



Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo



APOIO



FINANCIADORES E FACILITADORES



SÓCIOS PRINCIPAIS



Autores: Esse relatório foi elaborado por Ana Beatriz Rebouças, João Daniel e Oscar Delgado do Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), com o apoio de Carmen Araujo, André Cieplinski e Francisco Posada (ICCT). O relatório foi revisado por Heloant de Souza e Virginia Tavares (WRI).

Agradecimentos: Estudo técnico desenvolvido para a São Paulo Transportes S/A (SPTrans) como parte da iniciativa ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator), financiado por P4G, iCS (Instituto Clima e Sociedade) e TUMI (Transformative Urban Mobility Initiative). Gostaríamos de agradecer ao Simão Saura Neto e equipe de engenharia da SPTrans, ao Paulo Lima e equipe da Transwolff e à BYD Brasil, pelas discussões e disponibilização de dados.

ZEBRA: O ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator) é uma iniciativa conjunta do C40 e ICCT que visa apoiar cidades latinoamericanas na transição para frotas de ônibus com zero emissões, dentre elas a cidade de São Paulo.





SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. A ELETRIFICAÇÃO DOS ÔNIBUS NA CIDADE DE SÃO PAULO	6
4. AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DOS ÔNIBUS	9
5. CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	29
APÊNDICE I: Funcionamento do dispositivo de telemetria.....	34
APÊNDICE II: Resultados do teste SORT	36
APÊNDICE III: Passageiros transportados por ônibus ao dia.....	37

1. INTRODUÇÃO

Diversas cidades ao redor do mundo têm eletrificado suas frotas de ônibus urbanos como forma de reduzir os efeitos negativos das emissões de poluentes no meio ambiente e na saúde da população. A cidade de São Paulo tem avançado nessa direção, tendo iniciado a operação de uma frota-piloto de ônibus elétricos a bateria em 2019. Este relatório avalia o desempenho operacional de 2 dos 18 ônibus elétricos desse projeto-piloto, monitorados por equipamentos de telemetria.

A cidade de São Paulo aprovou em 2018 a Lei nº 16.802, que determina que os operadores de serviços de transporte coletivo por ônibus reduzam gradualmente as emissões de poluentes atmosféricos e climáticos de suas frotas. O projeto-piloto é parte do esforço da cidade de melhorar o desempenho ambiental de seus ônibus urbanos e adequar seu sistema de transporte à legislação vigente. Além de zerar as emissões de escapamento, os ônibus elétricos oferecem amplo potencial de redução de emissões de poluentes climáticos ao longo do ciclo de vida da energia, devido ao alto percentual de eletricidade gerado a partir de fontes renováveis no Brasil.

São Paulo detém a maior frota de ônibus do país e uma das maiores da América Latina, com aproximadamente 14 mil veículos, mais de 98% dos quais são movidos a diesel (São Paulo Transportes, 2022). A pequena parcela de tecnologias alternativas refere-se a 201 trólebus e aos 18 ônibus elétricos a bateria do projeto-piloto.

Desde janeiro de 2021, a operação de dois ônibus elétricos tem sido monitorada por equipamentos de telemetria, que coletam dados de posição, desempenho do motor elétrico e consumo de energia em tempo real. Este relatório apresenta uma análise exploratória desses dados, avaliando o desempenho dos ônibus elétricos monitorados ao longo do tempo e em diferentes condições operacionais, além de analisar as estratégias de recarga adotadas.

A próxima seção apresenta uma revisão de literatura, identificando os principais fatores que influenciam o consumo de energia dos ônibus elétricos a bateria. A seção 3 contextualiza a eletrificação dos ônibus do transporte público da cidade de São Paulo. A seção 4 apresenta os dados de telemetria utilizados no estudo, além de avaliar o desempenho operacional dos ônibus monitorados. A seção 5 conclui o trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

No transporte público, ainda se adotam amplamente ônibus a diesel, que são emissores de gases de efeito estufa e de poluentes prejudiciais à saúde da população (Bakker & Konings, 2018). Alternativas zero-emissão, como ônibus elétricos a bateria, já estão disponíveis e ganhando mercado em diferentes países. Além de contribuírem para reduzir a poluição atmosférica por não gerarem emissões de escapamento, essas alternativas têm um melhor desempenho energético em comparação às tecnologias convencionais (Lajunen & Lipman, 2016; Zhou, Wu, et al., 2016).

O Brasil, que usa predominantemente fontes renováveis para gerar eletricidade, é considerado ideal para a aplicação de ônibus elétricos (Correa et al., 2019). No entanto, a implementação desses ônibus em maior escala ainda enfrenta barreiras, como o alto custo do veículo e sua autonomia. O preço elevado decorre principalmente dos altos custos de alguns componentes do ônibus elétrico (com destaque para a bateria) e de sua produção em menor escala (Bakker & Konings, 2018; Lajunen, 2014).

Já a autonomia dos ônibus elétricos é considerada uma barreira por ser menor do que a dos veículos a combustão interna equivalentes. A autonomia resulta do balanço entre capacidade, peso, volume e custos. Baterias com menores capacidades podem reduzir custos e aumentar a eficiência energética por serem mais leves (Lee et al., 2021). Baterias maiores, além de terem um maior custo, adicionam peso e volume aos ônibus, o que pode reduzir sua capacidade de passageiros (Bakker & Konings, 2018). Como os ônibus geralmente percorrem trajetos conhecidos, fixos e recorrentes, é possível adotar estratégias na escolha da tecnologia e das rotas buscando maior eficiência operacional (Papa et al., 2022), ou até modificar as rotas típicas (Wenz et al., 2021).

Uma das principais vantagens dos ônibus elétricos a bateria, em comparação aos ônibus convencionais, é seu baixo consumo energético, o que torna seus custos operacionais significativamente inferiores (Feng & Figliozzi, 2013; Hellgren, 2007). Lajunen (2014) aponta que o consumo de energia dos veículos elétricos pode ser até cinco vezes menor do que o consumo equivalente dos ônibus a diesel. Em um estudo anterior, o ICCT desenvolveu simulações para algumas rotas de ônibus na cidade de São Paulo e as estimativas indicaram que o consumo de energia dos ônibus elétricos a bateria seria equivalente a 28% do consumo dos ônibus a diesel (Eufrásio et al., 2022).

Estudos voltados para veículos a combustão interna mostram que o consumo de energia é influenciado por fatores que podem ser agrupados nas seguintes categorias: viagem, clima, veículo, rodovia, tráfego e motorista (Ahn et al., 2002; Zhou, Jin, & Wang, 2016), como mostra a Figura 1. Juntas, essas categorias englobam variáveis como velocidade, aceleração, peso carregado e temperatura externa. Para ônibus elétricos, de Abreu e Silva et al. (2015) apontam que as principais variáveis que impactam a eficiência energética são o modelo e peso do veículo, a velocidade média de operação, a presença de trechos com elevação superior a 5% e as características das rotas. Wang et al. (2020) acrescentam a relevância dos estilos de condução, dos fatores climáticos, dos horários (operação noturna ou diurna) e dos dias da semana (operação no final de semana ou durante a semana) em suas análises de consumo energético.

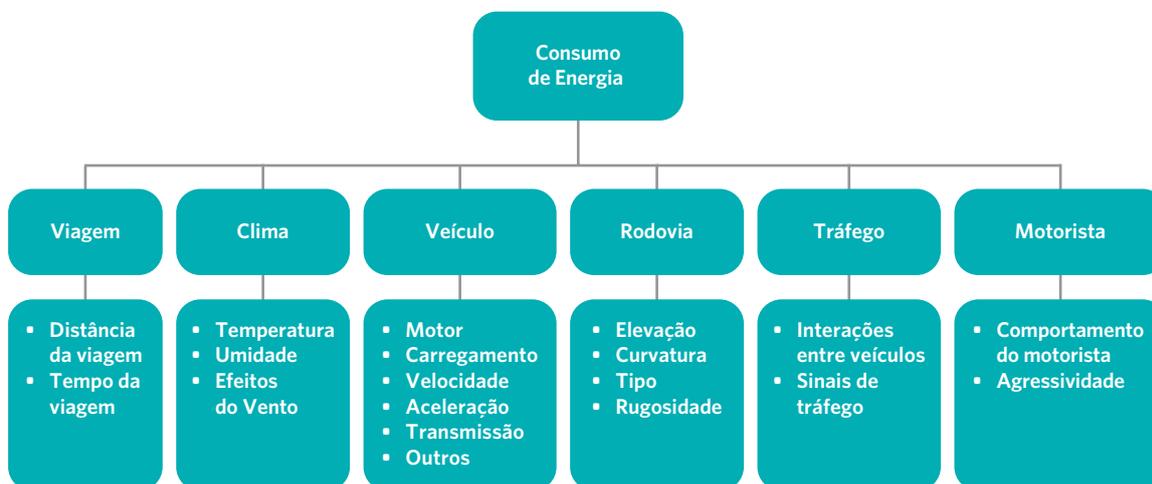


Figura 1 – Fatores que influenciam o consumo de energia em um veículo (adaptado de Zhou, Jin, & Wang, 2016).

De Abreu e Silva et al. (2015) ressaltam que, para ônibus urbanos, velocidades maiores estão mais associadas a menos paradas e menos eventos de aceleração e desaceleração do que a uma velocidade de cruzeiro maior. De forma geral, velocidades comerciais maiores favorecem o desempenho energético de ônibus urbanos. Os autores salientam que aumentar a distância entre paradas de ônibus, apesar de contribuir para reduzir o consumo energético, reduz a acessibilidade, o que pode prejudicar a experiência dos passageiros e diminuir a demanda.

Algumas estratégias podem facilitar a operação com velocidades que favorecem um menor consumo de energia, como a adoção de faixas exclusivas



de ônibus (Hu et al., 2012). Avaliando com mais detalhe o caso de ônibus elétricos a bateria, Fiori et al. (2021) observaram que é possível obter uma economia de 13% no consumo de energia a depender da velocidade adotada. Já Wang et al. (2020) observaram um desempenho energético 19,5% superior ao aplicar uma estratégia de velocidade ótima na operação.

O estilo de condução do motorista e as condições de tráfego influenciam a variação da velocidade, os padrões de aceleração e desaceleração e, conseqüentemente, a eficiência energética (Wang et al., 2020). Perrotta et al. (2014) concluem que comportamentos mais agressivos no trânsito levam a um pior desempenho e a um menor potencial de regeneração de energia na frenagem, resultando em um consumo energético até 14% superior.

A tecnologia de frenagem regenerativa consiste em recuperar parte da energia utilizada pelo veículo por meio dos eventos de freio. Esse mecanismo, presente nos ônibus elétricos a bateria, é fundamental para a redução do consumo energético. Em suas simulações, Kusuma et al. (2021) obtiveram uma redução no consumo energético próxima a 15% ao utilizar estratégias de frenagem regenerativa. Um teste-piloto realizado em Buenos Aires observou uma recuperação de 43% da energia consumida com esse tipo de frenagem (Maio et al., 2021).

A inclinação da rota também tem um efeito importante no consumo de energia do veículo e no desempenho da frenagem regenerativa (Bian & Qiu, 2018). Sagaama et al. (2020) demonstram que trechos com inclinações negativas favorecem a energia regenerativa de veículos elétricos, sendo os valores próximos a zero em trechos com inclinações positivas superiores a 8%.

Alguns estudos analisam o efeito da temperatura e do clima no desempenho dos ônibus elétricos. Wang et al. (2020) apontam que veículos elétricos têm menor eficiência energética nas estações climáticas mais quentes. Entretanto, Chikishev (2021) observa que grande parte da variação do consumo energético com a temperatura deve-se à utilização de equipamentos auxiliares, como ar-condicionado, que podem elevar o consumo em até 14%. Gao et al. (2019) estimam que de 20% a 25% da energia é consumida por equipamentos auxiliares em ônibus elétricos a bateria. Um teste em campo conduzido no Uruguai constatou um aumento de 21% no consumo energético dos ônibus elétricos com o uso de ar-condicionado (Uruguay, 2013).

A Tabela 1 apresenta informações sobre desempenho energético de ônibus elétricos a bateria adotados no transporte público de diferentes regiões. Selecionando-se casos em que o ônibus fosse de tamanho semelhante ao analisado neste estudo (12 m), verificou-se que os consumos médios variam entre 0,86 kWh/km e 1,26 kWh. Como discutido acima, o desempenho energético depende não apenas das características tecnológicas do ônibus, mas também das condições operacionais. Clima, estilo de condução dos motoristas e ciclo de condução (trajetos, frequência de paradas, elevação) são alguns dos fatores que justificam as variações do consumo de energia. Essas variações são esperadas mesmo para um mesmo ônibus operando uma rota específica.

