



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



FINANCIADORES E FACILITADORES



SÓCIOS PRINCIPAIS



Estudo técnico desenvolvido para a São Paulo Transportes S/A (SPTrans) como parte da iniciativa ZEBRA (*Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator*). Gostaríamos de agradecer ao Simão Saura Neto, Andrea Compri e equipes técnica e financeira da SPTrans, assim como ao Paulo Lima e equipe da Transwolff, pelas discussões e disponibilização de dados.

Esse relatório foi elaborado por Ana Beatriz Rebouças, Tales Rozenfeld e Oscar Delgado do Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), com o apoio de Carmen Araujo, Lingzhi Jin, Stephanie Searle e Nikita Pavlenko (ICCT). O relatório foi revisado por Eduardo Siqueira (WRI), Ilan Cuperstein e Mariana Batista (C40).



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	CONTEXTUALIZAÇÃO	3
2.1	Contexto legal	3
2.2	O sistema de transporte coletivo por ônibus de São Paulo	5
3	ANÁLISE DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE NO NÍVEL DA LINHA	8
3.1	Metodologia	8
3.2	Resultados	15
4	CRONOGRAMA DE AQUISIÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E ESTIMATIVA DE EMISSÕES	30
4.1	Metodologia	30
4.2	Resultados	35
5	NECESSIDADES DE INFRAESTRUTURA	39
6	CONCLUSÃO	41
7	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A	47
	APÊNDICE B	48
	APÊNDICE C	54
	APÊNDICE D	55

1 INTRODUÇÃO

A cidade de São Paulo tem a maior frota de ônibus do Brasil e uma das maiores da América Latina, com cerca de 14 mil veículos operando 1.339 linhas. O sistema de transporte coletivo por ônibus conduziu, na média, mais de 4 milhões de passageiros por dia em 2020 na capital paulista, mesmo com o impacto da pandemia da Covid-19. Segundo o inventário de emissões veiculares da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo de 2018, a frota de ônibus urbanos representava menos de 1% da frota circulante de veículos da Região Metropolitana de São Paulo em 2018 (Cetesb, 2019). Mesmo assim, naquele ano, foi responsável por mais de 21% das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP), poluentes que prejudicam a qualidade do ar e contribuem para o desenvolvimento de doenças pulmonares e cardiovasculares.

Em 2018, aprovou-se a Lei nº 16.802, determinando que os operadores de serviços de transporte coletivo por ônibus reduzissem progressivamente as emissões de suas frotas na cidade (São Paulo, 2018a). Foi estabelecido que, em até 20 anos, as emissões de escapamento de dióxido de carbono (CO_2) fóssil deveriam ser eliminadas da frota e as emissões de MP e NO_x deveriam ser reduzidas em 95% com base nos níveis de 2016.

Para cumprir essas metas, os operadores de ônibus da cidade precisam planejar a transição para tecnologias menos poluentes. Estudos anteriores apontam que, para o caso da cidade de São Paulo, os ônibus elétricos a bateria não apenas eliminam as emissões de escapamento, mas também oferecem os maiores benefícios climáticos entre diversas alternativas tecnológicas (Dallmann, 2019). Este relatório discute o desempenho operacional e econômico da transição de uma frota de ônibus a diesel para uma frota de ônibus elétricos a bateria, avaliando o caso da Transwolff, uma das 26 empresas privadas que operam o sistema de transporte coletivo por ônibus da cidade de São Paulo. Este estudo também aborda o impacto da transição para uma frota elétrica nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes atmosféricos.

A análise, que considera aspectos operacionais específicos de cada trajeto, é realizada no nível das linhas. Esse nível de análise é importante para estruturar a transição para uma frota limpa porque permite maximizar as vantagens dos ônibus elétricos em relação aos veículos a diesel. Informações reais de operação, coletadas de um projeto-piloto, são utilizadas para calibrar um



modelo que estima o desempenho operacional de ônibus elétricos em linhas selecionadas e os custos associados. Para avaliar o desempenho financeiro da transição, utiliza-se um modelo de custo total de propriedade, que analisa os custos operacionais, de manutenção e de capital associados a cada tecnologia ao longo do tempo.

A próxima seção contextualiza as mudanças legais recentes no município de São Paulo e apresenta o atual sistema de transporte da cidade. A Seção 3 apresenta o desempenho operacional e financeiro dos ônibus em linhas selecionadas através de uma análise de custo total de propriedade. A Seção 4 analisa um cronograma de aquisição de veículos elétricos e estima suas emissões. A Seção 5 discute as necessidades de infraestrutura para a transição para uma frota elétrica. A Seção 6 conclui o trabalho.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Esta seção detalha as mudanças na legislação do município de São Paulo que incentivaram a busca por soluções de ônibus zero emissão. Além disso, apresenta características do sistema de transporte coletivo por ônibus da cidade.

2.1 CONTEXTO LEGAL

Em junho de 2009, foi sancionada a Lei nº 14.933 (São Paulo, 2009), denominada de Lei de Mudanças Climáticas, que instituiu a Política de Mudança do Clima na cidade de São Paulo. Uma das diretrizes estabelecidas pela lei foi a redução de pelo menos 10% ao ano da quantidade de ônibus movidos a combustíveis fósseis, estipulando que a frota de ônibus urbano da capital seria livre desse tipo de combustível até 2018. No entanto, essa meta não foi atingida em nenhum ano.

Com o não cumprimento das metas estabelecidas pela Lei de Mudanças Climáticas e a consequente pressão da população e da sociedade civil, a Câmara Municipal de São Paulo editou uma nova legislação. A Lei Municipal nº 16.802/2018 definiu que, em 10 anos, as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x sejam reduzidas em 50%, 90% e 80%, respectivamente, em referência aos níveis observados em 2016 (São Paulo, 2018a). Já ao final de 20 anos, as emissões de escapamento de CO₂ fóssil devem ser eliminadas, enquanto as de NO_x e MP devem ser reduzidas em 95%. Mesmo as metas se referindo apenas às emissões de escapamento, a lei determina que a escolha da alternativa tecnológica busque, dentro de custos aceitáveis, maximizar a redução de emissões de origem fóssil em todo o ciclo de vida do combustível ou energia. A substituição dos ônibus por tecnologias mais limpas deve ser gradual, à medida que os veículos antigos ultrapassam a idade máxima permitida contratualmente.

Para acompanhar a implementação das diretrizes definidas nas leis, a Lei nº 16.802/2018 instituiu o Comitê Gestor do Programa de Acompanhamento da Substituição de Frota por Alternativas Mais Limpas (COMFROTA-SP). O COMFROTA-SP é composto por representantes de secretarias do município de São Paulo, operadores de transporte coletivo, empresas de coleta de lixo e representantes de organizações da sociedade civil, entre outros. Cabe ao comitê propor, estimular, acompanhar e fiscalizar a adoção de planos e ações que possibilitem substituir a frota por alternativas mais limpas de forma a garantir o cumprimento das metas de redução de emissões.



Em outubro de 2020, a autoridade municipal de transporte — São Paulo Transporte S/A (SPTrans) — apresentou aos membros do COMFROTA-SP a compilação do cronograma de renovação de frota proposta pelos operadores conforme a exigência da legislação e dos contratos de concessão, firmados em 2019 entre o município e os operadores de ônibus de transporte coletivo. Buscando cumprir as metas de redução de emissões, os operadores escolheram principalmente ônibus elétricos a bateria como alternativa tecnológica. Essa decisão é apoiada por alguns fatores. Inicialmente, esta é uma tecnologia que tem sido adotada com sucesso em diversos países, permitindo uma redução, ao mesmo tempo, na emissão de poluentes e no custo de operação dos veículos. Além disso, estudos anteriores sugerem que a opção elétrica é a mais benéfica para São Paulo quando se considera todo o ciclo de vida dos combustíveis (Dallman, 2019). Por fim, experiências na gestão de veículos elétricos têm sido acumuladas por meio de um projeto-piloto em operação na cidade. A transição para a frota mais limpa deveria iniciar já nos primeiros anos da concessão; porém, a crise advinda da pandemia da Covid-19 adicionou novos desafios a esse processo.

No período da pandemia, a SPTrans reduziu a quantidade de ônibus urbanos em operação para se adequar à acentuada redução de demanda decorrente do fechamento do comércio e das atividades não essenciais. A Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes (SMT) publicou uma portaria, em caráter temporário e emergencial, flexibilizando algumas condições contratuais para mitigar os danos da crise no sistema de transporte público na cidade. A Portaria SMT nº 81, de março de 2020 (São Paulo, 2020b), proibiu a compra de novos ônibus durante a situação emergencial e adiou em 6 meses o cronograma de aquisições. Além disso, permitiu que a idade média da frota seja de no máximo 7 anos, e não mais 5 anos, até 30 de abril de 2022.

Apesar das dificuldades impostas pela crise sanitária, o município de São Paulo tem reforçado seu comprometimento com a adoção de uma frota de ônibus mais limpa. Em julho de 2021, o prefeito divulgou o Programa de Metas 2021-2024 (São Paulo, 2021). Na meta 50, a SMT indica a intenção de entregar ao menos 2.600 ônibus elétricos ao município até o fim do atual mandato.

A Tabela 1 apresenta os principais marcos legais associados à implantação de ônibus limpos na cidade de São Paulo.

Tabela 1. Principais marcos legais relacionados à implantação de ônibus limpos na cidade de São Paulo

Lei, portaria ou programa	Atividade ou objetivo
Lei nº 14.933/2009 (artigo 50)	Redução de pelo menos 10% do número de ônibus movidos a combustíveis fósseis ao ano, com a frota livre desse tipo de combustível até 2018 (<i>meta não cumprida</i>)
Lei nº 16.802/2018 (nova redação ao artigo 50 da Lei nº 14.933/2009)	Até 2038, eliminação das emissões de escapamento de CO ₂ fóssil e redução das emissões de NO _x e MP em 95% Instituição do COMFROTA-SP, composto por representantes de secretarias municipais, operadores de transporte e representantes da sociedade civil, entre outros, para acompanhar a implementação da lei
Portaria SMT nº 81/2020	Suspensão temporária da aquisição de novos ônibus e permissão de maior idade média da frota devido à pandemia da Covid-19
Programa de Metas 2021-2024 da prefeitura	Declaração, na meta 50, da intenção de entregar pelo menos 2.600 ônibus elétricos ao município até o fim do mandato

2.2 O SISTEMA DE TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS DE SÃO PAULO

Em agosto de 2021, a frota da cidade de São Paulo era composta por 13.942 ônibus,¹ 98,4% dos quais movidos a diesel. A pequena parcela com tecnologias alternativas correspondia a 201 trólebus e 18 ônibus elétricos. Da frota a diesel, 87,7% eram certificados pelo padrão de emissões P7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), e 12,3%, pelo P5.² Também em agosto de 2021, 64% dos ônibus estavam equipados com ar-condicionado e a idade média da frota era de 5,12 anos.

Em 2019, o município de São Paulo assinou com os operadores de ônibus um contrato de concessão de serviços de transporte coletivo por 15 anos. Os contratos preveem a reestruturação do sistema, com o replanejamento da frota e a remoção e inclusão de linhas para uma nova rede de transporte coletivo por ônibus, denominada de “rede de referência”. Segundo o edital, a rede de referência deveria ser composta por 1.193 linhas, cuja implantação iniciaria um ano após a assinatura do contrato (ou seja, em setembro de 2020) e terminaria após três anos (São Paulo, 2018b). No entanto, com a pandemia da Covid-19, os estudos para a implantação e definição da rede de referência foram suspensos (Bazani, 2020).

Para adequar o sistema de transporte às legislações vigentes, a SPTrans tem prospectado a implementação de tecnologias mais limpas na frota de ônibus

¹ Detalhes na Tabela 8 no Apêndice I.

² O Proconve define os padrões nacionais de emissão para veículos pesados e leves, estabelecendo limites mais restritivos a cada fase. Para veículos pesados, os padrões P5 e P7 são equivalentes, de forma geral, aos europeus Euro III e Euro V.

urbanos de São Paulo. Entre 2014 e 2018, conduziu testes com ônibus elétricos a bateria da BYD — fabricante de ônibus elétricos instalada em Campinas (SP) — em diferentes linhas do sistema. Em outubro de 2018, lançou um projeto-piloto com a BYD que adicionou 18 veículos elétricos a bateria em uma linha do sistema, a 6030-10 (Unisa-Campus 1-Terminal Santo Amaro), operada pela empresa Transwolff.

A linha é operada todos os dias da semana, exclusivamente por ônibus básicos,³ e conta com 18 veículos nos horários de pico nos dias úteis. Seu trajeto, apresentado na Figura 1, soma cerca de 30km de comprimento, considerando os dois sentidos. A garagem, marcada com um triângulo na Figura 1, fica ao lado de um ramal elétrico, o que reduz os custos de adequação de infraestrutura.

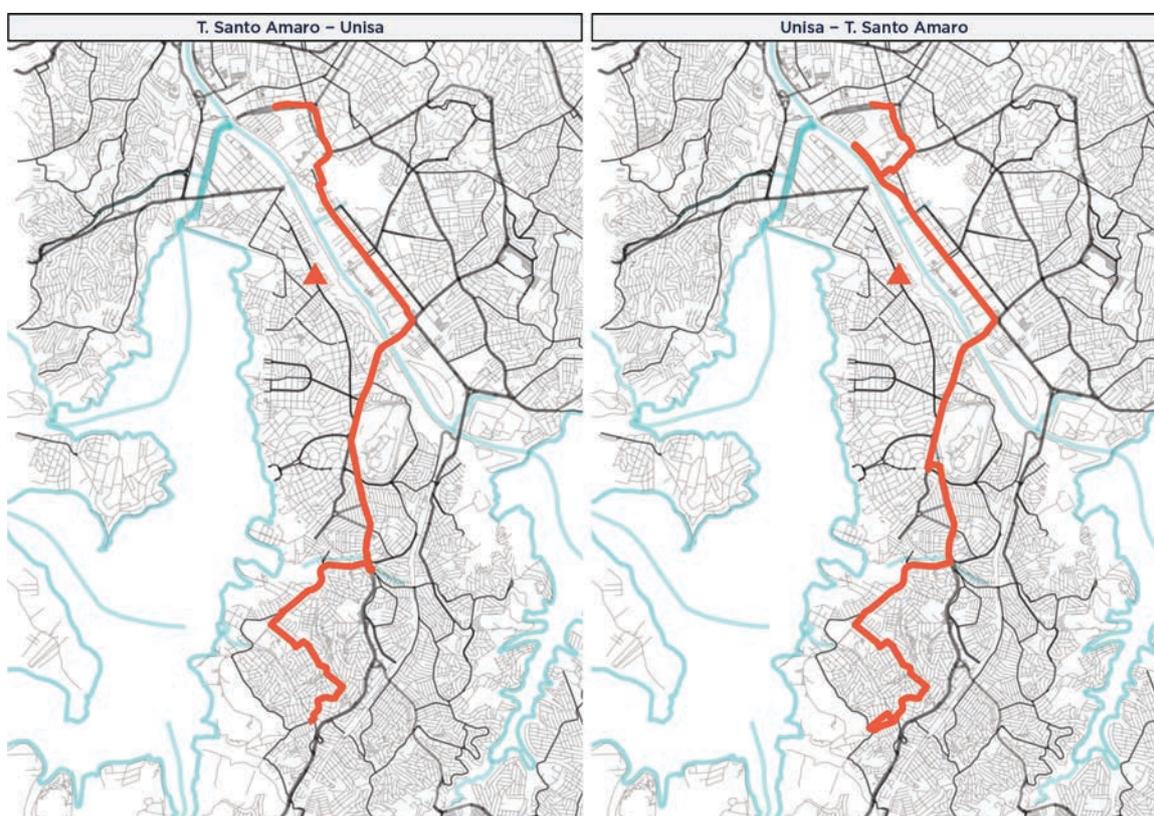


Figura 1. Trajeto da linha 6030-10 e indicação da garagem (representada pelo triângulo).

Fonte: Dados de posição da linha disponíveis na base GTFS da SPTrans. Mapa criado a partir dos dados abertos do OpenStreetMap.org

³ Segundo a SPTrans, os ônibus de tipo básico têm entre 11,5m e 12,5m de comprimento e capacidade para 74 passageiros (São Paulo, 2018c).



A recarga ocorre na garagem da Transwolff principalmente durante a noite e fora do horário de pico, que, em São Paulo, é das 17h30 às 20h30. A energia elétrica utilizada para a recarga é certificada como sendo gerada por fontes renováveis, tornando o ciclo de vida do projeto ainda mais limpo.

Os 18 ônibus elétricos usados no piloto têm carroceria brasileira adaptada para o chassi da BYD. Apesar de serem de tamanho padron, sua capacidade de carregamento de passageiros foi reduzida para que o peso máximo do veículo respeitasse o valor autorizado pela legislação vigente.⁴ Com isso, a capacidade desses ônibus elétricos ficou semelhante à dos ônibus básicos, mas com espaço interno, conforto e acessibilidade semelhantes aos de um ônibus padron.

Para contornar os altos custos de aquisição dos ônibus elétricos, a Transwolff comprou os veículos sem as baterias e fez um contrato de aluguel desses itens com a BYD. Durante os 15 anos de contrato, a Transwolff pagará mensalmente um valor fixo à BYD, que, por sua vez, será responsável pelo fornecimento, manutenção e eventual substituição da bateria. O contrato também inclui o pagamento mensal, por 10 anos, de um valor fixo referente à infraestrutura de recarga instalada pela BYD na garagem da Transwolff.

A Transwolff atua no subsistema local de distribuição na zona sul de São Paulo e é responsável por 135 linhas que, de forma geral, têm trajetórias curtas. Conforme apresentado na Tabela 8 do Apêndice I, a frota da Transwolff é composta por 1.272 ônibus. A maioria são midiônibus (58,9%) e ônibus básicos (35,4%), mas operam também miniônibus e os ônibus padron elétrico. O projeto-piloto está sendo conduzido apenas na linha 6030-10, mas este estudo investiga a adoção de ônibus com emissão zero também em outras linhas operadas por ônibus básicos da Transwolff.

4 A Resolução do Conselho Nacional de Trânsito nº 502, de 23 de setembro de 2014, estabelece os limites de peso e dimensão para veículos que transitam por vias terrestres (Brasil, 2014).

