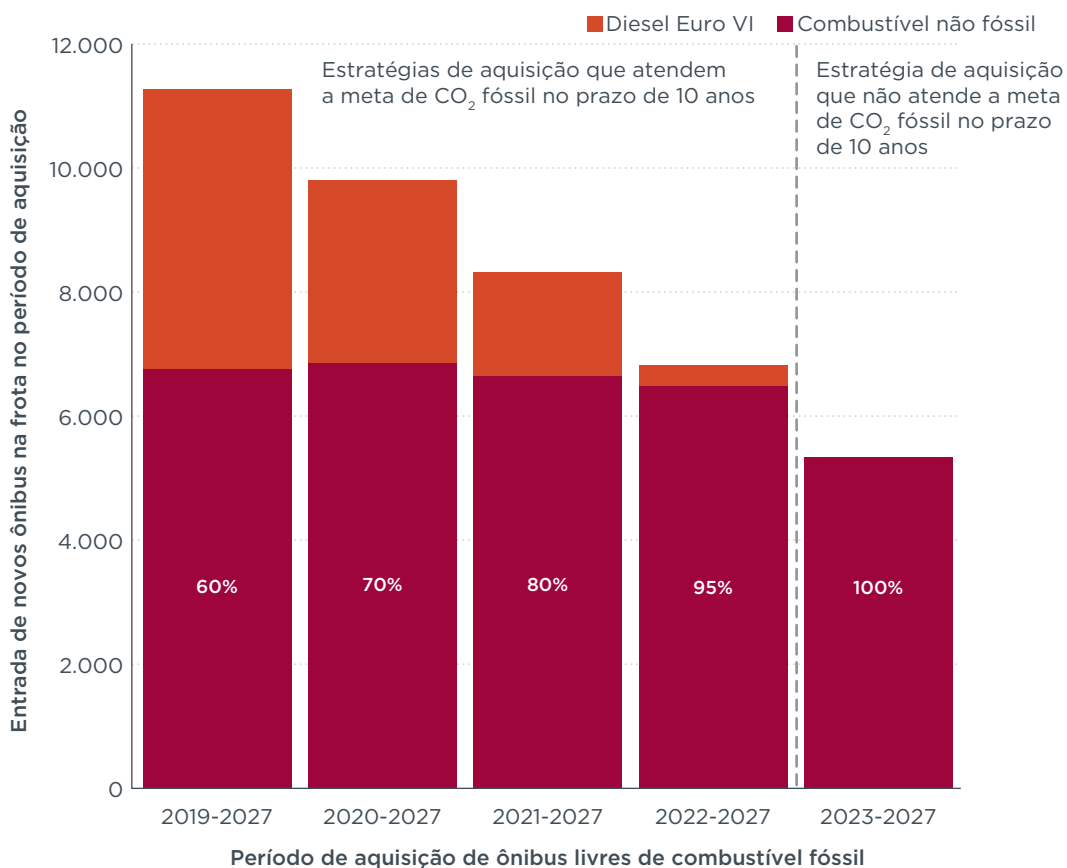


Figura 12. Estratégias de aquisição de ônibus livres de combustível fóssil. Cada barra mostra o número de novos ônibus, por tecnologia, na frota para um determinado período de aquisição. Os rótulos indicam a porcentagem de novos ônibus considerados livres de combustível fóssil para cada período de aquisição. Para cada cenário, todos os ônibus que entram na frota antes do início do respectivo período de aquisição de ônibus livres de combustível fóssil são considerados a diesel Euro VI.

Cabe observar que apresentamos apenas resultados de emissões de escapamento de CO₂ fóssil na Figura 11, já que a redução dessas emissões é independente da tecnologia livre de combustível fóssil selecionada (*i.e.*, todas as tecnologias sem combustível fóssil oferecem o mesmo nível de redução de emissões em relação à frota de referência). As reduções de emissões mostradas no cenário acima são alcançadas independentemente de qual tecnologia não fóssil, ou mistura de tecnologias, é selecionada, desde que a aquisição esteja no nível indicado nos parágrafos anteriores.

IMPACTOS CLIMÁTICOS DAS ESTRATÉGIAS DE AQUISIÇÃO EM CONFORMIDADE COM A LEI 16.802

A Lei 16.802 foi formulada para reduzir o uso de combustíveis fósseis nos ônibus de São Paulo, daí a decisão de usar as emissões de escapamento de CO₂ como medida para regular as emissões de poluentes climáticos. Como afirmado anteriormente, essa abordagem não é adequada para a avaliação dos impactos climáticos de combustíveis não fósseis usados em ônibus de transporte coletivo, como biocombustíveis ou eletricidade, em que as emissões associadas à produção e distribuição de matérias-primas e combustíveis podem ser significativas. Além do CO₂, a produção de combustíveis para transporte e suas matérias-primas, assim como seu uso em veículos, gera emissões de outros poluentes climáticos, como o carbono negro e os GEE, a exemplo de CH₄ e N₂O. Como a Lei 16.802 regula apenas as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, há o risco de que sua implementação leve a consequências não planejadas, apoiando opções de tecnologia e combustível que não resultariam nas reduções de emissões climáticas esperadas.

Na seção anterior, apresentamos evidências indicando que transições extensas de curto prazo para opções de ônibus de transporte coletivo livres de combustível fóssil são necessárias para atender às metas de redução de emissões de escapamento de CO₂ fóssil previstas na Lei 16.802. Ao considerar as estratégias de aquisição em conformidade com essa lei, não fizemos distinção entre as tecnologias livres de combustível fóssil, pois todas proporcionam o mesmo grau de redução nas emissões de escapamento de CO₂ fóssil em relação à frota de referência. Nesta seção, estendemos nossa análise para considerar as emissões de CO₂ do ciclo de vida do combustível, bem como de poluentes climáticos que não o CO₂, a fim de avaliar de forma mais abrangente os impactos climáticos das opções de ônibus de transporte coletivo livres de combustível fóssil.

Os dados para estimar as emissões de GEE do ciclo de vida do combustível são provenientes do modelo AFLEET do Argonne National Laboratory (ANL, 2018), que informa os dados de emissões do ciclo de vida de uma ampla seleção de combustíveis de transporte derivados do modelo ANL GREET1 2018.⁴ Para biocombustíveis baseados em culturas, as emissões associadas a mudanças indiretas no uso da terra (iLUC) podem ser significativas. As emissões associadas a iLUC ocorrem quando o aumento da demanda por biocombustíveis modifica as culturas de alimento, levando à conversão de terras não agrícolas em terras cultiváveis. Tipicamente, essas emissões são estimadas usando modelos econômicos. Estudos recentes de modelagem de iLUC realizados por conta do aumento da demanda por biocombustíveis no estado da Califórnia (California Air Resources Board, 2016) e na União Europeia (Valin et al., 2015) sugerem que as emissões associadas a iLUC podem responder por uma parcela relevante das emissões do ciclo de vida de GEE para certos biocombustíveis, como aqueles à base de óleo de soja. Ambos os estudos incluem estimativas de iLUC para o etanol de cana-de-açúcar; porém, desconhecemos modelagens de iLUC semelhantes e abrangentes que tenham sido feitas para outros biocombustíveis brasileiros.

Há incerteza na aplicação dos fatores de iLUC desenvolvidos para outras regiões no Brasil; apesar disso, assumir que as emissões associadas a iLUC sejam zero arrisca subestimar o impacto climático do aumento da demanda por biocombustíveis. Por isso, optamos por apresentar resultados para dois casos nesta seção. Os resultados de base referem-se ao caso em que as emissões associadas a iLUC não são incluídas na análise. Além disso, é mostrado um intervalo para o caso em que os fatores de iLUC

⁴ O fator de emissão de CO₂ do ciclo de vida do combustível para eletricidade (144 g/kWh) foi calculado usando o mix brasileiro de geração de eletricidade de 2016: 65,8% de energia hidrelétrica, 9,8% de gás natural, 8,8% de biomassa, 5,8% de energia eólica, 4,5% de carvão, 2,7% de energia nuclear e 2,6% de petróleo (International Energy Agency, 2018).

para biocombustíveis líquidos são incluídos na análise de emissões. Os pontos finais do intervalo representam os resultados calculados usando os fatores de iLUC relatados por CARB (2016) e Valin et al. (2015).⁵

A Figura 13 baseia-se na Figura 10, que mostrou as emissões de escapamento de CO₂ fóssil por quilômetro para as tecnologias alternativas de ônibus de transporte coletivo e combustíveis relativos aos ônibus a diesel da frota de referência, adicionando estimativas semelhantes às emissões de CO₂ do ciclo de vida do combustível. A Figura 13 mostra que mudanças relativas nas emissões de escapamento e do ciclo de vida são semelhantes para os ônibus que usam misturas de combustível compostas majoritariamente por fósseis (B15, GNC). Os ônibus movidos a biocombustível e elétricos a bateria não geram emissões de escapamento de CO₂ fóssil; no entanto, as emissões do ciclo de vida do combustível podem variar consideravelmente, em especial quando as emissões associadas a iLUC são incluídas para biocombustíveis baseados em culturas. À luz das premissas assumidas nesta análise, as emissões de ciclo de vida de CO₂ dos ônibus elétricos a bateria e ônibus movidos a biometano de aterros sanitários são significativamente mais baixas do que as emissões dos ônibus a diesel da frota de referência, que usam combustível B7. As reduções de emissões para esses ônibus livres de combustíveis fósseis variam de 85% a 95%.

