

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

**ANÁLISE DE CUSTOS E DE EMISSÕES NA SUBSTITUIÇÃO DE ÔNIBUS À
COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICOS NO TRANSPORTE PÚBLICO DE
PORTO ALEGRE**

por

Guilherme Augusto de Oliveira Rugeri

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2022

Guilherme Augusto de Oliveira Rugeri

ANÁLISE DE CUSTOS E DE EMISSÕES NA SUBSTITUIÇÃO DE ÔNIBUS À
COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICOS NO TRANSPORTE PÚBLICO DE PORTO
ALEGRE

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M),
como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência e
Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Perin Gasparin

Porto Alegre
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patrícia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwenber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Afonso Reguly

Coordenador Substituto: Andréa Moura Bernardes

CIP - Catalogação na Publicação

Rugeri, Guilherme Augusto de Oliveira
ANÁLISE DE CUSTOS E DE EMISSÕES NA SUBSTITUIÇÃO DE
ÔNIBUS À COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICOS NO TRANSPORTE
PÚBLICO DE PORTO ALEGRE / Guilherme Augusto de
Oliveira Rugeri. -- 2022.
81 f.
Orientadora: Fabiano Perin Gasparin.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Energias renováveis. 2. Transportes. 3. Frota de
ônibus urbanos. I. Gasparin, Fabiano Perin, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GUILHERME AUGUSTO DE OLIVEIRA RUGERI

ANÁLISE DE CUSTOS E DE EMISSÕES NA SUBSTITUIÇÃO DE ÔNIBUS À
COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICOS NO TRANSPORTE PÚBLICO DE PORTO
ALEGRE

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de mestre em engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Alexandre José Bühler
Instituto Federal Rio Grande do Sul

Dr. Arno Krenzinger
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Christine Tessele Nodari
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Fabiano Perin Gasparin
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

“Uma mente que se abre para uma nova ideia nunca mais volta ao tamanho original”

Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço à Deus por iluminar meu caminho, colocando-me em meio a uma família maravilhosa e bons e verdadeiros amigos.

Agradeço à Camila, pelo amor, companheirismo e reciprocidade que tenho de ti, todos os dias, desde que te conheci.

Agradeço aos meus pais, Eder e Elenir, pelos valores à mim transmitidos e a confiança para perceber que nada é maior que os nossos sonhos. Que este trabalho lhes traga orgulho e seja uma pequena retribuição de todo amor que recebo de vocês.

Ao meu irmão, Gabriel, pelo incentivo através do exemplo, mostrando que disciplina, foco e determinação superam qualquer obstáculo.

Aos meus tios Maria Solange, Alencar, Helena e Marcos, pelo companheirismo e respaldo durante esta caminhada, desde vir para Porto Alegre morar sozinho, até me tornar o homem que sou hoje.

No meio acadêmico, agradeço aos membros da banca, pela disposição em fazer deste um trabalho melhor e mais relevante. Agradeço, em especial, ao professor Arno Krezinger, por abrir-me as portas do LABSOL e auxiliar nos descobrimentos no caminho percorrido, desde um aluno interessado em energia solar até a obtenção do título de mestre.

Agradeço ao meu orientador, professor Fabiano Perin Gasparin, pela maestria em orientar e organizar este trabalho. Por despertar em mim a curiosidade e me fazer perceber o verdadeiro prazer que é ser um pesquisador. Além disso, obrigado pela boa convivência e amizade desenvolvida durante este período.

Agradeço à UFRGS, que através do PPGE3M, pela possibilidade ilimitada de explorar o mundo acadêmico.

Aos demais professores, pelos conhecimentos a mim transmitidos durante estes anos, que possibilitaram chegar à realização deste trabalho.

Por fim, dedico este trabalho à minha avó (*in memoriam*), Maria Luiza de Oliveira, que está sempre junto comigo, tenho certeza.

Resumo

Os cenários mundiais de preocupação ecológica e de sustentabilidade têm gerado inúmeras mudanças no uso das tecnologias nas áreas de energia. Preocupados com a segurança energética, os países têm enfrentado o paradigma de manterem-se autossuficientes, em termos energéticos, ao mesmo tempo em que combatem a insustentabilidade ambiental. Neste contexto, uma das maiores contestações está nas frotas de veículos automotores, responsáveis por cerca de 51% da emissão total de CO₂ no Brasil. Existem notórias evidências que a substituição das frotas de ônibus a combustão por ônibus puramente elétricos reduz o impacto ambiental, com um incremento de custo cada vez menor. No entanto, as incertezas com relação aos custos totais, a adequação da legislação vigente e os incentivos governamentais, presentes e futuros, ainda fazem com que os responsáveis pela eventual mudança sejam conservadores e mantenham a operação baseada nos ônibus a diesel.

Este estudo tem como objetivo analisar a frota pública de ônibus da cidade de Porto Alegre, comparando sua execução atual, baseada nos ônibus a diesel, com situações hipotéticas em que são introduzidos percentuais de 10, 20 e 30% da frota de ônibus puramente elétricos, equivalentes em características aos substituídos, considerando os custos divulgados pela prefeitura local atualizados e pesquisas de mercado. Para isto, foram criados três cenários, devido às incertezas futuras: padrão (atual), favorável aos ônibus elétricos e favorável aos ônibus a diesel. Dentro de cada cenário, foram definidas variáveis que permitiram o cálculo do custo total de propriedade (*total cost of ownership* - TCO) individual de cada modelo de ônibus e, posteriormente, da composição da frota desejada.

Os resultados foram separados em econômicos e ambientais. Economicamente, foi identificado o TCO do ônibus elétrico entre 97 e 118% do TCO do ônibus diesel, de acordo com o cenário adotado, o que faz com que o TCO da frota varie entre US\$ 2,93 e US\$ 3,14 por quilômetro rodado. Ambientalmente, a não emissão de poluentes durante a operação dos ônibus elétricos faz com que haja uma redução de 17.149,18 toneladas anuais de gases de efeito estufa para cada 10% de ônibus elétricos introduzidos à frota do município.

Concluiu-se, com isso, que existe tendência no aumento de competitividade entre as duas tecnologias estudadas para o futuro. As menores emissões de gases e poluentes dos ônibus elétricos tendem a compensar cada vez mais o incremento dos custos para sua implantação. A análise em longo prazo apresenta-se mais favorável para o ônibus elétrico, uma vez que os custos em infraestrutura para implantação já terão sido amortizados. No entanto, ainda é necessário respaldo governamental, para adequação da legislação e incentivos, para que a frota de ônibus possa ter um percentual maior de ônibus elétricos.

Palavras-chave: Energias renováveis, Transportes, Frota de ônibus urbanos.

Abstract

The world scenarios of ecological concern and sustainability have generated countless changes in the use of technologies in the energy areas. Concerned about their energy security, countries have faced a paradigm of remaining self-sufficient, in terms of energy, while fighting environmental unsustainability. Within this context, one of the biggest challenges is in the motor vehicle fleets, responsible for about 51% of the total CO² emission in Brazil. There is clear evidence that the replacement of combustion bus fleets by purely electric buses reduces the environmental impact, with a smaller cost increase. However, uncertainties regarding total costs, the adequacy of current legislation and government incentives, present and future, still make those responsible for any change to be conservative and maintain the operation based on diesel buses.

This study aims to analyze the public bus fleet in the city of Porto Alegre, comparing its current execution, based on diesel buses, with hypothetical situations where percentages of 10, 20 and 30% of the purely electric bus fleet, equivalent in characteristics to those replaced, considering the costs disclosed by the local city hall, updated and market surveys. For this, three scenarios were created, due to future uncertainties: standard (current), favorable to electric buses and favorable to diesel buses. Within each scenario, variables were defined that allowed us to calculate the individual total cost of ownership (TCO) of each bus model and later, the composition of the desired fleet.

The results were separated into economic and environmental. Economically, we perceive the TCO of the electric bus between 97 and 118% of the TCO of the diesel bus, according to the scenario adopted, which makes the TCO of the fleet vary between US\$ 2.93 and US\$ 3.14, per kilometer driven. Environmentally, the non-emission of pollutants during the operation of electric buses causes a reduction of 17.149,18 tons of greenhouse gases per year for every 10% of electric buses introduced to the municipality's fleet.

It was concluded, therefore, that there is a trend of increased competitiveness between the two technologies studied for the future. The lower emissions of electric buses tend to increasingly offset the cost increase for their implementation. The long-term analysis tends to be more favorable for the electric bus, since the infrastructure costs for implementation will have already been amortized. However, government support is still needed to adapt legislation and incentives so that the bus fleet can have a larger amount of electric buses.

Keywords: *Renewable energy, Transport, Urban bus fleets.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Emissões de GEE pela queima de combustíveis no Brasil.....	16
Figura 2 – Níveis de satisfação ou insatisfação dos usuários do transporte público de Porto Alegre (com notas entre 0 e 10).....	19
Figura 3 - Quantidade global de veículos elétricos, a partir de 2010	22
Figura 4 – Valores de incentivo x vendas de VE _s nos países de vanguarda	23
Figura 5 – Possibilidades de combinações de opções na implantação dos ônibus elétricos	29
Figura 6 – Projeção de limite de passageiros conforme o incremento de peso no ônibus, em função das baterias, para ônibus elétrico de 12 m	31
Figura 7 – Capacidade instalada de micro e mini geração distribuída (MMGD), por UF no Brasil, em 2019 e 2020	32
Figura 8 – Participação das fontes de geração na micro e minigeração distribuída em 2020 no Brasil.....	33
Figura 9 – Possíveis dificuldades e facilidades no repasse dos ônibus elétricos das capitais para o interior	35
Figura 10 – Contribuição das categorias na emissão de GEE no estado de São Paulo em 2019	38
Figura 11 – Contribuição individual das categorias na emissão de GEE no estado de São Paulo em 2019	38
Figura 12 – Contribuição individual das categorias na emissão de NO _x no estado de São Paulo, em 2019	39
Figura 13 – Contribuição individual das categorias na emissão de MP no estado de São Paulo, em 2019	40
Figura 14 – Percentual de veículos circulantes no Brasil segundo as fases do Proconve	41
Figura 15 – A participação de recursos renováveis na matriz elétrica brasileira	42
Figura 16 – As emissões de CO ₂ na produção de energia elétrica no Brasil.....	42
Figura 17– Impacto de cada setor no consumo de energia no Brasil	43
Figura 18 – Percentual de energia renovável nos transportes do Brasil	43
Figura 19 – Participação (consumo final) de energia por fonte, no Brasil	44
Figura 20 – TCO dos diferentes modelos de ônibus em função da quilometragem anual percorrida.....	47
Figura 21 – Perspectiva atual e futura (2025) para o TCO de ônibus diesel e elétrico	48

Figura 22 – Sensibilidade do TCO relação ao preço do diesel adotado	48
Figura 23 – Sensibilidade do TCO em relação ao preço de energia adotado	49
Figura 24 – Organograma com a organização deste trabalho	51
Figura 25 – Enquadramento dos itens apresentados pela Licitação Pública de Porto Alegre para o uso na planilha de Cooper et al. (2019)	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perfil do usuário do transporte público de Porto Alegre	18
Tabela 2 – Compilado histórico das principais iniciativas para a eletrificação dos veículos no Brasil.....	25
Tabela 3 – Metas de redução de emissões de CO ₂ , MP e NO _x adotadas na lei 16.802/2018, de São Paulo	27
Tabela 4 – Possíveis soluções para a implantação dos veículos elétricos nas frotas.....	34
Tabela 5 – Principais poluentes atmosféricos oriundos dos meios de transporte.....	37
Tabela 6 – Potencial de redução de GEE utilizando ônibus elétricos	45
Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações realizadas.....	52
Tabela 8 – Análise das emissões unitárias, em toneladas anuais	60
Tabela 9 – Custo anual unitário de cada tecnologia de ônibus simulada, para o cenário padrão	62
Tabela 10 – Custos anual unitário de cada tecnologia de ônibus simulada, para o cenário favorável aos ônibus elétricos.....	62
Tabela 11 – Custos anual unitário de cada tecnologia de ônibus simulada, para o cenário favorável aos ônibus diesel.....	63
Tabela 12 – Análise da composição da frota para cada cenário criado	64
Tabela 13 – Análise das emissões totais de cada uma das frotas simuladas, em toneladas anuais	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ARLA	Agente Redutor Líquido de Óxido de Nitrogênio Automotivo
BEB	<i>Battery Electric Bus</i>
BEM	Balço Energético Nacional
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CeiiA	Centro de Engenharia e Desenvolvimento
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COV	Compostos orgânicos voláteis
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPTC	Empresa Pública de Transporte e Circulação
GEE	Gases de efeito estufa
GIZ	<i>Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> – Agência Alemã de Cooperação Internacional
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCT	<i>The International Council on Clean Transportation</i>
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
ISSRC	<i>International Sustainable Systems Research Center</i>
LFP	Fosfato de íons de lítio

LTO	óxido de lítio-titânio
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material particulado
NMC	Óxido de lítio-níquel-mangânês-cobalto
NMHC	Hidrocarbonetos não-metano
NO	Óxido de Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NO _x	Óxidos de nitrogênio
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
ONU	Organização das Nações Unidas
PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicles</i>
PIS	Programa de integração social
PROCONVE	Programa de controle de emissões veiculares
PROMOB-e	Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente
SPTRANS	São Paulo Transporte S/A
SO ₂	Dióxido de enxofre
So _x	Óxidos de enxofre
SRC	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
THC	Hidrocarbonetos totais
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VE	Veículo elétrico
VEB	Veículo elétrico a bateria
VEH	Veículos elétricos híbridos
WRI	<i>World Resources Institute</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	19
1.2 Objetivos específicos	20
2. VEÍCULOS ELÉTRICOS E ASPECTOS FUNDAMENTAIS DE SEU USO	21
2.1. Breve Histórico dos Veículos Elétricos	21
2.2. Ônibus elétricos no mundo	23
2.3. Ônibus Elétricos no Brasil – histórico	24
2.4. Ônibus elétricos no Brasil – motivações	26
2.5. Tipos de Veículos Elétricos	28
2.6. Opções de tecnologia para implantação de ônibus elétricos	29
2.7. Infraestrutura de recarga	30
2.8. Baterias	30
2.9. Corpo do veículo e capacidade de passageiros	31
2.10. Estimativa de uso e valor das baterias usadas dos ônibus elétricos.....	31
2.11. Perspectiva: concessionárias de energia	33
2.12. Dificuldades para implantação dos veículos elétricos no Brasil	34
2.13. Impacto ambiental do transporte	36
2.14. Panorama brasileiro: o Balanço Energético Nacional	42
2.15. Desempenho ambiental.....	44
2.15.1. Do meio ao tanque	44
2.15.2. Do tanque à roda.....	45
2.15.3. Do meio à roda.....	45
2.16. Formas de aquisição de ônibus elétricos	46
2.17. TCO – Custo total de propriedade	46
3. METODOLOGIA.....	50
3.1. Definição dos dados de entrada	51