Tabela 1 – Desempenho energético de ônibus elétricos a bateria implementados no sistema de transporte público de diferentes regiões

Operação monitorada	Características dos ônibus monitorados	Consumo de energia	Referência
Montevideu, Uruguai 11/2013 a 12/2013	2 ônibus BYD K9 (12m) Bateria de 324 kWh	Média dos ônibus: 1,26 kWh/km Impacto do ar-condicionado: + 21% (teste com temperatura interna de 20°C e externa de 29,4°C)	Uruguay (2013)
Buenos Aires, Argentina 05/2019 a 03/2020	2 ônibus Yutong modelo ZK6128BEVG (12m) Bateria de 324 kWh	Menor média mensal: 0,91 kWh/km Maior média mensal: 1,12 kWh/km Impacto do ar-condicionado: + 9,3% (parcela máxima mensal observada)	Maio et al. (2021)
Santiago, Chile 11/2017 a 10/2018	2 ônibus BYD K9FE (12m)	Média dos ônibus: 1,006 kWh/km	Galarza (2020)
Long Beach (CA), Estados Unidos 01/2019 a 12/2019	10 ônibus BYD modelo 2017 6120 LGEV (12m) Bateria de 324 kWh (original), mas capacidade total de 360 kWh (suplemento)	Maior média anual: 1,26 kWh/km Menor média anual: 1,14 kWh/km	Eudy e Jeffers (2020)
Shenzen, China 01/2019 a 12/2019	6.053 ônibus (13 modelos, da BYD e da NJGD, de 6,8m a 12m). 67% da frota: BYD K8 (10,5m)	Menor média mensal: 0,86 kWh/km Maior média mensal: 1,08 kWh/km O consumo de energia no verão é 19,3% maior do que em outras estações	World Bank (2021)

3. A ELETRIFICAÇÃO DOS ÔNIBUS NA CIDADE DE SÃO PAULO

Por meio da Lei nº 16.802, de 2018, a cidade de São Paulo alterou um artigo da sua Lei de Mudanças Climáticas (Lei nº 14.933, de 2009), definindo novas metas de redução das emissões de escapamento de dióxido de carbono (CO₂) fóssil, além dos poluentes atmosféricos material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x). A lei estabelece que, em 10 anos, as emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x sejam diminuídas em 50%, 90% e 80%, respectivamente; estabelece ainda que, ao final de 20 anos, as emissões de escapamento de CO₂ fóssil sejam eliminadas, e as de NO_x e MP, reduzidas em 95%. Mesmo definindo



metas apenas para as emissões de escapamento, a lei determina que a escolha da tecnologia deve priorizar a redução de emissões de origem fóssil no ciclo de vida da fonte energética, dentro de custos aceitáveis.

Os serviços de transporte coletivo público de passageiros da cidade são viabilizados mediante contratos de licitação de 15 anos, assinados em 2019 entre a prefeitura e empresas privadas. Os contratos definem metas anuais de redução de emissões de poluentes, adicionando assim outras obrigações às metas de 10 e 20 anos definidas na Lei nº 16.802/2018.

Uma exigência contratual é a apresentação dos planos de substituição de frota à SPTrans, a autoridade de transportes da cidade, demonstrando como cada operador pretende cumprir as metas de redução de emissões. Apresentados em 2020, os planos contavam principalmente com a adoção de ônibus elétricos a bateria nos anos seguintes. No entanto, a pandemia da Covid-19 trouxe vários desafios para a transição tecnológica. Algumas condições contratuais foram flexibilizadas, proibindo-se a aquisição de novos veículos durante a situação emergencial e aumentando temporariamente a idade média da frota, de 5 para 7 anos (Portaria da Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes nº 81/2020). Mesmo nesse cenário, a cidade tem reiterado seu compromisso com a transição para uma frota mais limpa. A prefeitura incluiu em seu programa de metas a intenção de entregar 2.600 ônibus elétricos até o final do atual mandato, em 2024 (São Paulo, 2021).

Buscando adequar o sistema de transporte de ônibus às legislações vigentes, a SPTrans conduziu diversos testes com ônibus elétricos a bateria entre 2014 e 2018. Em outubro de 2018, o município lançou, em parceria com a fabricante BYD, o projeto-piloto que adicionou 18 ônibus elétricos a bateria à frota da empresa Transwolff entre 2019 e 2021. A linha selecionada foi a 6030-10 (Unisa - Campus 1/Terminal Santo Amaro), que é operada por ônibus básicos todos os dias da semana e tem cerca de 30 km. Seu trajeto é apresentado na Figura 2. A distância média entre as paradas de ônibus dessa linha é de 388 metros.

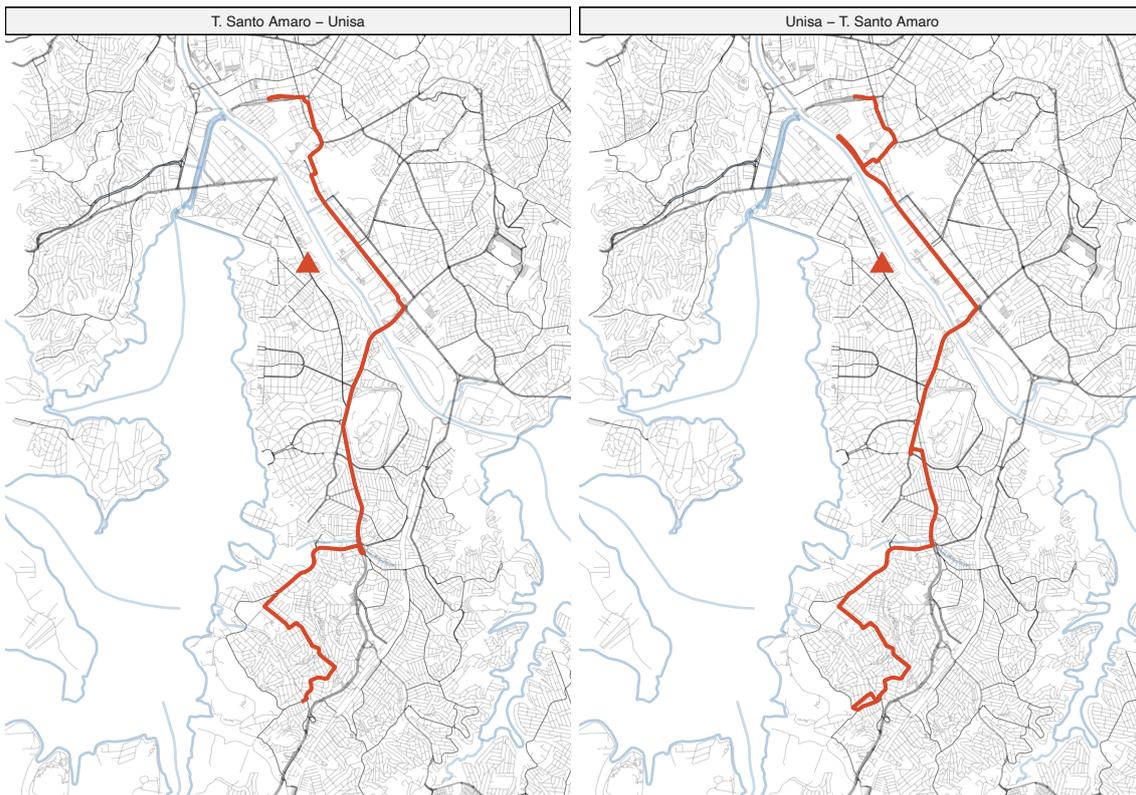


Figura 2 - Trajeto da linha 6030-10 e indicação da garagem (representada pelo triângulo).

Os ônibus elétricos do projeto-piloto foram produzidos pela BYD em parceria com a Caio e a Marcopolo, duas encarroçadoras brasileiras. Dos 18 ônibus, 12 têm carroceria Caio, e 6, Marcopolo. Os ônibus são do tipo padron com 12,9m de comprimento, mas sua capacidade projetada de cerca de 80 passageiros teve de ser restringida por limitação de peso. Os veículos transportam de 70 a 72 passageiros a depender da carroceria. Com isso, em termos de capacidade de passageiros, os ônibus assemelham-se mais ao modelo básico; porém, em termos de conforto e acessibilidade, são equivalentes ao padron. Há uma pequena diferença de peso entre os veículos: um tem 14.750 kg, e o outro, 14.937 kg.

Para reduzir o custo de capital do projeto, a operadora adquiriu os veículos sem baterias. Estas foram alugadas pelo prazo da vida útil do ônibus (15 anos) mediante pagamentos mensais. A BYD é a proprietária de todas as baterias e responsabiliza-se pela sua adequada operação ao longo do projeto. A recarga dos ônibus é feita na garagem da Transwolff principalmente no período noturno e fora do horário de pico (que, na cidade de São Paulo, acontece entre as 17h30 e as 20h30).

4. AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DOS ÔNIBUS

Este estudo analisa dados de operação de dois ônibus elétricos a bateria da Transwolff que fazem parte da frota do projeto-piloto da cidade de São Paulo detalhado na seção anterior. Os dois ônibus analisados têm chassi BYD, um com carroceria Marcopolo e outro com carroceria Caio. Ambos foram anonimizados ao longo deste relatório.

Os dados foram coletados com um equipamento de telemetria instalado em cada ônibus, o GO9 da Geotab. O método de coleta utilizado pelo dispositivo não adota uma frequência fixa. Para cada variável, são registradas novas observações apenas quando se detecta uma variação relevante. Dessa forma, o armazenamento é otimizado e a coleta mantém uma alta precisão, já que valores críticos não são perdidos e valores intermediários podem ser estimados a partir de interpolações. Detalhes técnicos do dispositivo e mais informações sobre o método de coleta são apresentados no Apêndice I.

A coleta aconteceu em tempo real entre 21 de janeiro e 31 de dezembro de 2021. A amostra exclui os dias com menos de 50 km operados por ônibus (que representam 10,5% das observações)¹. As variáveis analisadas foram construídas a partir de dados de GPS e de energia. Esta seção analisa o desempenho operacional e de consumo de energia dos ônibus monitorados, além da estratégia de recarga adotada.

4.1 DESEMPENHO OPERACIONAL

A Tabela 2 apresenta um resumo da operação dos dois ônibus elétricos monitorados e a Figura 3 exibe um histograma com a distribuição das distâncias diárias percorridas.

Tabela 2 - Operação diária dos ônibus monitorados (janeiro/2021 a dezembro/2021)

Ônibus	Número de dias	Distância diária (km) Média [mín. - máx.]	Número de viagens ao dia (ida e volta) ^(a) Média [mín. - máx.]	Duração diária da operação (horas) ^(b) Média [mín. - máx.]	Velocidade (km/h) ^(c) Média [mín. - máx.]
1	325	177,1 [50,6 - 261,0]	5,0 [1 - 7,5]	12,6 [4,3 - 18,2]	14,1 [6,3 - 18,3]
2	291	166,1 [52,8 - 261,2]	4,7 [1 - 7,5]	12,2 [4,0 - 22,2]	13,6 [4,4 - 17,4]

a. Número de viagens obtido a partir dos dados de GPS da operação real e dos dados do trajeto planejado da linha, disponibilizados pela SPTrans (dados de General Transit Feed Specification, GTFS2).

b. Tempo diário com a ignição ligada.

c. Velocidade média calculada pela divisão da distância percorrida ao dia pelo tempo diário em operação.

1 Dias com baixa quilometragem, considerados *outliers*, podem ser aqueles em que o ônibus estava inoperante por problema técnico ou manutenção programada.

2 Disponíveis em: <http://www.sptrans.com.br/desenvolvedores/>. Acesso em: 7/10/2022.

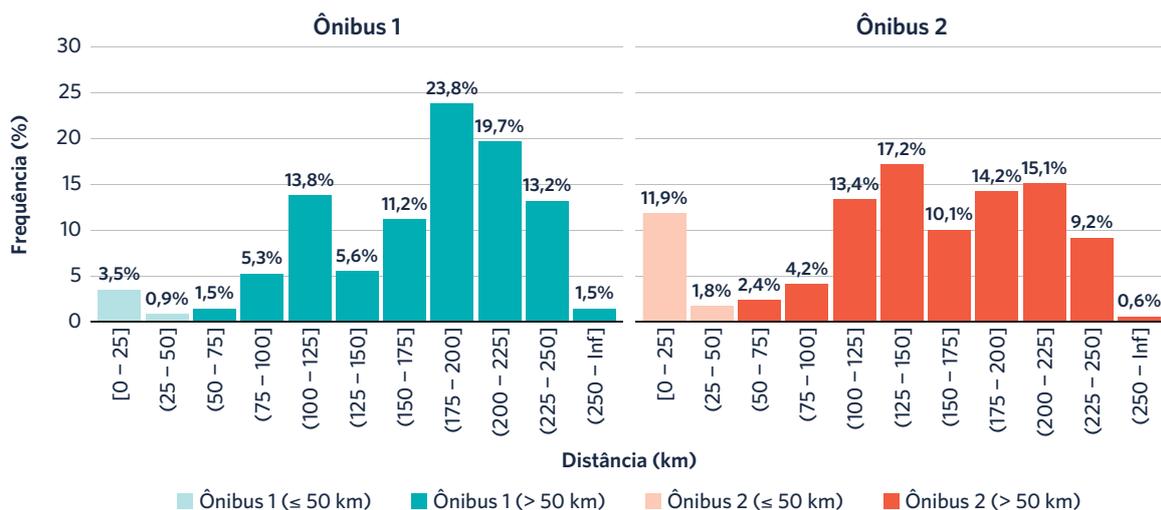


Figura 3 - Distâncias diárias percorridas pelos ônibus. Os dias com distância entre 0 e 50 km, destacados em cores mais claras, foram excluídos da amostra analisada no estudo.

