

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DA SUBSTITUIÇÃO DE ÔNIBUS DE COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICOS NO TRANSPORTE PÚBLICO DE PORTO ALEGRE

Guilherme Augusto de Oliveira Rugeri – rugeriguilherme@gmail.com

Fabiano Perin Gasparin – fabiano.gasparin@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós Graduação em Minas, Metalurgia e Materiais

Resumo. Preocupações ecológicas e de sustentabilidade têm gerado mudanças nas tecnologias nas áreas de energia. Preocupados com a segurança energética, os países enfrentam um paradigma de manterem-se soberanos energeticamente, e combaterem a insustentabilidade ambiental. Neste contexto, contesta-se as frotas veiculares, responsáveis por 51% da emissão de CO₂ no Brasil. Existem evidências que a substituição das frotas de ônibus diesel por puramente elétricas reduzem o impacto ambiental, com incremento de custo decrescente. No entanto, incertezas sobre custos totais, adequação da legislação vigente e possíveis incentivos governamentais fazem com que os responsáveis pela implementação sejam conservadores e mantenham a operação baseada nos ônibus diesel. Este estudo tem como objetivo analisar o TCO e as emissões da frota pública de ônibus de Porto Alegre, comparando sua execução atual, baseada nos ônibus diesel, com situações onde são introduzidos 10, 20 e 30% de ônibus puramente elétricos na frota, equivalentes aos substituídos, considerando os custos divulgados pela licitação de transporte público local e pesquisas de mercado. Economicamente, percebemos o TCO do ônibus elétrico entre 97 e 118% do TCO do ônibus diesel, dependendo das variáveis adotadas. Ambientalmente, a não emissão de poluentes durante a operação dos ônibus elétricos reduz em 17.149,78 toneladas anuais de gases de efeito estufa para cada 10% de ônibus elétricos na frota. Concluiu-se, com isso, que existe uma tendência do aumento de competitividade entre as duas tecnologias estudadas, para o futuro. As menores emissões dos ônibus elétricos tendem a compensar cada vez mais o incremento econômico para sua implantação. A análise em longo prazo tende a ser mais favorável para os ônibus elétricos, pois os custos em infraestrutura para implantação já terão sido absorvidos. No entanto, é necessário respaldo governamental, para adequação da legislação e incentivos, para que a frota de ônibus possa contar cada vez mais com ônibus sustentáveis.

Palavras-chave: Ônibus elétrico, Mobilidade Urbana, Energia Sustentável

1. INTRODUÇÃO

A qualidade de vida da população e sua sustentabilidade é assunto em alta nos dias atuais. Nesse contexto, a população das grandes metrópoles percebe o impacto ambiental local, causado pelo atual serviço de transporte público. Segundo Leurent e Windish (2011), o uso dos veículos automotores como principal meio de transporte acarretou diversas consequências para as cidades: acidentes, poluição sonora, poluição do ar e emissões de gases de efeito estufa pelo consumo de combustíveis fósseis, cada vez mais escassos e caros. De acordo com PROMOB-e (2018), é de interesse dos governos a eletrificação das frotas de veículos, pois estas estariam atreladas à benefícios econômicos, industriais, geração de novos empregos e desenvolvimento local. Os impactos negativos dos meios de transporte estão diretamente associados à combustão interna dos motores, e uma forma de amenizá-los é a mudança para motores movidos por uma energia mais limpa e menos poluente, como é o caso da eletricidade no Brasil. Os veículos com tração elétrica têm se expandido ao longo dos últimos anos, principalmente por apresentarem-se como uma solução ecológica, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos, como o material particulado e os óxidos de nitrogênio.

Os ônibus puramente elétricos vêm sendo introduzidos nas grandes cidades, sendo caracterizados por funcionarem exclusivamente a partir da energia armazenada em seu banco de baterias. Nos projetos atuais, é possível perceber que a autonomia, entrave desses veículos outrora, já é considerado um problema solucionável. De acordo com Guenther e Padilha (2016), os motores elétricos apresentam eficiência na faixa de 90% ou mais, superando a eficiência média dos motores a combustão, de cerca de 30%. Além da sua alta eficiência, têm uma vida útil muito maior que os outros motores, por apresentarem somente uma parte móvel - o rotor, ou seja, sua manutenção é menos frequente e envolve menos itens.

Porto Alegre, capital gaúcha, possui segundo dados do IBGE (2020), 1.488.252 habitantes, em um território de 495.390 km², com uma frota de automóveis de 608.095 carros, 5.156 ônibus e 2.340 micro-ônibus. A empresa responsável por regular e fiscalizar o transporte público da capital gaúcha é a EPTC - Empresa Pública de Transporte e Circulação. Segundo dados da própria empresa, o transporte público da cidade é atendido por 429 lotações, 623 veículos escolares, 3.928 táxis e 1.480 ônibus. Porto Alegre é amplamente reconhecida como uma das capitais mais verdes do Brasil,

classificada como a 4ª cidade mais arborizada do Brasil entre os municípios com mais de um milhão de habitantes, de acordo com dados do IBGE.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ônibus elétricos no Brasil: perspectivas e dificuldades

Considerar o contexto histórico brasileiro é fundamental para a definição das políticas públicas de eletro mobilidade. O estudo realizado por PROMOB-e (2018) aponta como a principal lição do cenário mundial para implantação de veículos elétricos a clareza em relação às motivações da transição. É possível observar que a falta de motivações claras gera falta de integração entre as partes envolvidas e, conseqüentemente, a eletrificação das frotas não acontece, como é o caso do Brasil até o momento.

Atualmente, o principal motivador brasileiro baseia-se no compromisso internacional assumido - da diminuição de gases de efeito estufa, no Acordo de Paris, em dezembro de 2015. Os compromissos assinados visam uma redução significativa da emissão de gases de efeito estufa para as próximas décadas. A responsabilidade primária pelo transporte público é do poder público municipal, conforme inciso V do artigo 30, da Constituição Federal. No entanto, a prática usual das grandes cidades brasileiras é a terceirização desse serviço por parte do poder público, para empresas concessionárias. A forma de controle de qualidade do serviço prestado por estas empresas são os editais das licitações públicas, nos quais os governos regulam as diretrizes do serviço prestado. Entretanto, a autonomia das operadoras do serviço na escolha das tecnologias mais viáveis e com melhor custo benefício, dentro das condições impostas nos editais, flexibiliza esse controle. Desta forma, as concessionárias, que operam este serviço nas grandes cidades têm papel fundamental na implementação, pois esta só ocorrerá em condições favoráveis.