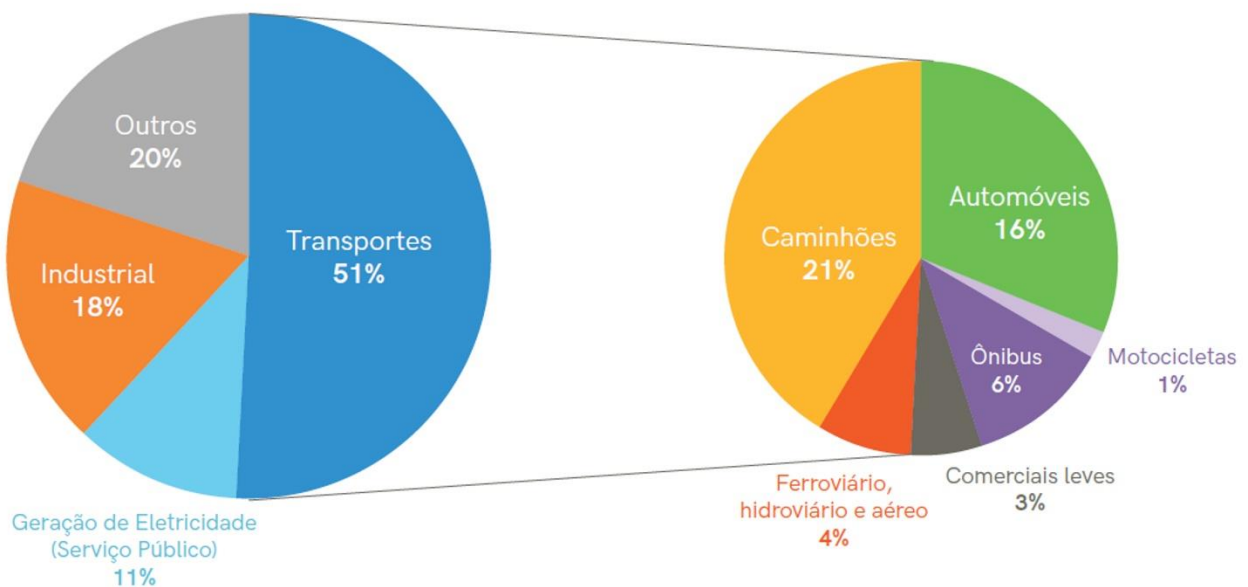
3.2. Hipóteses adotadas.....	55
3.3. Custos Envolvidos na Operação com Ônibus a Diesel.....	56
3.4. Custo do combustível	56
3.5. Custo Envolvido com a Operação do Veículo Elétrico	57
3.6. Custo da energia elétrica.....	57
3.7. Sistema Fotovoltaico	58
3.8 Cenários	59
3.8.1 Cenário padrão.....	59
3.8.2 Cenário favorável aos ônibus elétricos	59
3.8.3 Cenário favorável aos ônibus elétricos	60
3.9 Composição da frota	60
3.10 Emissões e poluentes de cada tipo de ônibus	60
4. RESULTADOS	62
4.1. TCO unitário - cenário padrão	62
4.2. TCO unitário - cenário favorável aos ônibus elétricos	62
4.3. TCO unitário - cenário favorável aos ônibus diesel	63
4.4. Simulações: composição da frota	63
4.5. Análise Qualitativa da Viabilidade	65
4.6. Ganhos ambientais.....	65
5. CONCLUSÕES	67
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
7. ANEXOS	75

1. INTRODUÇÃO

A qualidade de vida da população e sua sustentabilidade é assunto em alta nos dias atuais. Nesse contexto, um dos questionamentos mais recorrentes está na mobilidade urbana, onde o grande volume de pessoas e veículos envolvidos demanda estudos e planejamento para um serviço efetivo e de qualidade. O número elevado de cidadãos habitando grandes cidades tornou o transporte público, responsável pelo deslocamento de expressiva parte dessa população, um fator relevante na política e desenvolvimento das metrópoles ao longo dos anos. No entanto, apesar de suprir parcialmente as necessidades básicas, dúvidas tornaram-se frequentes, principalmente em relação ao impacto ambiental causado pelo atual modelo de serviço - sabidamente gerador de gases poluentes e material particulado, emitidos pelo processo de combustão interna dos motores diesel. 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 custosos. De acordo com PROMOB-e (2018), é de interesse dos governos a eletrificação das frotas de veículos, pois esta estaria atrelada à benefícios econômicos, industriais, geração de novos empregos e desenvolvimento local.

Conforme apresentado na Figura 1, o setor de transportes é o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) através da queima de combustível no país. É possível perceber que os impactos negativos dos meios de transporte prejudicam o desenvolvimento sustentável e estão diretamente associados à combustão que ocorre nos motores.

Figura 1- Emissões de GEE pela queima de combustíveis no Brasil



Fonte: PROMOB-e (2018)

Uma das principais formas de amenizar estes impactos negativos é a mudança para motores movidos por uma energia mais limpa e menos poluente, como é o caso da eletricidade. Os veículos com tração elétrica, como alternativa aos de combustíveis fósseis, têm se expandido ao longo dos últimos anos, principalmente por apresentarem uma solução ecológica para o problema, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos - como o material particulado e os óxidos de nitrogênio.

O levantamento de licenciamentos de veículos elétricos feito pela IEA (2020) aponta, no cenário global, a aderência aos veículos elétricos que tem partido, de maneira geral, de países com renda *per capita* acima da média mundial. A exceção desta tendência é a China que, mesmo com uma renda per capita relativamente baixa de sua população, se destaca, em números absolutos, como o maior mercado mundial de veículos elétricos. Além dela, as grandes participações nas vendas ficam entre a Noruega (39%), Suécia (6,3%), Países Baixos (2,7%) e Finlândia (2,6%) (EPE, 2020). De acordo com PROMOB-e (2018), os países que adotam normas ambientais rigorosas e uma estratégia coordenada de eletromobilidade garantem a vantagem do desenvolvimento inicial para suas empresas, gerando condições que permitem a competitividade industrial nos mercados internacionais.

No contexto nacional, a maior parte da concentração da poluição gerada pela mobilidade urbana ocorre nos grandes centros urbanos, onde vivem, segundo dados do Ipea (2016), cerca de 85% da população brasileira - com mais de 80 milhões de habitantes nas regiões metropolitanas. De acordo com EPE (2020) o país é favorável e detentor de políticas de incentivo aos combustíveis renováveis, porém, dadas as características de renda da população, altos valores de aquisição dos veículos elétricos e significativas restrições orçamentárias do Estado, a inserção de veículos elétricos na frota nacional é entendida como um movimento mais lento e gradual do que nos países de vanguarda.

O uso do modo ônibus para transporte coletivo em massa é um dos mais bem sucedidos modelos de transporte público em nível mundial. Encontra-se difundido em todos os lugares do mundo e possui vantagens como fácil implantação, flexibilidade de rota, alto índice de passageiros, baixo custo de infraestrutura para sua operação e mão de obra abundante. No entanto, os últimos anos têm sido marcados pela crescente concorrência dos ônibus elétricos, que prometem reduzir os custos de implantação e infraestrutura, além de combater problemas notórios como excesso de ruído, geração de gases poluentes e material particulado.

Os ônibus puramente elétricos vêm sendo introduzidos nas grandes cidades mundiais, 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. Dependendo do dimensionamento adotado, estes veículos podem ser carregados uma única vez, no período de repouso, ou dispor de cargas rápidas intermediárias, que podem reduzir o tamanho do banco de baterias. Entre as principais vantagens deste modal, comparativamente aos demais

modais de ônibus disponíveis no mercado, destacam-se o ruído quase inexistente do motor, a emissão nula de gases poluentes durante a operação, o maior torque em baixas velocidades quando comparado aos ônibus diesel e o baixo custo de manutenção e abastecimento. De acordo com Guenther e Padilha (2016), os motores elétricos apresentam eficiência na faixa de 90% ou mais, superando significativamente a eficiência média dos motores a combustão, de cerca de 30%. Além da 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, criada em 1998, atendendo a tendência mundial de municipalização da mobilidade urbana. Segundo dados da própria empresa, o transporte público da cidade é composto por 1.480 ônibus, além de lotações, veículos escolares e taxis. Porto Alegre é amplamente reconhecida como uma das capitais mais verdes do Brasil, classificada como a 4^a cidade mais arborizada do Brasil entre os municípios com mais de um milhão de habitantes, de acordo com dados do IBGE, o que reforça a preocupação e a ênfase das questões ambientais no âmbito regional.

Com objetivo de controlar a qualidade do serviço prestado, a EPTC realiza, desde 2018, uma pesquisa de satisfação dos serviços prestados, com auxílio da WRI Brasil, em um programa chamado Qualionibus. Dele é possível extrair informações como o perfil de usuários do transporte público e o seu nível de satisfação – conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Perfil do usuário do transporte público de Porto Alegre

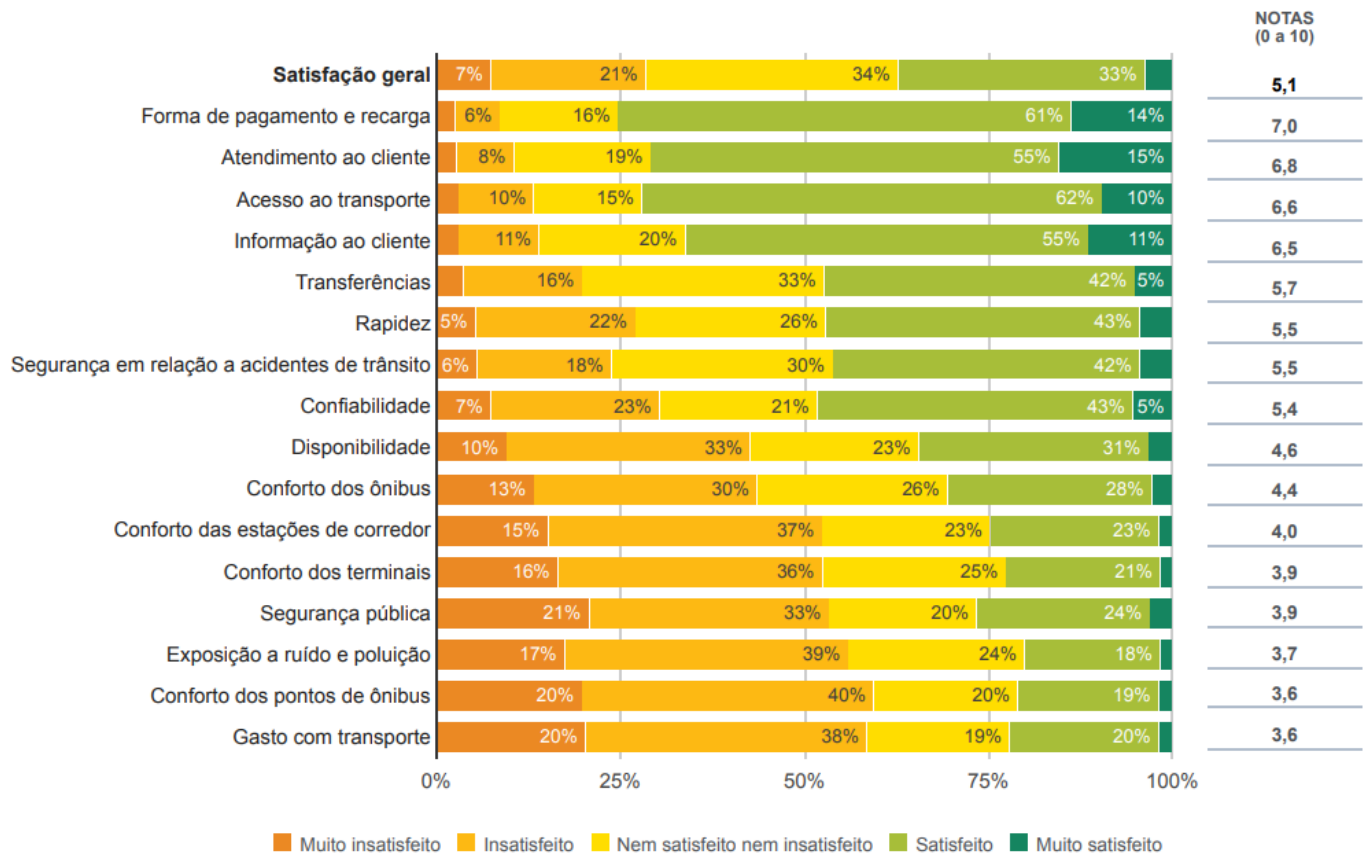
Perfil do usuário do transporte público de Porto Alegre	
Tempo médio gasto em ônibus por dia, por passageiro	1h 24min
%Passageiros que utilizam ônibus 5 ou mais dias da semana	73,20%
%Passageiros com mais de 34 anos que usam ônibus	50%
Passageiros que não possuem condições de utilizar outro transporte além do ônibus	48,80%
%Passageiros que pegam ônibus que circulam em faixas ou corredores de ônibus	85,70%
%Passageiros que crê que o transporte coletivo de ônibus vai melhorar ou melhorar muito	43%

Fonte: adaptado de EPTC (2019)

Na pesquisa, também é possível observar o nível de satisfação dos usuários de ônibus, destacando-se a exposição ao ruído e a poluição como sendo as principais queixas dos usuários. É importante salientar que a ausência de infraestrutura de metrô torna o sistema de transporte público de Porto Alegre diretamente dependente dos ônibus. O trânsito e o congestionamento, além de causarem cada vez mais poluição, também geram insatisfação da população. A Figura 2 apresenta os principais pontos de insatisfação da

população porto alegreense em relação às linhas de ônibus, onde é possível notar o impacto negativo, especialmente dos tópicos “Exposição ao ruído e a poluição” e “Gasto com o transporte”, os quais tem relação direta com as simulações propostas neste trabalho.