Pela Tabela 2, observa-se que a distância diária média percorrida pelo Ônibus 1 é de 177,1 km e pelo Ônibus 2 é de 166,1 km, com a máxima distância diária igual a 261,2 km. Com relação à distribuição de distâncias, a Figura 3 mostra que o Ônibus 1 percorreu entre 100 km e 250 km em 87,3% dos dias observados, enquanto operações do Ônibus 2 nessa mesma faixa ocorreram em 79,2% dos dias. Ônibus de uma mesma linha podem percorrer distâncias diárias diferentes, já que a quantidade de veículos em operação pode variar ao longo do dia. No horário de pico, por exemplo, há geralmente mais ônibus em serviço.

A Tabela 2 mostra também que cada ônibus da linha 6030-10 faz em média 5 viagens por dia, havendo registro de dias em que os ônibus completaram de 1 a 7,5 viagens. Com relação à duração da operação, os ônibus permanecem, na média, com a ignição ligada por pouco mais de 12 horas por dia, havendo, porém, dias com operação de 4 a 22,2 horas. Já a velocidade média é de 14,1 km/h para o Ônibus 1 e de 13,6 km/h para o Ônibus 2.

4.2 DESEMPENHO ENERGÉTICO

Como discutido na revisão de literatura (seção 2), o consumo de energia dos ônibus elétricos é influenciado por diversos fatores técnicos e operacionais. Os fatores técnicos incluem características como potência do motor, peso do veículo e capacidade da bateria. Já os fatores operacionais referem-se à utilização do veículo: velocidade, peso transportado, uso de ar-condicionado e temperatura externa, uso de outros acessórios, congestionamentos e estilo

de condução do motorista, além de características da linha de ônibus, como número de paradas programadas e perfil de elevação.

Nesta etapa do estudo, realiza-se uma análise exploratória, buscando caracterizar o comportamento do consumo de energia e verificar sua correlação com outras variáveis, porém sem estabelecer relações de causa e efeito. A Tabela 3 apresenta indicadores de desempenho energético dos dois ônibus elétricos a bateria monitorados.

Tabela 3 – Desempenho energético dos ônibus monitorados (janeiro/2021 a dezembro/2021)

Ônibus	Energia líquida ao dia (kWh) ^{(b),(f)} Média ^(a) [mín. - máx.]	Consumo de energia diário (kWh/km) ^(c) Média ^(a) [mín. - máx.]	Energia regenerada ao dia ^(d) Média ^(a) [mín. - máx.]	Energia diária consumida em período ocioso ^(e) Média ^(a) [mín. - máx.]
1	224,40 [58,9 - 340,4]	1,19 [0,94 - 1,94]	40,7% [29,0% - 49,2%]	9,6% [0% - 40,2%]
2	224,35 [79,6 - 320,7]	1,27 [0,99 - 2,29]	38,6% [17,2% - 48,1%]	11,9% [0% - 35,4%]

- As médias apresentadas são ponderadas pela distância diária percorrida.
- A energia líquida é igual ao total de energia que saiu da bateria para movimentar o ônibus menos o total de energia gerada pela frenagem regenerativa ao longo do dia.
- O consumo de energia é calculado dividindo-se a energia líquida pela distância percorrida.
- A parcela de energia regenerada é a energia gerada pela frenagem regenerativa dividida pelo total de energia que saiu da bateria ao longo do dia.
- O período ocioso refere-se aos momentos em que o ônibus está parado (velocidade igual a zero) com a ignição ligada.
- A energia bruta média ao dia consumida (sem descontar a energia regenerada) pode ser calculada pela equação $\frac{\text{Energia Líquida}}{1 - \% \text{ Energia Regenerada}}$. A média é de 379,8 kWh para o Ônibus 1 e 366,4 kWh para o Ônibus 2 (média ponderada pela distância diária percorrida).

A Tabela 3 mostra que a média da energia líquida diária é de 224,4 kWh para o Ônibus 1 e de 224,35 kWh para o Ônibus 2, com máximas de 340,4 kWh. As baterias desses ônibus têm capacidade de 324 kWh, no entanto, parte dessa capacidade não costuma ser acessada durante a operação real por conta da reserva técnica. Essa reserva é indicada tanto para garantir que os motoristas possam retornar aos pontos de carregamento com segurança como para preservar a saúde da bateria e evitar uma rápida degradação. Os fabricantes recomendam que as baterias não sejam descarregadas completamente e solicitam que se mantenha uma reserva de 10% a 20% do estado de carga (Grace, 2018; Lowell, 2019).

A Tabela 3 apresenta também informações sobre o consumo de energia por quilômetro. Os ônibus 1 e 2 consomem, em média, 1,19 kWh/km e 1,27 kWh/km, respectivamente. No entanto, observa-se uma ampla variação de valores para essa variável, entre 0,94 e 1,94 kWh/km para o Ônibus 1 e 0,99 e 2,29 kWh/

km para o Ônibus 2. É importante ressaltar que o consumo mensurado pelo dispositivo de telemetria considera apenas as entradas e saídas de energia da bateria, podendo ser utilizado para as estimativas de autonomia do veículo. No entanto, esse valor é diferente do consumo de energia remunerado, o qual inclui as perdas de energia na recarga. A energia contabilizada na conta de eletricidade inclui a energia perdida a partir da saída do sistema de eletricidade até o carregador e do carregador até a bateria do ônibus³.

Além disso, na cidade de São Paulo, a mensuração do consumo de energia é parte do processo de homologação dos ônibus elétricos a bateria. Atualmente, utiliza-se o *Standardised On-Road Test Cycle* (SORT) para padronizar tal medição, mais especificamente o protocolo E-SORT de 2017. O Apêndice II apresenta mais detalhes e os resultados do teste SORT para os ônibus BYD da Transwolff. Por ser padronizado, o teste permite comparar o desempenho energético e a autonomia de tecnologias, marcas e modelos de ônibus. Na operação real, no entanto, são esperados desempenhos diferentes dos obtidos no teste por conta da variação de condições operacionais.

Outra informação presente na Tabela 3 é o percentual de energia recuperada com a frenagem regenerativa. A parcela média de energia regenerada é de 40,7% para o Ônibus 1 e 38,6% para o Ônibus 2, com valores variando entre 17,2% e 49,2%. Além disso, parte do consumo de energia ocorreu durante o período ocioso – 9,6% para o Ônibus 1 e 11,9% para o Ônibus 2.

A Tabela 4 apresenta a parcela de dias monitorados em que a energia líquida foi superior à capacidade utilizável da bateria, considerando 10% e 20% de reserva técnica. Nos dois cenários de reserva técnica analisados, há dias em que a energia consumida foi maior do que a capacidade utilizável da bateria. O operador consegue atingir esses consumos de energia superiores à capacidade utilizável ao fazer recargas intermediárias ao longo da operação.

³ As perdas variam com a configuração do sistema elétrico do veículo e da infraestrutura de recarga. Ainda há poucas pesquisas que discutem as perdas de energia na recarga de ônibus elétricos a bateria. Um estudo de 2022 do ICCT sobre caminhões elétricos a bateria adota como premissa 15% de perdas na recarga (Ragon et al., 2022).

Tabela 4 – Parcela de dias com energia consumida acima da capacidade utilizável da bateria, considerando cenários de reserva técnica (capacidade total da bateria: 324 kWh)

Cenário	Capacidade utilizável da bateria (kWh)	Dias com energia consumida acima da capacidade utilizável
Reserva técnica da bateria de 10%	291,6	Ônibus 1: 3,4% Ônibus 2: 4,5%
Reserva técnica da bateria de 20%	259,2	Ônibus 1: 17,5% Ônibus 2: 21,3%

4.2.1. EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

A Figura 4 apresenta a relação entre a distância diária percorrida e o consumo de energia no dia.

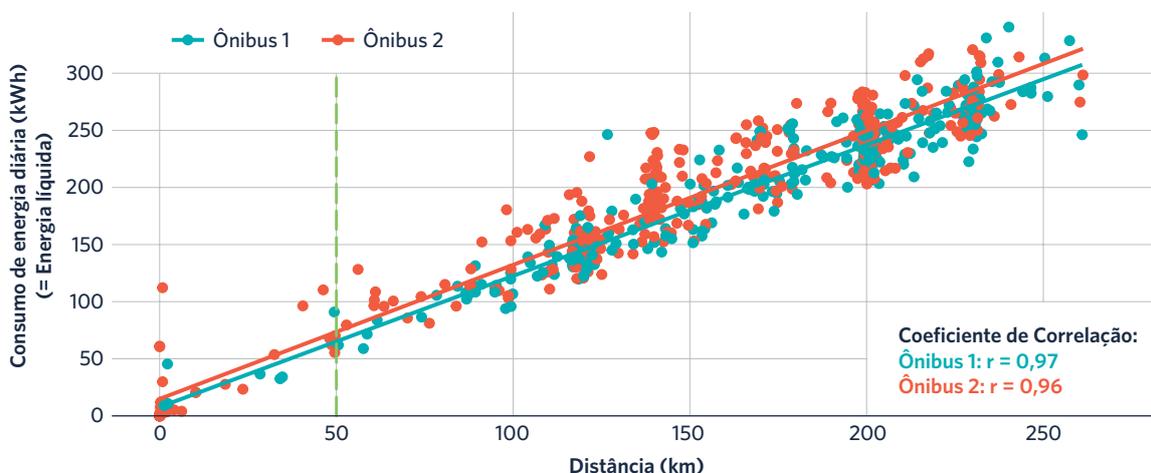


Figura 4 – Relação entre consumo de energia e distância diária.

Os coeficientes próximos a 1 evidenciam uma forte correlação positiva entre as variáveis, e o consumo de energia aumenta com maiores distâncias. As observações à esquerda da linha tracejada verde têm quilometragens diárias inferiores a 50 km e, como descrito anteriormente, foram eliminadas. Nesses dias, é possível que o ônibus tenha permanecido ligado para a realização de algum serviço de manutenção, consumindo energia, porém com um baixo registro de quilometragem. Manter essas observações geraria dias com altos índices de consumo de energia por quilômetro, não representativos da operação.

A Figura 5 apresenta um histograma com a distribuição do consumo diário de energia por quilômetro, já excluindo da amostra os dias com baixa quilometragem.

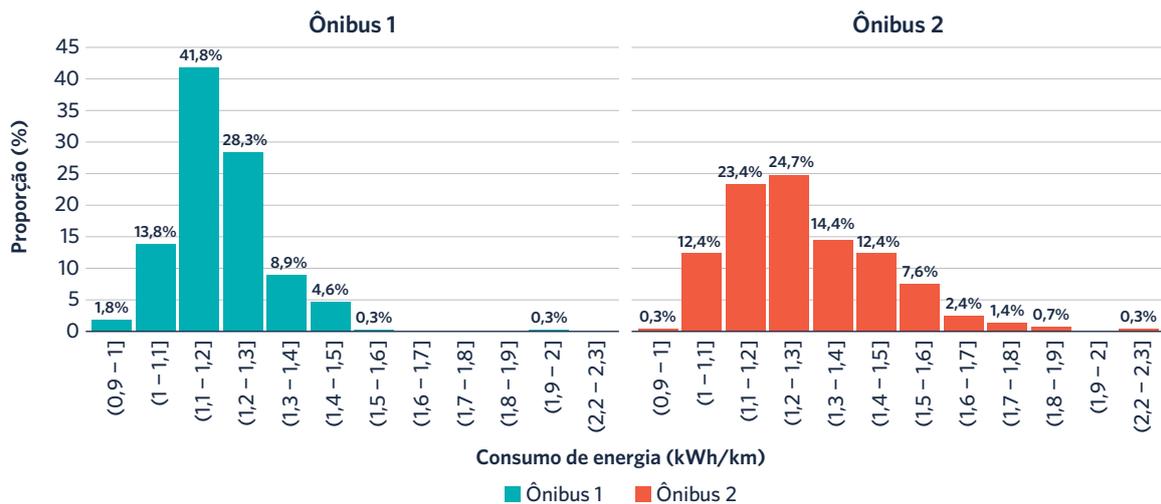


Figura 5 - Consumo de energia diário por quilômetro.

O Ônibus 1 apresentou um consumo menor ou igual a 1,3 kWh/km em 85,7% dos dias. Já o consumo de energia do Ônibus 2 ficou dentro dessa faixa em 60,8% dos dias analisados. Dias com mais de 1,5 kWh/km são menos frequentes para o Ônibus 1 (0,6% das observações contra 12,4% para o Ônibus 2). A Figura 6 mostra um diagrama de caixa⁴ do consumo de energia de cada ônibus por quilômetro para cada mês.