As dificuldades para a difusão dos veículos elétricos se dão por vários motivos. De acordo com Castro e Ferreira (2013), as tecnologias empregadas na indústria automotiva brasileira estão, historicamente, mais relacionadas à segurança energética do país do que à eficiência energética. Outro motivo representativo é o desincentivo tributário: é comum, nas capitais brasileiras, editais que preveem o tempo máximo de utilização dos ônibus no município (geralmente de 10 anos), além de uma idade média da frota (usualmente 5 anos), como pré requisitos a serem cumpridos pelas operadoras do serviço.

Conforme a Fig. 1, o nível de incentivo governamental, a nível mundial, tem relação direta com a implementação de veículos elétricos a bateria (BEVs) e veículos híbridos de plug-in (PHEVs) nos locais citados.

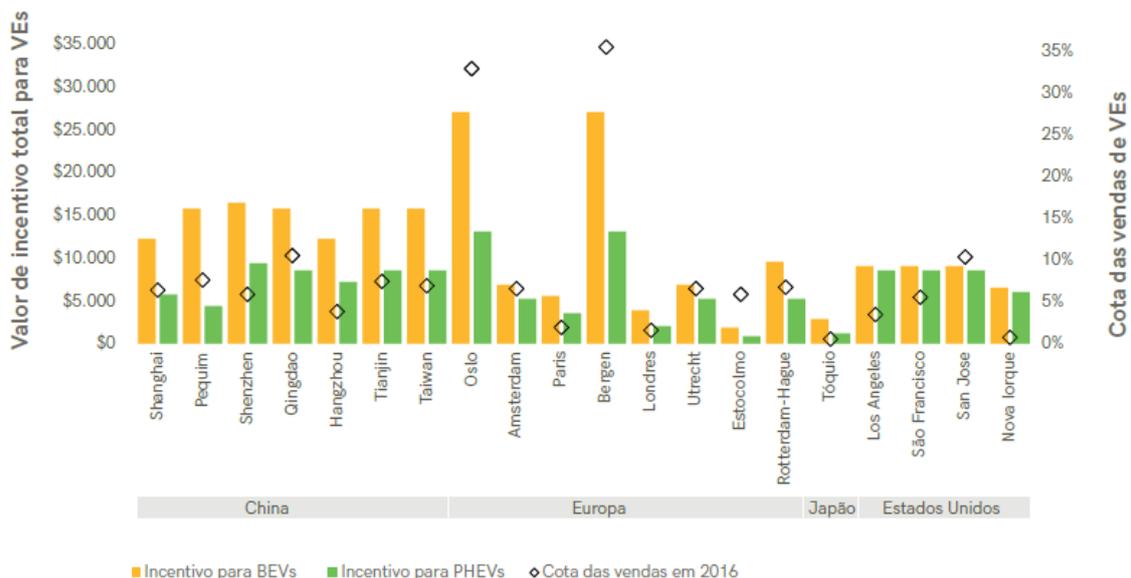


Figura 1 – Valores de incentivo x vendas de veículos elétricos nos países de vanguarda (PROMOB-e, 2018).

2.2 Ônibus elétrico adotado

Em termos tecnológicos, existem diversos tipos de veículos elétricos no mercado, atualmente. Escopo deste estudo, os veículos puramente elétricos são caracterizados por dependerem totalmente de carregamento elétrico externo e serem tracionados a partir da energia armazenada em um banco de baterias, contando, ainda, com um sistema de carregamento regenerativo das baterias em frenagens. Do ponto de vista energético, são os veículos mais eficientes e apresentam o menor custo por quilômetro rodado com energia. Possuem um grande banco de baterias, que podem resultar em perda de área útil de carga. Diferentes tipos de baterias podem ser utilizados, porém tem, em comum, o fato não

conseguirem se comparar, em autonomia (em distância), aos veículos convencionais. Tal fato que é apontado em diversos estudos como um limitador de sua implantação, necessitando uma adequação da infraestrutura de transporte utilizada.

2.3 Baterias

O banco de baterias é um tópico fundamental para implantação dos ônibus elétricos, pois de acordo com estudos este representa entre 40 e 50% do valor total do veículo (C40/ISSRC, 2013). Embora os veículos elétricos possuam baterias de diversas composições, as baterias do ônibus em estudo são de íons de lítio, a principal tecnologia empregada para este fim. As baterias de lítio diferem das demais por não apresentarem reação de oxirredução. Como o lítio é um elemento pequeno e leve, as baterias à base de lítio apresentam maiores níveis de potência e energia por unidade de massa, com densidade energética na ordem de 100 a 150 Wh/l e energia específica em torno de 120Wh/kg. A energia específica dessas baterias é aproximadamente duas vezes maior em comparação à energia das baterias de níquel metal hidreto (NiMH) e quatro vezes maior em relação aos níveis da bateria de chumbo ácido (PbA). Cabe ressaltar que, segundo Castro e Ferreira (2013), mesmo os veículos elétricos já em comercialização utilizam baterias distintas umas das outras.

2.4 Impacto ambiental

A Resolução CONAMA n. 001, publicada no dia 23 de janeiro de 1986, define impacto ambiental como: *...qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais.*

Além dela, a Resolução Conama n. 491, de 19/11/2018, classifica poluente atmosférico como: *...qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade.*

A Tab. 1 resume os principais poluentes atmosféricos oriundos dos meios de transporte, além de apresentar os principais poluentes gerados pelos ônibus a diesel. É possível constatar que os principais poluentes gerados pela circulação dos ônibus urbanos são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). No que tange os ônibus urbanos, os estudos apontam como principal problema da emissão o impacto local, pois, apesar de representarem parcelas relativamente pequenas dentro do todo, suas emissões impactam na vida de grande parcela da população, dada a densidade populacional dos grandes centros urbanos. A Fig. 2 demonstra a parcela dos ônibus na emissão de gases de efeito estufa.