As estimativas das emissões de CO₂ do ciclo de vida dos ônibus abastecidos com diesel renovável de óleo de soja ou biodiesel são sensíveis à consideração das emissões associadas a iLUC. No caso em que as emissões de iLUC são definidas como zero, ambas as opções proporcionam economia considerável de CO₂ em relação aos ônibus a diesel da frota de referência. No entanto, quando se levam em conta as emissões associadas a iLUC, os benefícios de emissões são reduzidos e, aplicando-se o fator mais alto de iLUC do óleo de soja relatado por Valin et al., as emissões do ciclo de vida de CO₂ são, na verdade, até 60% superiores às estimadas para os ônibus a diesel da frota de referência. Esses achados sugerem que há uma incerteza importante sobre a eventual obtenção de benefícios, em termos de emissões de CO₂, com as transições para biocombustíveis à base de soja.

Os resultados para os ônibus movidos a etanol são menos sensíveis à consideração das emissões de iLUC. Ambos os estudos internacionais relatam estimativas semelhantes para o fator iLUC do etanol de cana-de-açúcar, que são bem mais baixas do que as estimativas para o fator iLUC do biodiesel de óleo de soja. Como resultado, os ônibus a etanol mantêm benefícios significativos de emissões do ciclo de vida em relação aos ônibus a diesel da frota de referência, mesmo quando as emissões de iLUC são incluídas.

Para todos os ônibus a biocombustível, as estimativas de emissões são sensíveis à matéria-prima do combustível tomada para a modelagem. Os biocombustíveis com intensidade de emissão do ciclo de vida de CO₂ menor do que o considerado aqui ofereceriam maiores benefícios em termos de emissões de CO₂ (e vice-versa para os biocombustíveis com maior intensidade de emissão de CO₂).

5 Os valores reportados por Valin et al. foram ajustados linearmente para corresponder ao período de amortização de 30 anos aplicado na avaliação do CARB. Aqui, assumimos simplificada que todas as emissões de GEE relacionadas à mudança no uso da terra são de CO₂.

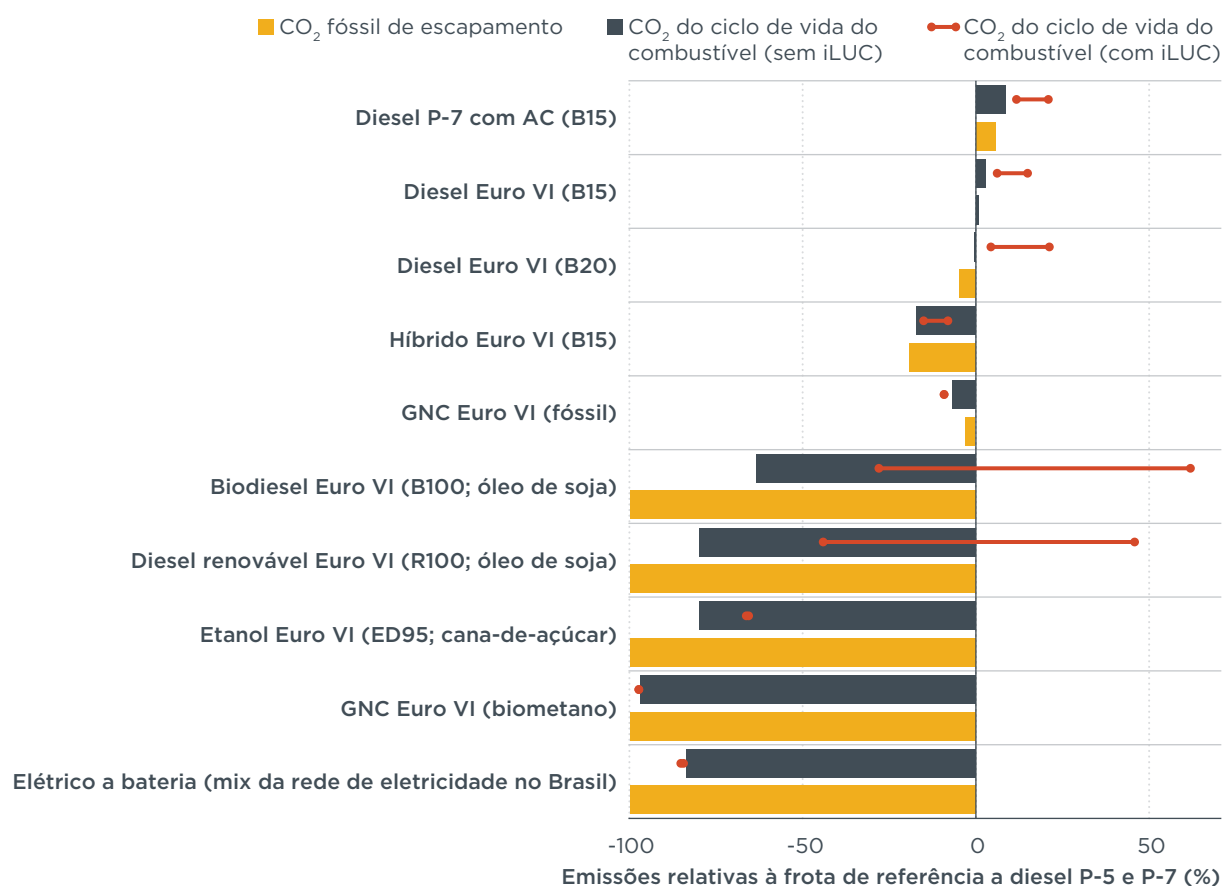


Figura 13. Alterações nas emissões de escapamento e do ciclo de vida do CO₂ (g/km) para motores alternativos de ônibus de transporte coletivo e combinações de combustível em relação aos ônibus a diesel P-5 e P-7 que usam combustível B7. Os resultados são mostrados para um ônibus padron, embora esses dados também representem outros tipos de ônibus na frota de São Paulo. Considere-se que todas as tecnologias de ônibus Euro VI e ônibus elétricos a bateria são equipadas com ar-condicionado.

A Figura 14 apresenta as emissões cumulativas de poluentes climáticos da frota de ônibus de São Paulo para o período de 2016 a 2040. São apresentadas estimativas para quatro cenários de aquisição em conformidade com a Lei 16.802 indexados ao cenário BAU. Aqui, consideramos as emissões do ciclo de vida do combustível dos GEE CO₂, CH₄ e N₂O, bem como as emissões de escapamento de carbono negro.⁶ Os cenários de aquisição em conformidade com a Lei 16.802 seguem o caminho tecnológico apresentado na Figura 11, diferindo apenas quanto à opção de tecnologia não fóssil selecionada para aquisição. Os resultados para o diesel renovável à base de soja são semelhantes àqueles apresentados para o biodiesel de soja e, portanto, foram excluídos da figura.

Esses resultados mostram que todos os cenários de aquisição em conformidade com a Lei 16.802 reduzem as emissões de carbono negro em relação ao cenário BAU. Em cada caso, as emissões acumuladas de carbono negro ao longo do período de modelagem de 25 anos são reduzidas em aproximadamente 30%. Outros ônibus a diesel de tecnologia mais antiga presentes na frota de referência são responsáveis pela maior parte do carbono negro emitido durante esse período.