3 ANÁLISE DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE NO NÍVEL DA LINHA

A metodologia de análise do custo total de propriedade (TCO, do inglês *total cost of ownership*) aqui utilizada tem como base os modelos já desenvolvidos e implementados pelo ICCT em outros estudos, nos quais se avaliou a adoção de ônibus com tecnologias alternativas, incluindo ônibus elétricos (Dallman, 2019; Jin *et al.*, 2020; Miller *et al.*, 2017). Esta seção apresenta uma análise de TCO, porém no nível da linha, sob o ponto de vista de uma empresa operadora.

3.1 METODOLOGIA

Este relatório busca avaliar o desempenho operacional e econômico da transição da frota de ônibus básicos da empresa Transwolff para uma frota de ônibus elétricos, considerando as características de suas linhas. O estudo se debruça sobre as linhas operadas por ônibus básicos, uma vez que os outros modelos adotados pela empresa são ônibus menores, que não podem ser substituídos pelos ônibus elétricos do tipo padron utilizados no projeto-piloto.

Das 135 linhas da Transwolff, 37 são operadas por ônibus básicos, das quais 20 foram selecionadas para este estudo. Justificaram a seleção os fatos de que, de acordo com o edital de concessão, essas 20 linhas devem ser mantidas na rede de referência sem alteração de trajeto; e de que seus dados estavam disponíveis e adequados para a modelagem. Mais informações sobre as linhas e a seleção da amostra são apresentadas no Apêndice II.

Gerenciar adequadamente o uso da bateria é um dos desafios da transição para uma frota elétrica. Características como a distância a ser percorrida, a presença ou ausência de ar-condicionado, o peso transportado e a topografia da linha afetam o consumo de energia e devem ser consideradas durante o planejamento operacional. Este estudo estima o consumo de energia dos ônibus elétricos a bateria em linhas tipicamente operadas por ônibus a diesel por meio de simulações da operação que observam as características de cada trajeto.

A estimativa do consumo de energia pode auxiliar a escolha tanto do tamanho ideal da bateria como da estratégia de recarga. Pode ajudar, também, na definição de um cronograma de eletrificação que priorize as linhas mais adequadas. Com isso, pode-se identificar os investimentos a ser realizados e planejar as adaptações de infraestrutura e o treinamento de pessoal

necessários para a transição tecnológica. A metodologia de análise se divide em três etapas, descritas na Figura 2.

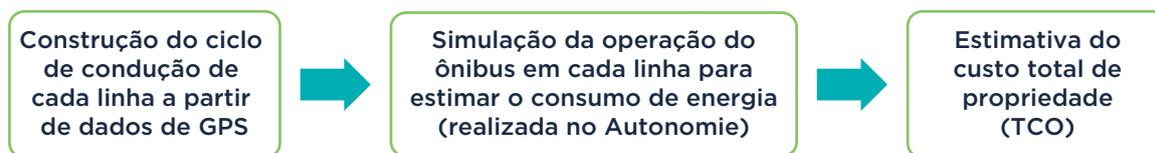


Figura 2. Etapas da análise de TCO

A primeira etapa busca elaborar um ciclo de condução para cada linha analisada. Um ciclo de condução representa um perfil de operação, com informações detalhadas sobre a velocidade e elevação de cada trecho do trajeto percorrido pelo veículo. Na segunda etapa, o ciclo de condução é utilizado para estimar o consumo de energia (eletricidade ou combustível) e as emissões de poluentes do ar e GEE associados. A terceira e última etapa consiste na análise do TCO, na qual se avaliam as despesas de capital e os custos operacionais dos ônibus em cada linha. Nessa etapa, os custos dos ônibus zero emissão são comparados com os dos ônibus convencionais a diesel.

O restante desta subseção explica as etapas de análise destacadas na Figura 2. O Apêndice II apresenta detalhes da elaboração de cada etapa.

3.1.1. DESENVOLVIMENTO DO CICLO DE CONDUÇÃO

O ciclo de condução busca condensar as informações de operação de vários dias e horários, bem como de diferentes veículos que operam uma mesma linha em um perfil de condução representativo. Para desenvolver esses ciclos, são necessários dados reais de operação, coletados com alta frequência para garantir que o modelo capture em detalhes o que acontece com o ônibus. Idealmente, o intervalo entre as observações deve ser de no máximo 1 segundo, podendo-se interpolar os dados caso os intervalos de coleta sejam de até 10 segundos. A ferramenta de construção de ciclos de condução do ICCT é descrita por Jin *et al.* (2020).

Dados com frequência adequada, coletados por equipamentos de telemetria durante 66 dias em 2020, estavam disponíveis para a linha 6030-10, mas não para as outras 19 linhas. Por isso, foi necessário construir ciclos de condução artificiais a partir de ajustes no ciclo de condução desenvolvido para a linha 6030-10. Os ajustes são detalhados no Apêndice II.

3.1.2. SIMULAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia e combustível é um dos principais determinantes dos custos operacionais dos ônibus, dos seus impactos ambientais e da autonomia dos veículos elétricos.⁵ A simulação dessa variável é necessária quando dados reais estão indisponíveis ou quando se deseja testar cenários específicos não observados na realidade. Este estudo estima o consumo de energia e combustível dos ônibus utilizando o *software* de simulação veicular *Autonomie*, desenvolvido pelo Argonne National Laboratories para analisar o impacto de diferentes tecnologias de veículos em termos de desempenho e emissões. O Apêndice II traz detalhes dessa estimativa.

O peso dos ônibus e, conseqüentemente, o carregamento de passageiros são variáveis relevantes na definição do consumo dos veículos. Portanto, as simulações consideram três cenários: ônibus vazio, com metade da capacidade e com a capacidade completa de passageiros. Ainda, seguindo a legislação vigente na cidade,⁶ todos os cenários são simulados considerando o uso de ar-condicionado. Para avaliar a potência demandada pelos acessórios, assume-se, de forma conservadora, que a temperatura média da cidade é de 22,5°C.⁷

3.1.3. AVALIAÇÃO DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

Esta etapa do estudo busca comparar os custos totais associados aos ônibus elétricos a bateria com os custos dos ônibus a diesel nas linhas selecionadas da Transwolff, com base em uma avaliação do TCO. Ônibus elétricos a bateria, apesar de terem um custo de aquisição maior do que seus análogos a diesel, costumam apresentar custos de operação e manutenção menores. A análise do TCO permite comparar custos de diferentes tecnologias de ônibus ao longo do tempo, uma vez que indica o valor presente líquido da soma das despesas de capital, operação e manutenção dos ônibus e sua infraestrutura de abastecimento.

O contrato de concessão estabelece que as empresas devem operar os serviços de transporte coletivo pelo prazo de 15 anos e, enquanto a vida útil máxima permitida para os ônibus elétricos é de 15 anos, a idade máxima dos

5 Autonomia representa a distância que o veículo pode percorrer com uma recarga completa da bateria.

6 Em 2016, a Lei Municipal nº 16.428 estabeleceu a instalação gradativa de ar-condicionado em pelo menos 80% da frota de ônibus urbanos (São Paulo, 2016). A lei reforçou a Portaria SMT nº 009, de 2015, segundo a qual todos os veículos de transporte coletivo de passageiros na cidade deveriam ter ar-condicionado (São Paulo, 2015).

7 A literatura indica que a demanda de potência de acessórios como o sistema de ar-condicionado e aquecimento varia de acordo com a temperatura externa (Vepsäläinen *et al.*, 2019). Utilizou-se a temperatura média de um mês quente de São Paulo, de acordo com os dados recuperados em 10 de agosto de 2021 de <https://en.climate-data.org/south-america/brazil/sao-paulo/sao-paulo-655/#temperature-graph>.

ônibus a diesel é de 10 anos. Dessa forma, para contemplar toda a duração do projeto, a avaliação do TCO considera a utilização de dois ônibus a diesel. A substituição desse veículo acontece no ano 11, e o segundo ônibus a diesel é revendido ao final do contrato antes de esgotar sua vida útil contratual.⁸ Essa análise carrega algumas incertezas, pois exige uma estimativa dos preços futuros de aquisição e revenda de um ônibus a diesel. No entanto, analisar os custos ao longo dos 15 anos contratuais se aproxima da decisão enfrentada pelos operadores, que devem prover os serviços de transporte por um período determinado, independentemente da tecnologia adotada.

A estrutura de cálculo do TCO utilizada neste estudo baseou-se na metodologia desenvolvida por Miller *et al.* (2017), refinada para o caso de São Paulo por Slowik *et al.* (2018) e Dallmann (2019). A Tabela 2 apresenta os componentes do TCO aqui considerados. Como o objetivo do estudo é analisar os custos que dependem da seleção da tecnologia, custos com componentes como administração, licenciamento e registro, contratação de pessoal e seguro não são avaliados, pois não estão associados a uma tecnologia específica. O modelo foi adaptado para considerar a duração do projeto em vez do ciclo de vida dos veículos e para incluir o valor da bateria como um custo mensal de aluguel, seguindo a prática adotada pelo projeto-piloto em São Paulo. Não adquirir a bateria promove uma significativa redução dos custos iniciais de aquisição do ônibus elétrico, transformando o custo de capital desse item em um custo operacional.

⁸ Dessa forma, deve-se descontar do preço de revenda do segundo ônibus a diesel o saldo devedor de seu financiamento.

Tabela 2. Componentes do custo total de propriedade (adaptado de Miller *et al.*, 2017)

Categoria	Componente	Definição
Aquisição do ônibus e da infraestrutura	Entrada	Pagamento inicial para a compra do ônibus ou da infraestrutura.
	Financiamento	Pagamento da amortização e dos juros.
	Valor de revenda	Valor de revenda do veículo, depreciado no final do período de operação planejado.
Operação e manutenção	Aluguel da bateria	No caso dos ônibus elétricos, custo referente à locação da bateria.
	Energia/combustível	Custo com abastecimento (energia ou combustível).
	Outros custos operacionais	Para ônibus a diesel, inclui o custo de ARLA 32. ⁹
	Manutenção do ônibus	Custo de manutenção do ônibus, incluindo pneus, lubrificantes, peças e acessórios.
	Manutenção da infraestrutura	Custo de manutenção da infraestrutura e operações.
	Custos com pessoal	Nesta análise, foram considerados apenas os custos com pessoal de operação e manutenção.
	Revisão	Para os ônibus cujo valor de compra não inclui uma garantia vitalícia, há, em geral, um custo na metade da vida útil para substituição da bateria, no caso dos ônibus elétricos, e para revisão do motor para outros ônibus. No caso dos ônibus a diesel, considerou-se que o custo de manutenção já conta com essa revisão. Para o caso do ônibus elétrico a bateria, uma possível troca da bateria está incluída no aluguel desse item.

Para cada linha da Transwolff analisada, estima-se o TCO de três tipos de ônibus: um elétrico a bateria e dois a diesel, sendo um de tipo básico e um de tipo padron, ambos com tecnologia P7. A análise comparou o ônibus elétrico padron da BYD com o ônibus a diesel do tipo básico porque este último comporta número equivalente de passageiros e é o tipo substituído pelo elétrico no projeto-piloto. Este estudo também comparou o veículo elétrico com um ônibus a diesel do tipo padron por sua equivalência nos serviços oferecidos aos passageiros, uma vez que ambos são superiores ao ônibus básico em acessibilidade e conforto. Os principais dados de custos operacionais e de capital utilizados foram extraídos de documentos publicados e disponibilizados pela SPTrans, incluindo relatórios anuais, editais e os contratos de concessão com os operadores de ônibus de transporte público.

Os custos operacionais de cada linha dependem da quilometragem diária percorrida e variam com o consumo de energia por quilômetro em cada

⁹ O ARLA 32 é um agente redutor líquido necessário para o funcionamento adequado de algumas tecnologias pós-tratamento de NO_x. Passou a ser exigido no Brasil com a implementação da fase P7 do Proconve (Miller & Façanha, 2016).

trajeto. Neste estudo, utilizam-se os consumos de energia estimados pelo *software* Autonomie na etapa anterior. Buscando realizar uma análise conservadora, adota-se o consumo estimado para o cenário com 100% de carregamento de passageiros, apresentados na Tabela 11 do Apêndice III, e uma situação com degradação de 10% da bateria, além da preservação de uma reserva técnica de 20%.¹⁰

A Tabela 3 apresenta os valores adotados para os componentes do TCO, segundo estimativa de maio de 2021. É importante destacar que esses valores são dinâmicos e variam conforme as condições macroeconômicas, de mercado, e a maior compreensão das condições de operação e manutenção da nova tecnologia de ônibus elétricos.

Tabela 3. Valores estimados para maio de 2021 para os principais componentes da avaliação de custo total de propriedade dos ônibus analisados para o caso da Transwolff (cenário de referência)

	Unidade	Básico a diesel (com AC ^a)	Padron a diesel (com AC)	Elétrico a bateria (com AC)
Valor de compra	R\$/ônibus	449.000	602.000	874.000,00 ^f
Custo unitário do combustível ou energia^b	R\$/L ou R\$/kWh	4,02	4,02	0,57
Custo unitário do ARLA 32^c	R\$/L	1,15	1,15	-
Consumo de ARLA 32 em comparação ao diesel	%	2,71%	2,71%	-
Aluguel da bateria	R\$/mês/ônibus	-	-	10.925,00 ^f
Custos de manutenção (peças e equipamentos)	R\$/km	0,60	0,80	0,61
Custos com pessoal de manutenção e operação^d	R\$/km	4,50	4,50	4,63
Custos da infraestrutura^e	R\$/mês/ônibus	-	-	727,00

Notas:

- (a) AC: ar-condicionado.
- (b) Considerou-se o preço médio de distribuição do diesel S10 no município de São Paulo em maio de 2021 disponibilizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).
- (c) Para o ARLA 32, considerou-se o valor adotado pela SPTrans na metodologia de remuneração, atualizado pela variação acumulada do IPC/FIPE da data de referência até maio de 2021.
- (d) Os custos com pessoal de manutenção e operação foram calculados com base em informações disponibilizadas pela SPTrans.
- (e) Valor dos carregadores informados pela SPTrans. Neste estudo, adota-se como premissa que cada unidade pode carregar dois veículos. Dessa forma, o custo por ônibus é metade do valor de custo de infraestrutura informado pela SPTrans.
- (f) Preço cheio de compra do ônibus elétrico, sem bateria: R\$ 920 mil. Aluguel de bateria: R\$ 11,5 mil por ônibus ao mês. Considera-se, como referência, redução de 5% dos valores cheios, refletindo mudanças de mercado.

¹⁰ A reserva técnica é o montante de carga que o fabricante sugere manter na bateria ao final do dia. Essa reserva serve principalmente para preservar a vida útil desse item.

Os custos de aquisição dos ônibus são afetados pelas condições de mercado de cada tecnologia. Enquanto os ônibus a diesel estão consolidados no mercado nacional e possuem ampla concorrência de fabricantes, os veículos elétricos ainda são relativamente novos. Com a expansão da demanda por ônibus elétricos, é provável que a concorrência nesse mercado aumente, com reflexo nos preços desses veículos, suas peças e equipamentos. Além disso, com a crescente pressão social pela adoção de tecnologias limpas, governantes têm estudado implementar políticas de incentivo para reduzir o investimento inicial em ônibus elétricos, como a redução de impostos estaduais ou federais. Para refletir prováveis mudanças que irão diminuir o custo de capital dos veículos elétricos, considerou-se um cenário de referência com 5% de redução do seu preço de aquisição e do aluguel da bateria. Outras premissas utilizadas na estimativa do TCO são descritas a seguir:

- a) Os custos de manutenção considerados na análise incluem os custos com peças e acessórios, rodagem (pneus e recapagem) e lubrificantes;
- b) O valor residual dos ônibus no fim da sua vida útil é de 5% do valor de compra;
- c) O segundo veículo a diesel será adquirido no 11º ano da concessão e revendido após 5 anos de uso por 30,91% do valor de compra;¹¹
- d) Custos futuros são descontados a valor presente por uma taxa de 7% ao ano;
- e) Assume-se que 100% do valor dos ônibus é financiado pelo prazo de 10 anos sem carência, seguindo linhas de financiamento do BNDES disponíveis no momento de elaboração deste estudo (setembro de 2021). O veículo a diesel utiliza a linha Finame BK Aquisição e Comercialização, com taxa de 8,1% ao ano, e o elétrico usufrui da linha Finame Baixo Carbono, com taxa de 7,8% ao ano.¹²

Este estudo toma como premissa que o preço do diesel crescerá acompanhará o aumento do preço internacional do petróleo. Adota-se uma taxa de crescimento de 3% ao ano até 2030 com base em estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), porém, com um ajuste no preço de 2021 para

¹¹ Depreciação segundo modelagem da SPTrans (São Paulo, 2018d).

¹² A taxa de financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) é uma composição do custo financeiro (considerado igual ao IPCA acrescido da Taxa de Longo Prazo de setembro de 2021), mais uma taxa do BNDES, mais uma taxa do agente financeiro. No cenário de referência, considera-se que o incentivo ao ônibus elétrico surge da taxa do BNDES mais favorável à linha de baixo carbono.

refletir as condições de maio desse ano.¹³ Assume-se, também, que a partir do 10º ano o preço do diesel se estabiliza e que o preço da energia elétrica fica constante durante todo o período das simulações.

As premissas apresentadas nesta seção descrevem o cenário de referência do TCO. No entanto, conforme já apontado, o mercado de transporte coletivo por ônibus está mudando rapidamente, podendo impactar diversas variáveis no médio e longo prazo. Assim, depois de discutir o TCO do cenário de referência, realiza-se uma série de análises de sensibilidade para investigar a influência de cada premissa.

3.2 RESULTADOS

Nesta seção, apresenta-se a estimativa do desempenho dos ônibus elétricos a bateria e dos ônibus convencionais a diesel nas linhas da Transwólf selecionadas, em diferentes condições de carregamento de passageiros. Em seguida, a autonomia do ônibus elétrico é comparada com a quilometragem diária típica dos ônibus a diesel atualmente em operação. Por fim, exibe-se o TCO de cada tecnologia em cada linha, bem como diferentes condições dos parâmetros considerados.

3.2.1. COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DOS ÔNIBUS A DIESEL COM ÔNIBUS ELÉTRICOS

Para cada uma das 20 linhas avaliadas, são realizadas 6 simulações de operação, considerando o carregamento de 0%, 50% e 100% de passageiros para um ônibus a diesel e um elétrico. Na Figura 3, que apresenta um diagrama de caixas (*boxplot*) com esses resultados,¹⁴ o eixo vertical da direita representa o consumo de energia em kWh/km, enquanto o eixo da esquerda é o seu equivalente em termos de consumo de diesel em L/km.¹⁵

13 O referido estudo da EPE projetava um crescimento de cerca de 6% ao ano entre 2021 e 2030, com base em valores de 2020. Assumiu-se que os preços convergiriam para a trajetória prevista pela EPE, porém partindo de um preço mais elevado em maio de 2021 (por isso a taxa anual utilizada foi menor).