Tabela 1 – Principais poluentes atmosféricos oriundos dos meios de transporte (adaptado de CETESB, 2019).

Poluente	Características	Danos gerais ao meio ambiente
Partículas Inaláveis Finas (MP 2,5)	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água
Partículas Inaláveis (MP 10) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Tamanho < 50micra	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis	Pode levar à formação da chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos a vegetação e à colheita.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado com odor forte e muito irritante. Pode levar a formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento de partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Pode levar à formação da chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos a vegetação e à colheita.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas e plantas ornamentais

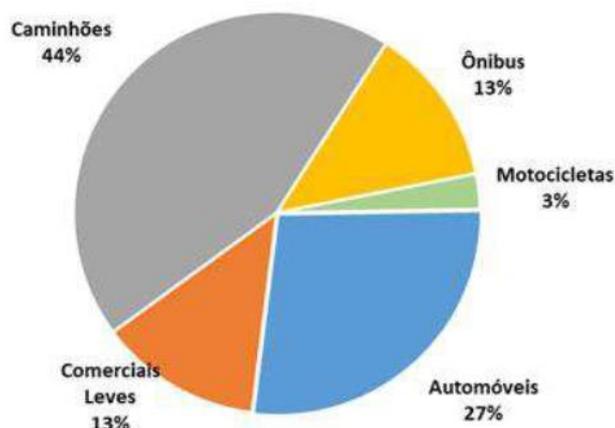


Figura 2 – Contribuição das categorias na emissão de gases de efeito estufa no estado de São Paulo, em 2019 (CETESB, 2019).

O material particulado pode ser definido, de maneira simplificada, como partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar, cujo diâmetro varia entre 2,5 μm (MP 2,5) a 10 μm (MP 10). De acordo com PROMOB-e (2018), um grande problema à saúde humana é a entrada dessas partículas no sistema respiratório e, possivelmente, nos alvéolos pulmonares, que podem, ao longo do tempo, levar a doenças como câncer respiratório, arteriosclerose, inflamação de pulmão, agravamento de asma e aumento de doenças cardiovasculares. Os óxidos de nitrogênio, por outro lado, são importantes na formação do ozônio troposférico, um poluente que se forma através de outros compostos na presença de radiação solar, sendo altamente oxidante na troposfera. É nocivo à saúde humana por gerar e agravar doenças respiratórias e cardiovasculares.

Portanto, é possível associar a poluição dos meios de transporte à certos impactos sociais relevantes. A diminuição da qualidade do ar, em parte gerada pelos ônibus diesel, apresenta efeitos negativos comprovados à saúde humana. Segundo Guenther e Padilha (2016), em São Paulo, idosos com idade superior a 65 anos têm riscos de mortalidade elevados em até 13% para cada aumento de 100 mg/m^3 de material particulado.

No Brasil, a norma Proconve - Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, atualmente na fase P7, tem como objetivo controlar as emissões dos veículos. Ela tem como base o padrão europeu, porém com um grande período de defasagem. Atualmente na fase 7, a regulamentação brasileira exige apenas o requerido na Euro 5, com previsão de atualizar para o requerido na Euro 6 apenas em 2022 (A Euro 6 está em vigor na Europa desde 2014).

2.5 Custo total de propriedade - TCO

O custo total de propriedade – ou TCO, tem sido apresentado na literatura como principal índice econômico para justificar ou não a adoção dos ônibus elétricos. Detentores de um custo inicial maior, chegando a ser mais do que o dobro de um veículo a diesel, os ônibus elétricos tem como trunfo seus menores custos de operação e manutenção, que fazem com que seu custo de vida possa ser menor que os modelos a diesel. O custo total de propriedade, no entanto, é apresentado em estudos de maneira muito variada, tanto pela adoção de parâmetros diferentes quanto pelas incertezas de sua inserção no mercado, dúvidas quanto a suas peças e dificuldade em precisar os custos futuros.

A *Bloomberg New Energy Finance* realizou em 2018, um estudo econômico que, entre as principais constatações, afirma que existe uma relação inversamente proporcional entre a quilometragem percorrida pelo ônibus elétrico e seu custo total de propriedade. Isso justifica, segundo o estudo, a adoção desses veículos especialmente nas grandes cidades, onde o deslocamento diário dos ônibus tende a ser maior, se comparado as cidades do interior. Além disso, o estudo também identificou o carregamento na garagem (*depot charging*) como o mais atrativo economicamente, pois apesar de necessitar de um banco de baterias maior, os menores custos com infraestrutura acabam compensando sua aquisição.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir da delimitação do tema e de revisão de literária para a definição dos elementos utilizados e os custos envolvidos. Para as simulações foi utilizada a planilha de cálculo de TCO e emissões de Cooper *et al.* (2019). Com os dados de entrada definidos, foram criados três cenários (padrão, favorável ao ônibus diesel e favorável ao ônibus elétrico), onde foram realizadas variações de alguns parâmetros, visando analisar a sensibilidade do TCO de cada tipo de ônibus estudado com a variação de alguns dados de entrada. A partir disso, com valores de TCO individuais, foram realizadas simulações de composições para a frota de ônibus de Porto Alegre, considerando o número total de ônibus atuantes no município constante e a quilometragem média da frota do município.

Para isso, foram feitas variações na proporção de ônibus, visando a introdução gradual dos ônibus elétricos na frota. Foram realizadas simulações com 10, 20 e 30% de ônibus elétricos na frota. Por fim, foram apresentados os resultados econômicos e ambientais das hipóteses propostas. A Fig. 3 ilustra a metodologia utilizada sob forma de organograma.