⁶ As emissões de CO₂, CH₄ e N₂O são estimadas segundo a abordagem descrita na Equação 1. As emissões de carbono negro são calculadas aplicando perfis de especiação de MP_{2,5} específicos por tecnologia desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos para estimativas de emissões de MP modeladas para cada cenário de aquisição (US EPA, 2018).

As emissões de outros poluentes climáticos têm maior variabilidade entre os cenários de aquisição. Nossas estimativas indicam que a transição para os ônibus a GNC movidos a biometano proporciona o maior benefício, em termos de emissões de CO₂, entre as opções de combustíveis não fósseis; no entanto, esse cenário também está associado a mais de um fator no aumento nas emissões de CH₄ em relação ao cenário BAU.

As reduções de emissões de ciclo de vida de CO₂ do combustível no cenário de aquisição de biodiesel são, como descrito acima, sensíveis ao tratamento das emissões associadas a iLUC. No cenário do biodiesel, as emissões acumuladas de CH₄ foram estimadas em ~30% menores do que no cenário BAU, enquanto as emissões de N₂O são 4,3 vezes mais altas. Aumentos semelhantes nas emissões de N₂O são observados no cenário de aquisição de etanol, embora as transições para os ônibus a etanol tenham gerado maiores benefícios em termos de emissões de CO₂ do que outras opções de biocombustível líquido. Finalmente, o cenário de aquisição de ônibus elétricos a bateria foi o único em conformidade com a Lei 16.802 em que as emissões de todos os poluentes climáticos foram reduzidas em relação ao cenário BAU. Neste caso, as emissões acumuladas de CO₂, CH₄ e N₂O de 2016 a 2040 são todas de 30% a 50% inferiores às emissões no cenário BAU.

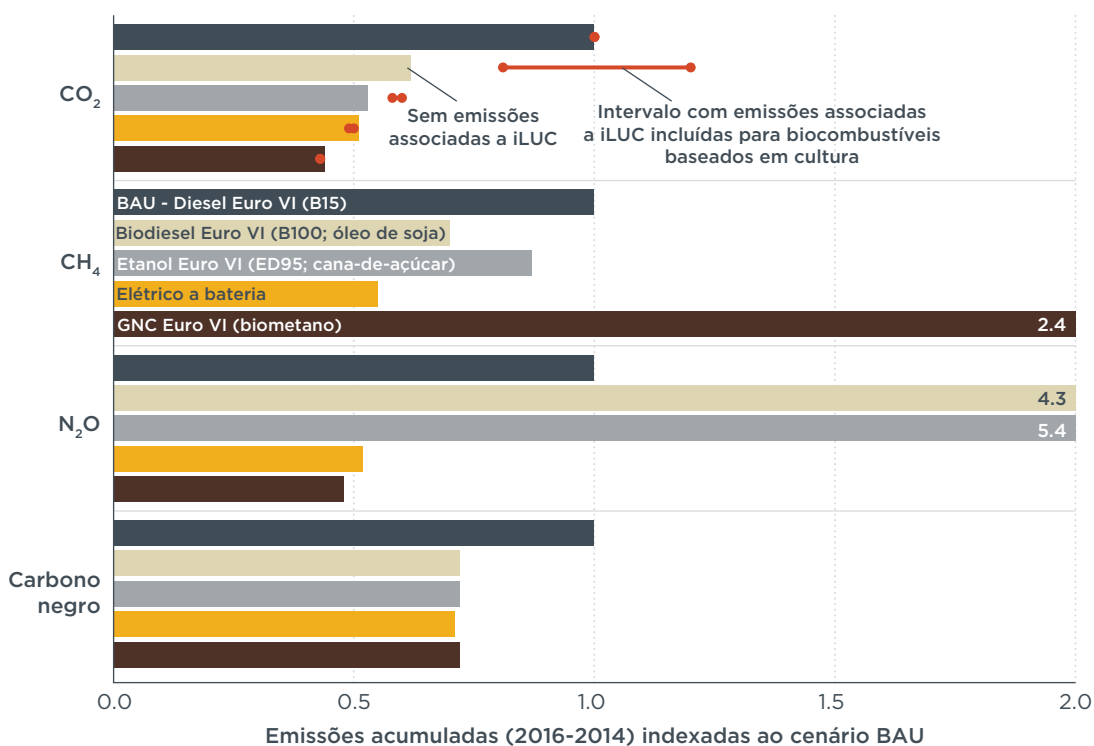


Figura 14. Emissões acumuladas de poluentes climáticos, de 2016 a 2040, para os cenários de aquisição em conformidade com a Lei 16.802, indexados ao cenário BAU. Para cada cenário, assumiu-se que 60% dos ônibus que entram na frota entre 2019 e 2027 e 100% dos novos ônibus a partir de 2028 têm a tecnologia de motor livre de combustível fóssil e a combinação de combustível indicadas.

Como uma etapa final na avaliação dos impactos climáticos dos cenários de aquisição em conformidade com a Lei 16.802, as estimativas anuais de emissões de poluentes climáticos para cada cenário foram combinadas com métricas absolutas de mudança de temperatura global (Shindell et al., 2017) para calcular a mudança média de temperatura global de 2016 a 2040 associada às emissões da frota de ônibus de transporte coletivo de São Paulo. Os resultados são mostrados na Figura 15, divididos por contribuições por CO₂ e poluentes que não o CO₂.

Na análise de base, a mudança de temperatura em 2040 associada às emissões de 2016 a 2040 para cada cenário de aquisição em conformidade com a Lei 16.802 é menor do que no cenário BAU, com a maior redução relativa (60%) estimada para o cenário de ônibus elétricos a bateria. Quando incluídas as emissões associadas a iLUC, o cenário do biocombustível não oferece melhora em comparação com o caso BAU. Para os cenários de aquisição compatíveis com a lei, a mudança de temperatura associada às emissões de poluentes que não o CO₂ atinge o pico em 2020 e cai substancialmente no período de 2020-2030, demonstrando os benefícios do controle de poluentes climáticos de curta duração, como o carbono negro. O aumento pós-2030 na mudança de temperatura associada a poluentes que não o CO₂ no cenário com biometano está ligado a maiores emissões de CH₄ para essa tecnologia. As transições para ônibus elétricos a bateria são projetadas para praticamente eliminar a mudança de temperatura associada às emissões de poluentes que não o CO₂ até 2040.

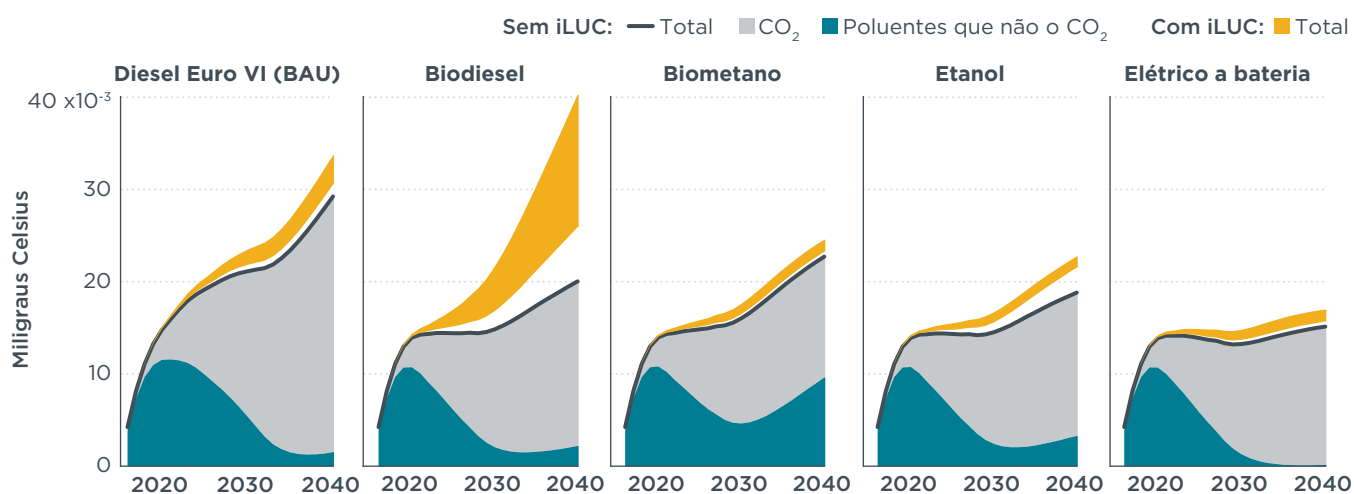


Figura 15. Temperaturas no período 2016-2040 relacionadas às emissões dos ônibus de transporte coletivo de São Paulo nos cenários de aquisição BAU e compatíveis com a Lei 16.802. Poluentes que não o CO₂ incluem CH₄, N₂O, carbono negro, NO_x e carbono orgânico particulado. Um miligrau equivale a um milésimo de grau Celsius.