14 A Tabela C1 do Apêndice C apresenta os consumos estimados para os ônibus a diesel e elétricos em cada linha, considerando o cenário de maior carregamento de passageiros.

15 Os valores de consumo de combustível foram convertidos em consumo de energia considerando uma mistura de 90% de diesel de petróleo e 10% de biodiesel e usando o menor valor de aquecimento para combustível a diesel com baixo teor de enxofre (128,488 Btu/gal) e biodiesel (119,550 Btu/gal), relatados pelo Centro de Dados de Combustíveis Alternativos do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Recuperado em 10 de agosto de 2021 de <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>.

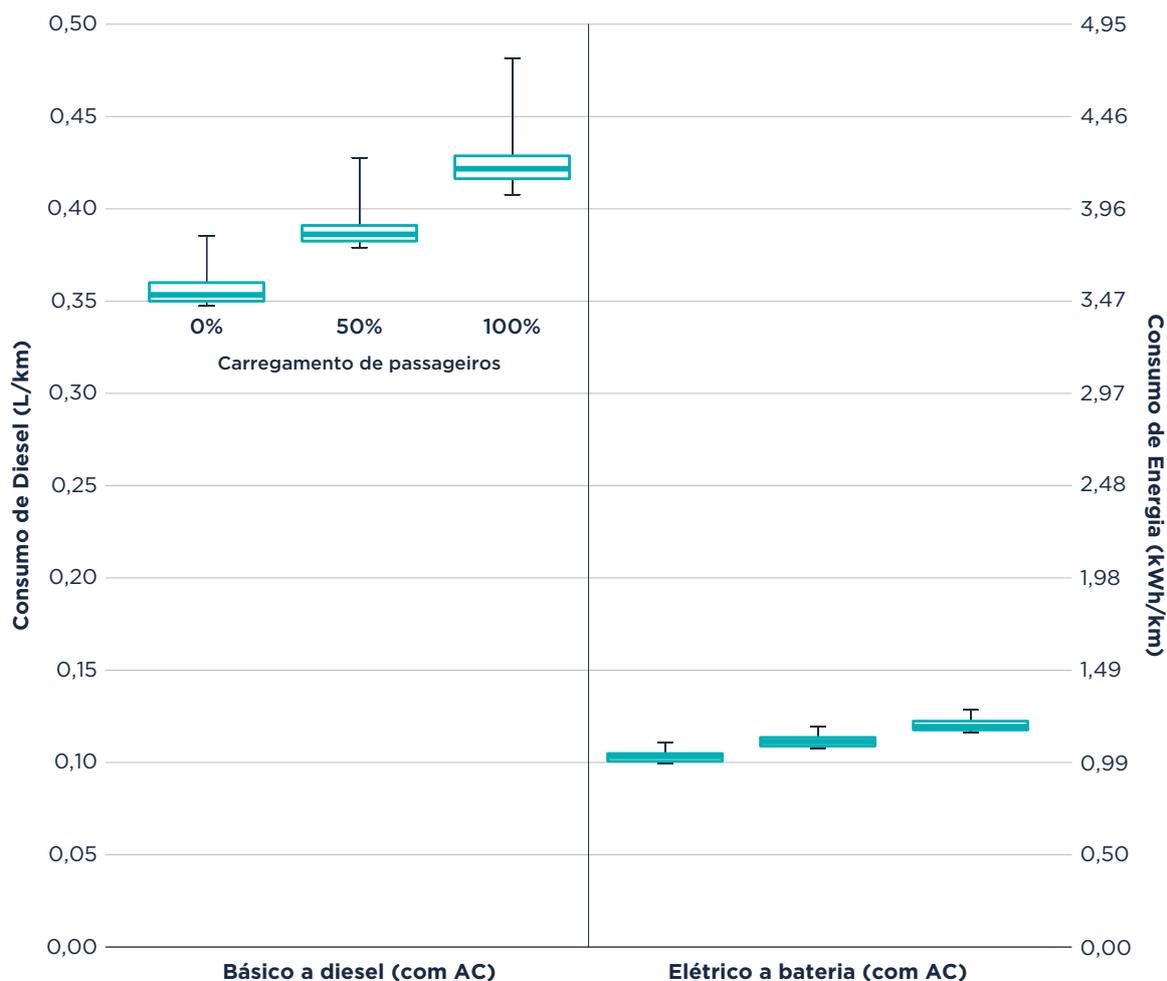


Figura 3. Consumo de energia estimado para todos os cenários modelados

Considerando as 20 linhas analisadas nas simulações, a mediana dos consumos dos ônibus a diesel foi de 0,35, 0,39 e 0,42 L/km¹⁶ para cada situação de carregamento de passageiros (respectivamente 0%, 50% e 100% de passageiros). Para o consumo do ônibus elétrico, em termos de diesel equivalente, esses valores foram de 0,10, 0,11, e 0,12 L/km.¹⁷ Esses resultados destacam os benefícios em eficiência energética do ônibus elétrico com relação ao ônibus a diesel. Para condições similares de carregamento e potência de acessórios, o consumo de energia de ônibus elétrico a bateria foi em média 28% do consumo equivalente de energia do ônibus a diesel. As variações de consumo de combustível entre as linhas, considerando as mesmas condições de carregamento de passageiros, correspondem a

¹⁶ Esses valores equivalem a, respectivamente, 3,49, 3,81 e 4,17 kWh/km.

¹⁷ Equivalentes a 1,02, 1,10 e 1,18 kWh/km.

diferenças nas características estruturais de cada trajeto, como inclinação, número de paradas para embarque e desembarque, e velocidade média.

O consumo de energia estimado para as 20 linhas da Transwolff é comparável àquele observado em testes, em projetos-pilotos, na operação de ônibus elétricos a bateria similares implementados em outros locais do mundo e, também, na linha 6030-10.

É importante destacar que os resultados de simulação podem ser diferentes de dados experimentais reais devido às premissas simplificadoras. Por exemplo, condições externas, como temperatura, umidade e pressão, são estáticas na modelagem, o que não acontece na prática. As perdas de energia no mundo real associadas às mudanças nos coeficientes de resistência ao rolamento devido a alterações na superfície da rodovia ou ao uso de pneus fora da pressão correta não são levadas em conta. Os efeitos do vento, incluindo a influência do vento contrário no arrasto, também não são contabilizados. Além disso, resultados simulados ignoram o desempenho de diferentes motoristas no consumo do ônibus, uma vez que o ciclo de condução busca reproduzir um perfil de viagem único para cada linha.

3.2.2. IMPACTO DO CARREGAMENTO DE PASSAGEIROS NO CONSUMO DE ENERGIA DE ÔNIBUS ELÉTRICOS

A Figura 4 apresenta o impacto da premissa de carregamento de passageiros no consumo de energia estimado e na autonomia de ônibus elétricos operando nas 20 linhas analisadas da Transwolff.¹⁸ Os diagramas de caixa no painel inferior apresentam o consumo de energia dos ônibus nas três condições de carregamento de passageiros (0%, 50% e 100%). O painel superior transforma os resultados de consumo de energia em estimativas de autonomia. O cálculo da autonomia assume uma bateria de 324 kWh com 20% de reserva técnica e 0% de degradação (ou seja, 259,2 kWh utilizáveis).

¹⁸ Calcula-se a autonomia dividindo a carga utilizável da bateria (kWh) pelo consumo estimado (kWh/km).

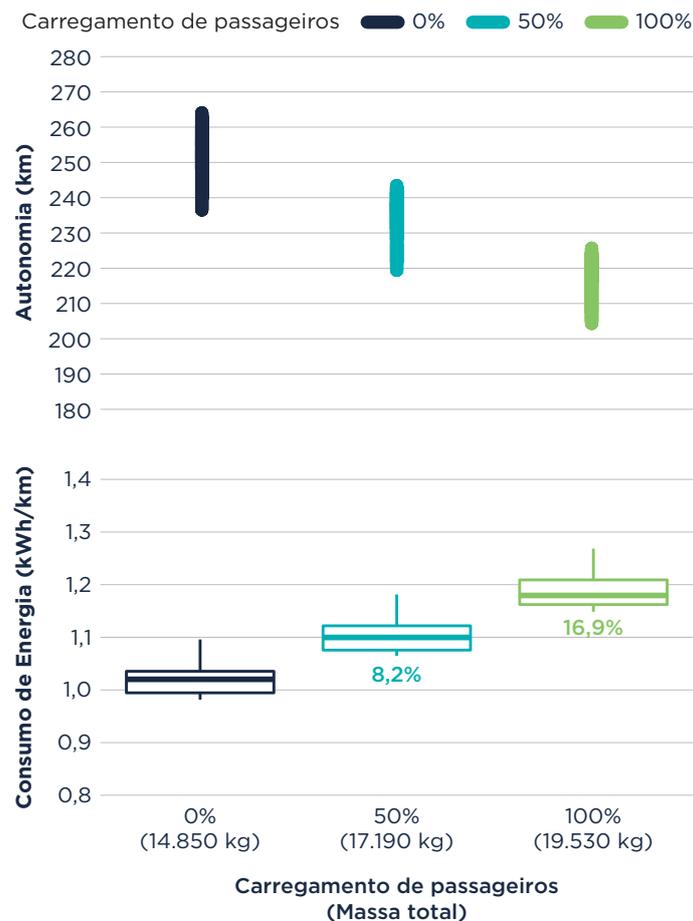


Figura 4. Impacto das premissas de carregamento de passageiros nas estimativas de consumo de energia e autonomia do ônibus elétrico

A Figura 4 demonstra como o carregamento de passageiros pode ter impacto significativo no consumo de energia e, conseqüentemente, na autonomia dos ônibus. As simulações indicam que, a partir do ônibus vazio, aumentar o carregamento para 50% e 100% de passageiros induz a um crescimento médio de consumo de, respectivamente, 8,2% e 16,9%. Nota-se que o consumo de energia dos ônibus elétricos aumenta aproximadamente de forma linear com o peso do veículo, o que permite adotar interpolações para estimar o consumo em outros cenários de carregamento de passageiros.

A autonomia estimada é inversamente proporcional ao consumo de energia, que, por sua vez, está relacionado às condições de condução da linha. Linhas com condições de condução menos severas levam a um menor consumo de energia e, conseqüentemente, a uma maior distância percorrida. Nos três cenários de carregamento (0%, 50% e 100% de passageiros), a estimativa média da autonomia foi de 217,6 km, 235 km e 254,3 km.

3.2.3. COMPARAÇÃO DA ATIVIDADE ATUAL DOS ÔNIBUS A DIESEL COM A AUTONOMIA DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Além de variações no carregamento de passageiros, outras variáveis que impactam o consumo de energia e a autonomia são a degradação da bateria ao longo do tempo e a reserva técnica, esta última representando o percentual de carga que não deve ser utilizado durante as operações regulares. O Apêndice IV discute em detalhes o impacto de diferentes variáveis na autonomia, como a reserva técnica, o carregamento de passageiros e a degradação da bateria. Considerar essas variáveis na modelagem no nível da rota é importante para auxiliar os operadores na escolha da tecnologia de ônibus mais adequada para cada linha e definir as melhores estratégias de recarga da bateria.¹⁹ Esse planejamento pode ajudá-los a garantir que a capacidade da bateria e a programação de recargas sejam suficientes para atender aos requisitos da programação, maximizando as vantagens da eletrificação nas linhas selecionadas.

Esta etapa do estudo compara a autonomia do ônibus elétrico com as operações diárias reais de cada uma das 20 linhas da Transwolff analisadas. As barras verticais na Figura 5 representam a utilização diária típica dos ônibus que operam cada linha.²⁰ Essas utilizações diárias são comparadas com as estimativas de autonomia dos ônibus elétricos a bateria, apresentadas tanto para baterias novas (círculos fechados) quanto para baterias degradadas (círculos abertos). Todas as comparações consideram o veículo operando com ar-condicionado e 20% de reserva técnica da bateria. O segmento de reta verde indica a situação com carregamento constante de 100% de passageiros, enquanto o azul apresenta a autonomia estimada considerando uma situação mais realista, de carregamento médio de passageiros igual a 50% — o que implica que algumas viagens são feitas com a capacidade total dos veículos enquanto outras são feitas com os ônibus mais vazios.

19 Outros parâmetros, como o estilo de condução, também podem impactar a autonomia do ônibus, mas são mais difíceis de capturar na estrutura de modelagem adotada neste estudo. Pesquisas futuras devem buscar incorporar esses parâmetros na análise no nível da linha.

20 Trata-se da mediana da distribuição das quilometragens percorridas por ônibus por dia. Ou seja, 50% dos ônibus que operam aquela linha percorrem, por dia, uma distância igual ou menor à distância representada pela mediana.

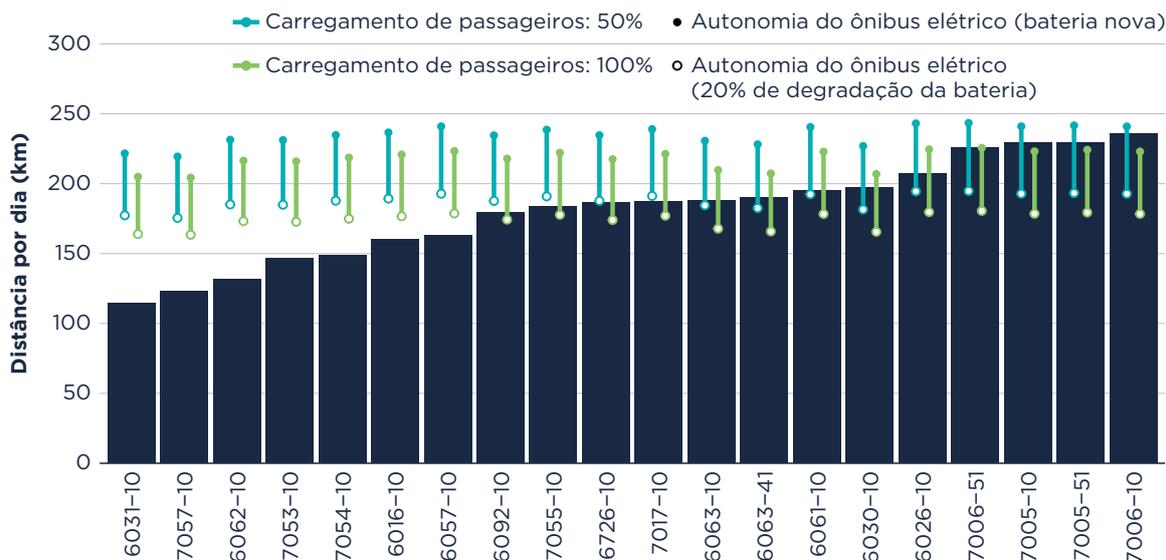


Figura 5. Estimativa da autonomia do ônibus elétrico em cada linha considerando a degradação de bateria ao longo do tempo para os cenários de 50% (em azul) e 100% (em verde) de carregamento de passageiros, além de uma reserva técnica de 20% da bateria. Os cenários de autonomia são comparados com a mediana da distribuição das distâncias diárias percorridas por veículo pela frota de ônibus a diesel de cada linha. As distâncias diárias percorridas por cada ônibus foram calculadas com os dados de GPS da SPTrans de setembro de 2019.

Pela Figura 5, percebe-se que, no início da vida útil da bateria, mesmo considerando o carregamento completo de passageiros (segmento de reta verde), o ônibus elétrico é capaz de atender a programação de praticamente todas as linhas sem grandes ajustes operacionais. A degradação da bateria pode prejudicar a operação dos veículos elétricos em nove linhas, porém, nessas situações a autonomia estimada fica menor que a utilização diária por menos de 30 km. Em apenas quatro linhas seria necessário adaptar a operação desde o início da vida útil da bateria (7006-51, 7005-10, 7005-51 e 7006-10), pois os ônibus têm uma operação intensa, que excede a autonomia estimada dos veículos elétricos. Já na situação mais realista de carregamento médio de 50% de passageiros (segmento de reta azul), mesmo as linhas mais usadas são plenamente atendidas pelos ônibus elétricos no início de sua vida útil. A velocidade de degradação da bateria, que está diretamente relacionada com seu uso e a estratégia de recarga adotada, não foi avaliada neste estudo.

Algumas estratégias podem ser implementadas para permitir a utilização de ônibus elétricos mesmo nas linhas de atividade mais intensa e ajudar os operadores a atingir a transição completa para esses veículos. Uma alternativa é manter os ônibus com baterias mais novas nas linhas mais demandantes, transferindo aqueles com as baterias mais degradadas para as linhas que requerem menos autonomia. Outra possibilidade é fazer um revezamento

de ônibus entre as linhas. Pode-se, ainda, realizar recargas intermediárias nos veículos mais demandados. É possível também adaptar a capacidade da bateria à necessidade de cada linha, adotando ônibus com baterias de maior capacidade às linhas mais demandantes, por exemplo.

Em alguns casos, pode ser necessário substituir os ônibus a diesel por um número maior de veículos elétricos para manter os níveis de serviço existentes. Isso acontecerá quando a distância diária percorrida pelo veículo a diesel for superior à autonomia do ônibus elétrico naquela linha, mesmo aplicando as mudanças operacionais descritas acima. Há também casos em que a autonomia do ônibus elétrico ultrapassa a utilização diária em determinada linha, o que indica uma oportunidade de otimização — por exemplo, adotar ônibus com capacidade de bateria menor ou compartilhar veículos em linhas pouco demandantes. Cada operador deve avaliar a solução que melhor se adéque à sua realidade.

3.2.4. AVALIAÇÃO DO CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

Esta etapa do estudo apresenta as estimativas do TCO de diferentes tecnologias de ônibus operando em cada uma das 20 linhas analisadas da Transwolff. Comparam-se os custos de um ônibus básico a diesel com tecnologia P7 e duas tecnologias alternativas: um ônibus a diesel padron com tecnologia P7 e um elétrico a bateria, todos equipados com ar-condicionado. Conforme discutido na Seção 3.1.3, os valores indicados do TCO refletem o valor presente líquido dos custos de capital, operação e manutenção ao longo dos 15 anos do projeto.

O TCO estimado é composto por seis categorias: custo de mão de obra de operação e manutenção, custo de aquisição (sem incluir a bateria do veículo elétrico), custo de aluguel da bateria, custo de aquisição e manutenção da infraestrutura de recarga, custos operacionais excluindo a mão de obra e custos de manutenção exceto a mão de obra. Essa categorização foi selecionada para adequar a análise ao modelo de negócio atualmente praticado no projeto-piloto da Transwolff.