Figura 2 – Níveis de satisfação ou insatisfação dos usuários do transporte público de Porto Alegre (com notas entre 0 e 10)



Fonte: EPTC (2019)

1.1 Objetivos

Este estudo tem como objetivo analisar a frota pública de ônibus da cidade de Porto Alegre, comparando sua execução atual, baseada nos ônibus a diesel, com situações hipotéticas em que são introduzidos percentuais de 10, 20 e 30% da frota de ônibus puramente elétricos, equivalentes em características aos substituídos, considerando os custos divulgados pela prefeitura local atualizados e pesquisas de mercado. A análise será feita visando a viabilidade técnica, de maneira que os ônibus elétricos tenham autonomia para suprir o itinerário atual, dos ônibus diesel. Além disso, buscou-se criar cenários favoráveis a uma ou outra tecnologia, além de um cenário padrão, onde foram usadas as variáveis de entrada atualizadas, para o mercado brasileiro. Para o cenário favorável ao ônibus elétrico, foi utilizada a geração

de energia solar como alternativa para diminuir os custos de operação, além de ser um destino para as baterias usadas dos ônibus, consideradas, neste cenário uma alternativa para uso em sistemas estacionários após o uso nos ônibus, que implicam em um maior valor residual após seu uso.

Foram avaliadas as regulamentações para a concessão do serviço de transporte público urbano no cenário nacional, que é a maneira indireta de direcionamento governamental, além de analisados os custos operacionais ao longo da vida útil do veículo, indicando com isso possíveis fatores contrários ou favoráveis à mudança, por parte dos agentes envolvidos.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são o levantamento de custos operacionais da frota porto alegreense, a adequação dos dados municipais para uso na planilha de Cooper et al. (2019), a definição de características para cenários favoráveis e contrários a uma ou outra tecnologia, além da análise da redução das emissões com a introdução dos ônibus elétricos na frota do município.

2. VEÍCULOS ELÉTRICOS E ASPECTOS FUNDAMENTAIS DE SEU USO

2.1. Breve Histórico dos Veículos Elétricos

Segundo Baran e Lengley (2011), apesar de visto por muitos como um avanço tecnológico, os veículos elétricos não são novidade no mercado, sendo, no princípio dos veículos automotores, um forte candidato ao monopólio da produção. Segundo Guenther e Padilha (2016), o mercado de veículos elétricos em 1900 representava cerca de 28% do total comercializado. No início do século XX, três tecnologias estavam entre as principais concorrentes a dominar o mercado de automóveis: elétrica, vapor e combustão.

De acordo com Baran e Lengley (2011), em 1903, a cidade de Nova Iorque possuía quatro mil automóveis registrados, sendo 53% a vapor, 27% a gasolina e 20% elétricos. Porém, a partir dos anos 30, os veículos elétricos entraram em forte queda, tornando-se preteridos do mercado, especialmente em razão do fenômeno do Fordismo, que barateou a produção dos veículos, da invenção da partida elétrica em 1912, que eliminou a partida a manivela, da descoberta de petróleo nos Estados Unidos e da demanda por veículos com maior autonomia, para circular nas rodovias que interligavam as cidades.

A baixa autonomia era um dos fatores que, à época, representava um grande entrave para os veículos elétricos, se comparado aos de combustão interna. Segundo Baran e Lengley (2011) poucas pessoas aventuravam-se pelas estradas do interior nos primórdios do automóvel, pois não havia infraestrutura elétrica nem gasolina à disposição. No entanto, com a maior facilidade em dispor e transportar combustíveis líquidos, os combustíveis fósseis logo foram difundidos e comercializados, até mesmo em pequenos estabelecimentos comerciais, e, como o veículo de combustão interna apresentava melhor autonomia, em relação à distância percorrida com um único abastecimento, este modelo viabilizou as viagens intermunicipais, à época. Além disso, segundo os autores, a manutenção dos primeiros automóveis a gasolina, dada sua simplicidade, era realizada até por profissionais pouco especializados.

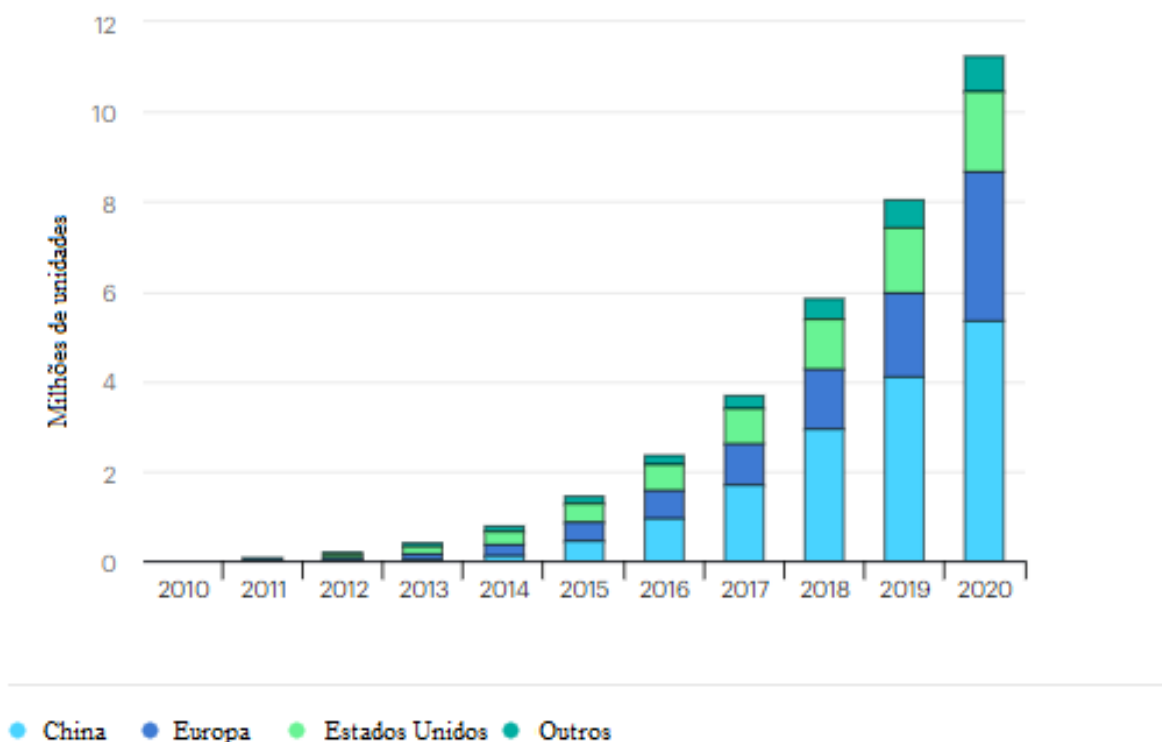
Portanto, apesar de conhecidos, os veículos elétricos não conseguiram superar as limitações tecnológicas e logísticas da época, e o período inicial do século XX definiu a forma de propulsão dos veículos automotores. Em função dos fatores citados, foi consenso estratégico e comercial que o meio energético utilizado seria o dos combustíveis fósseis, através da combustão interna. E assim foi, até a década de 70 quando, conforme Barassa et al. (2020), as primeiras medidas efetivas para utilização dos veículos elétricos começam a ser tomadas, inicialmente nos países mais desenvolvidos, como Estados Unidos, Japão e países europeus. Strangueto e Silva (2015) apontam, na década de 70, o surgimento dos primeiros estudos dos impactos negativos dos veículos de combustão interna, com relação ao meio ambiente e a escassez dos combustíveis fósseis. Foi a partir de então, quando a opinião pública passou a abordar os problemas ambientais, que os automóveis elétricos voltaram a atrair atenção dos grandes fabricantes. Até a década de

80, apesar do crescente estudo e apreensão social e ambiental, os veículos elétricos não conseguiram chegar às linhas de produção e disputar com veículos à combustão, por ainda não apresentarem competitividade, em termos de custos, e políticas de incentivo ao seu uso.

Todavia, a partir da década de 90, iniciou-se uma mudança de direção e medidas mais significativas começaram a surgir, como a implementação das primeiras normas de emissão zero, na Califórnia, a exposição dos problemas dos combustíveis fósseis e a necessidade de redução e transição para fontes renováveis, através dos documentos de planejamento nacional dos países sobre problemas socioambientais, conhecidos como Agenda 21. Em 1992, a União Europeia também corroborou para esse cenário através de sua política de transportes, onde a inclusão dos veículos elétricos era vista como uma das condições mais importantes do planejamento futuro.

Em um panorama geral, é possível observar que, embora incipiente, a frota de veículos elétricos aponta para um crescimento exponencial a nível mundial. A Figura 3 apresenta dados que indicam a tendência de crescimento mundial do número de veículos elétricos.

Figura 3 - Quantidade global de veículos elétricos, a partir de 2010



Fonte: adaptado de IEA (2021)

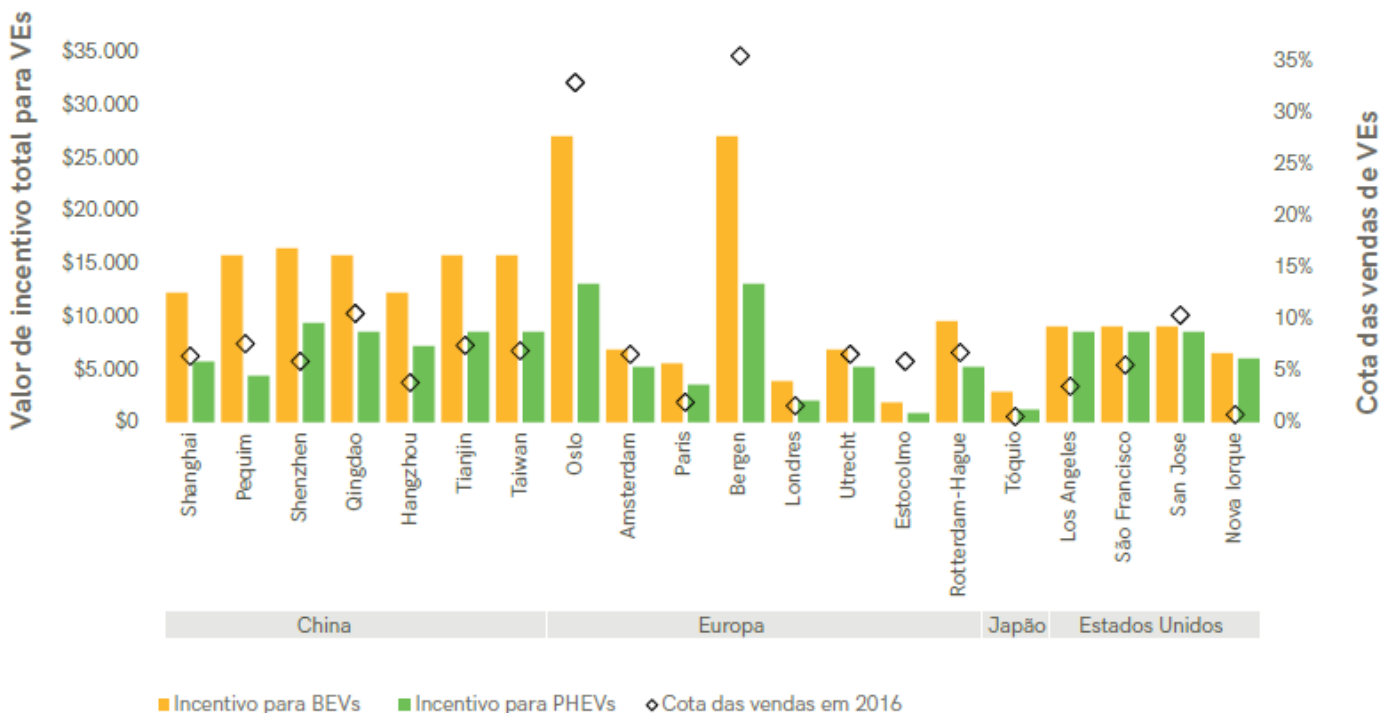
Em um contexto mais recente, é possível observar convergência política e social para um panorama automotor mais sustentável. Neste aspecto, os países desenvolvidos seguem na vanguarda: é citado por Buzatto et al. (2019), por exemplo, que a Alemanha conta com metas para encerrar a produção de veículos

de combustão interna até 2030, a França pretende acabar com a venda de veículos a gasolina ou diesel até 2040. Além disso, as medidas firmadas no Acordo de Paris, em 2015, norteiam as direções globais de redução na emissão de gás carbônico (CO₂) desde 2020. É possível perceber, portanto, a tendência do fim do apogeu dos veículos de combustão interna e a crescente busca por soluções mais sustentáveis.

2.2. Ônibus elétricos no mundo

Conforme referido anteriormente, a análise dos países pioneiros na eletrificação dos veículos (cuja implantação já superou os estudos e projetos piloto e se tornou representativa no âmbito geral), apresentam lições sobre a implantação dos veículos elétricos (VEs), que não devem ser ignoradas ou desprezadas. Hall e Ludsey (2017) divulgaram um estudo que aponta relação direta entre o nível de incentivos e ações governamentais e o aumento no número de veículos elétricos. A Figura 4 relaciona os valores de incentivo em função das vendas de VEs (tanto para os veículos puramente elétricos – BEVs, quanto para veículos híbridos de *plug in* – PHEVs), que demonstra que a aceitação dos veículos elétricos é, em sua maioria, proporcional ao nível de apoio e ação dos governos, nos âmbitos nacional e regionais.

Figura 4 – Valores de incentivo x vendas de VEs nos países de vanguarda



Fonte: PROMOB-e (2018)

2.3. Ônibus Elétricos no Brasil – histórico

O histórico dos veículos elétricos no Brasil é fragmentado, não apresentando uma linha cronológica constante de pesquisa e desenvolvimento contínuo. Relativamente aos veículos pesados, escopo deste estudo, já era possível observar há algum tempo o uso dos Trólebus - um conjunto no qual um ônibus é conectado por dois cabos à rede de energia elétrica acima dele que, por meio de contatos elétricos rolantes, transmitem energia elétrica, convertida em energia mecânica, capaz de tracionar o veículo. O fato de receberem energia diretamente dos cabos superiores, que demarcavam as linhas, configurava vantagem aos trólebus, que tinham maior autonomia em relação aos bondes movidos sobre trilhos, podendo desviar pequenos obstáculos e encostar nos terminais para embarque/desembarque de passageiros. Os trólebus, totalmente elétricos, não possuíam baterias, conectando-se diretamente à rede de energia, sendo dela dependentes.