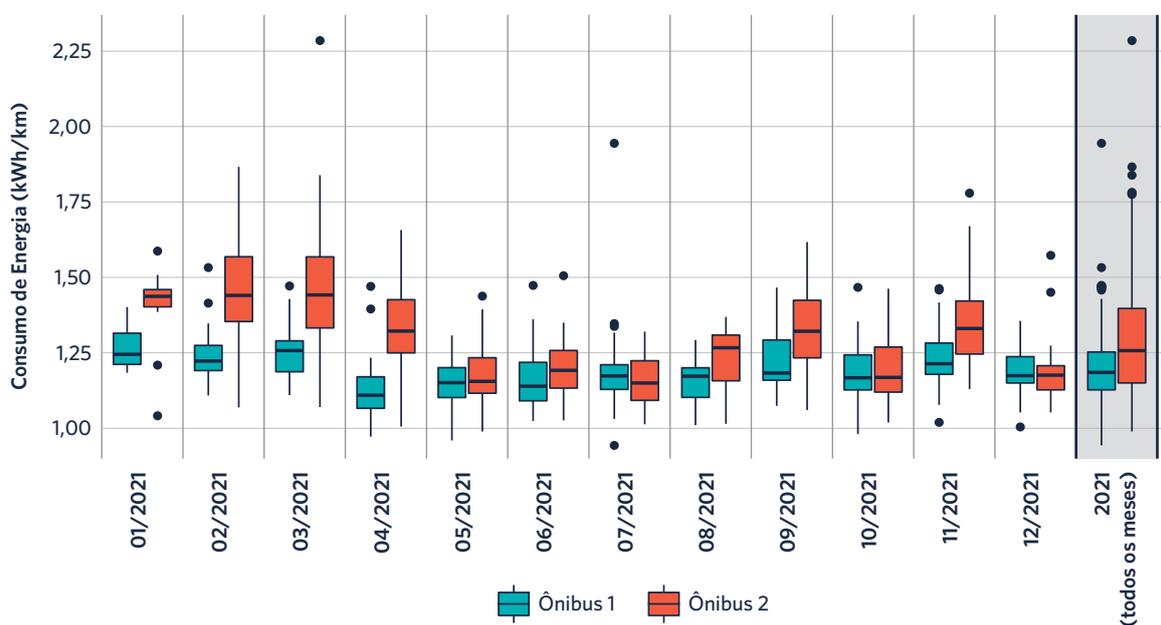


Figura 6 - Consumo de energia por quilômetro ao longo dos meses monitorados, agregado para 2021.

⁴ O diagrama de caixa, ou *boxplot*, representa a variação dos dados observados, permitindo analisar graficamente sua dispersão e amplitude por meio de quartis. Os quartis dividem a amostra ordenada em quatro partes. A caixa é limitada pelo primeiro e terceiro quartis, ou seja, 25% a 75% da amostra. A reta central representa a mediana, o valor central da amostra. Os valores atípicos (*outliers*) são os pontos individuais.

Nota-se um menor consumo médio a partir de maio, com um ligeiro aumento em agosto, setembro e novembro. O clima é um dos fatores que influenciam o comportamento do consumo de energia. Em meses de inverno, de junho a agosto, as temperaturas costumam cair, e espera-se um menor consumo do sistema de ar-condicionado. Um padrão de consumo maior se observa principalmente de janeiro a abril. A temperatura e outros fatores relevantes são analisados a seguir.

Para este estudo, não foi possível obter uma variável que representasse a carga transportada por ônibus. A SPTrans disponibilizou o número de passageiros transportados ao dia, como apresentado no Apêndice III; porém, essa informação possivelmente representa a carga transportada de forma insuficiente. Para a análise de consumo de energia, é importante considerar também por quanto tempo o passageiro foi transportado. Infelizmente, este estudo não teve acesso a informações sobre trajeto e duração das viagens dos passageiros, nem sobre a variação da ocupação dos ônibus ao longo do dia, de forma que essa relação continua pendente de análises mais aprofundadas.

4.2.2. TEMPERATURA AMBIENTE

Esta subseção explora com mais detalhes a relação entre a temperatura e o consumo de energia dos ônibus. Os ônibus analisados são equipados com ar-condicionado, cujo consumo tende a ser maior em dias mais quentes. Para analisar o comportamento do consumo de energia em diferentes condições climáticas, coletaram-se informações de temperatura de uma estação meteorológica próxima da linha na qual os ônibus operam, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)⁵. A Figura 7 apresenta a evolução das temperaturas máxima e média diária no período analisado. A Figura 8 mostra a relação entre o consumo de energia médio diário e a temperatura máxima ao dia.

⁵ Utilizaram-se informações meteorológicas coletadas em uma estação no bairro de Interlagos. A base de dados contém informações horárias sobre temperatura, pressão atmosférica, precipitação e umidade, entre outros dados climáticos. Dados disponíveis em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

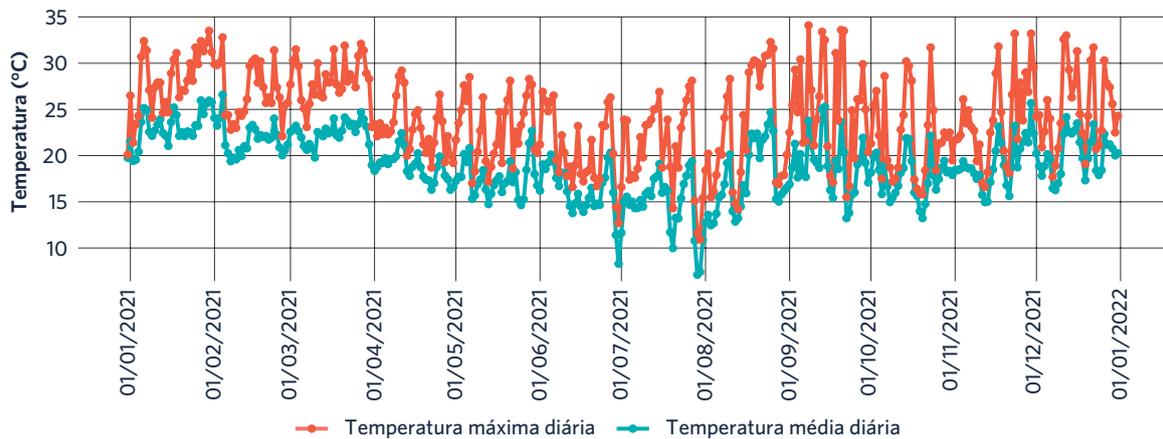


Figura 7 – Temperaturas máxima e média diárias ao longo de 2021.

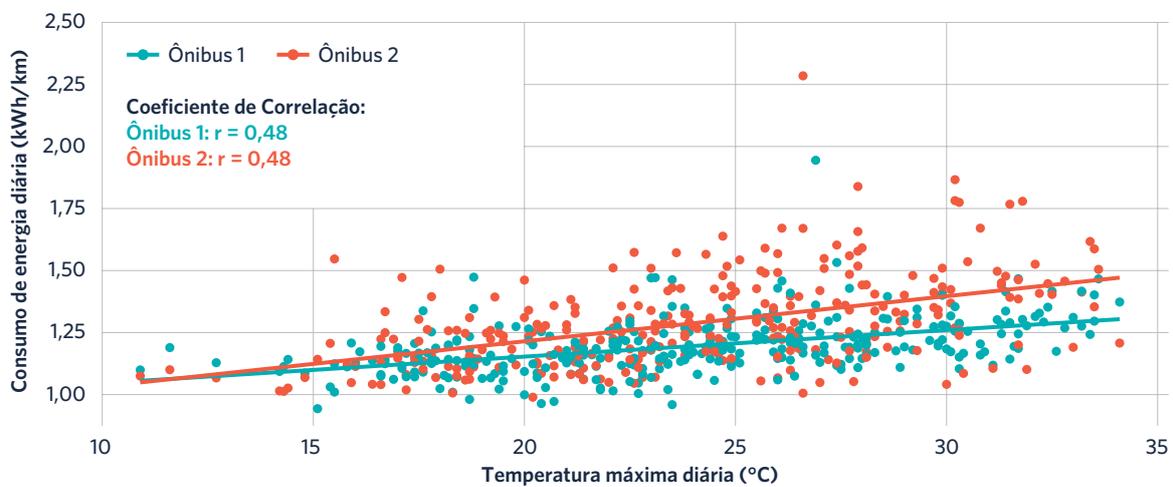


Figura 8 – Relação entre consumo de energia por quilômetro diário por grupo de temperatura máxima diária (em graus Celsius).

Na Figura 8, observa-se que o consumo de energia por quilômetro tende a ser mais alto nos dias com maiores temperaturas máximas. O Ônibus 2 tende a ter um consumo maior em temperaturas mais elevadas do que o Ônibus 1. Caso esse comportamento seja consequência das diferenças dos sistemas de ar-condicionado, é provável que o ar-condicionado do Ônibus 2 tenha um desempenho energético menos eficiente do que o do Ônibus 1. Dados de especificação técnica são necessários para tirar mais conclusões. No entanto, além das características técnicas, outros fatores que não foram controlados podem justificar um maior consumo de energia do ar-condicionado, como o peso transportado, a temperatura adotada e até a frequência de abertura das portas.

4.2.3. VELOCIDADE MÉDIA

A velocidade também é um fator que influencia o consumo de energia. A Figura 9 apresenta um gráfico de dispersão relacionando o consumo diário de energia com a velocidade operacional média.

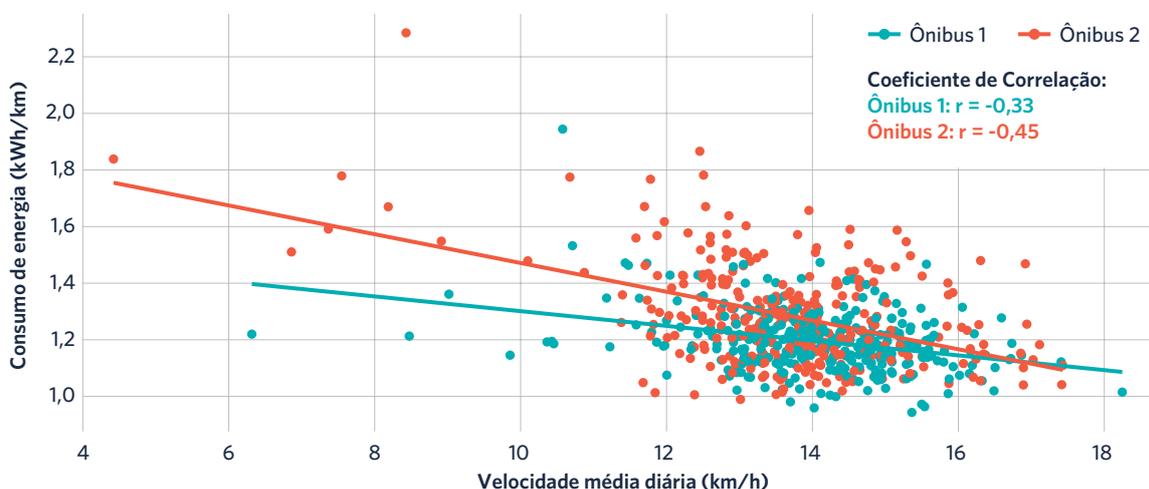


Figura 9 - Relação entre consumo de energia diária (kWh/km) e velocidade operacional média (km/h) para cada ônibus.

A Figura 9 indica que, nesta amostra, a velocidade média tem correlação negativa com o consumo de energia diário. Como discutido na revisão de literatura (seção 2), as baixas velocidades comerciais de ônibus urbanos são mais associadas a eventos de aceleração e desaceleração do que a uma menor velocidade de cruzeiro. Assim, velocidades maiores podem indicar menos oscilações de aceleração e, conseqüentemente, menor consumo. Os dois ônibus monitorados operam na mesma linha, portanto, percorrem o mesmo trajeto. Apesar de as paradas de ônibus serem as mesmas, variações de velocidade média podem acontecer devido a congestionamentos, variações da demanda, estilo de condução do motorista e frequência de embarque e desembarque de passageiros.

É importante ressaltar que as velocidades diárias médias variam pouco na amostra, com valores entre 12 km/h e 16 km/h na maior parte dos dias. Além disso, o baixo coeficiente de correlação aponta correlação fraca. No entanto, a velocidade não está isolada das outras variáveis. Essa análise exibe apenas uma tendência geral, limitada à amostra observada, e não estabelece uma relação de causalidade entre velocidade e consumo de energia.

4.2.4. FRENAGEM REGENERATIVA

Os ônibus elétricos contam com um sistema de frenagem regenerativa que possibilita recuperar a energia cinética gerada durante a frenagem, a qual é convertida em energia elétrica e armazenada nas baterias. Como depende das frequências e intensidades das acelerações e desacelerações, o desempenho desse sistema está diretamente relacionado com características da linha e da condução, como elevação do terreno, quantidade de paradas programadas e distância entre as paradas, além do estilo de condução dos motoristas. Essas características impactam as oscilações de aceleração e, assim, a quantidade de energia regenerada pela frenagem. Para alcançar uma maior eficiência do veículo elétrico, é necessário um período de adaptação dos motoristas, habituados à condução de ônibus a diesel.

A Figura 10 apresenta um histograma do percentual de energia regenerada por cada ônibus. Esse percentual é calculado como a energia recuperada durante a frenagem sobre o total de energia consumida.