AValiação DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

Até aqui, nossa análise considerou apenas o desempenho, em termos de emissões, de tecnologias alternativas de motor e opções de combustível. Cenários de aquisição de longo prazo foram desenhados sem levar em conta o custo dessas tecnologias e combustíveis ou as potenciais barreiras e desafios à sua implementação. O custo, em especial, é um componente importante a ser ponderado. Se as tecnologias e os combustíveis de emissão zero e livres de fuligem não forem financeiramente competitivos com os ônibus a diesel P-5 e P-7 da frota de referência, pode não ser viável para as operadoras fazer a transição para eles na escala necessária para cumprir a Lei 16.802 sem mudanças nos métodos de remuneração praticados nos contratos de concessão. Por outro lado, se os custos assumidos pelas operadoras para possuir e operar ônibus mais limpos forem iguais ou inferiores àqueles das tecnologias e dos combustíveis utilizados atualmente, o argumento em apoio às transições de tecnologia é fortalecido.

Nesta seção, exploramos os custos de tecnologias alternativas de ônibus de transporte coletivo por meio de uma avaliação do custo total de propriedade (TCO, do inglês *total cost of ownership*) das despesas de capital e operacionais incorridas durante a vida útil de um ônibus tipo padron operando na frota de São Paulo. O TCO é definido como a soma dos custos para adquirir, operar e manter o veículo e sua infraestrutura de abastecimento durante determinado período. A Tabela 7 sintetiza os componentes do TCO considerados para esta análise. Como o objetivo é avaliar os custos que dependem da seleção da tecnologia do ônibus, não são avaliados componentes de custo como administração, pessoal, licenciamento, registro e seguro. A inclusão desses custos não alteraria o resultado desta análise.

Tabela 7. Componentes do custo total de propriedade (Miller, Minjares, Dallmann, & Jin, 2017).

Categoria	Componente	Definição
Aquisição do ônibus e da infraestrutura	Entrada	Pagamento inicial para a compra do ônibus ou da infraestrutura. Considera-se que o valor remanescente é financiado.
	Financiamento	Pagamentos de amortização e juros por determinado período.
	Valor de revenda	Se o tempo de operação planejado for menor que a vida útil do ônibus, esse fluxo de caixa positivo considera o valor de revenda do veículo depreciado.
Operação e manutenção	Abastecimento	Custo anual para abastecer o veículo, determinado pela eficiência do combustível, pela distância percorrida e pelo preço do combustível.
	Outros custos operacionais	Inclui o custo do ARLA 32 para ônibus a diesel e híbridos diesel-elétricos com sistemas de redução catalítica seletiva.
	Manutenção do ônibus	Custo de manutenção regular de ônibus. Inclui pneus, peças, lubrificantes etc. Não inclui custos com pessoal.
	Manutenção da infraestrutura	Custo de manutenção da infraestrutura e operações, quando não incluído no preço de varejo do combustível.
	Revisão	Para aquisições de ônibus que não incluem uma garantia vitalícia, uma revisão geral na metade da vida útil inclui o custo de substituição da bateria, para ônibus elétricos, e uma revisão de motor para outros ônibus. Para esta análise, assumimos que a garantia da bateria cobre toda a vida útil do veículo.

O TCO é estimado para sete tecnologias de motor de ônibus de transporte coletivo e opções de combustível. Nossa análise se concentrou em ônibus do tipo padron, que

são o tipo mais comum na frota de São Paulo. No entanto, comparações relativas entre tecnologias costumam ser representativas de outros tipos de ônibus também.

Para calcular o TCO de cada tecnologia de ônibus, seguimos a metodologia desenvolvida por Miller et al. (2017) para uma análise do custo de frotas de ônibus de transporte coletivo livres de fuligem em 20 megacidades do mundo, posteriormente refinada para o caso de São Paulo por Slowik, Araujo, Dallmann, & Façanha (2018). Os principais dados para esta modelagem de custos para os ônibus a diesel P-7 da frota de referência foram extraídos diretamente dos relatórios anuais publicados pela SPTrans (2017), que contêm informações financeiras detalhadas sobre os custos de operação do sistema de transporte público do município. Dados semelhantes para outras tecnologias de ônibus foram obtidos de uma revisão da literatura. Uma lista completa das fontes de dados e das premissas adotadas nesta avaliação do TCO está incluída no apêndice. Um tratamento mais abrangente da abordagem de TCO aplicada aos ônibus de São Paulo pode ser encontrado em Slowik, Araujo, Dallmann, & Façanha (2018). A Tabela 8 sintetiza os valores estimados para os principais componentes de custo usados na análise. Outras premissas incluem:

- » a vida útil de todas as tecnologias de ônibus é de 10 anos;
- » a atividade anual é de 71.000 km/ano (ver Figura 7);
- » custos em anos futuros são descontados em 7% (Akbar, Minjares, & Wagner, 2014);
- » o financiamento para as despesas de capital para a aquisição de ônibus e infraestrutura consiste em uma entrada de 50%, sendo o restante coberto por um empréstimo com prazo de cinco anos e taxa de juros real de 7,6%;
- » a depreciação é de 8% ao ano para todos os tipos de ônibus. O valor do veículo depreciado no final do seu prazo de propriedade é tratado como um fluxo de caixa positivo.

Tabela 8. Valores estimados para os principais componentes de custo utilizados na análise do custo total de propriedade de um ônibus padron. Os dados e as premissas assumidas para calcular essas estimativas encontram-se no apêndice.

	Diesel P-7	Diesel Euro VI	Híbrido Euro VI	GNC Euro VI	Biodiesel Euro VI (B100)	Etanol Euro VI	Elétrico a bateria ^a
Valor de compra (R\$/ônibus)	546.073	556.995	819.110	611.602	556.995	737.199	955.628
Custos de infraestrutura (R\$/ônibus)	0	0	0	110.000	0	0	161.000
Custos de abastecimento (R\$/km)	1,85	1,75	1,40	1,18	1,93	2,18	0,83
Custos de manutenção (R\$/km)	0,77	0,77	0,66	1,08	0,88	1,08	0,58

^aAssume-se que o ônibus elétrico a bateria seja recarregado em um terminal durante a noite. Para informações sobre estimativas de custo para outros tipos de ônibus elétricos a bateria/outras estratégias de recarga (por exemplo, recarga em rota), ver Slowik, Araujo, Dallmann, & Façanha (2018).

A Figura 16 apresenta estimativas de TCO para um ônibus convencional a diesel P-7 equipado com ar-condicionado, bem como seis tecnologias alternativas de ônibus consideradas nesta avaliação: a diesel Euro VI, híbrido diesel-elétrico Euro VI, a GNC Euro VI, a biodiesel Euro VI, a etanol Euro VI e elétricos a bateria. As estimativas representam o valor líquido de todos os custos modelados incorridos durante um período de propriedade de 10 anos. As estimativas do TCO são divididas em quatro categorias principais: custos líquidos de aquisição do ônibus, custos líquidos de aquisição da infraestrutura, custos operacionais e custos de manutenção.