Conforme indicado na Tabela 4 e na Figura 6, as estimativas do TCO variam de R\$ 5,21/km a R\$ 6,24/km, sendo que o ônibus básico a diesel é consistentemente o mais barato. O item de maior impacto nos custos é o de mão de obra de operação e manutenção, que corresponde a cerca de 50% do TCO dos veículos. Enquanto o TCO do ônibus básico a diesel varia entre R\$ 5,21/km e R\$ 5,47/km, o do padron a diesel varia entre R\$ 5,81/km e R\$ 6,13/km, e o do elétrico,

entre R\$ 5,98/km e R\$ 6,24/km. Os TCOs do padron a diesel e do elétrico são, respectivamente, cerca de 12% e 15% superiores ao TCO do ônibus básico.

Tabela 4. Resumo dos resultados do TCO nas 20 linhas da Transwolff analisadas

Variável	Indicador	Básico a diesel		Padron a diesel		Elétrico	
Custo total de propriedade por quilômetro	Média	5,28		5,90		6,07	
	Mínimo/máximo	5,21	5,47	5,81	6,13	5,98	6,24
Categorias de custo							
Manutenção (sem mão de obra)	Média	7,36%		8,87%		6,5%	
	Mínimo/máximo	7,1%	7,47%	8,53%	9,01%	6,33%	6,61%
Infraestrutura	Média					1,34%	
	Mínimo/máximo					1,32%	1,39%
Operação (Energia/ Combustível e ARLA 32)	Média	24,71%		26,45%		7,4%	
	Mínimo/máximo	23,81%	26,75%	25,52%	28,54%	7,24%	7,66%
Aluguel da bateria	Média					20,2%	
	Mínimo/máximo					19,78%	20,9%
Aquisição do veículo (sem bateria para elétrico)	Média	12,61%		15,14%		15,07%	
	Mínimo/máximo	12,26%	13,32%	14,73%	15,96%	14,76%	15,6%
Mão de obra	Média	55,32%		49,54%		49,48%	
	Mínimo/máximo	53,39%	56,13%	47,65%	50,32%	48,13%	50,29%

O custo com mão de obra dos veículos a diesel é igual em termos absolutos e, como o TCO do ônibus básico é menor, a representatividade da mão de obra nesse veículo é maior: varia entre 53,4% e 56,1%, enquanto no padron a diesel fica entre 47,7% e 50,3%. Já para o veículo elétrico, a mão de obra é ligeiramente mais cara, uma vez que demanda trabalhadores mais qualificados. Nesses veículos, o peso da mão de obra no TCO varia entre 48% e 50%.

A segunda categoria de custo mais representativa para os TCOs indica a grande diferença entre ônibus a diesel e elétrico, pois, para aquele, é o custo de operação e, para este, é o aluguel da bateria. Os custos de operação de ônibus a diesel incluem gastos com combustível e ARLA 32. Na média, a operação representa, respectivamente, 24,7% e 26,5% para os veículos básico e padron. Esse valor é muito superior ao custo de operação do ônibus elétrico, referente à aquisição de energia, que varia de 7,24% a 7,7% do TCO total. Por outro lado, o aluguel da bateria é extremamente oneroso para o veículo elétrico, representando cerca de 20% do TCO. Esse custo, incorrido exclusivamente pelo ônibus elétrico, é maior que o da sua própria aquisição,

uma vez que a compra do ônibus elétrico sem bateria representa cerca de 15% do TCO. Já o custo de aquisição dos veículos a diesel básico e padron representa, na média, 12,6% e 15,1% dos TCOs, respectivamente.

Por fim, os elementos menos onerosos ao TCO são a manutenção dos ônibus e a aquisição da infraestrutura de recarga dos ônibus elétricos. Para os ônibus básico a diesel, padron a diesel e elétrico, o custo de manutenção representa uma média de, respectivamente, 7,4%, 8,9%, e 6,5%. O reduzido custo de manutenção do elétrico é parcialmente compensado pelo custo da infraestrutura, que representa, na média, 1,3% do TCO.



Figura 6. Estimativas do TCO por quilômetro para 20 linhas da Transwolff, considerando um período de 15 anos, por componente de custo, linha e tecnologia, em R\$/km. A quilometragem diária dos ônibus corresponde à autonomia do ônibus elétrico em um cenário conservador com 100% de carregamento de passageiros, uma reserva técnica de 20% e uma degradação de 10% da bateria. Os percentuais em parênteses indicam a diferença do TCO de cada tecnologia em relação ao ônibus básico a diesel.

3.2.5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA ESTIMATIVA DO TCO

A análise de sensibilidade avalia o efeito das incertezas e possíveis variações dos dados de entrada utilizados nas estimativas de TCO de cada tecnologia de ônibus selecionada pelos operadores. O cenário de referência, cujos resultados foram apresentados anteriormente, será comparado a cenários alternativos, descritos na Tabela 5, que consideram diferentes condições operacionais e financeiras. Esta seção apresenta a análise apenas para o caso da linha 6030-10 (a linha do projeto-piloto), pois o impacto da variação das premissas nas estimativas do TCO tem um comportamento semelhante entre as linhas.

Tabela 5. Visão geral das análises de sensibilidade

Componente do TCO	Descrição
Atividade diária	Referência: Autonomia do ônibus elétrico em cada linha (condições severas: 100% de carregamento de passageiros, 20% de reserva técnica e 10% de degradação da bateria) Alternativa: Variações entre 100 km/dia e 260 km/dia
Custo de aquisição do ônibus a diesel	Referência: Preço do ônibus P7 Alternativa: Preço do ônibus P8, considerado como o preço do P7 com acréscimo de 2%, 5% e 10%
Custo de aquisição de ônibus elétrico + aluguel de bateria	Referência: Preço do ônibus elétrico sem bateria igual a R\$ 874.000 (redução de 5% em relação ao preço cheio) e custo de aluguel de bateria igual a R\$ 10.925 ao mês (também com redução de 5%) Alternativa: Reduções de 0%, 3,5%, 10%, 15% e 20% nos custos, advindas da maturação do mercado nacional de veículos elétricos e de possíveis incentivos dos governos para a adoção dessa tecnologia
Preço da eletricidade	Referência: 0,58 R\$/kWh Alternativa: Variações de -30%, -20%, -10%, 10%, 20% e 30%. Valores correspondentes: 0,40; 0,46; 0,51; 0,63; 0,68; e 0,74 R\$/kWh
Preço do diesel	Referência: 4,016 R\$/L Alternativa: Preço inicial variando -30%, -20%, -10%, 10%, 20% e 30%. Valores correspondentes: 2,81; 3,21; 3,62; 4,42; 4,82; e 5,23 R\$/L
Taxa de crescimento anual do preço da eletricidade	Referência: 0% Alternativa: Taxa de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%
Taxa de crescimento anual do preço do diesel	Referência: 3% ao ano Alternativa: Taxa de 0%, 1%, 2%, 4%, 5% e 6%
Consumo do veículo elétrico	Referência: Simulação feita pelo <i>software</i> Autonomie Alternativa: Variações de -10%, 10%, 20%, 30% e 40% do valor-base
Consumo do veículo a diesel	Referência: Simulação feita pelo <i>software</i> Autonomie Alternativa: Variações entre -10% e 40% do valor-base
Taxa de juros e prazo de financiamento	Referência: Finame sem carência <ul style="list-style-type: none"> • Elétrico: 7,81% • Diesel: 8,13% • Condições: 10 anos de financiamento, sem carência e 100% financiado Alternativa: <ul style="list-style-type: none"> • Finame com 1 ano de carência: Condições análogas às do cenário de referência, porém com um ano de carência para o início das parcelas do financiamento • Finem sem carência: Taxa de juros de 7,76% para elétrico e de 8,18% para diesel • Incentivo ao elétrico: Análogo ao cenário de referência, mas com taxa de juros do elétrico igual a 4,22%²¹ • À vista: Cenário que considera que os veículos são comprados à vista
Taxa de desconto	Referência: 7% Alternativa: 3%, 5% e 9,1%

²¹ No cenário de incentivo ao elétrico, considera-se nula a taxa do BNDES, além de uma Taxa do Agente Financeiro reduzida.

Impacto da atividade diária: A Figura 7 apresenta as estimativas de TCO considerando diferentes quilometragens diárias para a linha 6030-10 e para cada ônibus avaliado (um básico a diesel, um padron a diesel e um elétrico a bateria). A atividade diária de um ônibus depende do trajeto da linha atendida e da frequência de viagens programadas. Em uma mesma linha, há variabilidade na distância percorrida por ônibus ao longo dos dias e até em um mesmo dia. Isso se deve a múltiplos fatores, como a variação da demanda ao longo do dia, a duração dos horários de pico e congestionamentos. Nessa análise de sensibilidade, traçaram-se cenários com quilometragem diária entre 100 km e 260 km. A Figura 7 também apresenta duas retas verticais com estimativas de autonomia do veículo elétrico, considerando 20% de reserva técnica da bateria e 100% de carregamento de passageiros. A reta à direita representa a estimativa de autonomia nessas condições operacionais com bateria nova (0% de degradação), e a reta à esquerda indica a estimativa de autonomia com certo envelhecimento da bateria (10% de degradação). As estimativas de autonomia são conservadoras por levarem em conta condições severas de operação, com constante carregamento de 100% de passageiros.

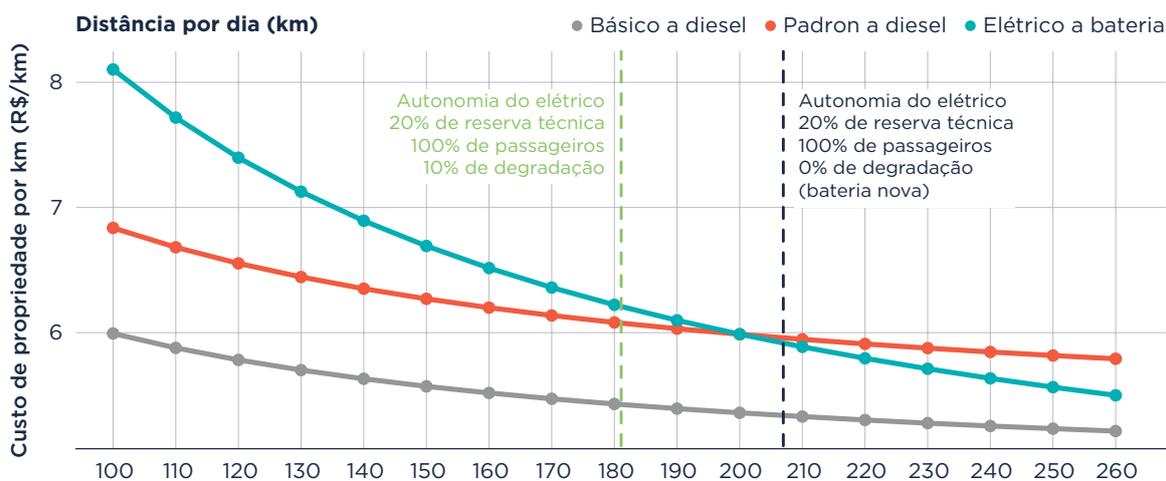


Figura 7. Análise de sensibilidade para o TCO de cada tecnologia na linha 6030-10, considerando diferentes cenários de quilometragem diária percorrida

Todas as tecnologias analisadas apresentam um TCO/km decrescente com o aumento do deslocamento diário. No entanto, os veículos elétricos têm vantagem sobre os ônibus a diesel à medida que os veículos são usados mais intensamente. Como evidencia a Figura 7, a partir do deslocamento diário de 200 km, o TCO do ônibus elétrico torna-se menor que o do ônibus padron a diesel na linha avaliada. Para o ônibus elétrico ser mais vantajoso, ajustes operacionais na programação da linha são necessários para maximizar o uso

do veículo, considerando sua autonomia. A hipótese de ajuste operacional foi examinada no cenário de referência deste estudo, porém de forma conservadora, pois se adotou como atividade diária o valor da autonomia do ônibus elétrico com 100% de carregamento de passageiros e 10% de degradação da bateria.

A Figura 8 apresenta as outras análises de sensibilidade realizadas para a linha 6030-10. Cada cenário simulado foi descrito na Tabela 5 e, a seguir, são discutidos os principais resultados.

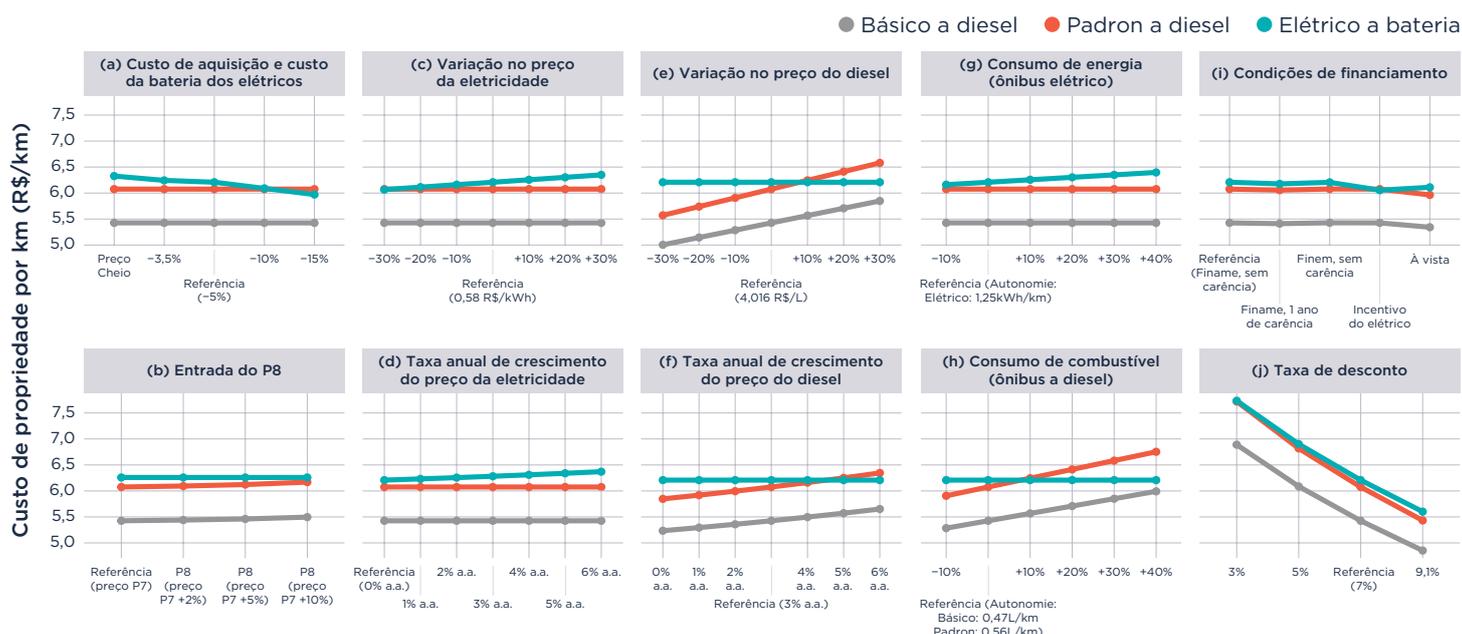


Figura 8. Análises de sensibilidade das estimativas do TCO dos ônibus básico a diesel, padron a diesel e elétrico a bateria para a linha 6030-10

Redução no custo de aquisição de ônibus e bateria (painel (a) na Figura 8):

Os resultados apresentados até o momento mostram que, apesar de os custos de capital do ônibus elétrico serem maiores em comparação aos do ônibus a diesel, a tecnologia tem custos de operação reduzidos. O custo de aquisição dos ônibus e da bateria é um importante elemento do TCO dos veículos elétricos, uma vez que, conforme apresentado na Tabela 4, representa em média 35% do TCO desses veículos. Em um cenário de expansão desse mercado, com a entrada de novas empresas, ganhos mais altos de escala na produção, maior nacionalização dos componentes e eventuais incentivos tributários para a tecnologia limpa, é esperado que o valor de aquisição dos veículos elétricos e da bateria diminua. O cenário de referência considera uma redução de 5% e a Figura 8 avalia cenários

alternativos para esses custos (com reduções de 0%, 3,5%, 10% e 15%). Conforme o cenário mais à esquerda do painel em análise, considerando o preço cheio do veículo, sem qualquer redução de custo, o TCO do ônibus elétrico seria cerca de 2% maior que o do cenário de referência. Essas simulações também indicam que uma redução de cerca de 10% nos custos de aquisição da bateria e do veículo seria suficiente para praticamente igualar o TCO dos ônibus elétricos com o dos padron a diesel.

Entrada da tecnologia P8 para os ônibus a diesel (b): A tecnologia P8, equivalente ao padrão Euro VI, está programada para ser implementada nacionalmente na comercialização dos veículos pesados em 2023, substituindo a tecnologia P7 (equivalente ao Euro V). Como a P8 ainda não é comercializada no Brasil, seus custos foram estimados com base em uma revisão de literatura. Com a entrada da fase P8, espera-se um ligeiro incremento no valor do ônibus a diesel devido à inclusão de tecnologias avançadas de controle de emissões, como observado com a entrada do Euro VI em outros mercados (Posada *et al.*, 2016). Simularam-se cenários de incremento de 2%, 5% e 10% no preço de compra do veículo a diesel P8 com relação ao valor de compra de ônibus P7 equivalente. A análise de sensibilidade indica que, apesar de aumentar levemente o TCO dos ônibus a diesel, o incremento no preço desses veículos não é suficiente para inverter a ordenação dos TCOs estudados.

Preço da energia elétrica (c) e (d): Nesta análise de sensibilidade, avaliaram-se cenários com diferentes preços iniciais de energia elétrica e taxas anuais de variação. Para o preço inicial desse insumo, considerou-se um incremento ou uma redução de 10%, 20% e 30% em relação ao valor de referência. Para o crescimento do preço, consideraram-se as taxas de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% ao ano (o cenário de referência não prevê taxa de variação do preço da eletricidade). Como o custo operacional do ônibus elétrico representa uma fração pequena de seu TCO, variando entre 7,24% e 7,66% a depender da linha (Tabela 4), o TCO do ônibus elétrico é pouco sensível a variações no preço desse insumo. O mesmo não acontece com variações no preço do diesel, como se verá a seguir.