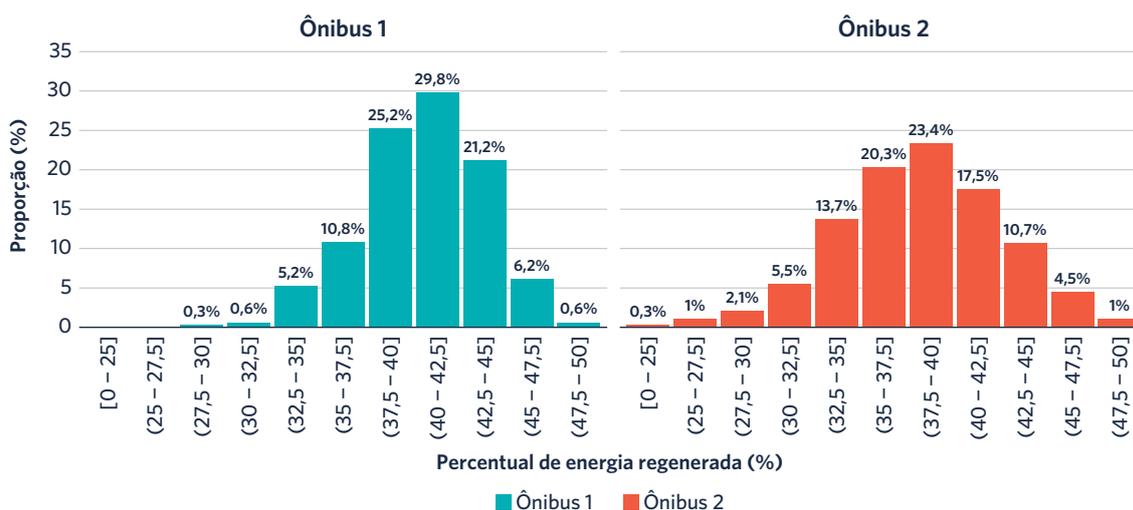


Figura 10 - Distribuição do percentual de energia diário.

A Figura 10 mostra que os ônibus possuem uma taxa de energia regenerada maior que 30% na maior parte dos dias monitorados (99,7% para o Ônibus 1 e 96,5% para o Ônibus 2). O Ônibus 1 teve, de forma geral, percentuais de regeneração maiores: entre 40% e 50% em 57,9% de seus dias, em contraste com 33,7% dos dias monitorados do Ônibus 2. A Figura 11 exibe um diagrama de caixa por mês e por veículo, representando a distribuição do percentual de energia regenerada ao longo dos meses monitorados.

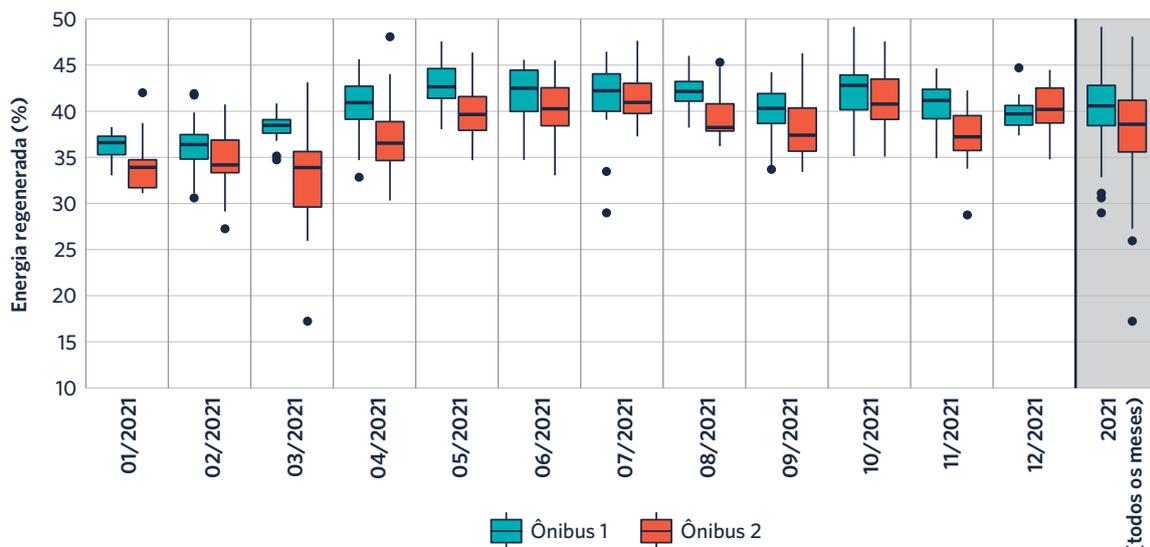


Figura 11 - Distribuição da energia regenerada pela frenagem em cada mês monitorado, agregada para 2021.

Os resultados apontam que, na maior parte dos meses, o Ônibus 1 tem maiores percentuais de regeneração. Observa-se um aumento geral da regeneração com o tempo, o que pode ser reflexo da adaptação dos motoristas à condução do veículo elétrico e à frenagem regenerativa.

4.2.5. CONSUMO DE ENERGIA NO PERÍODO OCIOSO

O período ocioso corresponde aos momentos em que o ônibus está com a ignição ligada, mas com velocidade nula. Esse período inclui as paradas para embarque e desembarque de passageiros, as paradas em semáforos e na operação de forma geral, excluindo os momentos em que o ônibus está desligado, o que acontece principalmente na garagem. O consumo de energia no período ocioso deve-se principalmente aos acessórios, incluindo o sistema de ar-condicionado e aquecimento, a ventilação e a iluminação, entre outros. A Figura 12 traz um histograma com a distribuição do percentual de consumo de energia ao dia no período ocioso.

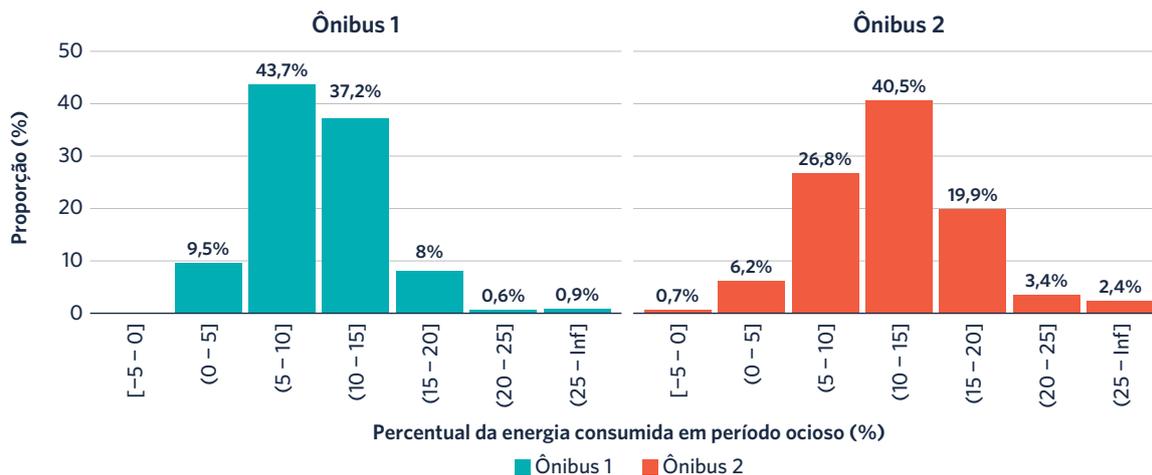


Figura 12 - Distribuição do percentual de energia consumida ao dia no período ocioso pelos dois ônibus monitorados.

Observa-se que a energia consumida no período ocioso foi de 5% a 15% na maior parte dos dias monitorados (80,9% para o Ônibus 1 e 67,3% para o Ônibus 2). Proporcionalmente, o Ônibus 2 ultrapassou por mais dias 15% da energia consumida em momentos ociosos (25,7% contra 9,5% para o Ônibus 1).

O ar-condicionado, um dos principais responsáveis pela parcela de consumo de energia dos acessórios, é muito influenciado pela temperatura ambiente. A Figura 13 relaciona a temperatura máxima diária com o percentual de energia consumida no período ocioso.

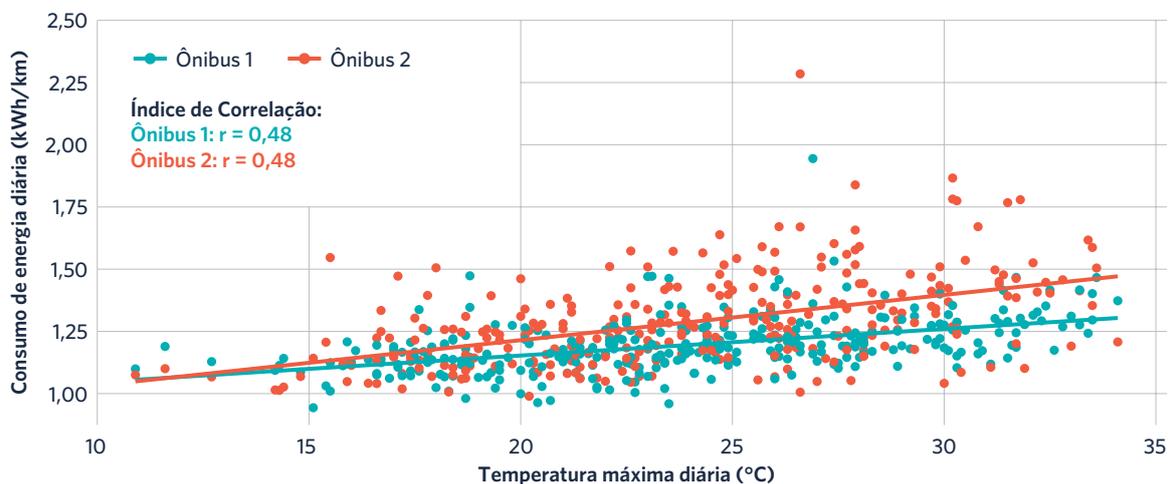


Figura 13 - Relação entre temperatura máxima diária e percentual da energia consumida no período ocioso pelos ônibus monitorados.

Observa-se uma correlação positiva fraca entre as variáveis, ou seja, há uma ligeira tendência de observar maiores parcelas de energia consumida em período ocioso nos dias com maiores temperaturas máximas. É provável que esse comportamento esteja relacionado com o uso do ar-condicionado.

Na verdade, a demanda de potência dos equipamentos auxiliares depende das condições operacionais e ambientais. Por exemplo, a potência necessária para o ar-condicionado varia com a temperatura ambiente e com a frequência de abertura e fechamento das portas. Assim, de forma geral, a potência exigida pelos acessórios varia por linha, horário e clima. A Figura 14 apresenta a distribuição da potência consumida durante os períodos ociosos dos ônibus monitorados.

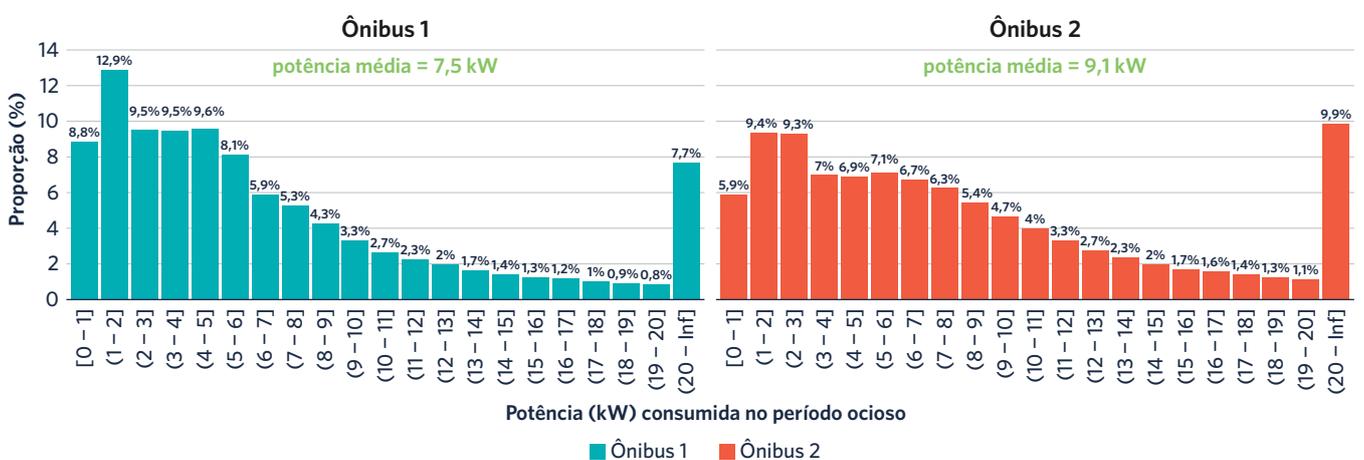


Figura 14 - Distribuição da potência consumida (em kW) no período ocioso.

Parte significativa dos valores observados encontra-se entre 0 kW e 8 kW (75,9% para o Ônibus 1 e 67,7% para o Ônibus 2). A potência média consumida no período ocioso pelo Ônibus 1 é igual a 7,5 kW e, pelo Ônibus 2, a 9,1 kW. Um estudo do ICCT de 2021 sobre a relação entre temperatura externa e demanda de potência dos acessórios estimou que, para temperaturas entre 15°C e 30°C, os equipamentos auxiliares demandam potência entre 4 kW e 14 kW (Dallmann et al., 2021). O estudo ressaltou que a demanda tende a ser significativamente maior em dias com temperaturas extremas.