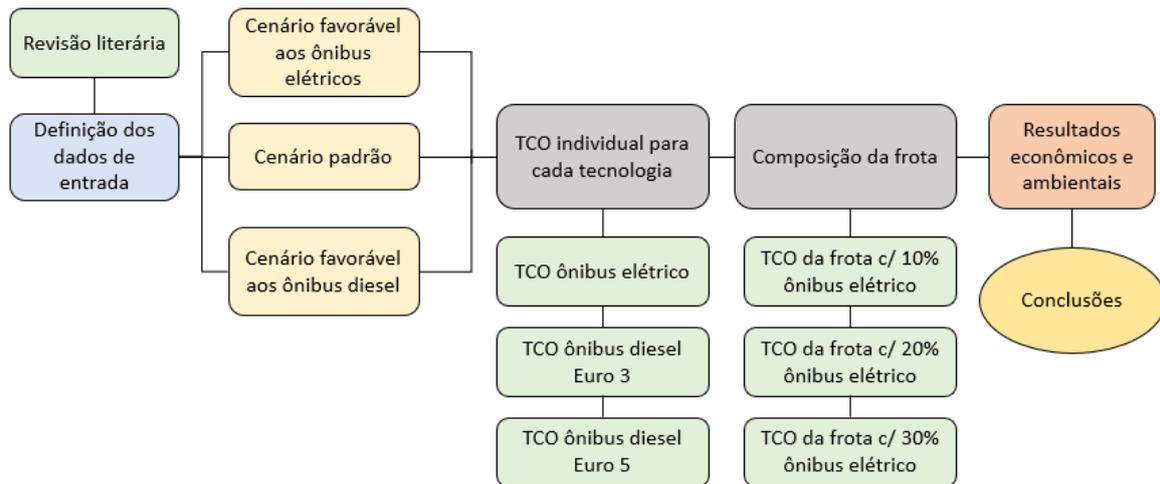


Figura 3 – Organograma com a organização deste trabalho (Autor, 2021).

3.1 Dados de entrada e hipóteses adotadas

O critério para a definição de dados visou o maior aproveitamento de informações de custos encontrados na realidade local. Os dados de Porto Alegre têm como base a licitação Concorrência Pública 01/2015, onde estão divulgados todos os custos do transporte público para as empresas vencedoras de cada lote da licitação. Por se tratar de dados reais, mas não atualizados, foi realizada uma média ponderada de todas as concessões do município, com correção monetária para os dias atuais, utilizando o indexador IPCA acumulado.

Em uma análise dos parâmetros atualizados, valores considerados não condizentes com a realidade foram substituídos por valores adequados, indicados no trabalho. Para os parâmetros necessários que não tiveram confiabilidade das informações obtidas foram utilizados os dados padrão da ferramenta, com pré definições para o Brasil, baseados em informações dos órgãos SPTrans, prefeitura de São Paulo, ANP, IGBE e MMA. A Tab. 2 apresenta todos os parâmetros utilizados para esta simulação e suas origens.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nas simulações realizadas (Autor, 2021).

Dado de entrada	Valor adotado	Unidade	Origem
Gases e emissões	Valores padrão	g/km	Padrão da ferramenta para o Brasil considerando apenas emissões durante a operação dos ônibus
Vida útil do ônibus diesel	10	anos	Valor adotado conforme pesquisa de mercado
Preço final de compra ônibus diesel	124.691,16	US\$/ônibus	Valor adotado conforme pesquisa de mercado
Preço final de compra ônibus elétrico	343.525,18	US\$/ônibus	Valor adotado conforme pesquisa de mercado
Pagamento inicial diesel	20	% do custo total	Variável - ver hipóteses adotadas
Pagamento inicial elétrico	7,26	% do custo total	Variável - ver hipóteses adotadas
Valor residual diesel	80	% do preço final	Variável - ver hipóteses adotadas
Valor residual elétrico	92,74	% do preço final	Variável - ver hipóteses adotadas
Taxa de empréstimo diesel	9,9%	%	Taxas e durações padrões da ferramenta, baseados em dados do BNDES
Taxa de empréstimo elétrico	9,4% padrão e 6% ônibus elétrico	%	9,4% - Taxas e durações padrões da ferramenta, baseados em dados do BNDES; 6% - ver hipóteses adotadas
Duração do empréstimo diesel	9	anos	Taxas e durações padrões da ferramenta, baseados em dados do BNDES
Duração do empréstimo elétrico	14	anos	Taxas e durações padrões da ferramenta, baseados em dados do BNDES
Custo total motorista e trabalho a bordo	40.000,00	US\$/ano/ônibus	Valor médio, ponderado e corrigido da licitação de Porto Alegre (2015)
Consumo de energia elétrica	1,6	kwh/km	Valor adotado conforme ficha técnica do modelo de ônibus elétrico adotado (ver anexos)
Tarifa da energia elétrica	\$ 0,09	US\$/kwh	Valor calculado para a projeção de consumo necessária, de acordo com a concessionária de energia elétrica de POA
Consumo de combustível	65	L/100 km	Consumo para a categoria do ônibus diesel adotado (traseiro com ar) na licitação de Porto Alegre (2015) (ver anexos)

Custo do combustível Euro 3	0,8218	US\$/L	Valor mínimo no município de Porto Alegre do diesel S-500, divulgado pela ANP, referente ao mês de outubro/2021
Custo do combustível Euro 5	0,8074	US\$/L	Valor mínimo no município de Porto Alegre do diesel S-10, divulgado pela ANP, referente ao mês de outubro/2021
Projeção do custo de combustível	var.	%/year	Valor variável para cenários favoráveis ao diesel e à energia elétrica, no futuro
Aditivo do combustível	0,01	US\$/L	Valor correspondente à ARLA 32, considerando seu custo R\$ 2,23/l, com consumo de 5% em relação ao diesel
Custo da estação de abastecimento combust.	2.276,94	US\$/ano/ônibus	Valor calculado a partir de pesquisa de mercado para os carregadores dos ônibus elétricos (ver hipóteses adotadas)
Seguros	var.	US\$/ano/ônibus	Valor correspondente a 2% do valor do veículo mais os valores de seguro passageiro e DPVAT da licitação de Porto Alegre
Custos adicionais de operação	38.828,00	US\$/ano/ônibus	Valor médio, ponderado e corrigido da licitação de POA (2015), correspondentes a todos os custos operacionais apresentados na Tab. 3
Custo anual de manutenção	7.576,00	US\$/ano/ônibus	Valor médio, ponderado e corrigido da licitação de POA (2015), correspondentes a todos os custos operacionais apresentados na Tab. 3
Custo total dos trabalhadores da manutenção	4.296,00	US\$/ano/ônibus	Valor médio, ponderado e corrigido da licitação de POA (2015), correspondentes a todos os custos operacionais apresentados na Tab. 3
Taxa de desconto	10	%	Valor indicado por Cooper <i>et al.</i> (2019) para análise em países em desenvolvimento
Número de ônibus	1480	-	Número de ônibus da frota de Porto Alegre, referente ao ano de 2020 (ver anexos)
Distância anual percorrida	5829,69	km/ano/ônibus	Valor calculado a partir do percurso médio mensal total da frota, oriundo da licitação de Porto Alegre (2015)
Valor cambio	0,17985	R\$/US\$	Cotação do dólar em outubro/2021
Inflação	10,15	%	IPCA acumulado 12 meses em outubro/2021
Custo sistema fotovoltaico	2.277,00	US\$/ano/ônibus	Valor adotado devido ao dimensionamento realizado, considerando um custo de R\$ 5,50/Wp instalado