Preço do diesel (e) e (f): De forma análoga ao exposto no parágrafo anterior, esta análise de sensibilidade avalia cenários do preço inicial do diesel e sua taxa de variação anual. Para o preço inicial, considerou-se a redução ou o incremento de 10%, 20% e 30% em relação ao preço indicado pela ANP. Já

para a taxa de variação, simulou-se um crescimento anual de 0%, 1%, 2%, 4%, 5% e 6% no preço do diesel entre 2021 e 2030, com estabilização após esse período (no cenário de referência, considera-se um crescimento de 3% para o mesmo período, conforme discutido). A Figura 6 e a Tabela 4 demonstram como a operação é uma parcela significativa do TCO dos veículos a diesel (cerca de 25% do TCO). Por esse motivo, o TCO dessa tecnologia é muito sensível tanto ao preço inicial do diesel quanto à sua taxa anual de variação.

Consumo de energia (diesel ou energia elétrica) (g) e (h): O cenário de referência considera o consumo de energia estimado para cada linha com o *software* *Autonomie*, em condições severas de operação, em que o ônibus transporta 100% de passageiros. Na operação real, há variação do consumo ao longo do dia e entre os dias, influenciada por fatores como temperatura e estilo de condução do motorista. Além disso, o consumo de energia pode ser reduzido com adaptações operacionais, como a substituição dos equipamentos de ar-condicionado e alterações estruturais para reduzir o peso dos veículos. Para avaliar essas possibilidades, simulam-se cenários variando o consumo de combustível (diesel ou energia elétrica) por quilômetro em -10%, +10%, +20%, +30% e +40% com relação às estimativas do *Autonomie*. Assim como observado na variação do preço do diesel e da energia elétrica, o TCO do veículo elétrico é pouco sensível a variações no consumo de energia, já que a operação é menos representativa no custo total dessa tecnologia. O contrário é observado para os ônibus a diesel, cujo TCO é impactado significativamente pelo aumento no consumo de diesel por quilômetro.

Condições de financiamento (i): O cenário de referência considera que os veículos a diesel e elétricos são financiados, respectivamente, pelas linhas do BNDES *Finame BK Aquisição e Comercialização* e *Finame Baixo Carbono*, conforme discutido na seção 3.1.3. As análises de sensibilidade simulam modelos alternativos de financiamento, com um cenário de compra à vista e de incentivos aos ônibus elétricos buscando indicar o potencial de políticas públicas para estimular o setor. Os resultados apontam que condições de financiamento favoráveis aos veículos elétricos são capazes de melhorar ligeiramente sua competitividade com os ônibus a diesel. No entanto, esse incentivo é limitado quando a bateria é alugada.

Taxa de desconto (j): A análise do cenário de referência descontou os valores monetários futuros a uma taxa de 7% ao ano de acordo com valores utilizados na literatura (Akbar, Minjares, & Wagner, 2014). No entanto, é importante



avaliar como o TCO se comporta com taxas alternativas. Simularam-se três cenários, considerando as taxas de desconto 3%, 5% e 9,1%, sendo esta última igual à Taxa Interna de Retorno dos contratos de concessão da SPTrans. Uma taxa de desconto maior reduz o TCO de ambas as tecnologias, mas torna o ônibus elétrico menos competitivo que a alternativa a diesel.

As análises do desempenho operacional e do TCO por linha fornecem importantes subsídios para a discussão sobre as prioridades de eletrificação entre as linhas de um operador. Uma possível estratégia consiste em minimizar os riscos de operação, priorizando a eletrificação das linhas em que a autonomia dos ônibus elétricos cumpre com mais folga a atual atividade diária dos ônibus a diesel. Essa estratégia garante o início da transição para uma frota elétrica com o mínimo de adaptações operacionais. No entanto, conforme já discutido, as vantagens dos veículos elétricos surgem da sua intensa utilização, de forma que essa estratégia pode não ser a mais adequada em termos financeiros.

Outra estratégia consiste em priorizar as linhas em que o TCO dos ônibus elétricos é mais vantajoso que o dos veículos a diesel. Os cálculos de TCO deste estudo sugerem uma ordenação de prioridades de eletrificação assumindo que os operadores aceitem o desafio de adaptar a operação das linhas para fazer com que cada ônibus elétrico circule até seu limite diário de autonomia. Ao priorizar a eletrificação com base em vantagens financeiras observadas no TCO, os operadores devem se atentar para possíveis adaptações operacionais de cada linha para garantir que as rotas selecionadas sejam passíveis de eletrificação com cada estratégia adotada.

Diversas variáveis operacionais e financeiras são relevantes na priorização de linhas para eletrificação. Para que um operador implemente uma transição para uma frota elétrica com sucesso, é necessário avaliar cuidadosamente suas alternativas a fim de garantir a viabilidade operacional da estratégia de eletrificação, maximizando os retornos financeiros advindos dessa transição.

4 CRONOGRAMA DE AQUISIÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E ESTIMATIVA DE EMISSÕES

Na seção anterior, avaliou-se o desempenho operacional e financeiro da adoção de ônibus elétricos em 20 linhas da Transwolff, considerando as características de cada trajeto e diferentes condições operacionais e financeiras. Essas análises auxiliam a escolha das linhas mais adequadas para eletrificação, de modo a garantir a transição para uma frota limpa minimizando os impactos operacionais e os custos. Com base nessas análises, esta seção explora cenários de aquisição de veículos limpos e estima a redução de emissões decorrentes dessa transição.

4.1 METODOLOGIA

Para avaliar a redução de emissões derivada da transição para uma frota limpa, é preciso definir o cronograma de substituição dos ônibus. Nesta seção, avaliam-se cenários para a substituição da frota a diesel das 20 linhas contempladas na seção anterior e apresentadas na Tabela 10 do Apêndice II. Além disso, estimam-se as emissões de GEE e poluentes atmosféricos em cada cenário. Vale salientar que as linhas avaliadas representam apenas uma parcela restrita da frota da Transwolff e, por consequência, da frota em operação no sistema de transporte público de São Paulo. Esta análise considera as substituições e emissões até o último ano dos contratos de concessão assinados entre operadores e SPTrans, ou seja, até 2033 (o último ano vai de setembro de 2033 a setembro de 2034).

4.1.1. CENÁRIO DE SUBSTITUIÇÃO DE VEÍCULOS

Os cronogramas avaliados consideram que um veículo é substituído quando atinge sua idade máxima permitida, isto é, depois de 10 anos, no caso dos ônibus a diesel, ou 15, no caso dos elétricos a bateria. A análise parte da frota operando em 2021 na Transwolff, cujos dados por linha são apresentados na Tabela 10 do Apêndice II. Três das vinte linhas analisadas (6063-41, 7005-51 e 7006-51) são linhas de atendimento, ou seja, derivam de uma linha-base e podem operar em horários, períodos e dias específicos. Os veículos das linhas de atendimento já estão contabilizados nas frotas das linhas-base, portanto, serão desconsiderados nesta parte da análise. Em julho de 2021, o estoque de veículos dessas 17 linhas-base totalizava 285 ônibus, sendo 267 a diesel mais os 18 elétricos do projeto-piloto, que operam a linha 6030-10.

A Tabela 6 detalha a frota de ônibus básico da Transwolff. A operadora conta com 450 ônibus básicos a diesel, a maior parte com tecnologia P7, além dos 18 padrons elétricos. Considera-se que os 267 ônibus a diesel mais antigos da Transwolff operam nas 17 linhas estudadas; com isso, avalia-se a situação em que a frota dessas 17 linhas é substituída o mais rápido possível. Os 267 ônibus a diesel mais antigos se referem a todos os ônibus básicos com ano do modelo de 2011 a 2019 e 8 com ano do modelo igual a 2020.

Tabela 6. Quantidade de ônibus básicos e padrons elétricos da frota atual da Transwolff por ano do modelo (julho de 2021)

Tipo	Ano do modelo	Tecnologia	Quantidade de veículos
Básico	2011	P5	7
	2012	P7	4
	2013		17
	2014		2
	2015		58
	2016		53
	2017		40
	2018		7
	2019		71
	2020		177
	2021		14
			Total básico: 450
Padron elétrico	2017	-	5
	2018	-	10
	2020	-	3
			Total elétrico: 18

Para a distribuição dos veículos nas linhas, considera-se que os ônibus mais antigos operam as linhas com maior atividade diária. Com isso, os elétricos seriam incluídos antes onde apresentam mais vantagens em termos de redução de emissões. Dois cenários de substituição são criados:

- i) Cenário I — Transição 100% elétrico: cada ônibus a diesel é substituído por um elétrico;
- ii) Cenário II — 0% de eletrificação: todos os ônibus são substituídos por novos ônibus a diesel (com a tecnologia P8/Euro VI a partir de 2023).

Os dois cenários representam casos extremos: a eletrificação mais intensa possível e a não adição de ônibus elétricos na frota. A diferença de emissões

entre ambos revela o potencial de redução de emissões com a eletrificação das 17 linhas avaliadas. Adotou-se como premissa que o número de veículos por linha permaneceria constante ao longo dos anos analisados, assim como a atividade diária média por veículo em cada linha.²²

A seguir, apresenta-se a metodologia utilizada para estimar as emissões de poluentes nesses cenários. Em uma primeira etapa, analisam-se apenas as emissões de escapamento de CO₂ fóssil e dos poluentes atmosféricos MP e NO_x. Em uma segunda etapa, analisam-se as emissões de ciclo de vida de CO₂ e outros GEE, como óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄).

4.1.2. ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE ESCAPAMENTO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E POLUENTES DO AR

Nesta etapa, avaliam-se as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x, poluentes mencionados na Lei Municipal nº 16.802/2018 (São Paulo, 2018a). Como os ônibus elétricos não geram emissões de escapamento, as emissões estimadas nesta etapa são produzidas apenas pelos ônibus a diesel em operação.

Os fatores de emissão utilizados nesta estimativa são os definidos pela SPTrans na metodologia de cálculo das emissões de poluentes de seu último edital de licitação (São Paulo, 2018c), adotados também na ferramenta PlanFrota.²³ No edital, a SPTrans faz referência aos fatores definidos no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011). O inventário leva em conta os valores de emissão médios de cada fase do Proconve apresentados pela Cetesb em seus relatórios de qualidade do ar, provenientes de testes de homologação de motores. Neste estudo, para os fatores de emissão de MP e NO_x, também se consideram os valores de emissão médios dos ônibus urbanos de cada fase do Proconve (Cetesb, 2020).

As emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x são calculadas em toneladas ao ano e dependem: (i) da atividade anual de cada linha e tipo de veículo (estimada considerando dados de GPS e multiplicada pelo número

²² As simulações não consideram as alterações de atividade e da quantidade de ônibus em cada linha, previstas com a implementação da rede de referência, definida no edital da concessão. Essas mudanças não foram avaliadas porque a rede de referência e seu cronograma foram suspensos durante a pandemia da Covid-19 e, até a data de elaboração deste estudo, sua reestruturação não havia sido divulgada.

²³ A ferramenta PlanFrota (IEMA, 2020), desenvolvida pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) em parceria com a SPTrans, é utilizada pela SPTrans e por operadores no planejamento da frota de forma a cumprir com as metas de redução de emissão estabelecidas pela Lei nº 16.802/2018.

de veículos de cada tipo em determinada linha);²⁴ (ii) do consumo de diesel em cada linha (em L/km), estimado nas etapas anteriores deste estudo e descontando, para o CO₂ fóssil, a parcela do biodiesel no diesel (já que, pela regulação, apenas a queima de combustíveis fósseis é contabilizada no cálculo de CO₂ fóssil de escapamento); e (iii) do fator de emissão de cada poluente. O fator de emissão de escapamento de CO₂ para o diesel de petróleo considerado é igual a 2,671 kg/L_{diesel}, (São Paulo, 2018c), equivalente a 268,5 g/kWh.²⁵ Apenas para fins de comparação, o fator de emissão do CO₂ de escapamento para o diesel definido pelo Argonne National Laboratory em seu modelo AFLEET (ANL, 2020) é igual a 269,5 g/kWh.

Já para os poluentes atmosféricos MP e NO_x, os fatores são definidos conforme a tecnologia de motor (P5/Euro III, P7/Euro V, ou P8/Euro VI), uma vez que alternativas mais avançadas são mais eficientes em conter sua emissão. Como descrito, adotam-se os valores de emissão médios reportados pela Cetesb (2020) para cada fase do Proconve; no entanto, ainda não há modelos homologados no Brasil da tecnologia P8/Euro VI. Por isso, este estudo considera os limites da fase (Conama, 2018), como adotado na ferramenta PlanFrota (IEMA, 2020). A Tabela 7 resume os fatores de emissão adotados na estimativa dos poluentes MP e NO_x para ônibus a diesel.

Tabela 7. Fatores de emissão dos poluentes atmosféricos MP e NO_x

Tecnologia	MP (g/kg _{diesel})	NO _x (g/kg _{diesel})	Fonte da estimativa
P5 (Euro III)	0,388	20,982	Cetesb (2020)
P7 (Euro V)	0,055	6,575	Cetesb (2020)
P8 (Euro VI)	0,026	1,112	Conama (2018)

Nota: Convertem-se os fatores de emissão em g/L_{diesel} considerando-se a densidade média do diesel igual a 0,840 kg/L (MME, 2021).

4.1.3. ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CICLO DE VIDA DE GASES DE EFEITO ESTUFA

As metas estabelecidas por lei referem-se apenas às emissões de escapamento, ou seja, resultantes da queima do combustível no motor dos veículos. No entanto, a escolha de combustíveis e fontes de energia deve ser feita buscando maximizar a redução de emissões de origem fóssil em todo o ciclo de vida do combustível, dentro de custos aceitáveis (São Paulo,

²⁴ Adota-se como atividade de um ônibus a mediana da distribuição de quilometragens diárias em cada linha em setembro de 2019 multiplicada pela quantidade de dias no ano.

²⁵ Conversão de unidades considerando o menor valor de aquecimento para o diesel com baixo teor de enxofre (128,488 Btu/gal), relatado pelo Centro de Dados de Combustíveis Alternativos do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Recuperado de <https://afdc.energy.gov/fuels/properties> em 10 de agosto de 2021.

2018a). Apesar de a legislação não exigir que os operadores considerem as emissões relacionadas à produção e distribuição dos combustíveis, elas podem representar uma parcela importante das emissões em seu ciclo de vida. Outro aspecto relevante é que a lei não considera as emissões relativas a mudanças indiretas no uso da terra (iLUC) para biocombustíveis baseados em cultura²⁶ nem outros poluentes climáticos além do CO₂, como N₂O e CH₄.

Nesta etapa, os impactos climáticos dos ônibus a diesel e elétricos a bateria são avaliados considerando não apenas as emissões de escapamento, mas também as do ciclo de vida de cada fonte de energia, e incluindo poluentes climáticos além do CO₂. As emissões de CO₂, CH₄ e N₂O são transformadas em CO₂-equivalente (CO₂eq), levando em conta o potencial de aquecimento global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*) para 100 anos de cada GEE, conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014).²⁷ As emissões de GEE do ciclo de vida são estimadas com o modelo AFLEET (ANL, 2020), que disponibiliza dados de emissões para diversos combustíveis de transporte.

As emissões de GEE do ciclo de vida para a eletricidade foram estimadas com base no planejamento da matriz brasileira de geração de energia elétrica para 2021 e 2030, apresentado no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (EPE, 2021). Essas estimativas foram ajustadas considerando 14% de perdas na distribuição da eletricidade, índice para o Brasil em 2018 (ANEEL, 2019). Os fatores de emissão para o ciclo de vida da energia elétrica calculados são 92,3 g CO₂eq/kWh em 2021 e 91,5 g CO₂eq/kWh em 2030.

Os dados do modelo AFLEET (ANL, 2020) também foram utilizados para os ônibus a diesel, dada a evolução prevista da mistura do biodiesel no diesel, de 11% a 15% (diesel B11 e B15), assumindo apenas o uso do biodiesel de soja. Consideraram-se ainda as emissões iLUC, que podem ser representativas para biocombustíveis baseados em culturas. Não foram encontradas estimativas dessas emissões abrangentes o suficiente para o caso do biodiesel derivado da soja brasileira. Por isso, aproveitou-se uma modelagem feita para biocombustíveis de aviação pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, 2019), em particular as estimativas para ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA, do inglês *hydroprocessed esters and fatty acids*)

26 As emissões iLUC ocorrem quando o aumento da demanda pelo biocombustível impacta as culturas de alimento, convertendo terras não agrícolas em terras cultiváveis.

27 GWP considerado para cada poluente: CO₂ = 1, CH₄ = 28 e N₂O = 265.

produzidos com soja brasileira.²⁸ Incluindo as emissões iLUC, os fatores de emissão adotados para diesel B11 e B15 são, respectivamente, 354,0 gCO₂eq/kWh e 362,9 gCO₂eq/kWh.

4.2 RESULTADOS

A Figura 9 discute as emissões de escapamento das 17 linhas analisadas nos dois cenários de substituição de frota simulados. Já as emissões de ciclo de vida são discutidas na Figura 10, junto das considerações sobre as emissões iLUC. Na Figura 9, os gráficos à esquerda correspondem ao cenário I, de 100% de substituição por ônibus elétricos, enquanto os gráficos à direita correspondem ao cenário II, no qual a substituição seria 100% diesel. Os gráficos no painel superior apresentam a evolução da composição da frota por tecnologia para cada cenário. Por sua vez, os gráficos do segundo painel exibem o cronograma de aquisição de novos ônibus. Os três últimos gráficos mostram as estimativas de emissão de escapamento de CO₂ fóssil e dos poluentes atmosféricos NO_x e MP2.5 por ano para a frota considerada.

No cenário I, caso os ônibus das 17 linhas analisadas sejam substituídos ao final de sua vida útil por ônibus elétricos, 282 veículos serão adquiridos entre 2022 e 2033. Nesse cenário, a frota se tornaria 100% elétrica em 2030, devendo-se a compra de ônibus depois desse ano à substituição dos veículos elétricos atualmente em operação no projeto-piloto. A maior aquisição, de 71 ônibus elétricos, aconteceria em 2029. Nesse cenário, as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP2.5 e NO_x, que correspondem às emissões dos ônibus a diesel ainda presentes na frota, são progressivamente eliminadas até 2030.

²⁸ Considera-se o fator de emissão do modelo GLOBIOM (117,9 g CO₂eq/MJ) para o combustível HEFA derivado da soja brasileira. A outra opção de fator de emissão, derivada do modelo GTAP-BIO, foi descartada neste estudo por utilizar premissas de modelagem sobre as quais existem várias divergências (Malins, Plevin, & Edwards, 2020).