4.2.6. AUTONOMIA

Uma das principais preocupações dos operadores de ônibus ao substituírem sua frota a diesel por ônibus elétricos a bateria é a autonomia, ou seja, a distância que esses veículos conseguem percorrer com uma recarga completa.

A autonomia do ônibus elétrico depende da capacidade de sua bateria (em kWh) e do consumo de energia (kWh/km). O consumo, por sua vez, varia com condições ambientais e operacionais, como temperatura externa, peso transportado, quantidade de paradas e estilo de condução do motorista, como discutido anteriormente. Portanto, mesmo analisando apenas uma linha, são esperadas variações da autonomia. A Figura 15 apresenta estimativas de autonomia considerando os consumos de energia diários por ônibus. A reserva técnica da bateria, importante para a saúde da bateria e segurança operacional, é indicada pelo fabricante. São considerados três cenários de reserva: 10%, 15% e 20%.

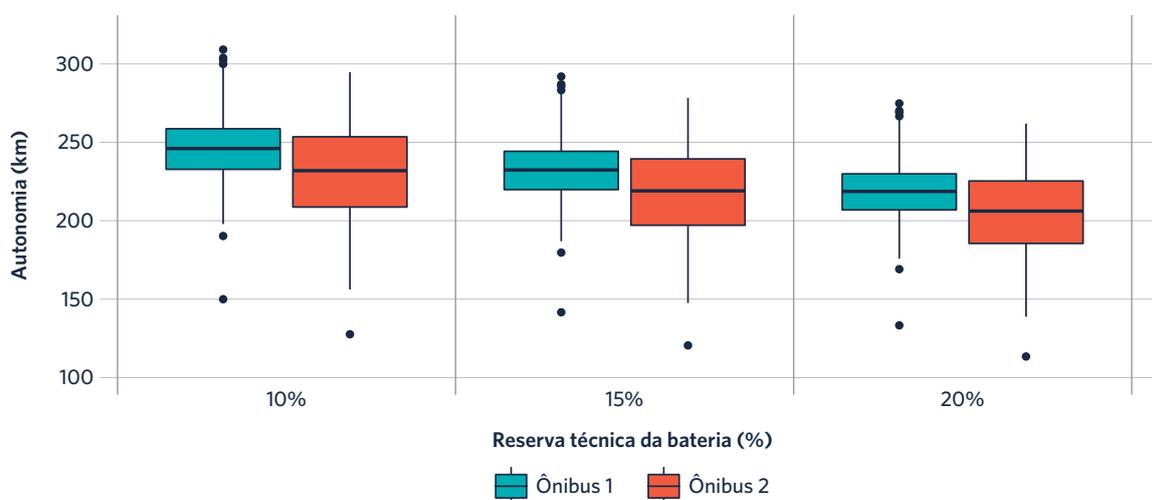


Figura 15 - Estimativas de autonomia para três cenários de reserva técnica da bateria (10%, 15% e 20%).

A Figura 15 mostra que, mesmo para um único ônibus, que opera apenas uma linha, existe variação significativa da autonomia. Considerando uma reserva técnica da bateria igual a 20%, a autonomia estimada para o Ônibus 1 varia entre 175,9 km e 264,3 km, enquanto para o Ônibus 2 varia entre 138,9 km e 262 km (desconsiderando os valores atípicos). As medianas das autonomies nesse cenário de 20% de reserva da bateria são iguais a 218,7 km e 206,2 km para os Ônibus 1 e 2, respectivamente.

A quilometragem diária média planejada em dia útil para a linha 6030-10 é de 188 km de acordo com dados da planilha de custos da SPTrans (São Paulo Transportes, 2022). Para a reserva técnica de 20%, a autonomia estimada foi maior ou igual à distância diária média planejada em 83,9% dos dias analisados. No entanto, os ônibus de uma linha não necessariamente operam a mesma quilometragem ao longo de um dia. A frequência de saída dos ônibus

tende a variar, podendo haver um maior número de veículos em operação durante o horário de pico e, assim, diferentes distâncias percorridas.

No caso das linhas usadas com maior intensidade, a autonomia do ônibus elétrico pode ser menor do que a quilometragem diária planejada. Isso não necessariamente impede a adoção do ônibus elétrico naquela linha, cuja operação pode ser viabilizada com recargas intermediárias ao longo do dia, que aumentam sua autonomia diária. No entanto, nem sempre a operação permite mais recargas além da noturna, seja por impossibilidade do retorno do veículo à garagem, seja por falta de pontos adicionais de recarga ou até por necessidade de maior disponibilidade do veículo durante o dia. Além disso, os custos podem variar a depender do horário da recarga. Para o caso analisado, o custo da eletricidade é maior no horário de pico (ou seja, entre as 17h30 e as 20h30 na cidade de São Paulo). A estratégia de recarga adotada é analisada a seguir.

4.3 ESTRATÉGIA DE RECARGA DOS ÔNIBUS

A estratégia de recarga é fundamental para garantir que o veículo possa percorrer a distância requerida e, conseqüentemente, definir o planejamento operacional dos ônibus elétricos. A recarga dos veículos monitorados acontece na garagem do operador por meio de carregadores com 80 kW de potência. As tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, um resumo dos eventos de recarga monitorados por ônibus e por tipo (noturna ou intermediária).

Tabela 5 - Características de recarga dos ônibus monitorados (janeiro/2021 a dezembro/2021)

Ônibus	Número de recargas ^(a)	Número de recargas por dia Média [mín. - máx.]	Energia total recarregada por dia (kWh) Média [mín. - máx.]	Tempo por dia carregando (horas) Média [mín. - máx.]	Recargas noturnas (entre as 20h e as 4h)
1	583	1,86 [1 - 5]	222,0 [0,4 - 469,3]	3,6 [0,01 - 9,4]	71,4%
2	463	1,67 [1 - 5]	219,3 [0,4 - 440,8]	3,8 [0,01 - 8,9]	73,8%

a. Como descrito na seção 4, foram eliminados da amostra os dias em que os ônibus percorreram menos do que 50 km.

Tabela 6 - Recargas por tipo (janeiro/2021 a dezembro/2021)

Tipo de recarga	Número de recargas	Energia recarregada por evento de recarga (kWh) Média [mín. - máx.]	Parcela da bateria recarregada Média [mín. - máx.]	Duração da recarga (minutos) Média [mín. - máx.]	Parcela de recargas até a carga de 100%
Noturna (20h - 4h)	758	137,6 [0,1 - 290,1]	43,0% [0% - 87,8%]	134,5 [0,3 - 402,4]	75,9%
Intermediária (4h - 20h)	288	90,7 [0,01 - 221,1]	28,3% [0% - 72,6%]	99,3 [0,3 - 433,2]	61,1%

Na Tabela 5, observa-se que, na média, ambos os ônibus recarregam mais do que uma vez ao dia. Dessas recargas, mais de 70% são feitas no período noturno (entre as 20h e as 4h). A energia total recarregada por dia é de em média 220 kWh para ambos os veículos, e o tempo médio diário de recarga é de 3,6 horas para o Ônibus 1 e 3,8 horas para o Ônibus 2.

Analisando as recargas por tipo na Tabela 6, observa-se que as noturnas têm, na média, maior quantidade de energia entrando (137,6 kWh para as recargas noturnas e 90,7 kWh para as recargas intermediárias). Assim, a parcela de bateria recarregada também é maior para as recargas noturnas, em média 43%, enquanto para as recargas intermediárias é igual a 28,3%. Como consequência, as recargas noturnas são também mais longas, com duração média de 134,5 minutos *versus* 99,3 minutos para as recargas intermediárias. Além disso, 75,9% das recargas noturnas carregam a bateria até 100%, enquanto o mesmo acontece em 61,1% das recargas intermediárias.

A Figura 16 apresenta um painel com mais informações sobre a estratégia de recarga adotada ao longo desse monitoramento. No primeiro painel, a altura das barras indica a frequência de recargas por horário de início desses eventos de recarga. Já o segundo e o terceiro painéis exibem diagramas de caixa com os percentuais de carga disponíveis (estados de carga), respectivamente, no início e ao final dos eventos de recarga.

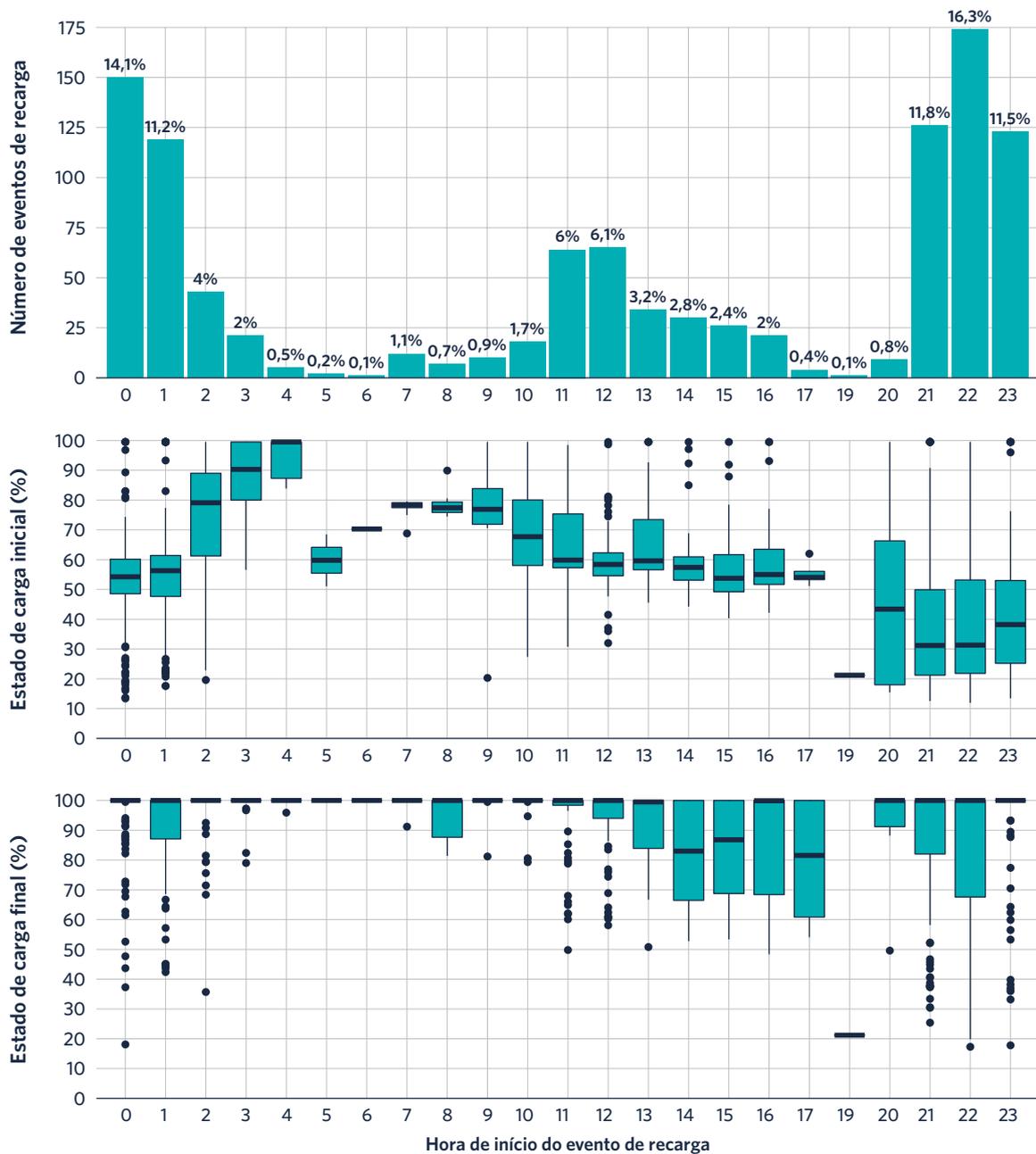


Figura 16 – Estratégia de recarga das baterias. O painel superior apresenta a quantidade de eventos de recarga por hora inicial de tais eventos. Os dois últimos painéis mostram a distribuição do percentual de energia disponível na bateria, também por hora inicial de evento de recarga.

No primeiro painel, nota-se que a maior parte dos eventos de recarga inicia entre as 20h e a 1h. Observa-se também uma quantidade significativa de recargas que começam às 11h e às 12h, porém, são menos frequentes do que nos horários extremos do dia. O segundo painel evidencia que as recargas noturnas tendem a iniciar quando a bateria está mais vazia do que o observado nos eventos de recarga intermediária.

Além disso, vê-se que o operador deixa uma reserva técnica da bateria, como recomendado pelo fabricante, necessária para a saúde da bateria e a segurança operacional. A maior parte das recargas (91,9%) começam com carga superior a 20% e apenas 8,1% iniciam com carga disponível entre 12% e 20%. Há ainda uma quantidade significativa de recargas, principalmente das intermediárias, iniciando com mais de 50% de carga disponível (59,4%).

O painel inferior, por fim, mostra que mais de 70% das recargas tendem a finalizar com 100% da bateria carregada. Esse comportamento indica que o operador busca carregar as baterias desses dois ônibus por completo quando possível.