Algumas hipóteses tiveram de ser criadas, por se tratar de um estudo de longo prazo que impõe a necessidade de algumas previsões para o cenário futuro, que não podem ser tratadas como definitivas. Em relação aos valores financiados, pressupõe-se que as operadoras do transporte público não disponham de valores extras para aquisição de veículos elétricos. Portanto, os valores de pagamento inicial e valores residuais foram ajustados para que os ônibus elétricos tenham um desembolso inicial igual aos ônibus diesel.

Com relação a operação da frota de ônibus de Porto Alegre, consideramos que a distância média mensal percorrida pelos ônibus não se alterou do período da licitação (2015), até os dias atuais. Em relação ao número total de veículos da frota, dados oficiais apresentam queda do número de ônibus na frota nos últimos anos. Assumiu-se como sendo igual ao último valor apresentado, de 1480 veículos, em 2020 – EPTC (2020).

Não se sabe ao certo o número de veículos em operação com tecnologias Euro 3 e Euro 5. Portanto, consideramos o cenário como sendo 50% para cada tecnologia (Euro 3 e 5). Os ônibus elétricos implantados na frota irão, prioritariamente, substituir os veículos com tecnologia Euro 3.

Os custos operacionais adicionais utilizados neste estudo compreendem as médias ponderadas e atualizadas das seguintes categorias da licitação pública municipal: depreciação da frota, depreciação de edificações, equipamentos e mobiliário de garagem, depreciação dos veículos de apoio, remuneração da frota, remuneração de terrenos, edificações, equipamentos e mobiliário de garagem, remuneração de almoxarifado, remuneração de veículos de apoio, despesas com pessoal operacional, despesas com pessoal administrativo, plano de saúde dos rodoviários, honorários de administração, despesas administrativas, outras despesas.

Os custos de manutenção apresentados na licitação foram utilizados como a soma da manutenção anual na ferramenta, compreendendo a média ponderada corrigida das despesas, óleos e lubrificantes, rodagem, despesas com peças e acessórios e despesas com pessoal de manutenção. A Fig. 4 apresenta o resumo da adaptação dos itens da licitação pública para o uso neste estudo, onde as cores representam os agrupamentos realizados, para compatibilidade de dados.

ITENS DE CUSTO NO DEMONSTRATIVO PÚBLICO	
Óleos&Lubrificantes	Custos fixos de manutenção
Rodagem	
Depreciação da frota	Custos operacionais adicionais
Depreciação de edificações, equipamentos e mobiliário de garagem	
Depreciação dos veículos de apoio	Seguros
Remuneração da frota	
Remuneração de terrenos, edificações, equipamentos e mobiliário de garagem	Custo total do motorista e trabalho a bordo
Remuneração de almoxarifado	
Remuneração dos veículos de apoio	Custo total do trabalho de manutenção
Despesas com peças e acessórios	
Operacional	
Manutenção	
Administrativo	
Plano de Saúde dos Rodoviários	
Honorários da administração	
Outras Despesas	
Seguros (Passageiro e DPVAT)	
CUSTO DE REMUNERAÇÃO DO SERVIÇO (7,24%)	
CUSTO GESTÃO DA CCT (3%)+ ALÍQUOTA LEI FEDERAL 12715/12 (2%)	

Figura 4 – Adequação de itens da concorrência Pública de Porto Alegre para o uso na planilha de Cooper *et al.* (2019) (Autor, 2021).

4. RESULTADOS

A planilha de Cooper *et al.* (2019) apresenta os resultados em função dos dados de entrada acima especificados. Os resultados iniciais nos permitem, primeiramente, analisar o custo total de propriedade estimado de cada tecnologia adotada para, posteriormente, realizarmos simulações com 10, 20 e 30% de ônibus elétricos na frota municipal.

4.1 Cenários criados

O cenário padrão deste trabalho visa estabelecer os parâmetros do TCO dos ônibus em função do retrato atual das variáveis de custo, de aquisição dos ônibus e dos custos operacionais. Para isso, foram consideradas as despesas do ônibus diesel como sendo as encontradas na licitação de Porto Alegre, devidamente atualizadas.

Já para o cenário futuro favorecendo os veículos elétricos, as seguintes hipóteses foram consideradas: Foi definida a utilização energia fotovoltaica para atenuar os custos com energia, através da geração própria de energia e do autoconsumo remoto, previstos na NR 482/2012 da Aneel, que garantem o direito do consumidor gerar energia utilizá-la para atenuar seus custos mensais, além do enquadramento como autoconsumo remoto, previsto na RN 687/2015. Para isso, o dimensionamento do sistema fotovoltaico proposto visou abater todo o consumo da frota, mantendo apenas o custo das taxas de utilização da rede como custo com energia. O valor residual após o período de uso dos ônibus elétricos foi de 5%, no cenário padrão, para 15%. As taxas de financiamentos caíram de 9,4% a.a, para 6% a.a representando assim uma forma de subsídio e incentivo governamental à eletrificação das frotas de ônibus.