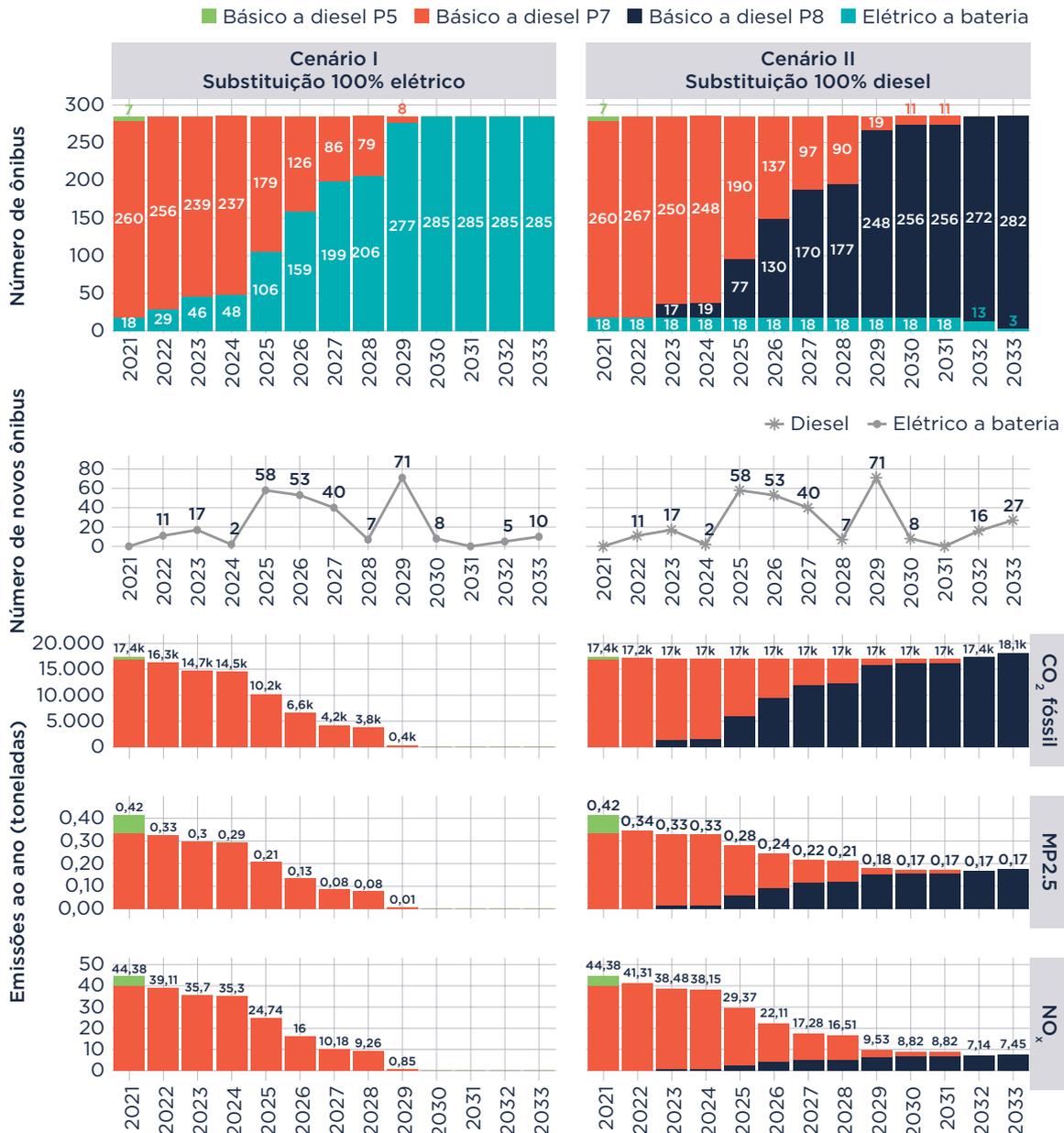


Figura 9. Cronograma de aquisição de veículos para os dois cenários analisados e estimativa de emissões anuais de escapamento de CO₂ fóssil, MP2.5 e NO_x. Em ambos os cenários, considera-se que todos os ônibus são substituídos à medida que atingem a idade máxima permitida (10 anos para ônibus a diesel e 15 para elétricos) e que a frota atual e a atividade permanecem constantes. Além disso, analisa-se a frota de ônibus básicos das 17 linhas da Transwólf selecionadas.

Já os resultados do cenário II, também apresentados na Figura 9, indicam que, caso não se adquira mais nenhum ônibus elétrico, será necessário comprar 310 ônibus a diesel entre 2022 e 2033. O maior número de aquisições em comparação com o cenário I se justifica pela menor vida útil dos veículos a diesel. Com relação às emissões, a entrada dos veículos P8 (Euro VI), que se

iniciaria em 2023, contribuiria para uma redução significativa da emissão dos poluentes atmosféricos MP2.5 e NO_x. Comparando as estimativas para 2033 com 2021, a substituição da frota do cenário II reduziria em 58% as emissões de MP e em 83% as de NO_x. No entanto, semelhante redução não se observa para o CO₂, pois essa variável é influenciada somente pela quantidade de combustível consumida. A emissão estimada para os 267 ônibus básicos a diesel que fazem parte da frota em 2021 é de 17,4 mil toneladas de CO₂ fóssil no escapamento.

Como a quantidade de veículos e a atividade são consideradas constantes ao longo dos anos, a emissão de CO₂ não se reduz. Pelo contrário, tem um leve incremento, devido à saída de 15 dos 18 ônibus elétricos do projeto-piloto ao atingirem sua idade máxima. Em 2033, as emissões no cenário II foram calculadas em 18,1 mil toneladas de CO₂ fóssil — um aumento de 4% em relação às emissões de 2021.

Comparando as emissões acumuladas de CO₂ fóssil de 2021 a 2033, calculam-se 88 mil toneladas para o cenário I e 223 mil toneladas para o cenário II. A eletrificação acelerada da frota nessas linhas evitaria a emissão de 135 mil toneladas de CO₂ fóssil, uma redução de mais de 60% das emissões no segundo cenário.

Vale notar que, mesmo se a Transwólf adotasse o cenário de substituição 100% elétrica nas linhas analisadas, não necessariamente atingiria as metas previstas na legislação. A análise realizada neste estudo não permite essa inferência, já que se debruça sobre apenas 17 das mais de 80 linhas-base operadas atualmente pela empresa. Assim, a eletrificação das linhas avaliadas deverá estar contida em um programa maior de redução de emissões, que contemple toda a frota da empresa. Esta análise salienta o potencial de redução de emissões alcançável ao eletrificar a frota e reforça que essa transição é essencial para cumprir a legislação vigente, uma vez que a simples atualização da tecnologia de motores a diesel é incapaz de contribuir para a redução de emissões de CO₂ exigida por lei.

A redução das emissões com a eletrificação apresentada até agora considerou apenas as emissões de escapamento, regulamentadas pela Lei Municipal nº 16.802/2018 (São Paulo, 2018a). A inclusão das emissões do ciclo de vida do combustível e da energia elétrica na análise possibilita comparar as consequências das alternativas tecnológicas de forma mais abrangente. A Figura 10 compara as emissões de escapamento de CO₂ fóssil com as de CO₂eq no ciclo de vida do combustível para ônibus a diesel (B11 e B15)

e elétricos a bateria (considerando a matriz elétrica brasileira de 2021 e a planejada para 2030), com e sem emissões iLUC. As emissões, apresentadas em g/km, consideram o consumo de combustível por quilômetro simulado para a linha 6030-10, embora sejam semelhantes, em termos percentuais, para as outras linhas.

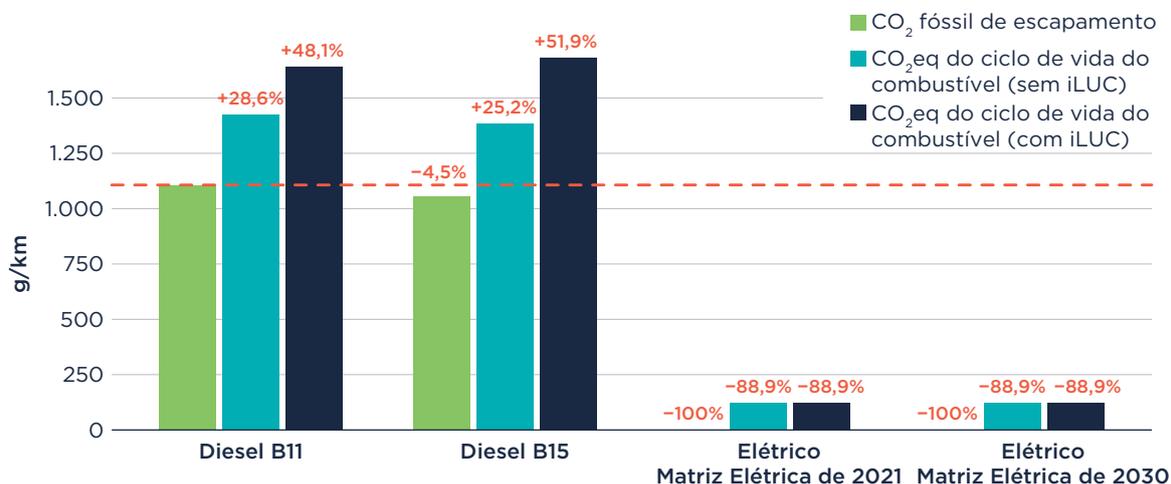


Figura 10. Comparação das emissões de escapamento do CO₂ fóssil e de ciclo de vida com e sem iLUC do CO₂eq em g/km para ônibus a diesel (B11 e B15) e elétrico a bateria (considerando a matriz elétrica de 2021 e planejada para 2030). Leva-se em conta o consumo de energia estimado no Autonomie para o ônibus básico a diesel (0,47 L/km) e elétrico a bateria (1,26 kWh/km) na linha 6030-10, equipado com ar-condicionado e com 100% de passageiros.

Considerando o ciclo de vida e outros poluentes climáticos, as emissões de CO₂eq dos ônibus elétricos a bateria são significativamente menores do que as dos ônibus a diesel. Além de reduzir em 100% as emissões de escapamento, tal tecnologia e combustível geram cerca de 90% menos CO₂eq na sua produção, distribuição e uso em comparação ao CO₂ fóssil de escapamento dos ônibus a diesel B11. As baixas emissões de ciclo de vida dos ônibus elétricos a bateria se devem, principalmente, à matriz energética brasileira, que produz eletricidade primordialmente de fontes menos poluentes. No caso do ônibus movido a diesel B11, há um aumento de 48,1% ao se considerar as emissões do ciclo de vida, incluindo as iLUC. Já no caso do diesel B15, apesar de a estimativa apontar 4,5% de redução nas emissões de escapamento de CO₂ fóssil, suas emissões de ciclo de vida são maiores que as do diesel B11 quando se incluem as emissões iLUC (51,9% maiores que as de escapamento do CO₂ fóssil do diesel B11). Isso quer dizer que o aumento da mistura de biodiesel no diesel não necessariamente reduz o impacto climático, mesmo diminuindo as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, já que as emissões associadas ao seu ciclo de vida são significativas, especialmente por conta do uso indireto da terra.

5 NECESSIDADES DE INFRAESTRUTURA

A eletrificação de uma frota de ônibus exige adaptações estruturais que garantam o adequado suprimento de todos os insumos necessários para a operação. Inicialmente, a matriz energética precisa estar ajustada ao novo modelo de transportes. O polo gerador de energia elétrica deve prever uma expansão para suportar a maior demanda da nova frota. Além disso, os sistemas de transmissão e distribuição devem se adaptar à nova carga. A garagem dos ônibus também deve se preparar para a transição, o que envolve não apenas a instalação de carregadores de alta ou baixa potência, mas também sua conexão à rede de eletricidade, com ou sem subestação específica. Por fim, também se devem ponderar aspectos operacionais de cada linha. Como discutido neste trabalho, trajetos muito longos podem extrapolar a autonomia dos ônibus elétricos. Nessa situação, pode-se considerar recargas intermediárias ao longo da operação diária, seja com retornos à garagem, seja com a instalação de carregadores em pontos estratégicos.

Essa transição também cria um ambiente de interação entre operadores de ônibus e agentes do setor de energia elétrica, o que enseja a necessidade de capacitação de profissionais. O sistema elétrico brasileiro é regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e contém um ambiente de contratação regulado e um ambiente de contratação livre, cada um com especificidades de funcionamento cujos detalhes fogem ao escopo deste trabalho. O sistema está conectado a um *grid* de distribuição elétrica, de forma que grandes consumidores do município de São Paulo podem negociar a compra de energia de geradores em outras regiões do país por meio de contratos específicos, que permitem preços diferenciados em relação aos disponíveis para consumidores cativos do ambiente regulado.

Os investimentos na infraestrutura e na formação de pessoal habilitado são custos fixos que devem ser incorridos no início da transição tecnológica e podem ser incorporados pelos operadores por meio de diferentes modelos de negócio. Para o projeto-piloto, foram estabelecidas mensalidades fixas a ser pagas pela Transwolff durante 10 anos, referentes às adaptações de infraestrutura realizadas pela BYD, incluindo os 15 carregadores instalados em uma garagem da empresa. O contrato define que a recarga deve ocorrer primordialmente fora do horário de pico, fixando o preço da energia adquirida no mercado livre pela BYD, passível apenas de ajuste anual de acordo com a inflação. Uma discussão detalhada sobre o modelo de contratação da



infraestrutura necessária para a expansão da frota elétrica foge ao escopo deste estudo. No entanto, a escolha do modelo de negócios mais adequado pode ser determinante para a viabilidade financeira do projeto. Essa escolha pode definir a alocação contratual de riscos e responsabilidades entre os interessados, alterando significativamente o custo de capital do projeto e os custos associados à manutenção e operação dos veículos.

6 CONCLUSÃO

Visando firmar seus compromissos com o combate às mudanças climáticas, em 2018 o município de São Paulo aprovou a Lei nº 16.802 (São Paulo, 2018a), estabelecendo critérios objetivos para a redução de emissões de poluentes climáticos e atmosféricos por ônibus de transporte público. Para atender às exigências da nova legislação, o município, por meio da SPTrans, lançou um projeto-piloto com a fabricante de ônibus BYD, e 18 ônibus elétricos foram adquiridos para atender a linha 6030-10 (Unisa-Campus 1-Terminal Santo Amaro), operada pela empresa Transwolff. Este estudo analisou a viabilidade da transição de linhas da Transwolff operadas por ônibus básicos para uma frota elétrica a bateria, considerando os aspectos operacionais de cada trajeto.

Um veículo elétrico operando nessa linha foi instrumentalizado com equipamentos de telemetria, e suas atividades foram registradas para criar ciclos de condução representativos de 20 linhas selecionadas da Transwolff, operadas por ônibus básicos. Com esses ciclos, simulou-se a operação de ônibus elétricos a bateria e a diesel em cada linha analisada, utilizando o *software* Autonomie. Feitas essas simulações, estimou-se o consumo de energia das tecnologias em diferentes condições, o que permitiu comparar a autonomia dos ônibus elétricos em cada linha com a programação de operação em cada trajeto. Com dados de consumo e informações sobre os custos associados ao projeto, o estudo calculou o TCO das alternativas elétricas e a diesel. Também discutiu a redução de emissões que pode ser esperada com a transição da frota de ônibus básicos a diesel para alternativas elétricas nas linhas selecionadas da Transwolff.

Primeiramente, avaliou-se a viabilidade operacional da transição de ônibus básicos para uma frota elétrica. Para isso, a autonomia dos veículos elétricos com uma carga completa da bateria foi estimada e comparada com a distância diária usual percorrida pelos veículos trafegando em cada linha. Todas as simulações de autonomia foram calculadas pelo *software* Autonomie considerando-se um cenário de 100% de carregamento de passageiros. Essa é uma situação conservadora, que subestima a autonomia dos veículos, uma vez que na realidade grande parcela das viagens é feita com um carregamento menor de pessoas. Mesmo nesse cenário pessimista de 100% de carregamento de passageiros, os resultados sugerem que a maioria das linhas pode ser operada por veículos elétricos sem grandes adaptações operacionais.

Também se avaliou o TCO, o que gerou resultados interessantes para a discussão sobre a eletrificação da frota da Transwolff. Inicialmente, é importante ressaltar que a comparação entre veículos a diesel e elétrico se insere em contextos de mercado muito distintos. Enquanto a tecnologia a diesel já é consolidada no mercado brasileiro, usufruindo dos benefícios de uma ampla competição entre fabricantes, ganhos de escala na produção e nacionalização de muitos componentes, a tecnologia elétrica é incipiente, com um mercado que busca se estruturar no país. O amadurecimento do mercado de veículos elétricos no Brasil, incentivado por uma ampliação da frota que usa essa tecnologia, pode beneficiar a adoção da alternativa elétrica por meio de uma redução no preço de aquisição desses veículos e da bateria.

Os principais resultados do TCO calculado neste estudo, que incorporam previsões de redução do preço de ônibus elétricos devido ao desenvolvimento desse mercado e projeções de crescimento no preço do combustível, indicam uma proximidade de custos entre os ônibus padron a diesel e elétricos. Os custos de propriedade estimados para ambos são muito semelhantes, com diferença de 1,1% a 4,9%.²⁹ Já os cenários alternativos de simulação indicam que os ônibus elétricos têm ainda espaço para melhorar sua competitividade perante a alternativa a diesel. Em particular, esta análise reforçou que a redução do preço de aquisição dos veículos elétricos e do aluguel das baterias tem potencial de aumentar a viabilidade financeira dessa tecnologia. Políticas públicas que buscam reduzir esses elementos de custo representam um caminho claro de incentivo à transição para uma frota limpa.

Este estudo também avaliou as emissões associadas a diferentes cenários de substituição de veículos, assumindo que um ônibus é retirado da frota quando atinge sua idade máxima e que o tamanho e a atividade da frota permanecem constantes. Compara-se um cenário de transição elétrica acelerada, no qual todos os novos veículos são elétricos a bateria, com um cenário de zero eletrificação, em que os novos ônibus são a diesel. A diferença entre os dois cenários representa a potencial redução de emissões alcançada com a eletrificação das linhas. No primeiro cenário, a frota se tornaria 100% elétrica a partir de 2030, zerando as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP2.5 e NO_x. Já no cenário 100% a diesel, as emissões de MP (-58%) e NO_x (-83%) diminuiriam por causa da entrada dos ônibus com tecnologia P8 (Euro VI), no entanto, não haveria redução das emissões de

²⁹ A diferença de TCO do veículo elétrico em relação ao ônibus básico é entre 1,3% e 5,4% acima da diferença entre ônibus padron e básico a diesel.