De acordo com Guenther e Padilha (2016), a implantação dos trólebus no Brasil iniciou-se em 1949, na cidade de São Paulo, sendo rapidamente replicada por outras cidades, como Rio de Janeiro, Porto Alegre, Belo Horizonte e Fortaleza, nos anos subsequentes. Percebendo a boa aceitação e demanda do mercado, empresas brasileiras nacionalizaram a produção. No entanto, a partir dos anos 90, novos direcionamentos econômicos e políticos deixaram em segundo plano os trólebus, fazendo com que continuasse usual em poucos municípios. Cabe ressaltar que, apesar da crescente implementação e estudos com ônibus puramente elétricos (VEBs), os trólebus retratam uma tecnologia consolidada e ainda representam a ampla maioria da frota de ônibus elétricos do Brasil, embora não sejam considerados como solução nos estudos atuais, muito em virtude da sua falta de flexibilidade.

A Tabela 2 apresenta algumas das principais iniciativas para promoção da eletrificação dos veículos no Brasil. Dentre os projetos oriundos a partir dessas iniciativas, destacam-se o Programa Ecofrota e o Programa Taxis Híbridos, na cidade São Paulo. A cidade de Curitiba também apresenta um projeto para implantação de ônibus elétrico em sua frota. Diversos municípios do interior de São Paulo também têm adotado projetos pilotos e até mesmo substituído parte da frota por veículos elétricos, como é o caso de Ribeirão Preto e Campinas. Em Florianópolis, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) implantou uma linha de ônibus realizada totalmente com ônibus elétricos, interligando dois *campi* da universidade, por meio de um ônibus elétrico, abastecido em terminais contendo sistemas fotovoltaicos.

Tabela 2 - Compilado histórico das principais iniciativas para a eletrificação dos veículos no Brasil

Nome	Início	Integrantes	Objetivos
Programa P&D ANEEL (Projetos em Mobilidade Elétrica)	2008	ANEEL e concessionárias permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica	Promover a cultura da inovação, criando equipamentos e aprimorando a prestação de serviços que contribuam para a segurança do fornecimento de energia elétrica e a mobilidade tarifária. Diminuição do impacto ambiental do setor e da dependência tecnológica do país
Programa de Mobilidade Elétrica Inteligente (Mob-i ONU)	2015	Itaipu Binacional, Aliança Renault - Nissan e CEiiA, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), ONU Mulheres	Contribuir para a redução da emissão de gases poluentes e promover o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que utilizem recursos renováveis e reduzam emissões de GEE
Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente (PROMOB-e)	2017	GIZ, MDIC, MME, ANEEL, ABDI e BNDES	O objetivo do projeto era que, em 2020, estariam criados os pré-requisitos para um uso amplo e efetivo de sistemas de propulsão eficientes em energia. Foco estratégico em veículos puramente elétricos a bateria (BEV) e híbridos plug-in (PHEV), bem como em frotas públicas e privadas e serviços de entrega urbana
Rede de Inovação no Setor Elétrico (RISE) aplicada à Mobilidade Elétrica	2018	ANEEL e GIZ	Estimular pesquisas aplicadas alinhadas com o setor industrial, identificando desafios e oportunidades de desenvolvimento tecnológico e garantindo o equilíbrio entre os agentes e a sociedade

Resolução Normativa ANEEL n. 819, de 19 de junho de 2018 - atividade de recarga de Ves	2018	ANEEL	Estabelecer os procedimentos e as condições para a realização de atividades de recarga de VEs
Decreto n. 9.442, de 5 de julho de 2018	2018	MDIC	Alterar as alíquotas do IPI incidente sobre veículos equipados com motores híbridos e elétricos
ANEEL - chamada de Projeto de P&D Estratégico "Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente"	2018	ANEEL	Desenvolvimento de modelos de negócio que contribuam, de maneira significativa, para a criação de massa crítica e base tecnológica para que o desenvolvimento de produtos e serviços nacionais na área de Mobilidade Elétrica Eficiente, e que demonstrem sua viabilidade técnico-econômica em território nacional.

Fonte: adaptado de EPE (2020)

2.4. Ônibus elétricos no Brasil – motivações

Embora faça parte de um todo, a análise dos fatores impulsionadores e contrários aos ônibus elétricos no Brasil, considerando as peculiaridades e o contexto histórico brasileiro, são fundamentais 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 no Brasil 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 atualmente.

De maneira geral, o Brasil ainda não adotou as políticas implementadas nos países de vanguarda para promover os veículos elétricos, contando apenas com algumas iniciativas, muitas vezes privadas, de maneira incipiente. Embora haja iniciativas em certos mercados da América do Sul, o desenvolvimento ainda inicial dessa tecnologia deixa espaço para que o Brasil aprenda com os exemplos internacionais e lidere um mercado promissor na América do Sul.

Os indicativos futuros apontam para um significativo crescimento dos ônibus puramente elétricos. O Brasil conta com empresas já consolidadas neste segmento. A empresa Eletra é responsável pela

implantação de diversos ônibus elétricos funcionais em várias cidades do Brasil, principalmente no estado de São Paulo. A empresa atua, ainda, em projetos embrionários, como o ônibus elétrico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis. A empresa chinesa líder mundial do segmento, BYD, possui instalações nacionais e fabrica modelos de ônibus que circulam no país. A empresa Volvo também já apresenta produção de chassis de ônibus elétricos em território nacional.

Atualmente, o principal motivador brasileiro para implantação de frota de veículos movidos a energia elétrica baseia-se no compromisso internacional assumido no Acordo de Paris, celebrado em dezembro de 2015. Os compromissos lá assinados visam uma redução significativa da emissão de GEE para as próximas décadas.

Pioneira, a iniciativa da cidade de São Paulo com relação ao tema merece destaque. A Lei 14.933, de 2009, instituiu a Política de Mudança do Clima no Município. No tocante aos veículos, o artigo 50 da lei estabelece reduções progressivas do uso de combustível fóssil para as frotas municipais, da ordem de 10% ao ano. A lei 16.802, de 2018, estabelece metas intermediárias e de longo prazo para a redução da emissão através do escapamento dos veículos. As diretrizes são progressivas e visam a redução de CO₂, MP e NO_x, de maneira gradativa a partir da vigência da lei, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Metas de redução de emissões de CO₂, MP e NO_x adotadas na lei 16.802/2018, de São Paulo

Poluente	Redução após	Redução após
	10 anos (01/2028)	20 anos (01/2038)
CO ₂ fóssil	50%	100%
MP	90%	95%
NO _x	80%	95%

Fonte: adaptado de ICCT (2019)

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, de maneira indireta, as diretrizes do serviço prestado. Entretanto, existe certa liberdade para as operadoras do serviço na escolha das tecnologias mais viáveis e com melhor custo benefício, dentro das condições impostas nos editais. Desta forma, as concessionárias, que operam este serviço nas grandes cidades têm papel fundamental na implementação, pois esta só ocorrerá em condições favoráveis, economicamente, às operadoras, uma vez que a lei não é impositiva à eletrificação das frotas de ônibus.

Embora haja autonomia a nível municipal, outras instâncias do poder também podem influenciar a eletrificação das frotas de ônibus. Em nível estadual, por exemplo, em sete estados brasileiros, incluindo o Rio Grande do Sul, há a isenção total do imposto ICMS para veículos elétricos (ABVE, 2017).

2.5. Tipos de Veículos Elétricos

O cenário atual da indústria e desenvolvimento mundial converge para três principais tipos de veículos elétricos fabricados e comercializados. São eles:

- Veículos Híbridos à gasolina (VEH): Os veículos híbridos possuem um motor elétrico auxiliar, acionado por um banco de baterias, além do motor principal, movido à combustão interna. Existem duas configurações para o sistema, em série ou em paralelo, onde o motor secundário pode, respectivamente, alimentar as baterias e/ou o motor elétrico ou trabalhar de forma conjunta. A vantagem desse sistema com relação aos modelos tradicionais a combustão é a significativa economia de combustível. A desvantagem destaca-se no preço inicial, muitas vezes ainda não aceito pelos possíveis compradores.

- Veículos Híbridos de plug in (PHEV): Os veículos híbridos apresentam um motor de combustão interna e um segundo sistema de propulsão elétrica. Este sistema secundário permite carregamento e possui diferentes métodos de fornecimento de energia para o veículo, que vão desde o veículo sendo tracionado puramente pela combustão interna até a propulsão totalmente oriunda do motor elétrico. Tais veículos híbridos são mais eficientes energeticamente que os veículos tradicionais, porém inferiores em rendimento se comparados aos veículos puramente elétricos. São considerados, em resumo, uma alternativa intermediária entre os veículos de combustão interna e os puramente elétricos.























- Veículos Elétricos a bateria (BEV): Escopo deste estudo, são veículos puramente elétricos, 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 resultam 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.

2.6. Opções de tecnologia para implantação de ônibus elétricos

Embora haja poucos tipos de veículos elétricos fabricados e comercializados mundialmente, existe uma ampla gama de opções a serem selecionadas, no que tange ao modelo completo da implantação desses veículos, de acordo com as peculiaridades de cada caso. De acordo com Göhlich et al (2018), fatores como fonte de energia, estratégia de recarga, forma de recarregamento, bateria empregada, motor empregado, tipo de ônibus e sistemas de refrigeração podem levar a diferentes configurações em cada sistema.

A Figura 5 apresenta as inúmeras possibilidades de composição da frota utilizando ônibus elétricos.

Figura 5 – Possibilidades de combinações de opções na implantação dos ônibus elétricos

Função	Opção					
Fonte energética	 Baixa voltagem	 Média voltagem	 Alta voltagem	 Trilhos	 Baterias estacionárias	 Tanque de H2
Estratégia de carga/recarga	 Oportunidade	 Em movimento	 Garagem			
Interface de carga/recarga	 Manua	 Pantógrafo	 Indução	 Trólebus	 Troca das baterias	
Fonte de energia a bordo				 Capacitor	 Tanque de H2 - células de H	 Nenhum
	NMC	LFP	LTO			
Motor	Síncrono de ímã permanente	Síncrono excitado eletricamente	Assíncrono	Motor de relutância comutada		
Tipo	Motor central	Motor no cubo da roda				
Modelo	 12 m	 18 m articulado	 24 m bi articulado	 Dois andares		
Refrigeração	Ar condicionado elétrico	Nenhum				
Aquecimento	Com resistência elétrica	Bomba de calor elétrica	Aquecimento via combustível			

Fonte: adaptado de Göhlich et al. (2018)

Considerando as condições locais do estudo e o modelo de ônibus elétrico adotado, optou-se, neste trabalho, respectivamente, por: energia oriunda da rede elétrica e fotovoltaica (dependendo do cenário), carregamento na garagem e de oportunidade quando necessário, interface de recarga manual, banco de baterias LFP (fosfato de íons de lítio), motor com magnetização síncrona permanente, ônibus de 12m, com ar condicionado. Os motivos e justificativa das escolhas feitas serão explanados ao longo deste trabalho.

2.7. Infraestrutura de recarga

Um ponto fundamental para a disseminação dos veículos elétricos é a infraestrutura de recarga, pois esta tem relação direta com o receio geral sobre a possível falta de abastecimento dos VEs. Miller et al. (2017), aponta a ampla disponibilidade de carregadores como uma barreira a ser superada, para que a estrutura de carregamento de veículos elétricos seja conveniente aos usuários.

Como a implantação dos veículos elétricos tem ocorrido de maneira fragmentada, é comum encontrar diversos padrões de tomadores de carga, diferentes correntes de carregamento e outras incompatibilidades. Essa falta de interoperabilidade ainda carece de solução, para tornar a implantação dos BEVs consistente e segura. De acordo com Miller et al. (2017), a visão do cenário como um todo, por parte dos fabricantes, aumenta a segurança dos compradores, que não ficam presos a um único fabricante, após adquirir o ônibus, no longo prazo. Cabe ressaltar que empresas do setor têm apresentado iniciativas em prol desta necessária padronização.

Na esfera nacional, PROMOB-e (2018) aponta que um modelo específico de cobrança da recarga ainda carece de definição, assim como a padronização dos plugues.

2.8. Baterias

O banco de baterias é tópico fundamental para implantação dos ônibus elétricos, pois de acordo com estudos este representa mais de 1/3 do valor do veículo (PROMOB-e, 2018), com um valor entre 40 e 50% do valor total do veículo (C40/ISSRC, 2013), embora seja consensual que estes preços têm queda acelerada. De acordo com Göhlich et al (2018), apesar de a maioria das baterias utilizadas nos ônibus elétricos serem à base de lítio, existem diferentes composições químicas, cujos valores variam de forma significativa. As características mais importantes de um tipo específico de célula, no que diz respeito às operações de ônibus elétricos, são densidade de energia, taxa de carga e ciclo de vida. As baterias de lítio diferem das demais por não apresentarem reação de oxirredução.

As baterias à base de lítio são as que 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 120 Wh/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).

De acordo com Göhlich et al. (2018), atualmente, fosfato de lítio-ferro (LFP), óxido de lítio-titânio (LTO) e óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC) são os tipos de células mais comuns encontrados em ônibus elétricos. As baterias LTO são aplicáveis prioritariamente em sistemas de cobrança de oportunidade. As de NMC possibilitam maior capacidade e alta potência de carregamento e, portanto, são

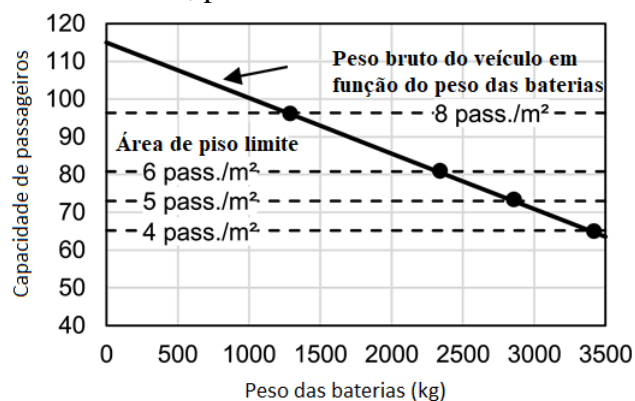
adequadas para todos os usos. Por sua vez as baterias LFP, utilizadas no ônibus estudado, só são viáveis em situações de carregamento lento.

Por representar grande parcela dos custos do ônibus elétricos, são questionamentos naturais a vida útil do banco de baterias e o custo da reposição destas após descarte/substituição. Tais tópicos serão abordados na parte prática deste trabalho.