Para um cenário futuro favorável aos ônibus diesel, por outro lado, assume-se não concretização das tendências de diminuição de preço esperadas para os ônibus elétricos. Foi considerado, para este cenário uma diminuição de 15% do valor do diesel, por este ser diretamente dependente das políticas internacionais de precificação do petróleo. Foi considerado, também, um aumento de custos de 15% do valor dos ônibus elétricos em relação ao diesel, em razão da variação cambial, uma vez que os ônibus elétricos estão muito mais expostos a importação de peças e componentes do que os ônibus diesel, consolidados tanto em fabricação quanto em manutenção, em território nacional. A Tab. 3 apresenta um resumo do TCO para cada tipo de ônibus nos cenários criados:

Tabela 3 – Resumo do TCO individual de cada modelo de ônibus adotado, em cada cenário (Autor, 2021).

Custo anual unitário - cenário padrão			
Custo anual unitário (\$/ônibus/ano)	Tipo: Elétrico	Tipo: Diesel - Euro 3	Tipo: Diesel - Euro 5
Custo operacional	\$ 158.648,86	\$ 121.079,61	\$ 121.079,61
Custo de combustível	\$ 19.910,64	\$ 55.284,31	\$ 54.315,59
Custo de manutenção	\$ 13.105,55	\$ 17.565,30	\$ 17.565,30
Custo de capital	\$ 21.951,84	\$ 13.413,42	\$ 13.413,42
Custo de financiamento	\$ 21.311,80	\$ 6.032,64	\$ 6.032,64
Custo total anual	\$ 234.928,69	\$ 213.375,28	\$ 212.406,56
% sobre o valor do ônibus diesel (Euro 5)	110,60%	100,46%	100,00%
Custo anual unitário - cenário favorável ao ônibus elétrico			
Custo anual unitário (\$/ônibus/ano)	Tipo: Elétrico	Tipo: Diesel - Euro 3	Tipo: Diesel - Euro 5
Custo operacional	\$ 158.648,86	\$ 121.079,61	\$ 121.079,61
Custo de combustível	\$ 1.003,31	\$ 55.284,31	\$ 54.315,59
Custo de manutenção	\$ 13.105,55	\$ 17.565,30	\$ 17.565,30
Custo de capital	\$ 21.818,92	\$ 13.413,42	\$ 13.413,42
Custo de financiamento	\$ 13.034,43	\$ 6.032,64	\$ 6.032,64
Custo total anual	\$ 207.611,06	\$ 213.375,28	\$ 212.406,56
% sobre o valor do ônibus diesel (Euro 5)	97,74%	100,46%	100,00%
Custo anual unitário - cenário favorável ao ônibus diesel			
Custo anual unitário (\$/ônibus/ano)	Tipo: Elétrico	Tipo: Diesel - Euro 3	Tipo: Diesel - Euro 5
Custo operacional	\$ 158.648,86	\$ 121.079,61	\$ 121.079,61
Custo de combustível	\$ 19.910,64	\$ 46.989,64	\$ 46.168,92
Custo de manutenção	\$ 13.105,55	\$ 17.565,30	\$ 17.565,30
Custo de capital	\$ 25.245,81	\$ 13.413,42	\$ 13.413,42
Custo de financiamento	\$ 24.507,35	\$ 6.032,64	\$ 6.032,64
Custo total anual	\$ 241.418,21	\$ 205.080,62	\$ 204.259,90
% sobre o valor do ônibus diesel (Euro 5)	118,19%	100,40%	100,00%

4.2 Simulações: composições de frota

A partir dos cenários criados, é possível fazer uma simulação da introdução gradual dos ônibus elétricos na frota de Porto Alegre. A Tab. 4 apresenta os resultados da frota do município sem ônibus elétricos e com 10, 20 e 30%, respectivamente, apresentando seus custos totais anuais.

Tabela 4 – Análise da composição da frota, devido ao custo unitário de cada tecnologia, em cada cenário (Autor, 2021).

Custo das frotas - cenário padrão				
Custo total anual (\$/ano)	FROTA 1 (SEM V.E)	FROTA 2 (10% V.E)	FROTA 3 (20% V.E)	FROTA 4 (30% V.E)
Custo operacional	\$ 179.197.829,88	\$ 184.758.078,58	\$ 190.318.327,28	\$ 195.878.575,98
Custo com combustível	\$ 81.103.919,98	\$ 75.868.616,94	\$ 70.633.313,90	\$ 65.398.010,86
Custo com manutenção	\$ 25.996.648,15	\$ 25.336.604,01	\$ 24.676.559,88	\$ 24.016.515,74
Custo de capital	\$ 19.852.374,01	\$ 21.116.048,21	\$ 22.379.724,65	\$ 23.643.398,04
Custo de financiamento	\$ 8.927.793,39	\$ 11.189.121,28	\$ 13.450.446,92	\$ 15.711.775,61
Custo total anual (\$/ano)	\$ 315.078.565,42	\$ 318.268.469,02	\$ 321.458.372,62	\$ 324.648.276,23
Custo total de operação anual	\$ 315.078.565,42	\$ 318.268.469,02	\$ 321.458.372,62	\$ 324.648.276,23
Custo total de operação de toda vida útil	\$ 1.936.021.388,82	\$ 2.006.437.941,19	\$ 2.076.854.493,56	\$ 2.147.271.045,92
Custo total anual (\$/ônibus/km/ano)	\$ 3,04	\$ 3,07	\$ 3,10	\$ 3,14
	100,0%	101,0%	102,0%	103,0%
Custo das frotas - cenário favorável ao ônibus elétrico				
Custo total anual (\$/ano)	FROTA 1 (SEM V.E)	FROTA 2 (10% V.E)	FROTA 3 (20% V.E)	FROTA 4 (30% V.E)
Custo operacional	\$ 179.197.829,88	\$ 190.318.327,28	\$ 190.318.327,28	\$ 195.878.575,98
Custo com combustível	\$ 81.103.919,98	\$ 65.036.744,45	\$ 70.633.313,90	\$ 57.003.156,69
Custo com manutenção	\$ 25.996.648,15	\$ 24.676.559,88	\$ 24.676.559,88	\$ 24.016.515,74
Custo de capital	\$ 19.852.374,01	\$ 22.340.393,27	\$ 22.379.724,65	\$ 23.584.403,62
Custo de financiamento	\$ 8.927.793,39	\$ 11.000.330,49	\$ 13.450.446,92	\$ 12.036.598,31
Custo total anual (\$/ano)	\$ 315.078.565,42	\$ 313.372.355,37	\$ 321.458.372,62	\$ 312.519.250,34
Custo total de operação anual	\$ 315.078.565,42	\$ 313.372.355,37	\$ 321.458.372,62	\$ 312.519.250,34
Custo total de operação de toda vida útil	\$ 1.936.021.388,82	\$ 2.015.351.603,43	\$ 2.076.854.493,56	\$ 2.055.016.710,73
Custo total anual (\$/ônibus/km/ano)	\$ 3,04	\$ 3,02	\$ 3,10	\$ 3,02
Custo das frotas - cenário favorável ao ônibus diesel				
Custo total anual (\$/ano)	FROTA 1 (SEM V.E)	FROTA 2 (10% V.E)	FROTA 3 (20% V.E)	FROTA 4 (30% V.E)
Custo operacional	\$ 179.197.829,88	\$ 184.758.078,58	\$ 190.318.327,28	\$ 195.878.575,98
Custo com combustível	\$ 68.937.336,36	\$ 64.929.643,59	\$ 60.921.950,83	\$ 56.914.258,07
Custo com manutenção	\$ 25.996.648,15	\$ 25.336.604,01	\$ 24.676.559,88	\$ 24.016.515,74
Custo de capital	\$ 19.852.374,01	\$ 21.603.382,94	\$ 23.354.394,15	\$ 25.105.403,45
Custo de financiamento	\$ 8.927.793,39	\$ 11.662.235,51	\$ 14.396.675,35	\$ 17.131.117,09
Custo total anual (\$/ano)	\$ 302.911.981,80	\$ 308.289.944,64	\$ 313.667.907,49	\$ 319.045.870,33
Custo total de operação anual	\$ 302.911.981,80	\$ 308.289.944,64	\$ 313.667.907,49	\$ 319.045.870,33
Custo total de operação de toda vida útil	\$ 1.861.262.999,28	\$ 1.946.527.936,58	\$ 2.031.792.873,87	\$ 2.117.057.811,17
Custo total anual (\$/ônibus/km/ano)	\$ 2,93	\$ 2,98	\$ 3,03	\$ 3,08