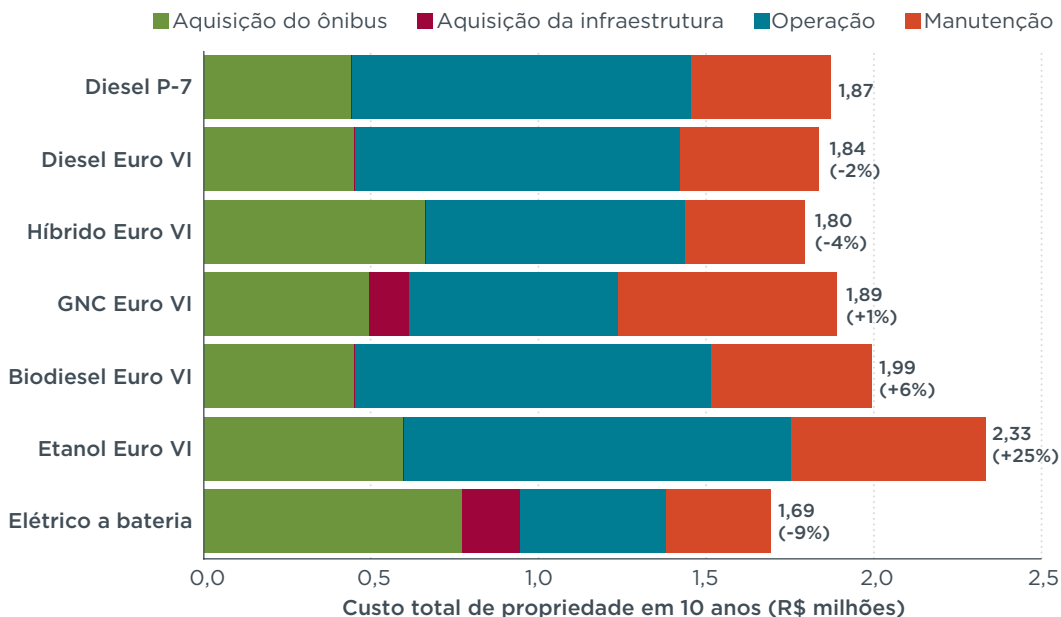


Figura 16. Estimativas do custo total de propriedade, em um período de 10 anos, para ônibus tipo Padron LE de tecnologia convencional e alternativa em São Paulo. Os rótulos dos dados indicam a contribuição de cada componente de custo para as estimativas. As porcentagens mostram a variação no custo total de propriedade em relação à tecnologia a diesel P-7 da frota de referência. Os custos de aquisição incluem a entrada e as prestações do financiamento menos o valor de revenda do ônibus ao término do período de propriedade.

Nesta avaliação, o TCO de um ônibus convencional padron a diesel P-7 é estimado em R\$ 1,87 milhão. Os custos operacionais representam mais da metade dos custos totais ao longo da vida útil do ônibus a diesel, com o restante dividido de forma mais ou menos igual entre a aquisição do ônibus e a manutenção regular. A composição do custo do ônibus a diesel Euro VI é semelhante, embora, neste caso, o preço de compra ligeiramente maior que o do ônibus a diesel P-7 seja compensado por despesas operacionais menores, o que resulta em um TCO um pouco menor (R\$ 1,84 milhão). Essa dinâmica também se reflete na composição do TCO do ônibus híbrido diesel-elétrico. Estima-se que o preço de compra desta tecnologia seja 50% mais alto que o do ônibus a diesel P-7 da frota de referência. No entanto, a maior eficiência energética do ônibus híbrido e os custos de manutenção mais baixos resultam em economia de custos operacionais durante toda a vida útil do ônibus e em um TCO cerca de 4% menor que o do ônibus a diesel P-7.

Estima-se que o TCO dos dois tipos de ônibus a biocombustível considerados nesta análise, a biodiesel e etanol, seja superior ao dos ônibus a diesel P-7 da frota de referência. Em ambos os casos, os custos de abastecimento e manutenção por quilômetro são mais altos do que aqueles para os ônibus a diesel que utilizam combustível diesel comercial B10, o que implica custos operacionais elevados durante a vida útil. O TCO estimado do ônibus a etanol foi o mais alto de todas as tecnologias consideradas: 25% maior do que a dos ônibus a diesel P-7.

Esses resultados mostram que os ônibus elétricos a bateria competem com os da frota de referência em termos de TCO, com custos estimados para o ciclo de vida 9% menores que os dos ônibus a diesel P-7. De fato, os ônibus elétricos a bateria têm o menor TCO de todas as tecnologias consideradas nesta análise. Apesar dos custos relativamente maiores de aquisição do veículo e da infraestrutura para essa tecnologia, os custos reduzidos de operação e manutenção geram economia ao longo da vida útil do ônibus em comparação com os ônibus convencionais a diesel. A principal economia decorre da

diminuição nas despesas com abastecimento, equivalente a cerca da metade do que é gasto pelos ônibus a diesel.

Com exceção do ônibus a etanol, os custos totais de propriedade e de operação ao longo da vida útil das opções de ônibus de tecnologia alternativa encontram-se dentro de 10% dos custos de vida útil do ônibus a diesel P-7 da frota de referência. Quando todos os custos incorridos durante a vida útil são considerados, os ônibus a diesel Euro VI, híbridos diesel-elétricos e elétricos a bateria proporcionam estimativas de custo mais econômicas que as dos ônibus a diesel P-7. Assim, especialmente no caso de ônibus elétricos a bateria, as práticas tradicionais de aquisição, que privilegiam as opções mais baratas de tecnologia de ônibus, podem desfavorecer as tecnologias que têm um preço de compra mais alto, mas custos operacionais reduzidos de forma substancial e custos líquidos potencialmente menores ao longo da vida útil. Mudanças nessas práticas de aquisição e modelos inovadores de financiamento, que considerem a economia operacional ao longo da vida útil das tecnologias alternativas de ônibus, podem ser necessárias para acelerar a aceitação dessas opções tecnológicas (Miller, Minjares, Dallmann, & Jin, 2017).

IMPLICAÇÕES E PERSPECTIVAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Com a aprovação da Lei 16.802, a cidade São Paulo deu um passo importante para melhorar o desempenho ambiental de sua frota de ônibus de transporte coletivo. A lei estabelece metas ambiciosas de redução de emissões de poluentes atmosféricos e climáticos para a frota, que exigem ações de curto prazo de diversas partes interessadas, incluindo a SPTrans e as operadoras de transporte coletivo, para facilitar a introdução de tecnologias de motor mais limpas e combustíveis não fósseis.

Nossas conclusões indicam que as operadoras de transporte coletivo precisam agir rapidamente para incorporar as tecnologias Euro VI e livres de combustível fóssil em suas frotas a partir de 2019. Com relação à implementação das estratégias de aquisição modeladas, a medida mais direta em curto prazo seria a priorização, pelas operadoras de transporte coletivo, das tecnologias Euro VI. Cada ônibus a diesel P-7 que entra na frota torna mais difícil o cumprimento das metas de 10 anos para MP e NO_x.

Das tecnologias Euro VI consideradas nesta análise, os ônibus a diesel Euro VI são os que São Paulo tem mais facilidade de ampliar a aquisição de forma imediata. A principal barreira para os ônibus a diesel Euro VI, a disponibilidade de combustível diesel com baixo teor de enxofre, não é um problema, pois o diesel S10 já está prontamente disponível na cidade. Da mesma forma, o ARLA 32, que é um aditivo necessário para o funcionamento adequado dos sistemas de redução catalítica seletiva encontrados nos motores a diesel Euro VI, já está sendo usado pelos ônibus a diesel P-7 da frota. Finalmente, quatro dos maiores fabricantes de ônibus e motores do mundo se comprometeram a produzir tecnologias de motor livres de fuligem, como diesel Euro VI ou mais limpas, disponíveis em São Paulo a partir de 2018.⁷ De fato, fabricantes no Brasil já estão produzindo ônibus a diesel Euro VI para exportação para Santiago, no Chile, onde os padrões mais recentes exigem que todos os novos ônibus tenham desempenho de emissões Euro VI.⁸ Em relação a outras tecnologias de motor, são necessárias poucas mudanças nas operações diárias para incorporar os ônibus a diesel Euro VI nas frotas.

As operadoras de transporte coletivo em São Paulo provavelmente vão precisar passar a adquirir a tecnologia Euro VI antes da implementação nacional dos padrões de emissões PROCONVE P-8 para veículos pesados. Neste caso, deve ser estabelecido um processo pelo qual esses motores possam ser certificados para um desempenho de nível P-8. O trabalho com agências técnicas estaduais e nacionais deve começar imediatamente para desenvolver esses processos.

A aquisição em curto prazo de diesel Euro VI deve colocar as operadoras de transporte coletivo em São Paulo no caminho certo para atingir as metas de redução de emissões de MP e NO_x. No entanto, as decisões relativas à aquisição de combustível livre de fóssil são mais desafiadoras, uma vez que essas tecnologias ainda não foram utilizadas amplamente em São Paulo e podem exigir mudanças sistemáticas na maneira como os ônibus são comprados e operados.