2.9. Corpo do veículo e capacidade de passageiros

Uma indagação comum para utilização de ônibus elétricos é se a capacidade de passageiros tem a tendência de diminuir, tendo em vista o maior peso do banco de baterias em relação ao peso bruto total permitido. No entanto, esta afirmativa não se concretiza na prática. De acordo com Göhlich et al. (2018), a capacidade máxima de passageiros na prática não é limitada pela carga útil, mas sim pelo espaço disponível para os passageiros. A Figura 6 apresenta a relação entre capacidade de passageiros e peso das baterias necessárias para operação do ônibus.

Figura 6 – Projeção de limite de passageiros conforme o incremento de peso no ônibus, em função das baterias, para ônibus elétrico de 12 m



Fonte: adaptado de Göhlich et al. (2018)

Assim, mesmo com o peso do banco de baterias sendo muito variável (de acordo com a autonomia necessária), a densidade total alcançada na prática não representa níveis extremos de carga (peso) para o ônibus. Portanto, a projeção dos ônibus baseados na capacidade de passageiros determinada pelo espaço do piso deixa uma ampla reserva de peso para o banco de baterias, mesmo em condições de superlotação. De acordo com PROMOB-e (2018), a produção de carrocerias desses veículos, em sua grande maioria já nacionalizada não geraria mudanças excessivas ou dificuldades adicionais.

2.10. Estimativa de uso e valor das baterias usadas dos ônibus elétricos

Um dos maiores problemas a serem superados para o uso de ônibus elétricos tem relação com seu banco de baterias usado. Responsáveis por grande parcela do custo do veículo (entre 33 e 50% do valor do

ônibus, de acordo com a literatura estudada), estas baterias têm uma vida útil média de 10 anos em operação.

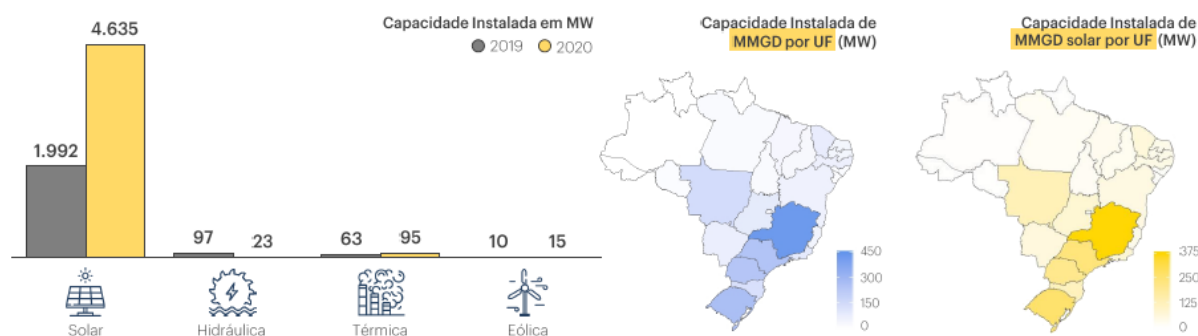
No entanto, o uso, o valor residual e o descarte destas, após este período, ainda é incerto. Apesar dessa incerteza, estudos já começam a demonstrar a possibilidade de reutilização destas baterias após o uso no ônibus, pelo fato de possuírem uma densidade de carga muito maior que baterias comuns. A UFSC realiza, em parceria com a Nissan, estudos de aproveitamento das baterias de íons de lítio usadas no Nissan Leaf, o carro elétrico mais vendido no mundo. Através desses estudos, Ruther (2021) afirma que as baterias que não mais atendem os veículos elétricos podem ser reconfiguradas e utilizadas como baterias estacionárias de segunda vida, em sistemas fotovoltaicos desconectados da rede ou postes com painéis fotovoltaicos, para armazenamento de energia. O que se pode concluir, dessa iniciativa, é a viabilidade de se computar um valor residual para as baterias usadas pelos ônibus, que vem a ser um fluxo de caixa positivo no modelo proposto. De acordo com Ruther (2021), as baterias de íons de lítio podem ter entre 30 e 70% de valor residual quando comparadas com uma similar nova, e uma expectativa de uso por até 10 anos em sistemas estacionários. Portanto, apesar de ser um componente representativo no custo total dos ônibus elétricos, as baterias usadas tendem a apresentar um cenário cada vez mais favorável, tanto na aquisição das novas quanto na substituição.

Neste estudo, considerou-se a possibilidade da reutilização destas baterias através do aumento no valor residual dos ônibus elétricos (de 5% no cenário padrão para 15% no cenário favorável aos VEs), pela perspectiva de revenda das baterias para utilização em uma segunda vida.

A geração de energia fotovoltaica, apontada como um possível destino das baterias usadas, vem sofrendo crescimento exponencial no Brasil nos últimos anos, de acordo com a Figura 7 - indicando a competitividade e o interesse da população nesse setor e na geração de energia sustentável, inclusive com uma forte aderência do Rio Grande do Sul à geração fotovoltaica de energia.

Figura 7 – Capacidade instalada de micro e mini geração distribuída (MMGD), por UF no Brasil, em 2019 e 2020

O adicional de capacidade instalada de MMGD¹ se concentrou no Centro-Sul do País, influenciado pela expansão da fonte solar em unidades federativas como Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso.



Fonte: Balanço energético nacional (2020)

Dentro da geração de energia solar, a geração *off-grid*, onde a energia gerada é estocada em baterias para uso isolado da rede elétrica, apresenta-se defasada em relação a geração *on-grid*, no qual o sistema fotovoltaico tem conexão com a rede elétrica e funciona através de um sistema de compensação da conta de luz em função da energia gerada.

No entanto, existem no país muitas situações de residências e locais isolados da rede elétrica, onde a geração de energia *off grid* pode melhorar a qualidade de vida dos brasileiros. Programas governamentais já foram instaurados nesse sentido, porém esse incentivo nunca se baseou no aproveitamento de peças usadas de outro setor, como propõe este estudo. A possível reutilização das baterias usadas nos ônibus elétricos poderia reduzir custos e facilitar, com isso, a implementação desta ideia.

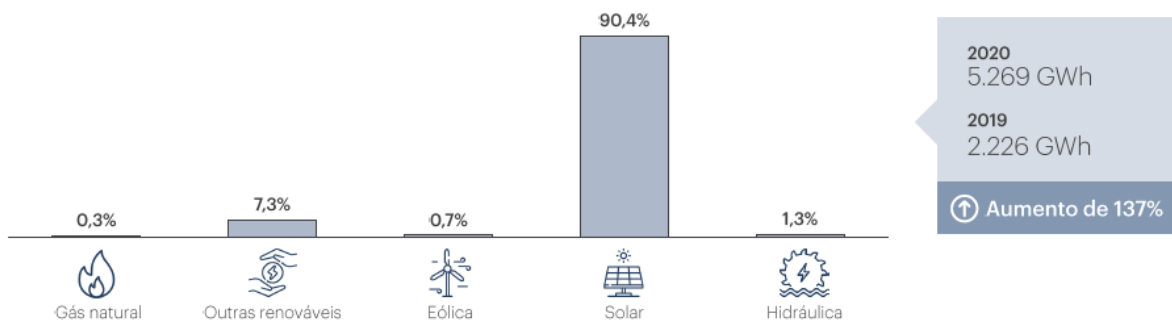
2.11. Perspectiva: concessionárias de energia

Apesar de parecer uma solução positiva para o futuro, a eletrificação dos veículos ainda apresenta dúvidas a respeito de seu funcionamento. As empresas concessionárias de geração e distribuição, fundamentais na mudança, ainda não possuem clareza dos impactos gerados pela eletrificação das frotas.

As modalidades de geração de energia vêm sofrendo fortes mudanças em âmbito nacional, com muitos usuários partindo para as modalidades de geração distribuída ou mercado livre de energia. Portanto, é necessário estudo para análise do impacto energético da frota de ônibus municipal como a de Porto Alegre.

Hall e Lutsey (2018), apontam que a eletrificação do transporte pode representar uma nova fonte de demanda para as concessionárias de energia, que tem tendência crescente pelas próximas décadas. Essa nova oportunidade pode ser fundamental, tendo em vista que a venda de eletricidade em países como Estados Unidos e Europa tendem a estabilizar ou diminuir, mantendo-se as propensões atuais. Além disso, o possível carregamento noturno, fora do horário de pico, pode ajudar a diminuir os riscos de sobrecarga na rede. A Figura 8 evidencia o amplo papel da energia solar na geração própria de energia, por parte dos consumidores. De acordo com o Balanço energético nacional (2020), em 2020 a micro e minigeração distribuída apresentou aumento de 137% em relação a 2019.

Figura 8 – Participação das fontes de geração na micro e minigeração distribuída em 2020 no Brasil



Fonte: Balanço energético nacional (2020)

2.12. Dificuldades para implantação dos veículos elétricos no Brasil

As dificuldades para a difusão dos veículos elétricos se dão por diversos 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, pois, por serem em sua maioria importados (inclusive de países com acordos com o Brasil, que diminui a tributação), os veículos elétricos não possuem categoria específica na TIPI – Tabela de Imposto sobre Produtos Industrializados, o que faz com que muitas vezes sejam tributados na categoria máxima, refletindo um preço mais elevado para o importador e inviabilizando o negócio. A Tabela 4 exibe um resumo das principais dificuldades para a implantação dos veículos elétricos.

Tabela 4 - Possíveis soluções para a implantação dos veículos elétricos nas frotas

Barreiras		Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
Operações da frota	Incerteza do valor residual	Empréstimos garantidos	Regulamentação das baterias usadas	Leasing das baterias	Garantia estendida dos fabricantes	Empréstimo ou leasing estendido para o veículo
Veículo	Custo de capital	Empréstimo de capital	Leasing das baterias	Acordos de compra em conjunto	Empréstimo ou leasing estendido para o veículo	
	Incerteza da cadeia de suprimentos	Metas de eletrificação de frotas mandam um claro sinal para as indústrias				
Bateria	Incerteza de opções no fim da vida útil	Leasing das baterias	Garantia estendida dos fabricantes	Empréstimo ou leasing estendido para o veículo	Regulamentação do que fazer com as baterias usadas	
	Queda dos preços das baterias	Leasing dos veículos				
Infraestrutura de recarga	Custo de capital	Padronização	Precificação dos carregadores junto a licitação dos ônibus	Procura de parcerias		
	Custo de instalação	Padronização	Procura de parcerias			
	Percepção pública e restrições de espaço	Educação	Realocação das paradas de ônibus			
Suprimento de eletricidade e problemas da rede elétrica	Locação do suprimento de energia	Procura de parcerias	Estudo de um novo local para garagem	Painéis solares na garagem		
	Área da rede suprimida	Carregadores portáteis de baterias	Painéis solares nas garagens			
Financiamento	Incerteza quanto a linhas de crédito	Financiamento direto pelas indústrias de ônibus elétricos	Garantias governamentais das taxas de empréstimos	Envolvimento de companhias financeiras no processo		
Apoio Governamental	Envolvimento dos governos nacionais no desenvolvimento dos ônibus elétricos	Exploração da implantação por autoridades governamentais				

Fonte: adaptado de *Bloomberg New Energy Finance* (2018)

Destacam-se, entre os pontos contrários à inserção dos ônibus puramente elétricos na frota urbana, as incertezas com relação a revenda e reutilização desses veículos após os primeiros anos de uso. De acordo com Lima (2017), é comum, nas capitais brasileiras, editais que preveem tempo máximo de utilização dos

ônibus no município (geralmente de 10 anos) e uma idade média da frota (usualmente 5 anos), como pré requisitos a serem cumpridos.

Visando seguir esses parâmetros, é comum que as empresas que realizam o transporte público nas capitais – que geralmente possuem ótimas condições de compra de veículos novos - renovem constantemente a frota, revendendo os veículos mais antigos para cidades menores, objetivando evitar o aumento de custos com manutenção e ainda obter lucros com a revenda. Para cidades de menor porte, a aquisição desses veículos usados se torna competitiva, pois demanda um investimento menor e entrega veículos capazes de atender as demandas locais, cujos itinerários e deslocamentos são menores que nas capitais.

No entanto, é muito difícil estimar com precisão como essa dinâmica de repasse ocorreria com os ônibus elétricos, primeiramente pela necessidade de maior tempo de uso nas capitais e grandes cidades (devido ao maior tempo para retorno do investimento), além do término da vida útil das baterias, que coincide com o momento de repasse desses ônibus, o que demandaria um investimento de até 50% de um veículo novo, tornando a incerteza ainda maior.

Ademais, cabe ressaltar o impacto que a aquisição de ônibus elétricos usados teria no itinerário e na infraestrutura das cidades do interior, uma vez que para adquirir estes veículos, os municípios obrigatoriamente teriam que rever a flexibilidade de horários das linhas e comprar carregadores, baterias, entre outros equipamentos, que podem tornar a aderência aos ônibus elétricos uma opção não atrativa economicamente, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Possíveis dificuldades e facilidades no repasse dos ônibus elétricos das capitais para o interior



Fonte: Autor (2022)

Uma prática muito comum, e que muitos trabalhos desconsideram, é a atratividade de revenda dos ônibus elétricos usados das concessionárias da capital para o interior. Segundo a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), a renovação da frota de ônibus em grandes municípios brasileiros é baseada na revenda dos veículos usados – sendo contabilizada como parte do negócio da operadora e responsável por impactos no negócio como um todo. Em se tratando do ônibus a diesel, este processo é usual e ajustado, uma vez que os ônibus usados nas grandes cidades são suficientes para cidades menores, e cumprem sua necessidade plenamente. Para os ônibus elétricos, no entanto, a NTU (2018) diz que se deve ponderar os impactos da revenda, uma vez que ônibus elétricos não poderiam ser utilizados em localidades onde não haja infraestrutura para recarga.

Em relação às operadoras de ônibus, Lima, Silva e Neto (2019), fazem um compilado no qual, segundo eles, é compreensível o receio gerado com as novas demandas de energia. O aumento da demanda, decorrente dos ônibus elétricos, deixariam as operadoras expostas a aumentos da tarifa de energia, além do risco de apagões e falta de luz, principalmente sob condições meteorológicas extremas. A ampliação do espaço necessário nas garagens, para instalação dos carregadores, também pode ser um problema para algumas operadoras. Em relação aos carregadores, a *Bloomberg New Energy Finance* (2018) aponta a falta de padronização e intercambialidade entre os diversos tipos como fator prejudicial aos ônibus elétricos, pois pode condicionar a aquisição de novos veículos a um único fornecedor, além de dificultar a revenda posterior dos ônibus, pois o futuro comprador terá de ter a infraestrutura correta instalada, sob pena de ter que refazer sua estrutura.