5. CONCLUSÃO

Ao longo dos últimos anos, a cidade de São Paulo tem se empenhado em melhorar o desempenho ambiental de seu sistema de transportes. Além da aprovação da Lei nº 16.802/2018, que estabeleceu metas de redução de emissões para ônibus urbanos, a prefeitura comprometeu-se a incluir 2.600 ônibus elétricos em sua frota até 2024. O projeto-piloto lançado pela SPTrans em parceria com a BYD viabilizou a implementação de 18 ônibus elétricos a bateria na frota, operados pela empresa Transwolff desde 2019. Os resultados do projeto-piloto podem auxiliar a guiar os próximos passos da transição tecnológica na cidade.

Este relatório analisou o desempenho de dois ônibus elétricos da frota do projeto-piloto, monitorados ao longo de 2021, considerando dados de operação e consumo de energia. As análises aqui apresentadas buscam caracterizar o desempenho dos ônibus ao longo do tempo em diferentes condições operacionais, porém não estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis nem quantificam o impacto de cada uma.

Observa-se uma variação significativa do consumo de energia ao longo do tempo para um mesmo ônibus e entre os ônibus analisados. O consumo médio é igual a 1,19 kWh/km para um ônibus e 1,27 kWh/km para o outro, porém as médias diárias variaram entre 0,94 kWh/km e 2,29 kWh/km nos dias analisados. Apesar de haver diferenças técnicas entre os veículos monitorados (os modelos de carroceria são diferentes), ambos têm o mesmo modelo de chassi e bateria, e seus pesos vazios são próximos (com diferença de cerca de 1%). A variação significativa de valores para um mesmo ônibus demonstra o impacto das condições de operação no consumo de energia. É importante

ressaltar que o consumo mensurado pelos dispositivos de telemetria não inclui as perdas de energia na recarga, contabilizadas no consumo remunerado.

O uso do ar-condicionado no ônibus aumenta o consumo de energia, especialmente em dias quentes. De fato, de forma geral, os ônibus apresentaram maior consumo em dias com maiores temperaturas máximas. Além disso, um dos ônibus tende a consumir mais energia com maiores temperaturas do que o outro, indicando uma possível diferença de desempenho dos equipamentos de ar-condicionado.

O peso transportado é outro fator relevante, porém, dados detalhados sobre a quantidade de passageiros transportados por viagem e seus trajetos não estavam disponíveis para esta análise. Nenhuma correlação clara foi observada entre o consumo médio diário e o total de passageiros transportados por dia. Sugere-se investigar essa relação com dados mais desagregados.

Avaliou-se também a relação entre velocidade média e consumo de energia. De forma geral, nos dias em que os ônibus monitorados apresentaram velocidades médias maiores, também consumiram menos energia. Os ônibus urbanos costumam apresentar velocidades médias baixas devido à alta frequência de paradas ao longo do dia para o embarque e desembarque de passageiros. As oscilações de aceleração ao longo da operação são influenciadas, ainda, por congestionamentos, o que reflete na velocidade média. Portanto, velocidades mais altas podem estar associadas a menos eventos de aceleração e desaceleração e, assim, a um menor consumo de energia.

A frenagem regenerativa também é impactada pela frequência e intensidade das oscilações de aceleração e desaceleração. Para os dois ônibus monitorados, o percentual médio diário de energia regenerada pela frenagem variou de 17,2% a 49,2%, com valor médio igual a 40,7% para um ônibus e 38,6% para o outro. Notou-se um aumento da regeneração ao longo do tempo, o que pode ter sido influenciado por uma maior adaptação dos motoristas à tecnologia.

O estilo de condução dos motoristas é outro fator que afeta o consumo de energia. Este estudo não teve acesso aos dados de escala dos motoristas, logo, não foi possível analisar esse estilo de forma mais abrangente. No entanto, a análise da frenagem regenerativa pode apresentar indicativos sobre a adaptação do estilo de condução dos motoristas à nova tecnologia e motivar que futuros estudos se aprofundem neste tópico.



Por fim, com relação à estratégia de recarga, observou-se que os ônibus monitorados são recarregados principalmente no período noturno, sobretudo entre as 21h e as 2h. Quantidade significativa de recargas inicia entre as 11h e as 13h, porém, estas são menos frequentes e menos intensas. Verificou-se que, na média, há mais de um evento de recarga por dia e que, grande parte das vezes, o operador busca completar a carga da bateria.

Apesar de o estudo monitorar apenas dois ônibus, os dados coletados fornecem informações precisas e detalhadas sobre o consumo energético e a eficiência da operação. Os resultados apresentados estão em linha com valores verificados em outros estudos considerando cidades que já operam frotas de ônibus elétricos de grande escala.

Ressalta-se que tais resultados se limitam aos dois ônibus analisados. Assim, não necessariamente o mesmo ônibus terá um desempenho energético similar se adotado em outras condições operacionais. Na verdade, variações no consumo de energia são esperadas mesmo para um ônibus que circula em apenas uma linha, já que as condições operacionais variam ao longo da operação – como peso transportado, congestionamentos, condições climáticas e condução dos motoristas. Poder monitorar essas variações auxilia na gestão operacional da frota de ônibus.

Além de não gerar emissões de escapamento, os ônibus elétricos a bateria costumam apresentar custos operacionais baixos em comparação à tecnologia convencional. Portanto, maximizar o uso desses veículos traz maiores ganhos financeiros, além dos benefícios climáticos e à saúde associados à redução de emissões. Dessa forma, este tipo de monitoramento torna-se uma ferramenta ainda mais importante por permitir acompanhar a evolução do desempenho energético e a autonomia desses ônibus, trazendo mais previsibilidade e segurança à operação.

REFERÊNCIAS

- Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2002). Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 182-190. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:2\(182\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182))
- Bakker, S., & Konings, R. (2018). The transition to zero-emission buses in public transport - The need for institutional innovation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.023>
- Bian, J., & Qiu, B. (2018). Effect of road gradient on regenerative braking energy in a pure electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(13), 1736-1746. <https://doi.org/10.1177/0954407017735020>
- Braun, A., & Rid, W. (2017). The influence of driving patterns on energy consumption in electric car driving and the role of regenerative braking. *Transportation Research Procedia*, 22, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.03.024>
- Cawse, N. (2022, 19 de maio). *How the curve algorithm for GPS logging works*. Geotab. <https://www.geotab.com/blog/gps-logging-curve-algorithm/>
- Chikishev, E. (2021). Impact of natural and climatic conditions on electric energy consumption by an electric city bus. *Transportation Research Procedia*, 57, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>
- Correa, G., Muñoz, P. M., & Rodriguez, C. R. (2019). A comparative energy and environmental analysis of a diesel, hybrid, hydrogen and electric urban bus. *Energy*, 187, 115906. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115906>
- 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*. International Council on Clean Transportation.
- de Abreu e Silva, J., Moura, F., Garcia, B., & Vargas, R. (2015). Influential vectors in fuel consumption by an urban bus operator: Bus route, driver behavior or vehicle type? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 38, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.003>

- Eudy, L., & Jeffers, M. (2020). *Long Beach Transit Battery Electric Bus Evaluation: Final Report*. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75582.pdf>
- Eufrásio, A. B. R., Delgado, O., & Rozenfeld, T. (2022). *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/ze-hvs-sao-paulo-brazil-mar22/>
- Feng, W., & Figliozzi, M. (2013). An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>
- Fiori, C., Montanino, M., Nielsen, S., Seredynski, M., & Viti, F. (2021). Microscopic energy consumption modelling of electric buses: Model development, calibration, and validation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, 102978. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102978>
- Galarza, S. (2020). *From pilots to scale: Lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile*. C40. https://www.c40knowledgehub.org/s/article/From-Pilots-to-Scale-Lessons-from-Electric-Bus-Deployments-in-Santiago-de-Chile?language=en_US
- Gao, Z., LaClair, T., Ou, S., Huff, S., Wu, G., Hao, P., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2019). Evaluation of electric vehicle component performance over eco-driving cycles. *Energy*, 172, 823–839. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.017>
- Grace, D. (2018, 20 de setembro). *Understanding Range: Clarity Behind the Calculations*. <https://www.proterra.com/understanding-range-clarity-behind-the-calculations/>
- Hellgren, J. (2007). Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus powertrain for year 2005 and 2020. *Energy Policy*, 35(1), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.10.004>
- Hu, Y. C., Lin, W. T., Chen, G. P., & Yang, Y. W. (2012). Characteristics of Fuel Consumption and Vehicular Operation of Buses in Taipei's Exclusive Bus Lanes. *Sustainable Transportation Systems*, 168–175. <https://doi.org/10.1061/9780784412299.0021>

- Kusuma, C. F., Budiman, B. A., Nurprasetio, I. P., Islameka, M., Masyhur, A. H., Aziz, M., & Reksowardojo, I. K. (2021). Energy Management System of Electric Bus Equipped with Regenerative Braking and Range Extender. *International Journal of Automotive Technology*, 22(6), 1651-1664. <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0142-z>
- Lajunen, A. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008>
- Lajunen, A., & Lipman, T. (2016). Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy*, 106, 329-342. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.075>
- Lee, J., Shon, H., Papakonstantinou, I., & Son, S. (2021). Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103066. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103066>
- Lei nº 14.933, de 5 de junho (2009). Câmara Municipal de São Paulo. <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-14933-de-05-de-junho-de-2009>
- Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018, nº 16802 (2018). <http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>
- Lowell, D. (2019). *Electric Bus 101: Economics, Politics, Myths & Facts*. M. J. Bradley & Associates. <https://www.mjbradley.com/sites/default/files/EVIElectricBus101FINAL15may19.pdf>
- Maio, P., Ángel, A., Ortiz, N., Herrera, S., & Vidal, W. (2021). *Resultados del piloto de buses eléctricos en Buenos Aires. Tecnologías alternativas en el transporte público*. Corporación Andina de Fomento. <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1687>
- Papa, G., Santo Zarnik, M., & Vukašinović, V. (2022). Electric-bus routes in hilly urban areas: Overview and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112555>
- Perrotta, D., Macedo, J. L., Rossetti, R. J. F., Afonso, J. L., Kokkinogenis, Z., & Ribeiro, B. (2014). Driver Attitude and Its Influence on the Energy Waste of Electric Buses. In M. Behrisch, D. Krajzewicz, & M. Weber (Orgs.), *Simulation of Urban Mobility* (Vol. 8594, p. 99-108). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45079-6_8

- Portaria nº 81, de 24 de março (2020). Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes (SMT) de São Paulo. <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/portaria-secretaria-municipal-de-mobilidade-e-transportes-smt-81-de-24-de-marco-de-2020>
- Ragon, P.-L., Mulholland, E., Basma, H., & Rodríguez, F. (2022). *A review of the AFIR proposal: Public infrastructure needs to support the transition to a zero-emission truck fleet in the European Union*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/afir-eu-hdv-infrastructure-mar22/>
- Sagaama, I., Kchiche, A., Trojet, W., & Kamoun, F. (2020). Impact of Road Gradient on Electric Vehicle Energy Consumption in Real-World Driving. In L. Barolli, F. Amato, F. Moscato, T. Enokido, & M. Takizawa (Orgs.), *Advanced Information Networking and Applications* (Vol. 1151, pp. 393–404). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44041-1_36
- São Paulo. (2021). *Programa de Metas 21/24*. <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/governo/SEPEP/arquivos/pdm-versao-final-participativa.pdf>
- São Paulo Transportes. (2022). *Planilha de Custos*. https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/index.php?p=227887
- Uruguay. (2013). *Pruebas de campo bus 100% eléctrico*. Ministerio de Industria, Energía y Minería. <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/56464/Informe+final+Pruebas+Bus+El%C3%A9ctrico+BYD+-+K9.pdf/e9f2079e-38e0-4c03-8f88-e8308c46dfe2>
- Wang, S., Lu, C., Liu, C., Zhou, Y., Bi, J., & Zhao, X. (2020). Understanding the Energy Consumption of Battery Electric Buses in Urban Public Transport Systems. *Sustainability*, 12(23), 10007. <https://doi.org/10.3390/su122310007>
- Wenz, K.-P., Serrano-Guerrero, X., Barragán-Escandón, A., González, L. G., & Clairand, J.-M. (2021). Route prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: A new methodology and a study of case in an intermediate city of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111215>
- World Bank. (2021). *Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group* (Mobility and Transport Connectivity Series). <http://hdl.handle.net/10986/35935>



Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S., & Hao, J. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>

Zhou, M., Jin, H., & Wang, W. (2016). A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 203–218. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.008>

APÊNDICE I: FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE TELEMETRIA

Os dois ônibus elétricos a bateria da Transwolff analisados neste estudo estão sendo monitorados desde janeiro de 2021 por telemetria (dispositivos GO9 da Geotab). Os dispositivos coletam, em tempo real, dados como posição, distância percorrida e carga da bateria, que são disponibilizados em uma plataforma digital. Essas informações não apenas possibilitam acompanhar o desempenho dos veículos e detectar problemas técnicos como podem ser utilizadas na calibração de simulações.