Das tecnologias livres de combustível fóssil consideradas nesta análise, nossos cálculos indicam que os ônibus elétricos a bateria oferecem os maiores benefícios ao clima. Segundo nossas estimativas, os custos ao longo da vida útil de possuir e operar um ônibus elétrico a bateria em São Paulo são competitivos com os de um ônibus a diesel. No entanto, o preço de aquisição dos ônibus elétricos a bateria continua mais alto do

7 Disponível em: <http://www.ccacoalition.org/en/resources/global-industry-partnership-soot-free-clean-bus-fleets-public-commitment-statement>

8 United Nations Environment Programme. (2017). Santiago adopts Euro VI buses: a case study. Disponível em: <http://www.ccacoalition.org/en/resources/santiago-adopts-euro-vi-buses-case-study>.

que o de outras tecnologias de ônibus. Modelos inovadores de financiamento e negócio podem ser necessários para explicar melhor as economias operacionais significativas oferecidas pelos ônibus elétricos a bateria no momento da decisão de compra.

Outras tecnologias de ônibus de acionamento elétrico com emissão zero, como trólebus e ônibus elétricos a células de combustível, não foram consideradas diretamente em nossa análise. Os trólebus elétricos podem proporcionar uma redução de emissões equivalente à dos ônibus elétricos a bateria. Uma expansão da rede de trólebus existente também pode contribuir para a descarbonização da frota de São Paulo. Os ônibus elétricos a células de combustível ainda não atingiram o mesmo nível de maturidade tecnológica e comercialização das demais opções de ônibus de transporte coletivo. No entanto, à medida que for sendo desenvolvida, espera-se que essa tecnologia ofereça uma opção elétrica de emissão zero viável para as operadoras de transporte coletivo em São Paulo a longo prazo.

Do ponto de vista operacional, as transições para frotas de ônibus elétricos de emissão zero vão exigir um planejamento cuidadoso para garantir que a tecnologia seja implantada de maneira a ter desempenho equivalente ao da frota de ônibus a diesel. Por exemplo, os ônibus elétricos a bateria impõem desafios às operadoras de transporte coletivo, referentes às estratégias de recarga, que não são encontrados nas frotas de ônibus a diesel. Um dos passos mais importantes a curto prazo para promover as transições para ônibus elétricos de emissão zero é desenvolver o conhecimento institucional necessário à ampla implantação dessa tecnologia na frota de São Paulo. De certo modo, isso já começou. Diversos projetos-piloto e de demonstração de ônibus elétricos a bateria têm sido realizados na cidade desde 2015. Os resultados dessas avaliações podem apoiar a identificação de rotas propícias à eletrificação com as atuais opções de ônibus elétricos a bateria comerciais. Após a eletrificação de rotas individuais, o próximo passo seria escalar até o nível do terminal e, a longo prazo, porcentagens ainda maiores da frota.

Nossa análise sugere que aproximadamente 6.700 ônibus livres de combustível fóssil precisam estar em operação na frota de São Paulo no início de 2028 para cumprir a meta da Lei 16.802 de redução das emissões de CO₂ fóssil no prazo de 10 anos. Embora ofereçam os maiores benefícios em termos de emissões entre as tecnologias livres de combustível fóssil aqui consideradas, não se sabe se os ônibus elétricos a bateria podem ser adquiridos e introduzidos na frota na medida necessária para atingir essa meta. Neste caso, a aquisição de ônibus a biocombustível pode complementar os esforços para atingir a meta de 10 anos referente ao CO₂ fóssil.

Como detalhado acima, os impactos climáticos das opções de biocombustíveis são altamente variáveis e dependem das rotas de produção de matéria-prima e combustíveis. Nossas estimativas indicam que o aumento do uso de biodiesel à base de soja deve ser evitado, devido ao alto risco de emissões por mudanças no uso da terra associadas a esta matéria-prima. Caso as operadoras optem pelo uso de biodiesel ou diesel renovável como parte de suas estratégias de aquisição para cumprir a Lei 16.802, devem ser priorizados combustíveis com menor intensidade de carbono, como aqueles produzidos a partir de gorduras animais ou óleo de cozinha usado. Nossos resultados indicam que ônibus abastecidos com etanol e biometano oferecem mais benefício em termos de emissões de ciclo de vida que os ônibus a diesel de petróleo ou GNC fóssil e, portanto, do ponto de vista das emissões, podem apoiar tanto a letra como o espírito da Lei 16.802. Estimamos que os ônibus a biodiesel e etanol tenham os maiores custos de propriedade ao longo da vida útil das tecnologias consideradas em nossa avaliação de TCO. Os custos de abastecimento e manutenção dessas tecnologias precisam ser reduzidos para torná-los financeiramente competitivos.

A cidade de São Paulo deu um passo importante em direção a frotas de ônibus de transporte coletivo mais limpas com a aprovação da Lei 16.802. Atingir as ambiciosas metas de redução de emissões estabelecidas na lei vai exigir um alto nível de comprometimento e coordenação entre a administração da cidade, a SPTrans, as operadoras de transporte coletivo e outras partes interessadas. A aprovação da lei é um sinal claro desse compromisso, que, porém, precisa ser seguido por ações concretas para proporcionar as reduções exigidas nas emissões por parte da frota de ônibus de transporte coletivo da cidade. Esta análise explicou o nível e o ritmo da transição tecnológica necessários para atingir essas reduções. Pesquisas e análises futuras podem avaliar cronogramas específicos de aquisição em longo prazo apresentados pelas operadoras de transporte durante o processo de licitação da concessão, o desenvolvimento de modelos alternativos de financiamento e negócio para apoiar a aquisição de ônibus de baixa emissão de carbono e livres de fuligem, e uma avaliação mais detalhada das estratégias de implementação de tecnologias avançadas de ônibus e combustíveis.

REFERÊNCIAS

- Akbar, S., Minjares, R., & Wagner, D. V. (2014). *Reducing black carbon emissions from diesel vehicles: impacts, control strategies, and cost-benefit analysis*. World Bank. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/329901468151500078/pdf/864850WP00PUBLOI0report002April2014.pdf>.
- Argonne National Laboratory (2018). *AFLEET Tool 2018*. Disponível em: https://greet.es.anl.gov/afleet_tool.
- Asian Development Bank. (2018). *Sustainable transport solutions: low-carbon buses in the People's Republic of China*. Disponível em: <https://www.adb.org/publications/sustainable-transport-solutions-peoples-republic-china>.
- Brasil. *Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016*. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2016/lei-13263-23-marco-2016-782625-norma-pl.html>.
- Brazil ups biodiesel blend to B10. *Biofuels International*. Disponível em: https://biofuels-news.com/display_news/13493/brazil_ups_biodiesel_blend_to_b10/. Acesso em: 3 jul. 2018.
- Bloomberg New Energy Finance (2018). *Electric buses in cities: driving towards cleaner air and lower CO₂*. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>.
- California Air Resources Board (CARB). (2016). *Detailed analysis for indirect land use change*. Disponível em: https://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/iluc_assessment/iluc_assessment.htm.
- California Air Resources Board (CARB). (2018). *Innovative clean transit draft proposed regulation summary*. Disponível em: <https://www.arb.ca.gov/msprog/ict/meeting/mt180611/180611ictregsummary.pdf>.
- Cavalett, O., Chagas, M., Seabra, J., & Bonomi, A. (2013). Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18:647-658. doi: 10.1007/s11367-012-0465-0.
- Chambliss, S. & Bandivadekar, A. (2015). *Accelerating progress from Euro 4/IV to Euro 6/VI vehicle emissions standards*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/accelerating-progress-euro-4iv-euro-6vi-vehicle-emissions-standards>.
- Cidade de São Paulo. (2009). *Lei nº 14.993, de 5 de junho de 2009*. Disponível em: <http://www.nossasaopaulo.org.br/portal/files/LeiClima.pdf>.
- Cidade de São Paulo. (2018). *Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018. Diário Oficial da cidade de São Paulo*, n. 12. Disponível em: http://www.camara.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/01/dom_capa.pdf.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). (2017). *Emissões veiculares no estado de São Paulo – 2016*. Disponível em: <http://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2018). *Resolução nº 490, de 16 de novembro de 2018*. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=739>.
- Conselho Nacional de Política Energética. (2018). *Resolução nº 16, de 29 de outubro de 2018*.
- Dallmann, T., Du, L., & Minjares, R. (2017). *Low-carbon technology pathways for soot-free urban bus fleets in 20 megacities*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/low-carbon-technology-pathways-soot-free-urban-bus-fleets-20-megacities>.