2.13. Impacto ambiental do transporte

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.*

O CETESB (2019), resumiu os principais poluentes atmosféricos oriundos dos meios de transporte, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais poluentes atmosféricos oriundos dos meios de transporte

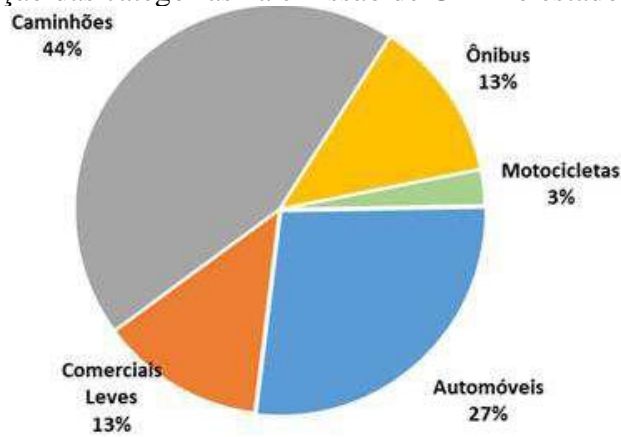
Poluente	Características	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Inaláveis Finas (MP 2,5 - diâmetro de até 2,5 µm)	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água
Partículas Inaláveis (MP 10- diâmetro de até 10 µm) 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.	Danos à saúde humana

Ozônio (O3)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas e plantas ornamentais
-------------	--	---

Fonte: adaptado de CETESB (2019)

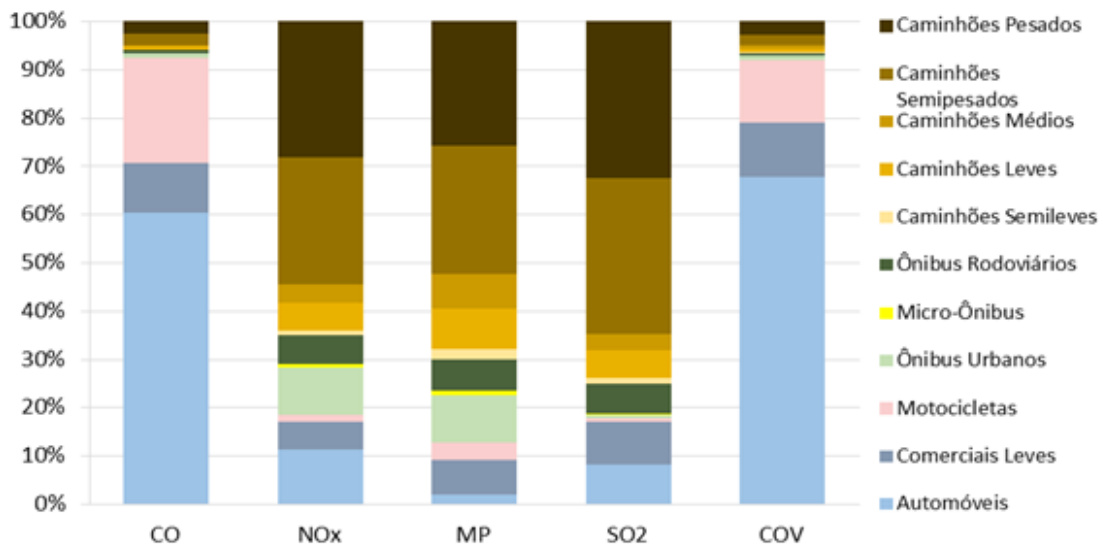
Segundo dados das Figuras 10 e 11, os principais poluentes gerados pela circulação dos ônibus urbanos são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). No que tange os ônibus diesel, os dados apontam como principal problema da emissão o impacto local, pois, apesar de representarem parcelas relativamente pequenas dentro do todo, suas emissões repercutem na vida de grande parcela da população, dada a densidade populacional dos grandes centros urbanos.

Figura 10 – Contribuição das categorias na emissão de GEE no estado de São Paulo em 2019



Fonte: CETESB (2019)

Figura 11 – Contribuição individual das categorias na emissão de GEE no estado de São Paulo em 2019



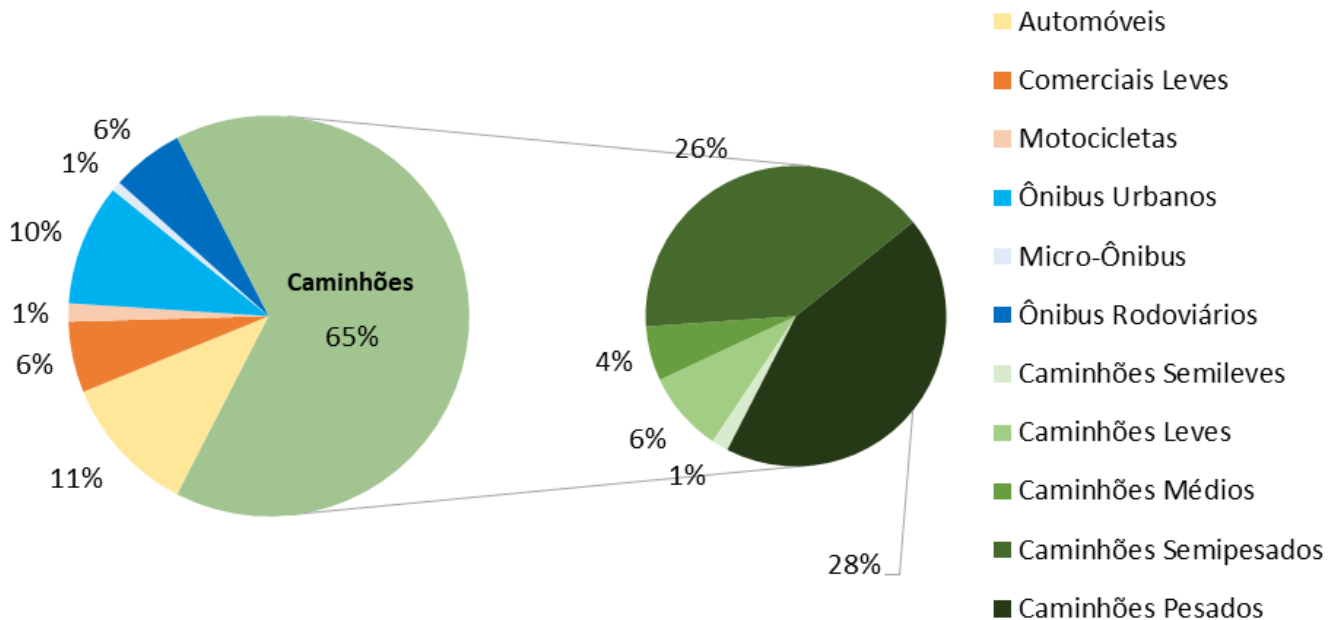
Fonte: CETESB (2019)

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 (fração fina, MP 2,5) a 10 μm (MP 10). De acordo com PROMOB-e (2018), o 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, 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.

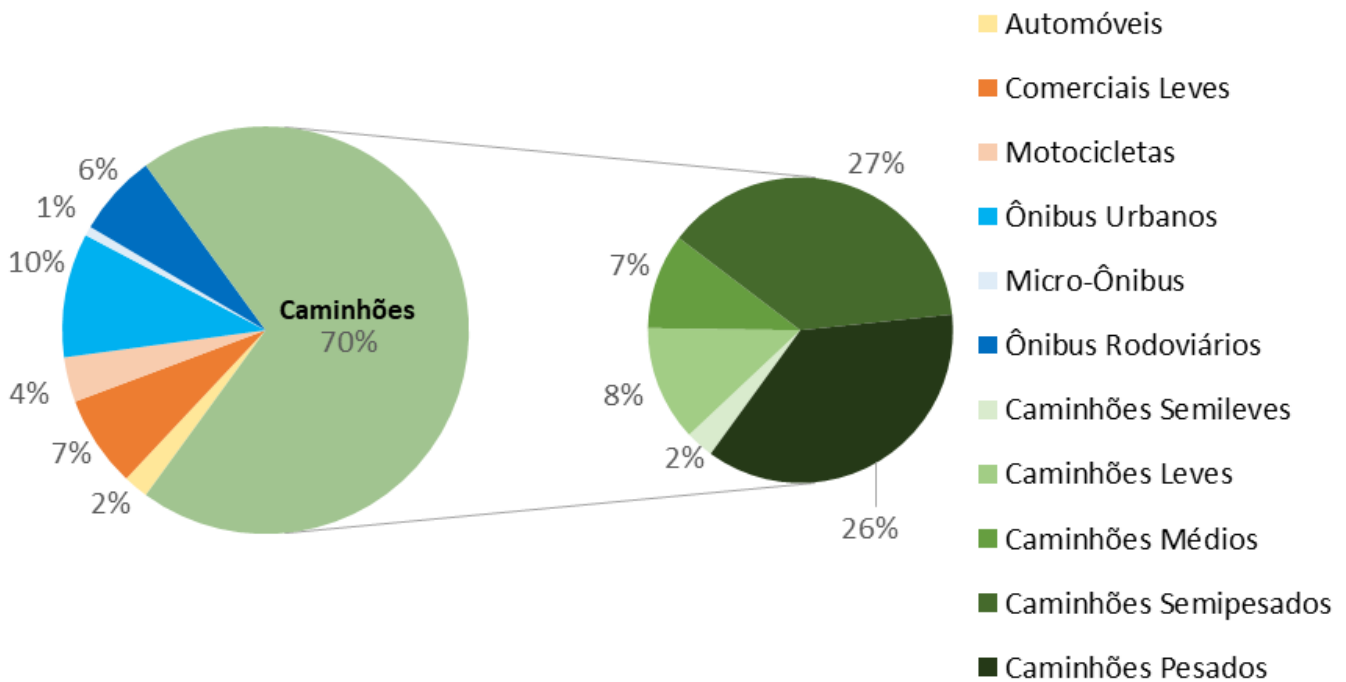
O inventário de emissões veiculares, compilado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2019), estima que os ônibus urbanos representam cerca de 1% da frota de veículos da região metropolitana de São Paulo e, apesar de não representam um problema crítico com relação as emissões de CO, SO₂ e COV, respondem por 10% das emissões veiculares de óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP), conforme apresentado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Contribuição individual das categorias na emissão de NO_x no estado de São Paulo, em 2019



Fonte: CETESB (2019)

Figura 13 – Contribuição individual das categorias na emissão de MP no estado de São Paulo, em 2019



Fonte: CETESB (2019)

Nesse contexto, 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/m³ de material particulado.

No entanto, historicamente, padrões de eficiência veicular vêm sendo estabelecidos para controlar a tecnologia adotada nos veículos e controlar suas emissões de GEE. Mundialmente utilizada, a norma de controle e emissão de poluentes da União Europeia serve de base para guiar os requisitos que os veículos devem cumprir. Criada em 1988, iniciando com a Euro 0, a série de medidas estabelece o valor máximo de emissões de poluentes que o veículo pode atingir, contando com especificações e limites para veículos a diesel e gasolina. São controlados pela norma os óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, a fração do combustível com queima incompleta na combustão e o material particulado, liberado no escapamento do veículo. Desde sua criação, vigoraram as Euro 1, 2, 3, 5 até o 6, criado em janeiro de 2014 que está em vigor nos dias atuais (sendo contados em números decimais para veículos leves e romanos para os pesados). Os requisitos exigidos nas normas têm evoluído ao longo do tempo e contam com as novas tecnologias para tornar o uso dos veículos a combustão cada vez menos agressivo ao meio ambiente. Entre as medidas que tornam possíveis a redução da poluição dos veículos, destacam-se a diminuição do consumo de

combustível, que reduz as emissões de gases contaminantes e CO₂, e a aplicação de sistemas de tratamento de gás (catalisadores SCR) para controlar os contaminantes formados na combustão.

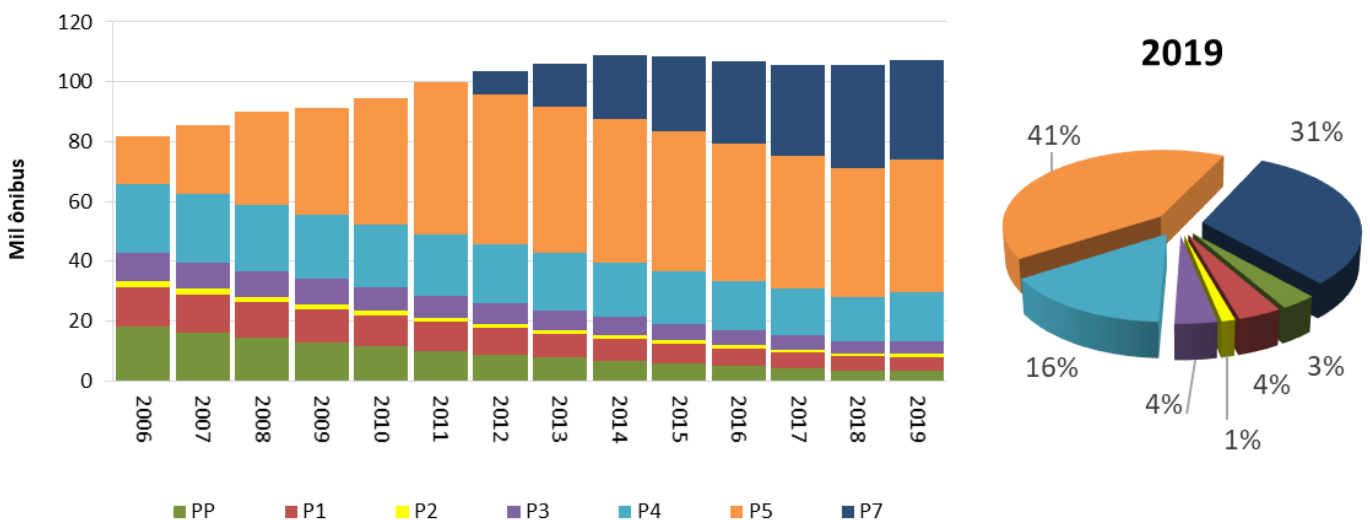
No Brasil, a norma regulamentadora, denominada Proconve - Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, atualmente na fase P7, tem como base o padrão europeu, porém com um grande período de defasagem. A regulamentação atual brasileira exige apenas o requerido na Euro 5, tendo previsão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

A Resolução Conama 403/2008 obrigou o atendimento da fase P7 do Proconve para veículos pesados novos a partir de 2012. Para cumprimento da normativa pelos fabricantes, os veículos passaram a adotar a tecnologia de Catalisador de Redução Seletiva (ou SCR - *Selective Catalytic Reduction*) que requer a utilização do Agente Redutor Líquido de óxidos de nitrogênio Automotivo (ARLA 32). O ARLA 32 é uma solução de ureia em água desmineralizada. Trata-se de insumo com certificação compulsória, em conformidade com as especificações prescritas pela Instrução Normativa IBAMA nº 23, de 11 de junho de 2009.