CO₂ fóssil. A eletrificação acelerada evitaria a emissão acumulada de 135 mil toneladas de CO₂ fóssil, uma redução de mais de 60% em relação ao cenário de substituição por ônibus a diesel.

Ao incluir as emissões de CO₂ e de outros GEE do ciclo de vida na comparação entre ônibus alimentados por diesel e eletricidade, observa-se que os ônibus elétricos a bateria têm um grande potencial de redução de emissão de GEE também ao longo do seu ciclo de vida. Isso acontece devido ao elevado percentual de fontes pouco poluentes na matriz energética brasileira, com destaque para as usinas hidrelétricas. Estima-se que o ônibus elétrico a bateria geraria 90% menos emissões de CO₂eq em seu ciclo de vida, incorporando emissões de escapamento, do que um ônibus abastecido por diesel B11 geraria de CO₂ fóssil de escapamento.

A transição para uma frota de ônibus elétricos a bateria exige planejamento cauteloso, com adequações da operação à autonomia do veículo e à estratégia de recarga. Este estudo analisou cenários de eletrificação de um conjunto de linhas da operadora Transwolff e estimou a viabilidade operacional, os custos de propriedade associados e a redução das emissões. Pesquisas futuras podem expandir a análise para um conjunto maior de operadores em São Paulo, além de analisar modelos alternativos de negócio e financiamento. A experiência em outras regiões tem mostrado que modelos alternativos de negócio auxiliam a mitigar o impacto financeiro dos altos custos iniciais desses ônibus, acelerando a adoção dessa tecnologia. Além dos impactos monetários, deve-se frisar que a eletrificação da frota traz outros benefícios ao município, como melhorias na saúde advindas da redução da poluição, benefícios associados à redução de ruídos e um maior conforto aos usuários do sistema. Embora quantificar esses benefícios fuja ao escopo deste trabalho, eles são aspectos importantes e devem ser considerados na decisão pela adoção de ônibus elétricos.

7 REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2019). *Perdas de Energia Elétrica na Distribuição*. Recuperado de https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2019-02-07.pdf/d7cc619e-0f85-2556-17ff-f84ad74f1c8d
- Akbar, S., Minjares, R., & Wagner, D. V. (2014). *Reducing Black Carbon Emissions from Diesel Vehicles: Impacts, Control Strategies, and Cost-Benefit Analysis*. Recuperado do World Bank, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/329901468151500078/pdf/864850WP00PUBL0I0report002April2014.pdf>
- Argonne National Laboratory (ANL). (2020). *AFLEET Tool 2019*. Recuperado de https://greet.es.anl.gov/afleet_tool
- Bazani, A. (2020, 3 de setembro). Estudos para implantação de nova rede de ônibus em São Paulo serão retomados após pandemia, diz SPTrans. *Diário do Transporte*. Recuperado de <https://diariodotransporte.com.br/2020/09/03/estudos-para-implantacao-de-nova-rede-de-onibus-em-sao-paulo-serao-retomados-apos-pandemia-diz-sptrans/>
- Brasil. Conselho Nacional de Trânsito. (2014). *Resolução nº 502, de 23 de setembro*. Recuperado de <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=275034>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb). (2019). *Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2018*. Recuperado de <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/02/Relat%C3%B3rio-Emiss%C3%B5es-Veiculares-no-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo-2018.pdf>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb). (2020). *Dados: Fator de Emissão*. Recuperado de <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). (2018). *Resolução nº 490, de 16 de novembro*. Recuperado de https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058898/do1-2018-11-21-resolucao-n-490-de-16-de-novembro-de-2018-51058604#:text=Estabelece%20a%20Fase%20PROCONVE%20P8,rodovi%C3%A1rio%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A1ncias
- Dallmann, T. (2019). *Benefícios de Tecnologias de Ônibus em Termos de Emissões de Poluentes do Ar e do Clima em São Paulo*. Recuperado do International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/beneficios-de-tecnologias-de-onibus-em-termos-de-emissoes-de-poluente-do-ar-e-do-clima>
- Dallmann, T., Delgado, O., Jin, L., Minjares, R., Gadepalli, R., & Cheriyan, C.A. (2021). *Strategies for Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Route-Level Energy Consumption and Driving Range Analysis*. Recuperado de <https://theicct.org/publications/deploying-zero-emission-bus-fleets-jun2021>
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2020). *Nota Técnica - Projeção de Preços Internacionais de Petróleo e Derivados: 2020-2030*. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-projecao-de-precos-internacionais-de-petroleo-e-derivados-2020-2030>

- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2021). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Recuperado de https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf
- Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). (2020). *PlanFrota: Ferramenta para Transporte Limpo*. Recuperado de <https://energiaeambiente.org.br/produto/planfrota-ferramenta-para-transporte-limpo>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Greenhouse Gas Emissions by Economic Sectors: Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2019). *CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology [CORSIA Supporting Document]*. Recuperado de https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf
- Jin, L., Delgado, O., Gadepalli, R., & Minjares, R. (2020). *Strategies For Deploying Zero-Emission Bus Fleets: Development of Real-World Drive Cycles to Simulate Zero-Emission Technologies along existing Bus Routes*. Recuperado de <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Drive-cycle-devo-ZE-bus-082020.pdf>
- Malins, C., Plevin, R., & Edwards R. (2020). How robust are reductions in modeled estimates from GTAP-BIO of the indirect land use change induced by conventional biofuels? *Journal of Cleaner Production*, 258, 120716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120716>
- Miller, J., & Façanha, C. (2016). *Análise de Custo-Benefício da Norma P-8 de Emissões de Veículos Pesados no Brasil*. Recuperado de <https://theicct.org/publication/cost-benefit-analysis-of-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*. Recuperado de <https://theicct.org/publications/financing-transition-soot-free-urban-bus-fleets-20-megacities>
- Ministério de Minas e Energia (MME). (2021). *Anexo VIII – Fatores de Conversão do Balanço Energético Nacional de 2021 – Ano base 2020*. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). (2011). *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Recuperado de http://anuario.antt.gov.br/index.php/content/view/5632/1__Inventario_Nacional_de_Emissoes_Atmosfericas_por_Veiculos_Automotores_Rodoviarios.html
- Posada, F., Chambliss, S., & Blumberg, K. (2016). *Costs of Emission Reduction Technologies for Heavy-Duty Diesel Vehicles*. Recuperado do International Council on Clean Transportation, <https://www.theicct.org/publications/costs-emission-reduction-technologies-heavy-duty-diesel-vehicles>
- São Paulo. (2009). *Lei nº 14.933, de 5 de junho*. Recuperado de <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2009/1493/14933/lei-ordinaria-n-14933-2009-institui-a-politica-de-mudanca-do-clima-nomunicipio-de-sao-paulo>

- São Paulo. Secretaria Municipal de Transportes. (2015). *Portaria SMT nº 9, de 21 de janeiro*. Recuperado de <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/portaria-secretaria-municipal-de-mobilidade-e-transportes-9-de-22-de-janeiro-de-2015>
- São Paulo. (2016). *Lei nº 16.428, de 25 de abril*. Recuperado de <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2016/1643/16428/lei-ordinaria-n-16428-2016-dispoe-sobre-a-instalacao-de-ar-refrigerado-em-no-minimo-80-oitenta-por-cento-da-frota-dos-onibus-que-operam-no-sistema-de-transporte-coletivo-urbano-de-passageiros-e-da-outras-providencias?q=Lei+16.428>
- São Paulo. (2018a). *Lei nº 16.802, de 17 de janeiro*. Recuperado de <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2018/1681/16802/lei-ordinaria-n-16802-2018-da-nova-redacao-ao-art-50-da-lei-n-14933-2009-que-dispoe-sobre-o-uso-de-fontes-motrizas-de-energia-menos-poluentes-e-menos-geradoras-de-gases-do-efeito-estufa-na-frota-de-transporte-coletivo-urbano-do-municipio-de-sao-paulo-e-da-outras-providencias?q=Lei%2016.802>
- São Paulo. (2018b). Edital de Licitação: Anexo 3.1 – Especificação do Sistema Integrado de Transporte Coletivo. Recuperado de <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/edital/index.php?p=256676>
- São Paulo. (2018c). *Edital de Licitação: Anexo 5.1 – Padrões Técnicos de Veículos*. Recuperado de <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/edital/index.php?p=256676>
- São Paulo. (2018d). *Edital de Licitação: Anexo 10.3 – Estudo de Viabilidade Econômico-Financeira da Concessão do Sistema de Transporte Coletivo Público de Passageiros na Cidade de São Paulo*. Recuperado de <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/edital/index.php?p=256676>
- São Paulo. (2020a). *Planilha de Custos da SPTrans*. Recuperado em 5 de julho de 2021 de https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/index.php?p=227887
- São Paulo. Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes. (2020b). *Portaria SMT nº 81, de 24 de março*. Recuperado de <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/portaria-secretaria-municipal-de-mobilidade-e-transportes-smt-81-de-24-de-marco-de-2020>
- São Paulo. (2021). *Programa de Metas 21/24*. Recuperado de <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/governo/SEPEP/arquivos/pdm-versao-final-participativa.pdf>
- Slowik, P., Araujo, C., Dallmann, T., & Façanha, C. (2019). *Avaliação internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas*. Recuperado de <https://theicct.org/publications/avalia%C3%A7%C3%A3o-internacional-de-pol%C3%ADticas-p%C3%BAblicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas>
- Vepsäläinen, J., Otto, K., Lajunen, A., & Tammi, K. (2019). Computationally efficient model for energy demand prediction of electric city bus in varying operating conditions. *Energy*, 169, 433–443. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.064>

APÊNDICE A

A Tabela A1 apresenta a frota de ônibus da cidade de São Paulo, enquanto a Tabela A2 detalha a da Transwólf, por tipo e tecnologia.

Tabela A1. Características da frota de São Paulo por tipo de ônibus (agosto de 2021)

Tipo	Comprimento (m)	Capacidade de passageiros	Quantidade na frota	Idade média (anos)
Miniônibus	8,6-9,0	35	1.975	4,15
Midiônibus	9,6-11,5	54 a 68	3.074	4,92
Básico	11,5-12,5	74	2.217	6,14
Padron	12,5-15	87 a 110	4.020	4,68
Articulado	18,2-23	129 a 174	2.387	5,91
Biarticulado	≤ 27	198	50	9,10
Trólebus	12,5-15	87 a 110	201	8,98
Elétrico	12,9	71 e 72	18	3,11
Total: 13.942				

Fonte: São Paulo (2018c) e dados fornecidos pela SPTrans em agosto de 2021.

Tabela A2. Composição da frota da Transwólf (dados de julho de 2021)

Tipo	Tecnologia	Quantidade na frota	Idade média (min-máx) (anos)
Miniônibus	P7/Euro V	55	3,1 (0-7)
Midiônibus	P5/Euro III	67	3,8 (0-11)
	P7/Euro V	682	
Básico	P5/Euro III	7	3,0 (0-10)
	P7/Euro V	443	
Padron	Elétrico	18	2,9 (1-4)
Total: 1.272			

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta mais detalhes sobre as 20 linhas analisadas e a seleção dessa amostra, além de discutir as adaptações feitas para a construção dos ciclos de condução e trazer informações adicionais sobre a simulação do consumo de energia.

SELEÇÃO DA AMOSTRA

Este estudo considera apenas as linhas da Transwolfoff operadas por ônibus básicos, considerando que essa parcela da frota pode ser substituída por ônibus elétricos padron, como os adotados no projeto-piloto, já que os outros veículos da empresa são menores (miniônibus e midiônibus). Das 135 linhas da Transwolfoff, 37 são operadas por ônibus básico. Dessas 37, 31 foram pré-selecionadas porque sua manutenção estava prevista na rede de referência, segundo o edital de concessão, sem alterações de trajeto, e porque seus dados de GPS e GTFS estavam disponíveis.

Como será discutido a seguir, foi possível construir ciclos de condução de apenas 20 dessas linhas. A Tabela B1 destaca os parâmetros dessas 20 linhas, utilizados para desenvolver os ciclos artificiais, destacando em cinza as 11 linhas excluídas da análise.

Tabela B1. Linhas da Transwolff operadas por ônibus básico consideradas no estudo e parâmetros utilizados na estimativa dos ciclos artificiais

#	Linha	Nome	Operação da linha		Parâmetros para construção do ciclo de condução artificial		
			Frota dia útil ^{a,b}	Atividade diária ^c km/dia/ônibus	Velocidade média ^{c,d} km/h	Tempo ocioso ^e %	Inclinação média da linha ^f %
1	6016-10	Jd. Noronha-Term. Grajaú	22	160,2	12,23	21,41%	-0,27%
2	6026-10	Jd. Icarai-Term. Sto. Amaro	12	207,2	15,64	25,61%	0,62%
3	6031-10	Jd. São Bernardo-Term. Grajaú	10	114,6	13,41	41,04%	-0,19%
4	6057-10	Vi. Natal-Term. Grajaú	14	163,3	14,29	24,81%	-0,30%
5	6061-10	Jd. Marilda-Term. Grajaú	13	195,4	14,42	26,27%	-0,07%
6	6062-10	Jd. Castro Alves-Term. Grajaú	23	131,8	11,64	26,24%	-0,10%
7	6063-10	Jd. Varginha-Term. Varginha	27	187,9	18	33,89%	0,69%
8	6063-41	Jd. Novo Marilda-Term. Varginha	9*	190,0	17,84	35,55%	0,35%
9	6092-10	Jd. Das Pedras-Term. Grajaú	7	179,2	13,29	30,39%	0,54%
10	6726-10	Jd. Gaivotas-Term. Grajaú	19	186,5	13,93	26,19%	-0,04%
11	7005-10	Jd. Vera Cruz-Jd. Ângela	19	229,6	14,72	24,77%	0,00%
12	7005-51	Jd. Vera Cruz-Metrô Capão Redondo	12*	229,6	14,04	24,18%	0,36%
13	7006-10	Jd. Horizonte Azul-Jd. Ângela	33	235,4	14,78	26,25%	0,00%
14	7006-51	Jd. Horizonte Azul-Metrô Capão Redondo	18*	225,9	14,46	24,63%	0,35%
15	7017-10	Jd. Guarujá-Term. Guarapiranga	16	187,5	14,59	25,92%	1,08%
16	7053-10	Jd. Macedônia-Term. Campo Limpo	24	146,3	11,92	27,55%	1,80%
17	7054-10	Jd. Macedônia-Term. Campo Limpo	5	148,5	12,84	30,68%	0,57%
18	7055-10	Jd. Guarujá-Term. Campo Limpo	17	183,4	13,06	24,34%	0,69%
19	7057-10	Jd. Mitsutani-Term. Campo Limpo	6	123,4	12,01	28,66%	1,73%
20	6030-10	Unisa-Campus 1-Term. Sto. Amaro (Referência para construção dos ciclos artificiais)	18	197,3	15,47	23,66%	0,17%
21	6063-42	Chác. Sto. Amaro-Term. Varginha	4*	158,4	19,97	33,12%	0,23%
22	6063-43	Vi. Da Paz-Term. Varginha	1*	136,0	19,98	16,31%	2,26%
23	6L01-10	Marsilac-Term. Varginha	9	278,4	24,01	31,60%	0,09%
24	6L01-22	Vi. Progresso-Term. Varginha	2*	82,3	24,57	36,48%	0,00%
25	6L04-10	Jd. Oriental/Fontes-Term. Parelheiros	6	179,4	18,61	29,31%	0,48%
26	6L04-41	Jd. Das Fontes-Term. Parelheiros	2*	79,3	25,64	39,25%	0,90%
27	6L04-42	Jd. Oriental-Term. Parelheiros	2*	64,0	21,43	32,39%	0,48%
28	6L05-10	Barragem-Term. Parelheiros	9	274,4	26,79	39,97%	-0,23%
29	6L11-10	Ilha Do Bororé-Term. Grajaú	6	218,6	13,95	27,40%	-0,24%
30	N635-11	Term. Grajaú-Jd. Gaivotas	4	76,7	22,25	39,00%	0,00%
31	N639-11	Term. Grajaú-Vargem Grande	3	122,8	27,45	37,90%	0,00%

Notas:

- (a) O asterisco (*) é utilizado quando a frota já está contabilizada na linha-base. Os dois últimos dígitos do código da linha representam o tipo de linha, sendo: 10 (linha-base), 11 (linha noturna), 21-29 (retorno), 31-39 (derivação), 41-49 (bifurcação) e 51-59 (prolongação). As linhas cujos dois últimos dígitos são diferentes de 10 e 11 são denominadas linhas de atendimento.
- (b) Número de ônibus da frota de cada linha em dia útil no horário de pico da manhã (São Paulo, 2020a).
- (c) Os parâmetros operacionais foram calculados a partir de dados da operação de setembro de 2019, escolhido por ter uma operação "típica" — não é um mês de férias escolares nem tem grandes eventos que poderiam trazer características atípicas para o sistema de transportes, como o carnaval.
- (d) A quilometragem diária por ônibus, representada pela mediana da distribuição de distâncias diárias registradas, foi estimada a partir dos dados de GPS da SPTrans de setembro de 2019.
- (e) O tempo ocioso foi estimado a partir dos dados de telemetria do ônibus da Transwolff, coletados entre agosto e novembro de 2020, e dados GTFS das linhas disponibilizados pela SPTrans.³⁰
- (f) Inclinações calculadas com base nos dados de elevação coletados com uma API do Google.

30 Disponível em <http://www.sptrans.com.br/desenvolvedores/>.

DESENVOLVIMENTO DO CICLO DE CONDUÇÃO

A metodologia para desenvolver o ciclo de condução e simulação do consumo de energia utilizada neste estudo baseou-se em Jin *et al.* (2020) e Dallmann *et al.* (2021). Aqui serão discutidas adaptações que se mostraram necessárias na análise das rotas da Transwolff.

Conforme apresentado na seção 3.1, a primeira etapa da análise é o desenvolvimento dos ciclos de condução de cada linha. A ferramenta de construção de ciclos do ICCT utiliza dados reais de posição (latitude e longitude), elevação e velocidade, com alta frequência e precisão. Ela exige que o intervalo entre as observações seja de no máximo 1 segundo (frequência de pelo menos 1 Hz). Dados com intervalos de coleta de até 10 segundos podem ser utilizados, sendo necessário realizar uma interpolação para obter dados com a frequência de 1 Hz.³¹

Foi possível construir o ciclo da linha 6030-10 seguindo a metodologia de Jin *et al.* (2020), já que dados de telemetria³² com frequência adequada estavam disponíveis. A construção do ciclo é esquematizada na Figura B1. O lado esquerdo apresenta a evolução da velocidade ao longo de 4 dos 66 dias de operação considerados. O lado direito mostra o ciclo de condução representativo desenvolvido.