- Dreier, D., Silveira, S., Khatiwada, D., Fonseca, K., Nieweglowski, R., & Schepanski, R. (2018). Well-to-wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. *Transportation Research Part D*, 58, 122-138. doi:10.1016/j.trd.2017.10.015.
- Façanha, C. (2016). *Deficiencies in the Brazilian PROCONVE P-7 and the case for P-8 standards*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/deficiencies-brazilian-proconve-p-7-and-case-p-8-standards>.
- Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA 3.3, 2017). Disponível em: <http://www.hbefa.net/e/index.html>.
- International Energy Agency. (2018). *Statistics*. <http://www.iea.org/statistics/>.
- Miller, J., & Façanha, C. (2016). *Cost-benefit analysis of Brazil's heavy-duty emission standards (P-8)*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/cost-benefit-analysis-brazils-heavy-duty-emission-standards-p-8>.
- Miller, J., Minjares, R., Dallmann, T., & Jin, L. (2017). *Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/financing-transition-soot-free-urban-bus-fleets-20-megacities>.
- Ministério de Minas e Energia. (2017). *Boletim dos Biocombustíveis*, nº 110, jul./ago. 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138769/0/Boletim+DBio+n%C2%BA+110+jul-ago+de+2017.pdf/e85a585c-10c7-4efc-bb8e-1779604f7487>.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). (2011). *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/emissoes-veiculares>.
- Prefeitura de São Paulo Mobilidade e Transportes. (2018). *Edital de Licitação do Transporte Público por Ônibus*. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/edital/index.php?p=247319>.
- Shindell, D., Borgford-Parnell, N., Brauer, M., Haines, A., Kuylenstierna, J., Leonard, S. A., ... Srivastava, L. (2017). A climate policy pathway for near- and long-term benefits. *Science*, 356(6337), 493-494. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aak9521>.
- Slowik, P., Araujo, C., Dallmann, T., & Façanha, C. (2018). *International evaluation of public policies for electromobility in urban fleets*. Gesellschaft für International Zusammenarbeit (GIZ).
- SPTTrans. (2017). *Planilha tarifária do Sistema de Transporte Coletivo Urbano - 2017*. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/spttrans/aceso_a_informacao/index.php?p=227887.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *Renewable fuel standard program (RFS2) regulatory impact analysis*. EPA 420-R-10-006. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-fuel-standard-rfs2-final-rule-additional-resources>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Report to Congress on black carbon*. EPA-450/R-12-001. Disponível em: <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018). *Speciation of total organic gas and particulate matter emissions from on-road vehicles in MOVES2014b*. EPA-420-R-18-012. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P100UXME.pdf>.
- Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., & Hamelinck, C. (2015). *The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts*. Utrecht, Netherlands: ECOFYS Netherlands B.V. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf.

APÊNDICE

Tabela A1. Comparação dos fatores de emissão de MP e NO_x para os ônibus a diesel P-5 (Euro III), P-7 (Euro V) e Euro VI a partir de duas fontes de dados.

Fonte	Tipo de veículo da fonte	Fator de emissão de NO _x (g/km)			Fator de emissão de MP (g/km)			Tipo de ônibus para a modelagem
		Diesel P-5 (Euro III)	Diesel P-7 (Euro V)	Diesel Euro VI	Diesel P-5 (Euro III)	Diesel P-7 (Euro V)	Diesel Euro VI	
MMA, 2011 (via edital de licitação de concessão)^a	Miniônibus	5,1	2,1	Dados não fornecidos para ônibus a diesel Euro VI	0,085	0,021	Dados não fornecidos para ônibus a diesel Euro VI	Mini
	Midiônibus	6,1	2,5		0,103	0,025		Midi
	Básico	7,1	2,9		0,119	0,029		Básico
	Padron	9,9	4,0		0,165	0,040		Padron, Padron (15m)
	Articulado (18m)	12,7	5,1		0,213	0,052		Articulado,
	Articulado (23m)	13,7	5,5		0,229	0,056		Articulado (23m)
	Biarticulado	16,2	6,5		0,271	0,066		Biarticulado
HBEFA, 2017	Míni	8,6	6,3	0,42	0,165	0,049	0,005	Míni, Midi
	Padrão	11,2	7,8	0,47	0,226	0,065	0,006	Básico, Padron, Padron (15m)
	Articulado	14,1	7,1	0,38	0,274	0,077	0,007	Articulado, Articulado (23m), Biarticulado

^aOs fatores de emissão de MP e NO_x são informados em g/kg no edital de licitação de concessão. Esses valores foram convertidos em g/km utilizando o consumo estimado de combustível para cada tipo de ônibus reportado pela SPTrans.

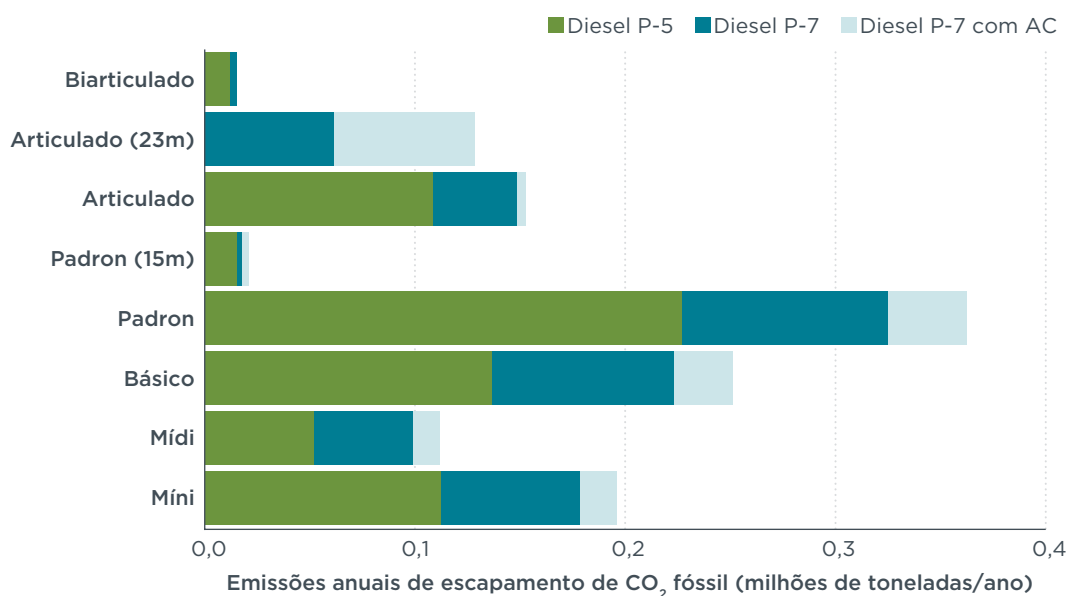


Figura A1. Emissões de escapamento de CO₂ fóssil da frota de referência de ônibus de transporte coletivo do município de São Paulo por tipo de ônibus e tecnologia de motor.

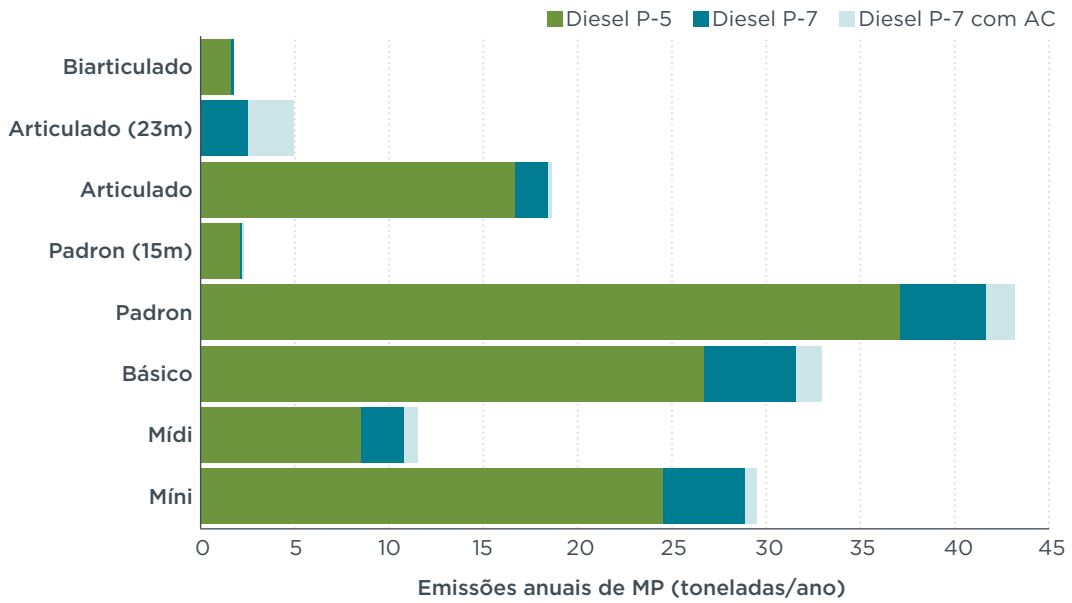


Figura A2. Emissões de MP da frota de referência de ônibus de transporte coletivo do município de São Paulo por tipo de ônibus e tecnologia de motor.