De acordo com CETESB (2019), apesar de estudos indicarem que o uso de ARLA tenha contribuído com a estabilização dos níveis de poluição, alguns proprietários fraudam o uso do sistema, por razões econômicas. Entre as práticas adotadas está o uso de insumos sem certificação e a instalação de dispositivos eletrônicos para burlar o sistema de controle do veículo, fazendo com que seus veículos excedam os limites de poluição permitidos legalmente.

No intuito de apresentar o panorama atual do cenário nacional, a Figura 14 apresenta os percentuais de veículos em cada fase do Proconve que estão em circulação no Brasil.

Figura 14 – Percentual de veículos circulantes no Brasil segundo as fases do Proconve



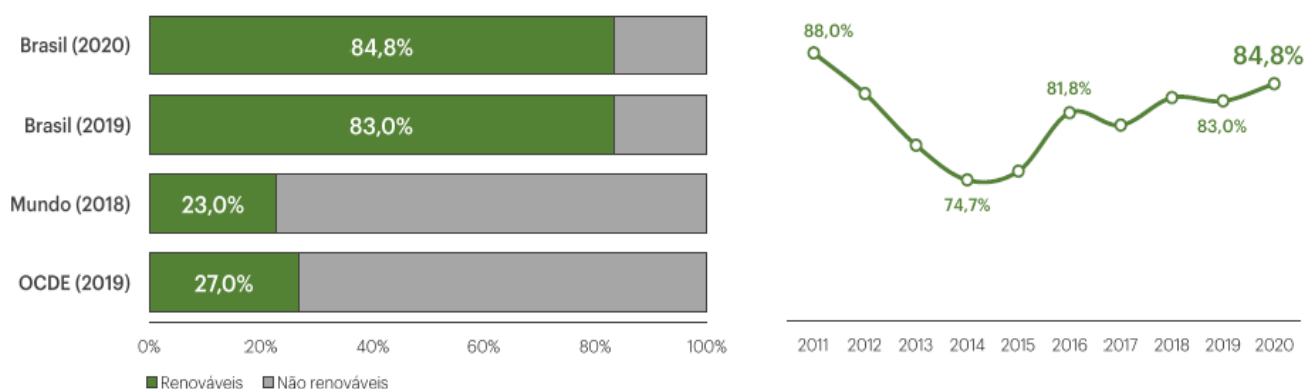
Fonte: CETESB (2019)

2.14. Panorama brasileiro: o Balanço Energético Nacional

Tradicionalmente, a EPE realiza em intervalos anuais o Balanço Energético Nacional, através do qual pode-se ter acesso ao panorama energético brasileiro. Nele, é possível encontrar dados atuais sobre a situação da nação em setores fundamentais para o escopo deste trabalho, como a matriz energética nacional, o uso e impacto dos transportes no setor energético e a parcela e o crescimento da energia solar.

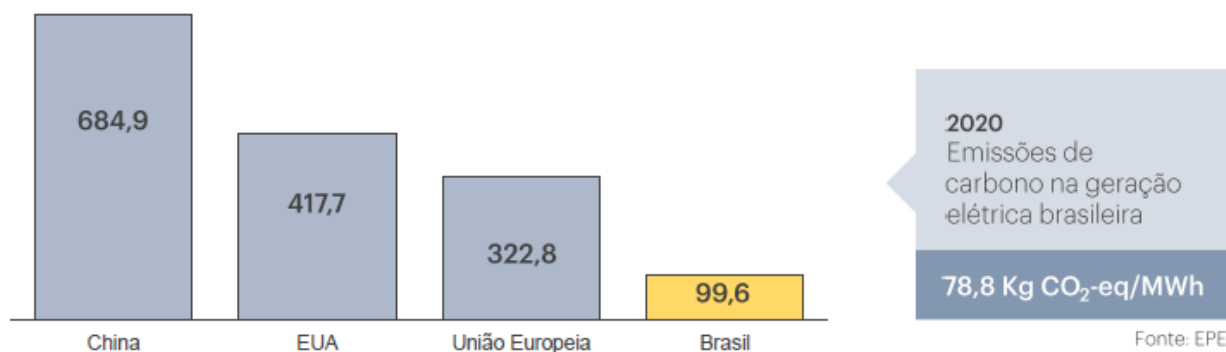
Com relação à matriz energética, especialmente se tratando da geração de energia elétrica, é possível notar, nas Figuras 15 e 16, uma disparidade entre o cenário brasileiro e o mundial na participação de fontes renováveis, apontando origem majoritariamente renovável para o Brasil, que vai de encontro ao panorama mundial. Essa vantagem brasileira, na forma de geração de energia elétrica, torna o cenário da eletrificação das frotas ainda mais favorável, pois a energia elétrica aqui gerada tem caráter muito mais limpo que a média mundial.

Figura 15 – A participação de recursos renováveis na matriz elétrica brasileira



Fonte: EPE (2020)

Figura 16 – As emissões de CO₂ na produção de energia elétrica no Brasil



Fonte: EPE (2020)

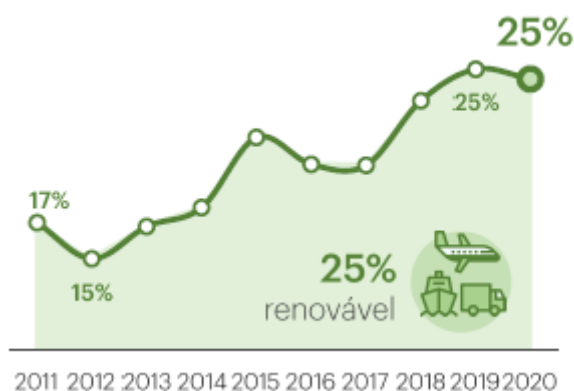
Com relação ao consumo de energia, a Figura 17 aponta o setor de transportes como a segunda maior categoria de consumo do país, responsável por 31,2% da demanda. Dentro da energia usada nos transportes no Brasil, cerca de 25% tem origem renovável, devido, principalmente, às políticas nacionais de inserção de biodiesel no óleo diesel usado no país, como pode ser visto na Figura 18. Apesar de crescente, no entanto, a parcela de energias renováveis no setor de transporte se encontra muito aquém da parcela na geração de energia elétrica, que alcança o índice de 84,8%.

Figura 17– Impacto de cada setor no consumo de energia no Brasil



Fonte: EPE (2020)

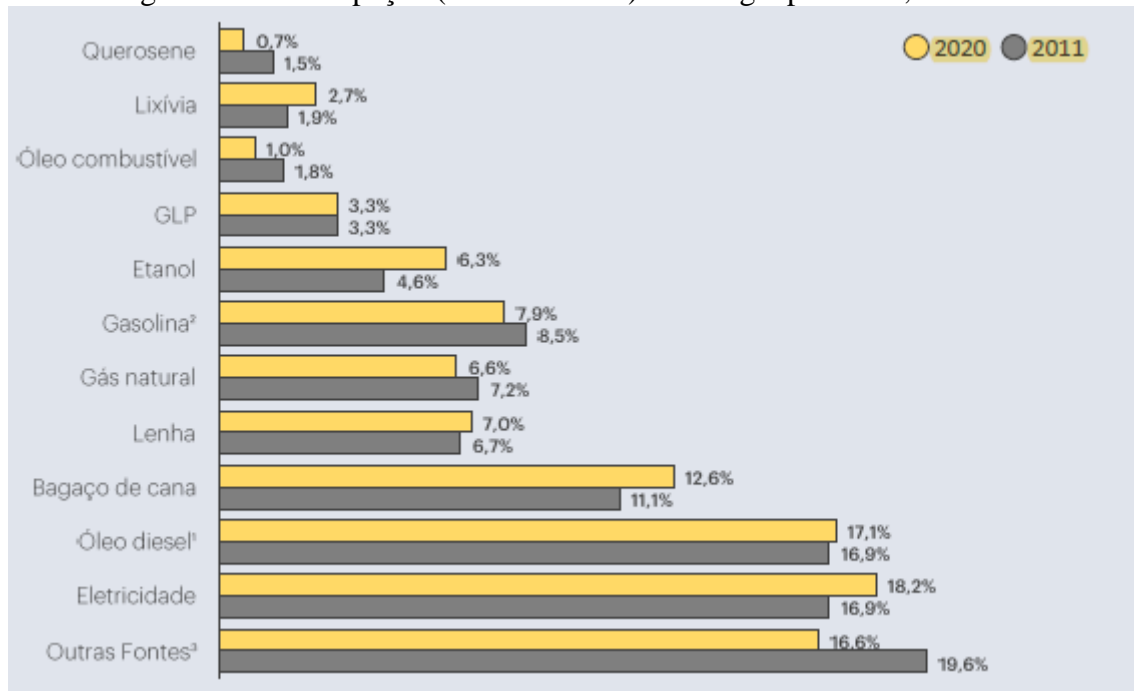
Figura 18 – Percentual de energia renovável nos transportes do Brasil



Fonte: EPE (2020)

Portanto, apesar do consumo similar de energia nos setores de eletricidade e transportes, conforme a Figura 19, a substituição das frotas de ônibus diesel por elétricos significaria um favorecimento à produção e consumo de energia renovável.

Figura 19 – Participação (consumo final) de energia por fonte, no Brasil



Fonte: EPE (2021)

2.15. Desempenho ambiental

De acordo com Mahmoud et al. (2018), o desempenho ambiental é uma grande preocupação nos dias atuais, e representa a principal motivação para as propostas de eletrificação dos veículos. Na literatura, a forma mais encontrada de representação desse desempenho está na análise da geração de gases de efeito estufa ao longo de todo o processo - da geração até o consumo da energia nos veículos, tendo como parâmetros o meio onde a energia é produzida (*well*), o armazenamento dela nos veículos (*tank*) e o consumo durante a utilização dos veículos (*wheel*). A partir destes critérios, é possível decompor o desempenho energético dos veículos em três estágios: o desempenho completo do sistema, do meio à roda (*well to wheel*), além das análises intermediárias, do meio para o tanque (*well to tank*) e do tanque para a roda (*tank to wheel*). O meio para o tanque mede as emissões de gases de efeito estufa do combustível (no caso diesel ou eletricidade) nos estágios de produção e distribuição, enquanto o tanque para a roda mede as emissões do combustível durante uso do veículo.

No que tange aos ônibus elétricos, estes destacam-se por não gerarem emissões de escapamento e pelo potencial de reduções na emissão de CO₂ ao se considerar todo o seu ciclo de vida. (EPE, 2020).

2.15.1. Do meio ao tanque

A avaliação do meio ao tanque quantifica as emissões dos GEE durante a produção e distribuição

da energia. São identificados os métodos de produção de energia, matérias-primas e vias de distribuição utilizadas, sendo posteriormente calculadas as taxas de poluição de cada meio. Para o caso brasileiro, a matriz energética majoritariamente renovável torna a mudança das frotas do diesel para a eletricidade uma alternativa benéfica, no aspecto ambiental.

2.15.2. Do tanque à roda

A avaliação do tanque à roda, de maneira complementar, estima as emissões locais produzidas durante a operação do ônibus. Os resultados do tanque à roda são altamente sensíveis ao contexto estudado, devido às condições locais, como relevo, trânsito, velocidade média e outras. A aferição normalmente é realizada em uma de duas formas: através dados operacionais ou modelos de simulação de trânsito.

2.15.3. Do meio à roda

É a avaliação que fornece uma visão geral do desempenho ambiental de cada tecnologia. Por meio dela, é possível observar que os veículos puramente elétricos têm grande potencial para reduzir as emissões de GEE. Em seu estudo, Mahmoud et al. (2016) observa que os ônibus elétricos proporcionam uma redução de 41% nos GEE, com base no mix de eletricidade da União Europeia – cuja parcela de geração de energia renovável é muito menor que a brasileira. É possível observar também que a utilização de ônibus elétricos com fonte de eletricidade de base renovável pode reduzir a emissão de GEE quase que em sua totalidade, como aponta a Tabela 6.

Tabela 6 – Potencial de redução de GEE utilizando ônibus elétricos

Modo	Fonte energética	% de redução de gases de efeito estufa comparado ao ônibus diesel
Ônibus elétrico	Eletricidade - mix energético da União Europeia	41,08%
Ônibus elétrico	Eletricidade - energia renovável	98,36%

Fonte: adaptado de Mahmoud et al. (2016)

A literatura apresenta valores variáveis para as emissões dos ônibus. No estudo realizado por Maluf Filho (2013), foram analisados dados da frota de São Paulo com relação à poluição, onde foram separados os tipos de veículos e analisados. No caso dos ônibus urbanos a diesel, o estudo aponta emissões totais de 2.170 ton/ano para o monóxido de carbono (CO); 440 ton/ano para os gases hidrocarbonetos (HC); 10.840

ton/ano para óxidos de nitrogênio (NO_x); 300 ton/ano para material particulado (MP) e 10 ton/ano para óxidos de enxofre (SO_x), por veículo.

De acordo com os estudos do C40/ISSRC (2013), foi estimado ganhos ambientais com o uso dos veículos elétricos. Percentualmente, estudos de campo demonstram grande redução na emissão de poluentes pela adoção do ônibus elétrico. Testes realizados em Santiago, no Chile, dados do C40 e IRSCC apontam uma redução entre 73 e 81% com relação ao veículo diesel, dependendo do tipo de bateria adotada. Cabe ressaltar que estes dados são provenientes da análise do tanque à roda, não levando em consideração a emissão de poluentes dos processos produtivos de cada elemento.

2.16. Formas de aquisição de ônibus elétricos

Um dos principais problemas ao tratar da adesão aos ônibus elétricos está no alto investimento inicial. De acordo com as cotações feitas para realização deste trabalho, o custo de um ônibus elétrico hoje é mais que o dobro da aquisição de um similar a diesel. Segundo o Banco Mundial (2017), as operadoras de ônibus tendem a rejeitar novas tecnologias de veículos por não conhecerem as características de operação em sua totalidade. Portanto, os operadores que não estão familiarizados com a nova tecnologia podem entender a transição para uma frota elétrica como um negócio custoso e de alto risco.