Em termos de emissões de poluentes, é possível observar a relação direta entre a retirada dos ônibus diesel da frota e a redução de gases e emissões, uma vez que seus substitutos, os ônibus elétricos, não produzem poluição durante sua operação. A Tab. 5 apresenta as emissões anuais e ao longo da vida útil, de todas as tecnologias usadas na simulação.

Tabela 5 – Resumo da redução da poluição por frota proposta, em toneladas anuais (Autor, 2021).

Emissões (toneladas anuais)	Frota sem VE	Frota 10% VE	Frota 20%VE	Frota30%VE
Dioxido de carbono (CO2)	175168,33	158124,92	140134,66	122617,83
Hidrocarbonetos totais (THC)	0,00	0,00	0,00	0,00
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	18,58	15,30	11,83	8,46
Metano (CH4)	6,21	5,61	4,97	4,35
Oxido de nitrogenio (NOx)	549,64	463,87	373,33	285,17
Oxido nitroso (N2O)	3,11	2,80	2,48	2,17
Oxido Nítrico (NO)	0,00	0,00	0,00	0,00
Material Particulado	9,01	7,46	5,82	4,22
Monoxido de carbono (CO)	99,75	84,77	68,96	53,57
Gases de efeito estufa	0,00	0,00	0,00	0,00
Emissões prévias de gases de efeito estufa	0,00	0,00	0,00	0,00
Total gases de efeito estufa	176261,61	159111,83	141009,29	123383,13
Redução poluição	0	17149,78	35252,32	52878,48

5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra aspectos relevantes para a consideração imediata da mobilidade elétrica como uma tecnologia viável ao transporte público de Porto Alegre. A análise econômica ilustra a atual competitividade entre as tecnologias utilizadas.

Ao analisar os cenários descritos neste estudo, percebe-se que no cenário padrão, onde foi considerado o cenário atual como sendo o verdadeiro, o veículo elétrico apresenta o maior TCO entre as 3 tecnologias analisadas, representando um TCO 10,60% superior em relação ao modelo a diesel com tecnologia Euro 5. O modelo Euro 3 apresentou TCO superior ao Euro 5 em todas as simulações, pelo fato de o valor adotado para o diesel comum (S-500) ser superior ao diesel S-10 no município de Porto Alegre, o que não é comum quando comparado a outros municípios.

Considerando o cenário favorável ao veículo elétrico, a situação idealizada apresentou, através da utilização energia fotovoltaica para atenuar os custos com energia, um maior valor residual para os ônibus elétricos em função do valor residual das baterias usadas, além de menores taxas de juros para financiamentos como forma de incentivo a adoção. Este cenário o TCO de um ônibus elétrico como sendo 2,26% inferior ao ônibus diesel. Um dos fatores mais importantes, quando considerado o cenário favorável aos ônibus elétricos é a segurança energética, uma vez que o investimento na geração de energia solar assegura ao operador a certeza com relação aos custos futuros, não deixando-o exposto às variações do custo de combustível. Isso, na prática, apresenta um fator organizacional importante tanto para o poder público quanto para os licenciados, pela previsibilidade de lucros e investimentos necessários.

Já o cenário favorável ao ônibus diesel baseia-se na não concretização no que parece ser a tendência atual, da diminuição dos preços dos veículos elétricos e seus componentes. Além disso, a forte consolidação da tecnologia diesel no mercado apresenta menos exposição às variações cambiais quando pensamos em peças, componentes e mão de obra. Para este cenário, o TCO do veículo elétrico foi 18,19% superior aos modelos diesel.

Já a análise ambiental não deixa dúvida que os ônibus elétricos são superiores aos veículos de combustão interna, por não emitirem poluentes durante sua operação. O fato de a matriz energética brasileira ser majoritariamente renovável evidencia uma melhora ambiental quando comparamos a geração elétrica e a de petróleo. A diminuição da emissão de gases nocivos e material particulado apresenta evidente e imediata melhora, sendo um fator relevante para o incremento da qualidade do ar das grandes metrópoles e qualidade de vida dos seus cidadãos.