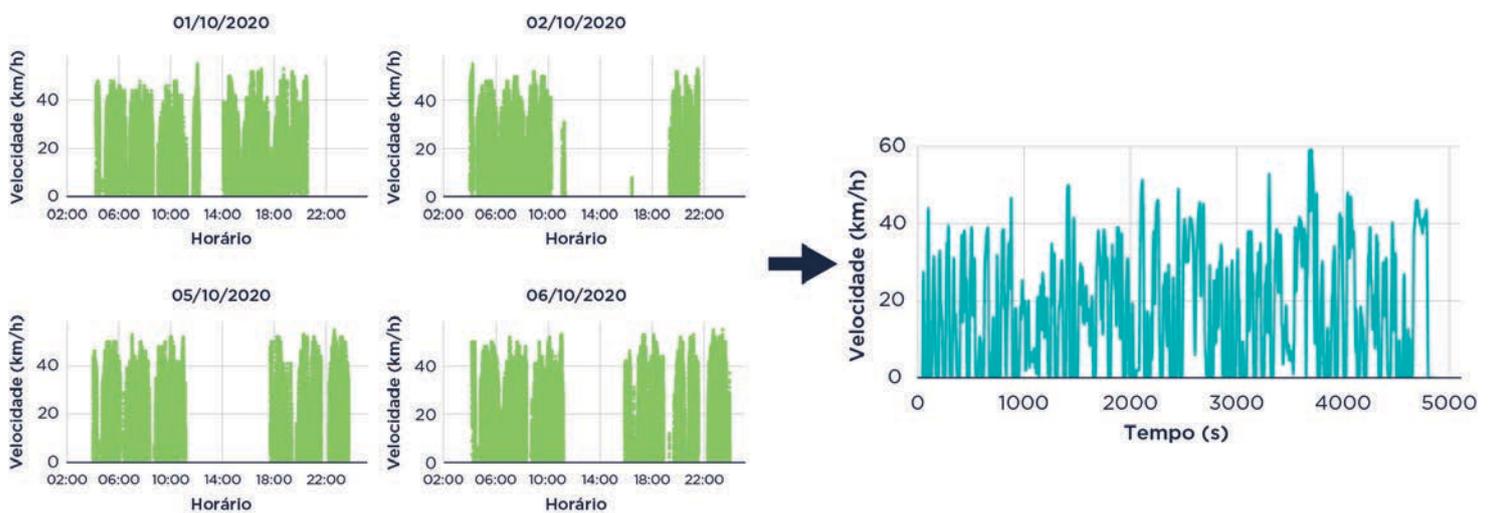


Figura B1. Exemplos de dados reais operacionais da linha 6030-10 (lado esquerdo) e ciclo de condução representativo desenvolvido (lado direito)

³¹ Dados capturados em baixa frequência podem ocultar ações do ônibus ao longo do trajeto. Por exemplo, paradas rápidas para o embarque ou desembarque de passageiros ou em placas de "pare" podem não ser capturadas em sistemas que coletam dados apenas a cada 50 ou 60 segundos.

³² Dados de GPS referentes à operação de 1 ônibus elétrico BYD na Transwolff, coletados entre agosto e novembro de 2020. Os intervalos de coleta dos dados são variáveis, mas em sua maioria menores do que 10 segundos.

Para as outras 19 linhas, não estavam disponíveis dados com frequência adequada. A SPTrans disponibiliza dados de GPS de toda a sua frota, porém com frequência menor do que a necessária para este estudo, com intervalos de coleta oscilando majoritariamente entre 45 e 50 segundos. Por conta disso, para essas outras linhas, foram construídos ciclos de condução artificiais a partir de três ajustes no ciclo de condução da linha 6030-10, considerado o ciclo-base: i) no tempo ocioso, ii) na velocidade média e iii) na inclinação. Os ajustes são explicados na Figura B2, que exemplifica o desenvolvimento de um ciclo artificial. As três últimas colunas da Tabela B1 mostram os parâmetros adotados para a construção dos ciclos artificiais.

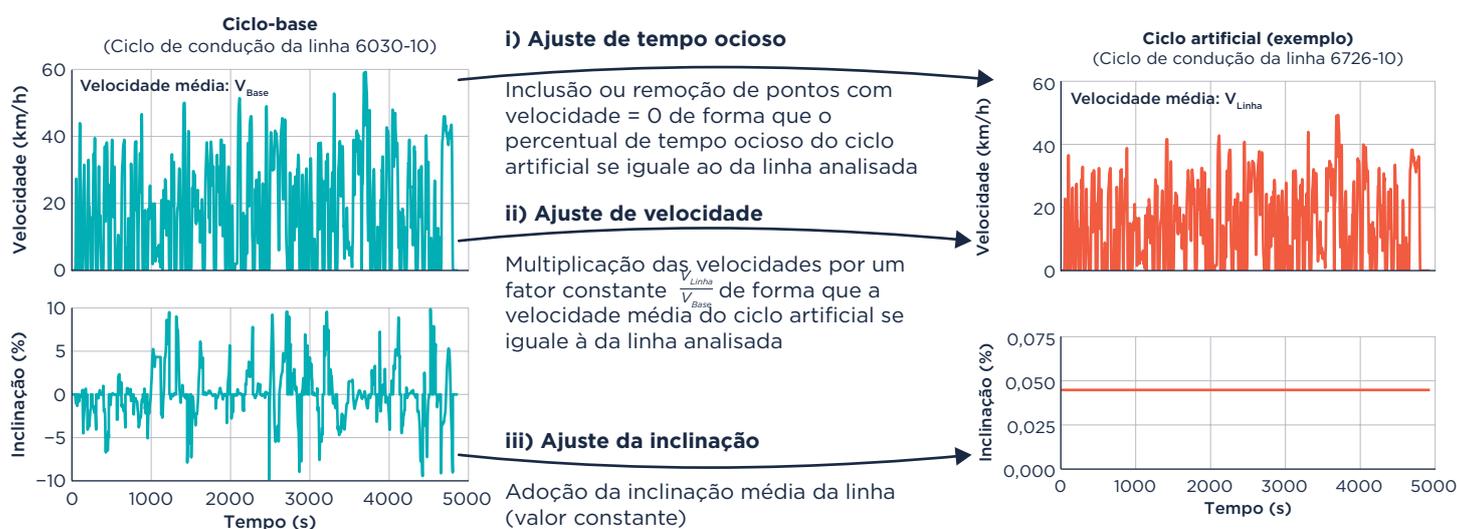


Figura B2. Exemplo de construção de ciclo de condução artificial (linha 6726-10)

O tempo ocioso representa o percentual médio de tempo parado do ônibus durante a operação.³³ Para os ciclos de condução artificiais, esse parâmetro foi estimado com base no percentual de tempo ocioso do ciclo-base (linha 6030-10), no número de paradas de cada linha e no tempo médio de viagem (calculado com os dados de GPS da SPTrans de setembro de 2019).³⁴ Partindo do ciclo-base, o ajuste de tempo ocioso foi feito pela inclusão ou remoção de pontos de velocidade nula.

³³ O tempo ocioso é calculado somando os tempos em que o ônibus está com velocidade zero durante a operação — eliminam-se os tempos do ônibus parado na garagem e nos pontos finais de parada.

³⁴ O percentual de tempo ocioso das outras linhas foi estimado a partir do tempo médio de parada da linha 6030-10, calculado com os dados de telemetria de agosto a novembro de 2020. Multiplicou-se o tempo ocioso médio por ponto de parada de ônibus da linha 6030-10 (19,6 segundos) pelo número de paradas de cada linha, dividindo o resultado pelo tempo médio de viagem (considerando o trajeto ida e volta no caso de linhas com duas direções).

Para o ajuste da velocidade média, multiplicou-se a velocidade do ciclo-base por uma constante de forma a simular a velocidade média observada na linha analisada (calculada com os dados de GPS da SPTrans de setembro de 2019). Já para o cálculo da inclinação, a partir dos dados de latitude e longitude dos pontos iniciais e finais das linhas (disponíveis na base de dados GTFS da SPTrans), coletaram-se os dados de elevação por meio de uma API do Google.³⁵ Calculou-se uma inclinação média para cada linha e direção, dividindo-se a diferença de elevação entre os pontos finais e iniciais pela distância. No ciclo artificial, no caso de linhas com apenas uma direção, adotou-se essa inclinação média de forma constante ao longo do ciclo; no caso de linhas com duas direções, adotou-se a média entre as duas inclinações.

Onze ciclos de condução artificiais elaborados por meio dos ajustes no ciclo-base se mostraram pouco confiáveis em algumas situações e foram descartados. Os ciclos descartados representam linhas com características muito distintas com relação ao ciclo-base: oito circulam em regiões rurais (linhas 6L01-10, 6L01-22, 6L04-10, 6L04-41, 6L04-42, 6L05-10, 6063-42 e 6063-43), duas são noturnas (linhas N635-10 e N639-11) e uma contempla uma travessia de balsa (6L11-10). Ao final, considerou-se que os dados disponíveis para este estudo eram insuficientes para a estimativa dos ciclos de condução artificiais dessas onze linhas. A Tabela B1 destaca os parâmetros das 20 linhas da Transwolff selecionadas, utilizados para o desenvolvimento dos ciclos artificiais, destacando em cinza as linhas excluídas da análise.

SIMULAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

A simulação do consumo de energia de diesel e bateria é baseada na ferramenta Autonomie³⁶ e explicada por Dallman *et al.* (2021). Os parâmetros dos veículos que ofereceram dados de entrada dessa ferramenta são apresentados na Tabela B2.

³⁵ Os dados do Google Elevation API capturam informações de elevação com base nas latitudes e longitudes informadas.

³⁶ Para mais detalhes sobre características e aplicações no Autonomie, consultar publicações listadas em <https://www.autonomie.net>.

Tabela B2. Especificações do ônibus a diesel e elétrico a bateria

Especificação técnica	A diesel	Elétrico a bateria
Comprimento (m)	12,5	12,9
Peso em ordem de marcha (kg)	12.100	14.850
Peso bruto total (kg)	16.780	19.530
Raio do pneu (m)	0.29	0.29
Potência do motor/motor elétrico (kW)	175	300
Relação de transmissão	6.70 / 3.81 / 2.29 / 1.48 / 1.00 / 0.73 marcha à ré = 6.29	1:22
Redução do eixo traseiro	i = 5.222	
Potência de acessórios (kW)	6	6
Capacidade da bateria (kWh)	N.A.	324

APÊNDICE C

A Figura C1 apresenta o consumo de combustível e energia estimado no Autonomie para cada linha analisada, considerando o cenário de 100% de carregamento de passageiros. Simulou-se um ônibus básico a diesel e um ônibus elétrico a bateria, conforme as características técnicas de ônibus que fazem parte da frota da Transwolff, descritos na Tabela B2 do Apêndice II. No entanto, para a comparação entre tecnologias na análise de custos, o ônibus elétrico a bateria da Transwolff é mais semelhante em termos de tamanho, acessibilidade e conforto ao ônibus a diesel padron – tipo que não faz parte da frota da empresa. Por isso, estimou-se o consumo de diesel de ônibus padron nas linhas avaliadas considerando um aumento de 19,6% com relação ao consumo do ônibus básico a diesel. O valor de 19,6% foi obtido ponderando a relação entre o consumo médio de combustível do ônibus básico (0,529) e do padron (0,633) do sistema de São Paulo,³⁷ com ar-condicionado.

Tabela C1. Consumo de combustível e energia estimado para cada linha (com 100% de carregamento de passageiros e massa de 16.780 kg)

Linha	Resultados do Autonomie		Estimativa (+19,6% do consumo do básico)
	Ônibus básico Consumo de diesel (L/km)	Ônibus elétrico Consumo de energia (kW/ km)	Ônibus padron* Consumo de diesel (L/km)
6016-10	0.408	1.174	0.487
6026-10	0.429	1.154	0.513
6030-10	0.466	1.252	0.557
6031-10	0.462	1.265	0.553
6057-10	0.418	1.160	0.500
6061-10	0.420	1.163	0.502
6062-10	0.414	1.197	0.495
6063-10	0.473	1.236	0.566
6063-41	0.481	1.250	0.576
6092-10	0.425	1.190	0.508
6726-10	0.422	1.191	0.505
7005-10	0.419	1.162	0.501
7005-51	0.415	1.156	0.496
7006-10	0.422	1.162	0.505
7006-51	0.416	1.149	0.498
7017-10	0.421	1.171	0.504
7053-10	0.416	1.200	0.497
7054-10	0.422	1.185	0.505
7055-10	0.413	1.167	0.494
7057-10	0.429	1.269	0.512

³⁷ Dados obtidos na planilha de custos da SPTrans (São Paulo, 2020a).

APÊNDICE D

A Figure D1 exemplifica como os resultados da simulação de consumo de energia no nível da linha podem ser utilizados para analisar o impacto de diferentes parâmetros na autonomia de ônibus elétricos, considerando duas linhas operadas pela Transwólf. A linha 6026-10 (Jardim Icaraí-Terminal Santo Amaro), em azul, teve o menor consumo de energia modelado entre as 20 linhas analisadas. Já a linha 7057-10 (Jardim Mitsutani – Terminal Campo Limpo), em verde, teve o maior consumo de energia entre as 20 linhas modeladas. Elas representam os extremos, em termos de autonomia, para as 20 linhas analisadas.

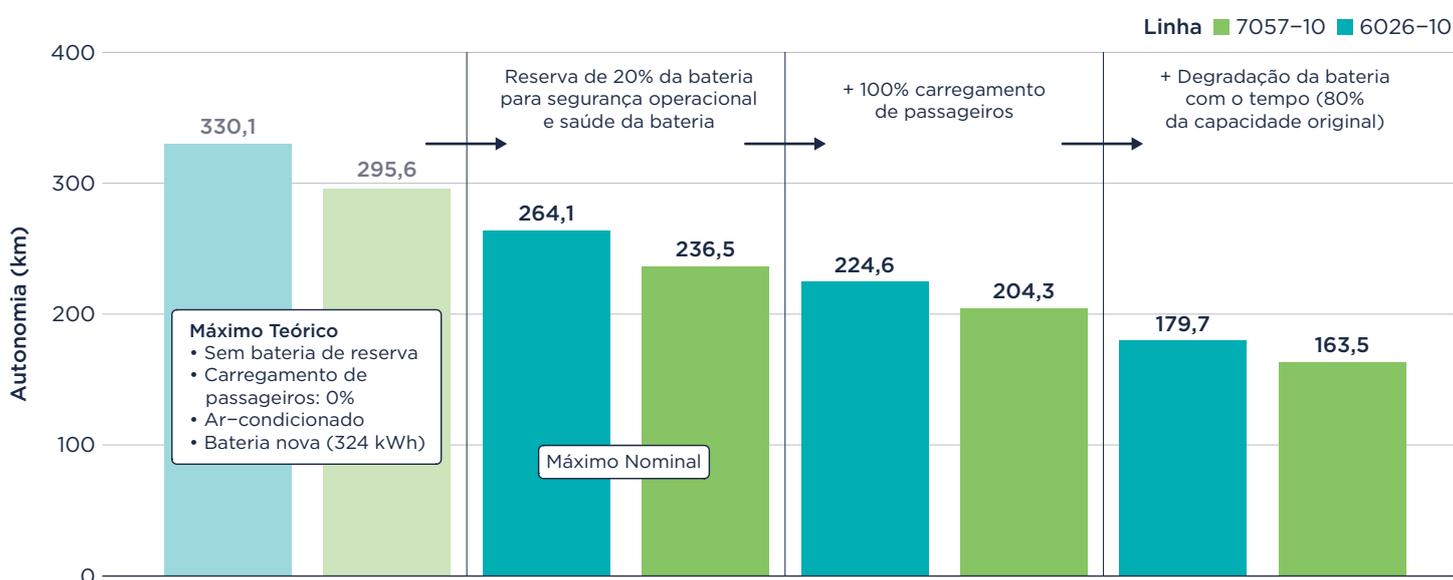


Figura D1. Impacto de variáveis-chave na autonomia estimada dos ônibus elétricos que operam as linhas 7057-10 e 6026-10

No primeiro quadro da Figura D1, as duas barras mostram a autonomia máxima teórica do ônibus elétrico operando cada linha. Para esse caso, assume-se um ônibus vazio, com ar-condicionado, e uso de toda a capacidade da bateria (324 kWh) na operação. Nesse exemplo, a autonomia do ônibus é 330,1 km na linha 6026-10 e 295,6 km na linha 7057-10. A diferença entre as duas autonomies reflete o impacto do ciclo de condução no consumo de energia.

Em operações reais de ônibus elétricos, não é toda a energia armazenada na bateria que está disponível para uso. Uma reserva deve ser mantida para compensar quaisquer desvios das operações esperadas e garantir que o motorista possa retornar com os ônibus aos locais de carregamento em



segurança. Além disso, os fabricantes não recomendam o esgotamento das baterias. Eles sugerem manter uma reserva mínima da carga, normalmente de 10% a 20% da capacidade total da bateria. O segundo quadro apresenta a estimativa de autonomia para as duas linhas considerando a premissa conservadora de adotar 20% da bateria como reserva técnica. Mesmo sem considerar outras variáveis, a autonomia máxima nominal é 20% menor do que a autonomia máxima teórica.

O terceiro quadro apresenta a autonomia do ônibus elétrico na condição operacional mais severa de 100% de carregamento de passageiros. Nessa condição, a autonomia máxima nominal reduz de 264,1 a 224,6 km na linha 6026-10 e de 236,5 a 204,3 km na linha 7057-10. Todos os modelos consideraram o uso de ar-condicionado, devido à sua obrigatoriedade nos novos veículos adquiridos.

Por fim, a capacidade utilizável da bateria reduz com o tempo devido a sua degradação. Neste exemplo, assumimos que a degradação máxima da bateria antes de sua substituição é de 20%. Isso significa que uma bateria degradada terá 80% da capacidade de uma bateria nova. As duas barras do último quadro da Figura D1 mostram o que pode ser considerado o pior caso de estimativa da autonomia do ônibus elétrico para as duas linhas, com uma bateria degradada, carregamento de passageiros máximo e uma premissa conservadora de 20% de reserva técnica. Nessas condições, estimamos uma autonomia de 179,7 km para a linha 6026-10 e 163,5 km para a linha 7057-10.

CONTATO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org



FINANCIADORES E FACILITADORES



SÓCIOS PRINCIPAIS