O dispositivo de telemetria é conectado diretamente à entrada OBD (*On-board Diagnosis*) do veículo, extraíndo dados da saída CAN (*Controller Area Network*). Essa entrada se comunica com a ECU (*Engine Control Unit*) do veículo e permite acesso aos dados dos sensores de cada um de seus componentes. Uma representação do mecanismo de coleta e armazenamento dos dados é oferecida na Figura 17.

Mecanismo de Telemetria

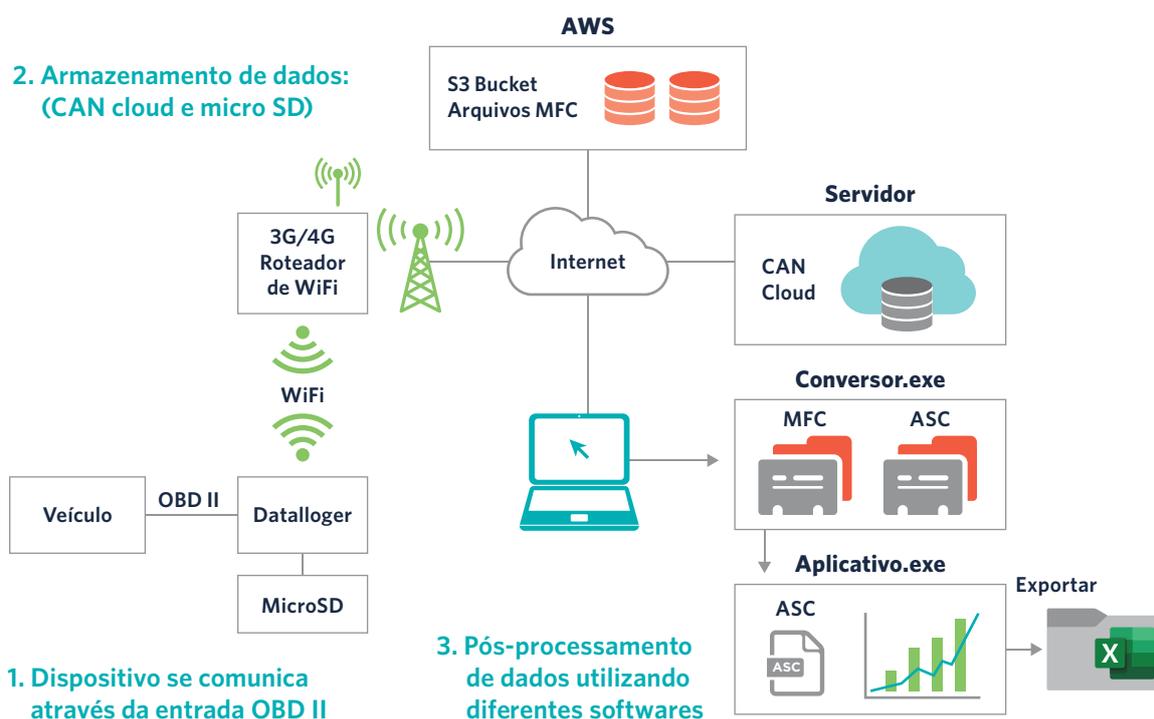


Figura 17 - Estrutura de coleta e armazenamento de dados dos veículos elétricos monitorados
Source: Helmer Acevedo, "Mecanismo de telemetria," unpublished internal communication (Washington, DC: ICCT, 2022).

Os dados são coletados pelo dispositivo e transmitidos para a plataforma digital a partir de um algoritmo de curva patenteado pela Geotab, que por sua vez utiliza o algoritmo Ramer-Douglas-Peucker. Esse método registra novas observações quando o dispositivo detecta uma variação relevante na variável analisada, de acordo com a margem de erro pré-estabelecida. Assim, o dispositivo não realiza a coleta de dados com uma frequência fixa, porém garante que valores críticos sejam registrados, coletando menos pontos. Com isso, o armazenamento de dados é otimizado e, ainda assim, é possível criar uma curva preditiva para estimar dados intermediários (Cawse, 2022). Um exemplo comparando a coleta de todos os pontos com essa abordagem de coleta de pontos críticos da curva é apresentado na Figura 18.

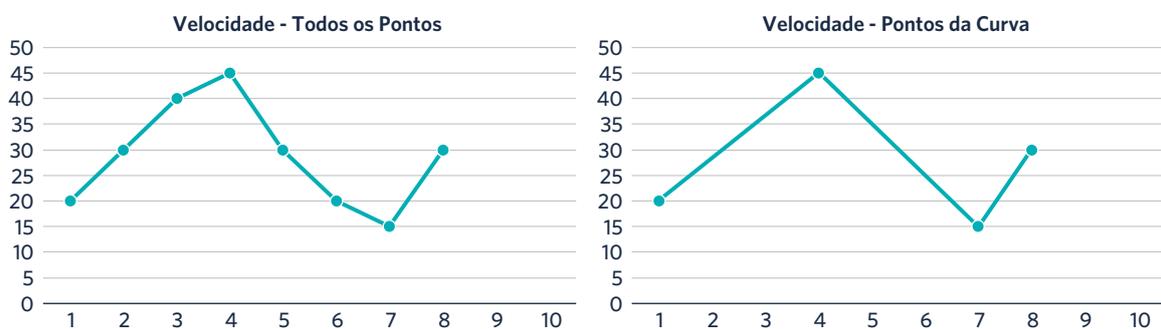


Figura 18 – Coleta de todos os pontos de dados de velocidade *versus* coleta de pontos críticos (pontos da curva). Adaptado de Cawse (2022).

APÊNDICE II: RESULTADOS DO TESTE SORT

O processo de homologação dos ônibus elétricos a bateria em São Paulo inclui um teste padronizado de mensuração de consumo de energia, o teste SORT (*Standardised On-Road Test Cycle*), cujo protocolo foi desenvolvido pela Union Internationale des Transports Publics (UITP) para mensurar o consumo de combustível de ônibus de forma padronizada e reproduzível. Em 2017, o teste SORT teve seu escopo ampliado para incluir ônibus elétricos, denominado de E-SORT (UITP, 2022). O protocolo de teste inclui três ciclos: SORT 1 é o ciclo urbano; SORT 2, o ciclo misto; e SORT 3, o ciclo suburbano. A SPTrans definiu que os ônibus elétricos a bateria devem atingir uma autonomia mínima de 250 km no teste.

O teste de ônibus da BYD da Transwolfo foi realizado em 2020 e os resultados são apresentados na Tabela 7. Para o teste, o peso do veículo foi de 16,675 kg. Esse valor corresponde ao ônibus carregado com metade da capacidade de passageiros. Além disso, durante o teste, os equipamentos auxiliares (como o de ar-condicionado) permaneceram desligados.

Tabela 7 – Resultados do teste SORT em um ônibus BYD da Transwolfo (teste realizado em setembro/2020)

	Consumo de energia (kWh/km)	Alcance máximo (km)
SORT 1 (Ciclo urbano)	0,9353	267,4
SORT 2 (Ciclo misto)	0,8588	291,2
SORT 3 (Ciclo suburbano)	0,8589	291,2

O teste SORT permite comparar modelos de ônibus quanto ao desempenho no consumo de energia e à autonomia, sendo bastante relevante para a escolha da tecnologia, uma vez que considera condições de teste controladas. Essa comparação direta não é possível na operação real, em que os ônibus operam em linhas com diferentes trajetos, perfis de elevação, número de paradas, níveis de congestionamento, pesos transportados, motoristas e clima. Por conta disso, consumos de energia distintos dos observados no teste SORT são esperados na operação real.

APÊNDICE III: PASSAGEIROS TRANSPORTADOS POR ÔNIBUS AO DIA

Um fator que influencia o consumo de energia de um veículo é a carga transportada. O número de passageiros transportados por dia é uma informação monitorada pela SPTrans, que disponibilizou esses dados dos dois ônibus analisados por este estudo de janeiro a setembro de 2021. O Ônibus 1 transportou, na média, 388,9 passageiros por dia, enquanto o Ônibus 2 transportou 361,5 passageiros. A Figura 19 apresenta um histograma com a distribuição do número de passageiros diários por ônibus no período analisado. A Figura 20 mostra a relação entre o consumo de energia médio e o número de passageiros transportados por dia.

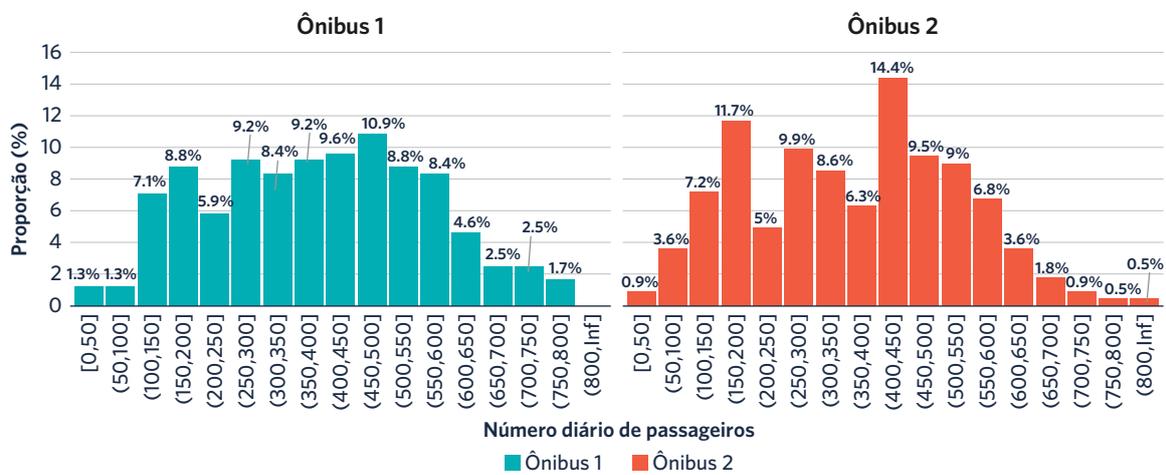


Figura 19 - Distribuição do número de passageiros transportados ao dia por ônibus de janeiro a setembro de 2021.

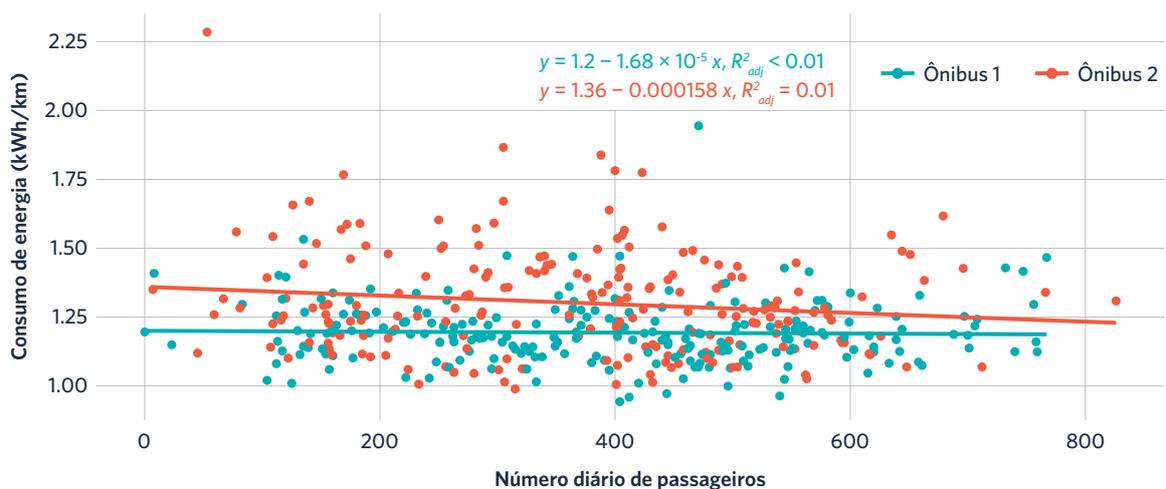


Figura 20 - Relação entre consumo de energia e número de passageiros diário.



O baixo coeficiente indica que não há correlação entre consumo energético e número diário de passageiros nos ônibus. No entanto, esse resultado não indica que a variável é irrelevante. Primeiramente, a relação entre as variáveis pode não ser evidente por não se isolar o efeito de outras variáveis. Além disso, esse comportamento pode ser uma limitação dos dados disponíveis. Devido aos embarques e desembarques que ocorrem ao longo da operação, é importante considerar por quanto tempo o passageiro foi transportado. Dados da variação de ocupação do ônibus também poderiam representar essa informação. Infelizmente, não se teve acesso a essas informações adicionais. Sugere-se que essa análise seja explorada em estudos futuros.

Estudo anterior do ICCT estimou o consumo de energia de ônibus elétricos a bateria e ônibus a diesel em algumas linhas da cidade de São Paulo (Eufrásio et al., 2022). Simulou-se o consumo de energia em três cenários: 0%, 50% e 100% de carregamento de passageiros. As simulações mostraram que a carga transportada tem um impacto significativo no consumo de energia, com um aumento médio de 16,9% do consumo comparando o ônibus com 100% de passageiros e o ônibus vazio.

CONTATO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org



APOIO



FINANCIADORES E FACILITADORES



SÓCIOS PRINCIPAIS