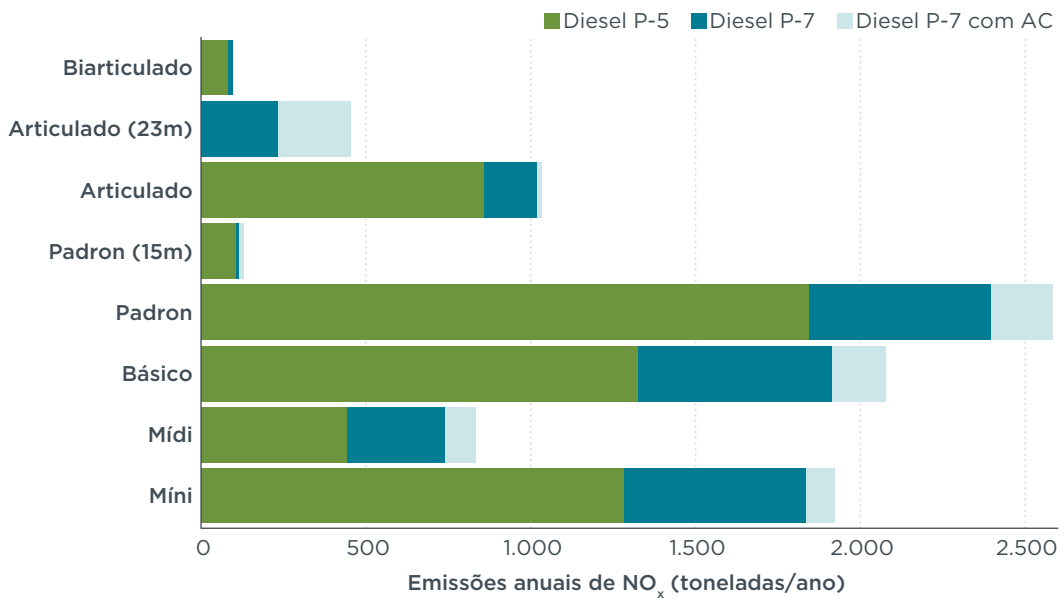


Figura A3. Emissões de NO_x da frota de referência de ônibus de transporte coletivo do município de São Paulo por tipo de ônibus e tecnologia de motor.

FONTES DOS DADOS E PREMISSAS DA ANÁLISE DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

Tabela A2. Preço de compra dos ônibus

Tecnologia do ônibus	Premissa	Valor usado para a modelagem do TCO (R\$)	Fonte
Diesel P-7	Reportado diretamente pela SPTrans	546.073	SPTrans, 2017 ^a
Diesel Euro VI	+2% em relação ao diesel P-7	556.995	Posada, Chambliss, & Blumberg, 2016 ^b
Híbrido Euro VI	+50% em relação ao diesel P-7	819.110	CARB, 2017 ^c
GNC Euro VI	+12% em relação ao diesel P-7	611.602	CARB, 2017
Biodiesel Euro VI (B100)	Equivalente ao diesel Euro VI	556.995	Posada, Chambliss, & Blumberg, 2016
Etanol Euro VI	+35% em relação ao diesel P-7	737.199	SPTrans, 2017
Ônibus elétrico a bateria	+75% em relação ao diesel P-7	955.628	CARB, 2017

^aSPTrans. (2017). *Planilha Tarifária do Sistema de Transporte Coletivo Urbano – 2017*. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/aceso_a_informacao/index.php?p=227887.

^bPosada, F., Chambliss, S., & Blumberg, K. (2016). *Costs of emission reduction technologies for heavy-duty diesel vehicles*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/costs-emission-reduction-technologies-heavy-duty-diesel-vehicles>.

^cCalifornia Air Resources Board (CARB). (2017). *Fifth Innovative Clean Transit Workgroup meeting: cost data and sources (6-26-2017)*. Disponível em: <https://arb.ca.gov/msprog/ict/meeting.htm>

Tabela A3. Custos de infraestrutura

Tecnologia do ônibus	Premissa	Fonte
GNC Euro VI	Custo por ônibus calculado considerando que o serviço de abastecimento de GNC para 175 ônibus custa 6,000,000 dólares	CARB, 2017 ^a
Ônibus elétrico a bateria	Os custos de equipamento e instalação de um serviço de recarga para um terminal de 50 kW que atende a um ônibus são de 50.000 dólares.	CARB, 2017

^aCalifornia Air Resources Board (CARB). (2017). *Fifth Innovative Clean Transit Workgroup meeting: cost data and sources (6-26-2017)*. Retrieved from <https://arb.ca.gov/msprog/ict/meeting.htm>

Tabela A4. Custos de abastecimento

Tecnologia do ônibus	Consumo de energia (kWh/km)	Preço do combustível (R\$/kWh)	Custos de abastecimento (R\$/km)
Diesel P-7	6,3	0,29 ^a	1,85
Diesel Euro VI	6,0	0,29 ^a	1,75
Híbrido Euro VI	4,8	0,29 ^a	1,40
GNC Euro VI	6,6	0,18 ^b	1,18
Biodiesel Euro VI	6,0	0,32 ^c	1,93
Etanol Euro VI	6,0	0,36 ^b	2,18
Ônibus elétrico a bateria	1,8	0,45 ^a	0,83

^aSPTrans. (2017). *Planilha tarifária do Sistema de Transporte Coletivo Urbano - 2017*. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/aceso_a_informacao/index.php?p=227887.

^bAgência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2017). *Sistema de levantamento de preços*. Disponível em: www.anp.gov.br/preco.

^cPrefeitura Municipal de Curitiba. (2017). *URBS Preços dos insumos e salários*. Disponível em: https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/pdf/transporte/rit/Preco_dos_Insumos_e_Salarios.pdf

Tabela A5. Custos de manutenção

Tecnologia do ônibus	Premissa	Valor usado para a modelagem do TCO (R\$/km)	Fonte
Diesel P-7	Reportado diretamente pela SPTrans	0,77	SPTrans, 2017 ^a
Diesel Euro VI	Equivalente ao diesel P-7	0,77	Miller, 2017 ^b
Híbrido Euro VI	-14% em relação ao diesel P-8	0,66	CARB, 2017 ^c
GNC Euro VI	+40% em relação ao diesel P-8	1,08	Comunicação pessoal Iveco
Biodiesel Euro VI (B100)	+15% em relação ao diesel P-8	0,88	Comunicação pessoal Scania
Etanol Euro VI	+40% em relação ao diesel P-8	1,08	Comunicação pessoal Scania
Ônibus elétrico a bateria	-24% em relação ao diesel P-8	0,58	CARB, 2017

^aSPTrans. (2017). *Planilha tarifária do Sistema de Transporte Coletivo Urbano - 2017*. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/aceso_a_informacao/index.php?p=227887.

^bMiller, J. (2017). *Effect of P-8 standards on bus system costs in Brazil*. International Council on Clean Transportation. Disponível em: www.theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil-bus-fare-briefing_ICCT_14042017_vF.pdf

^cCalifornia Air Resources Board (CARB). (2017). *Fifth Innovative Clean Transit Workgroup meeting: cost data and sources (6-26-2017)*. Disponível em: <https://arb.ca.gov/msprog/ict/meeting.htm>