Ao fazer uma análise de longo prazo, para o período posterior a análise deste estudo, é esperado um cenário cada vez mais favorável ao uso dos veículos elétricos, pois o investimento na infraestrutura já foi realizado e os preços dos veículos elétricos tendem a diminuir. Apesar da necessidade da substituição do banco de baterias, os investimentos realizados na infraestrutura, como carregadores e sistema fotovoltaico, apresentam uma vida útil superior aos 15 anos aqui analisados, tornando-se um investimento com vida útil maior que a própria frota, sendo útil, portanto, para o período posterior à análise deste estudo.

Cabe ressaltar, no entanto, a necessidade de política e regulamentações específicas para esse tipo de veículo, pois para o projeto tornar-se viável é necessário um período de uso superior a idade média dos ônibus atuantes em Porto Alegre. De maneira geral, cabe a uma decisão majoritariamente governamental se a adoção de ônibus elétricos em função dos ganhos ambientais compensa o TCO, ainda maior dos ônibus elétricos, uma vez que os consórcios privados dificilmente optarão pela alternativa com maior custo imediato para implantação. Detentores de concessões com período estabelecido, não é parte fundamental para os operadores das linhas de ônibus o pensamento a longo prazo.

Um dos fatores mais importantes, quando considerado o cenário favorável aos ônibus elétricos é a segurança energética, uma vez que o investimento em geradores de energia assegura ao operador a certeza com relação aos custos futuros, não deixando-o exposto às variações do custo de combustível. Isso, na prática, apresenta um fator organizacional importante tanto para o poder público quanto para os licenciados, de previsibilidade de lucros e investimentos.

Os países emergentes encontram-se, de maneira geral, em fases iniciais da introdução de ônibus elétricos nas frotas, o que cria um cenário favorável para a ampla discussão de planos e políticas públicas para esta mudança. Políticas de redução de emissões progressivas, ao longo dos anos, além de subsídios e isenções para a implementação da mudança da frota tendem a ser o passo inicial para a eletrificação das frotas, que precisa ser discutido e considerado imediatamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e à UFRGS, através do PPGE3M, pelo apoio recebido na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. Disponível em < <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/atren2012482.pdf> > Acesso em 20/02/2022.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. Disponível em < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> > Acesso em 20/02/2022.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível – ANP. Síntese de preços praticados – Rio Grande do Sul. Disponível em < https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp > Acesso em 06/12/2021.
- Bloomberg New Energy Finance, 2018. Electric Buses in Cities Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2

- dC40/ISSRC. 2013. Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Electrical. Disponível em < <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Low-Carbon-Technologies-Can-Transform-Latin-America-Bus-Fleets.pdf> > Acesso em 31/05/2021.
- CASTRO, B. H. R. DE; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. DA. 2013. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. BNDES Setorial, v. 37, p. 443–396.
- Cooper, E., E. Kenney, J. M. Velasquez, X. Li, and T. H. Tun. 2019. “Costs and Emissions Appraisal Tool for Transit Buses.” Technical Note. Washington, DC: World Resources Institute. Disponível em < www.wri.org/publication/transit-buses-tool > Acesso em 06/12/2021.
- GUENTHER, Paulo Renato; PADILHA, Thomaz Dalmaz. ESTUDO DE VIABILIDADE PARA SUBSTITUIÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO POR VEÍCULOS DE TRACÇÃO ELÉTRICA EM UMA LINHA DE ÔNIBUS DE CURITIBA. TCC (Engenharia elétrica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- IBGE, Panorama de Porto Alegre. Disponível em < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama> >. Acesso em 31/05/2021.
- Leurent, F., Windisch, E. 2011. Triggering the development of electric mobility: a review of public policies. Eur. Transp. Res. Rev. 3, 221–235.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resoluções do Conama. 2012. Brasília. Disponível em < <http://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf> > Acesso em 06/12/2021
- Prefeitura de Porto Alegre, CONCORRÊNCIA PÚBLICA 01/2015. Disponível em < http://www2.portoalegre.rs.gov.br/smf/default.php?reg=19&p_secao=256 > Acesso em 06/12/2021
- PROMOB-e - Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente. 2018. Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas. Disponível em: <https://theicct.org/publication/avaliacao-internacional-politicas-publicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas/>. Acesso em 22/01/2022.

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF THE REPLACEMENT OF INTERNAL COMBUSTION BUSES FOR ELECTRIC BUSES IN PUBLIC TRANSPORTATION IN PORTO ALEGRE

Abstract. *Ecological and sustainability concerns have generated changes in energy technologies. Concerned about their energy security, countries face a paradigm of remaining self-sufficient, energetically, and fighting environmental unsustainability. In this context, a major challenge is the vehicular fleets, responsible for 51% of CO₂ emissions in Brazil. There is evidence that the replacement of diesel bus fleets with purely electric ones reduces the environmental impact, with a decreasing cost increase. However, uncertainties about total costs, adequacy of current legislation and possible government incentives make those responsible for implementation be conservative and maintain the operation based on diesel buses. This study aims to analyze the TCO and emissions of the public bus fleet in Porto Alegre, comparing its current implementation, based on diesel buses, with situations where 10, 20 and 30% of purely electric buses are introduced in the fleet, equivalent to replaced, considering the costs disclosed by the local government and market surveys. Economically, we perceive the TCO of the electric bus between 97 and 118% of the TCO of the diesel bus, depending on the adopted variables. Environmentally, the non-emission of pollutants during the operation of electric buses reduces by 17,149.78 tons of greenhouse gases per year for every 10% of electric buses inserted in the fleet. It was concluded, therefore, that there is a trend of increased competitiveness between the two technologies studied for the future. Lower emissions from electric buses tend to increasingly offset the economic increase for their implementation. The long-term analysis tends to be more favorable for the diesel bus, as the infrastructure costs for implementation will have already been absorbed. However, government support is needed to adapt legislation and incentives so that the bus fleet can increasingly rely on electric buses.*

Key words: *Electric bus, Mobility, Sustainability*