Segundo a Bloomberg New Energy Finance (2018), existem três opções na forma de aquisição dos veículos elétricos: compra direta, empréstimos e *leasing* (de baterias, de ônibus ou ambos). O estudo aponta o pagamento de empréstimos ou *leasing* como passíveis de serem liquidados com as economias operacionais, facilitando com isso a adoção mais efetiva dos ônibus elétricos.

2.17. TCO – Custo total de propriedade

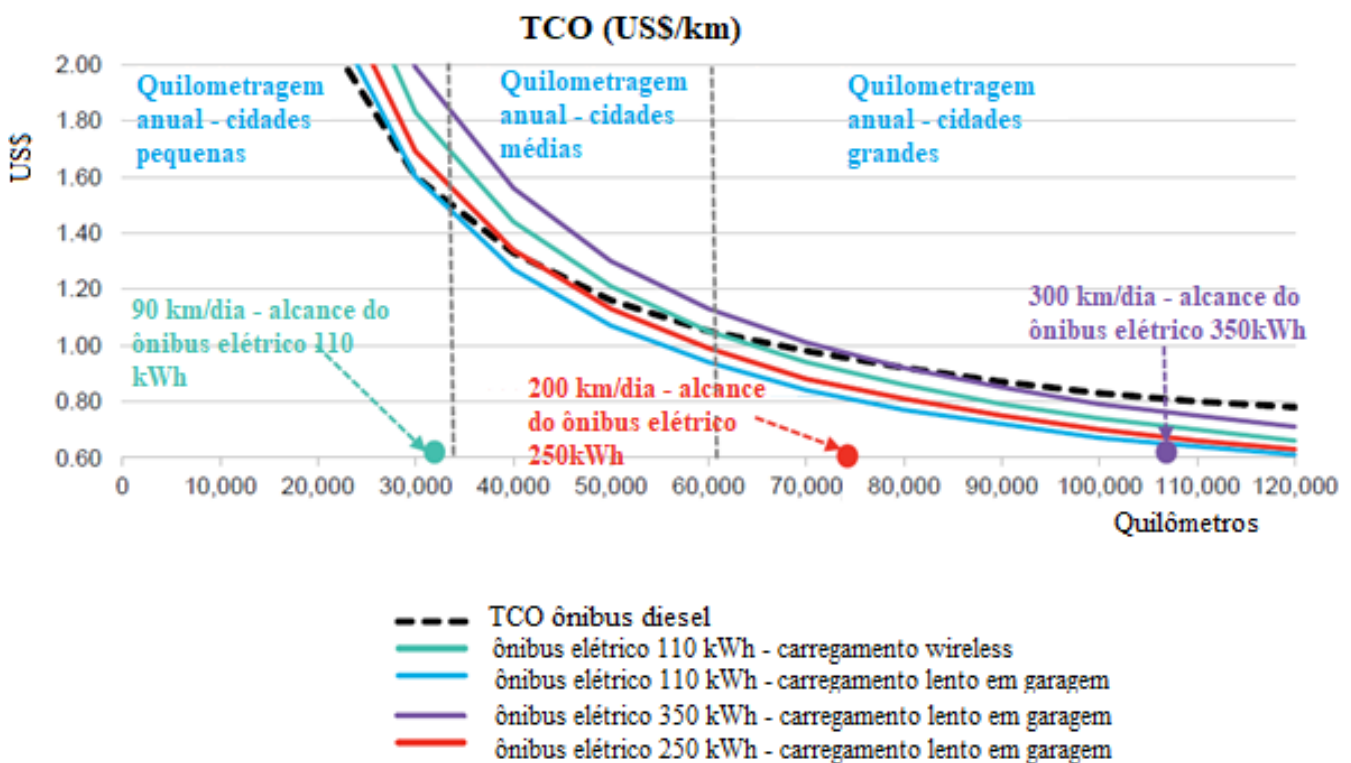
O custo total de propriedade – ou TCO, tem sido apresentado na literatura como principal índice econômico para justificar a adoção ou não dos ônibus elétricos. Detentores de um custo inicial inegavelmente maior, chegando a ser mais do que o dobro de um veículo a diesel, os ônibus elétricos tem como trunfo a redução de despesas de operação e manutenção, que fazem com que seu custo de vida possa vir a ser menor que dos modelos 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 reposição de suas peças e dificuldade em precisar os custos futuros.

Para análise do TCO do modelo diesel, por outro lado, a ampla difusão e conhecimento de suas peculiaridades no mercado fazem com que os parâmetros tenham maior exatidão, gerando um modelo mais conciso.

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*, também conhecido como carregamento lento) como o mais atrativo economicamente, pois apesar de necessitar de um banco de baterias maior, os menores custos com infraestrutura acabam compensando sua aquisição. A Figura 20 relaciona o custo total por quilômetro dos ônibus com a quilometragem diária desses veículos.

Figura 20 – TCO dos diferentes modelos de ônibus em função da quilometragem anual percorrida



Fonte: adaptado de *Bloomberg New Energy Finance* (2018)

Por outro lado, Göhlich et al. (2018) apresenta perspectivas de um cenário tecnicamente igual na atualidade, em termos de TCO, para os veículos diesel e elétrico. Seu estudo projeta, porém, uma queda mais acentuada do custo total dos veículos elétricos em 2025, o que indica uma consolidação da tecnologia e uma diminuição nos seus custos, em um futuro próximo.

Figura 21 – Perspectiva atual e futura (2025) para o TCO de ônibus diesel e elétrico

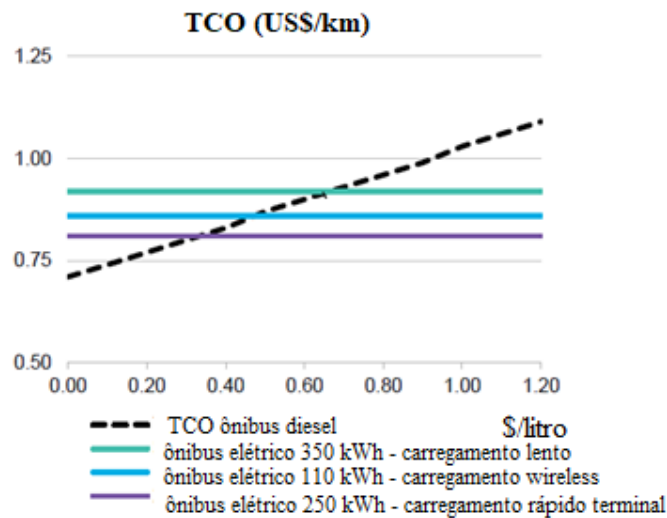


Fonte: adaptado de Göhlich et al. (2018)

Parâmetros fundamentais para o cálculo do TCO, os custos de diesel e de energia elétrica estão em constante flutuação, e suas variações podem causar mudanças significativas na tomada de decisão de qual modelo adotar.

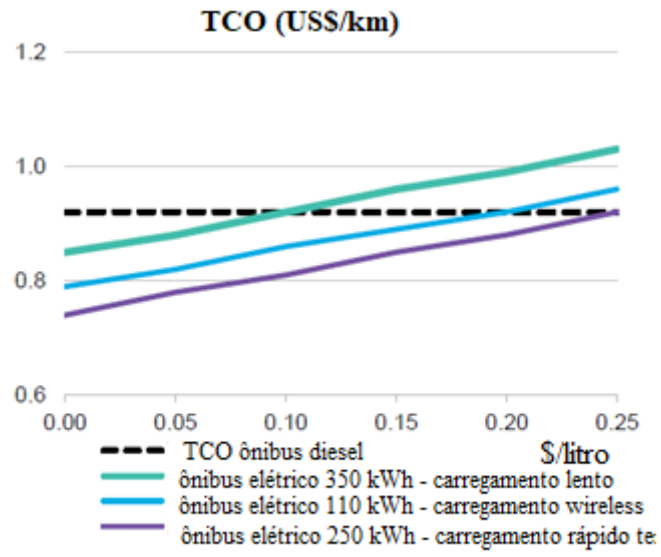
As Figuras 22 e 23 demonstram o quão significativos estes dois parâmetros podem ser para o TCO do ônibus adotado, podendo torná-lo uma opção melhor ou pior economicamente.

Figura 22 - Sensibilidade do TCO relação ao preço do diesel adotado



Fonte: adaptado de Bloomberg New Energy Finance (2018)

Figura 23 - Sensibilidade do TCO em relação ao preço de energia adotado



Fonte: adaptado de *Bloomberg New Energy Finance* (2018)

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir da delimitação do tema e de revisão de literatura dos aspectos abordados, através de artigos, dissertações, informações públicas, comerciais e notas técnicas sobre os tipos de ônibus e suas tecnologias. Posteriormente, foram levantados dados da licitação do transporte público de Porto Alegre, dados da concessão de transporte público do município e particularidades das linhas de ônibus municipais. Definiu-se, então, os elementos e os custos envolvidos.

Para as simulações foi utilizada a planilha de cálculo de TCO e emissões de Cooper et al. (2019), para a qual definiram-se os dados de entrada mediante uma combinação de informações: pesquisas de mercado, valores médios dos dados públicos atualizados e valores padrão da ferramenta utilizada, com base em dados oficiais brasileiros. A ordem de prioridade na utilização uso dos dados de entrada foi, primeiramente, o uso dos dados encontrados na realidade local, devidamente atualizados. Nos casos em que estes não correspondiam a realidade, foram utilizados dados de pesquisas de mercado e, se ainda assim não houvessem dados representativos, foram utilizados os dados padrão da ferramenta, com dados predispostos para o Brasil.

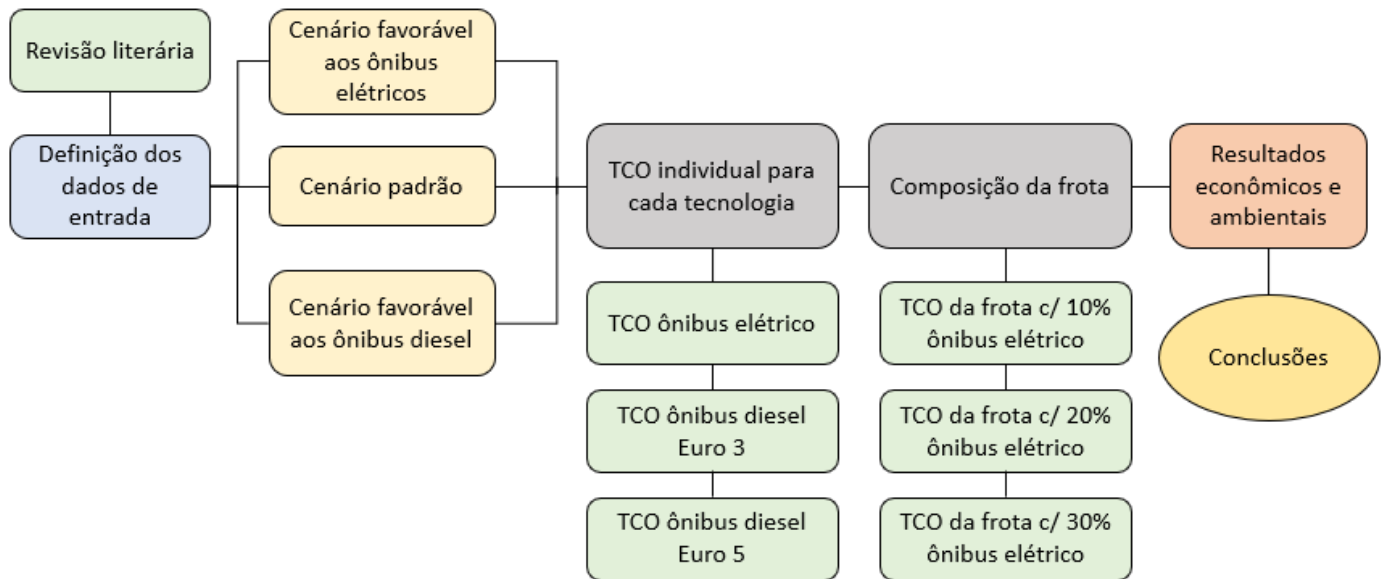
Definidos os dados de entrada na planilha, foram criados três cenários (padrão, favorável aos ônibus diesel e favorável aos ônibus elétricos), nos quais foram realizadas variações de alguns parâmetros, visando analisar a sensibilidade do TCO de cada tipo de ônibus estudado com a variação de alguns dados de entrada. Nos cenários enviesados foram feitas considerações otimistas, baseadas em perspectivas onde o preço futuro de uma tecnologia apresenta-se mais favorável que outra.

A partir disso, com valores de TCO individualizados, foram realizadas simulações de composições para a frota de ônibus de Porto Alegre, considerando o número total de ônibus atuantes no município constante. Para isso, foram feitas variações na proporção de ônibus elétricos, diesel Euro 3 e diesel Euro 5, visando a introdução gradual dos ônibus elétricos na frota. Por se tratar de um estudo na fase inicial da introdução de ônibus elétricos na frota pública, foram realizadas simulações com 10, 20 e 30% de ônibus elétricos na frota, com o restante mantendo-se de acordo com a disposição atual, de ônibus diesel com tecnologias Euro 3 e Euro 5.

As simulações realizadas adotaram o critério de substituir, prioritariamente, os ônibus diesel com tecnologia Euro 3 por elétricos, por tratarem-se de veículos mais antigos e mais defasados tecnologicamente. Somente ao concluir-se a substituição de todos os ônibus com tecnologia Euro 3, os ônibus com tecnologia Euro 5 passariam a ser substituídos, exemplificando, assim, a ordem das mudanças propostas por este estudo.

Por fim, foram apresentados os resultados econômicos e ambientais das hipóteses propostas. A Figura 24 ilustra a metodologia utilizada, sob forma de organograma.

Figura 24 – Organograma com a organização deste trabalho



Fonte: Autor (2022)

3.1. Definição dos dados de entrada

Os critérios utilizados para a definição de custos adotados neste trabalho são de vital importância e serão aqui detalhados, pois os resultados econômicos gerados estarão diretamente ligados aos parâmetros iniciais, que variam muito na literatura estudada, seja por especificidades do local estudado, seja pela falta de atualização monetária ou, em alguns casos, por ambos.

Pelo estado da arte literário tratar quase exclusivamente do cenário internacional, os estudos analisados são em países diferentes, onde muitas vezes a implantação dos ônibus elétricos está em estágio mais avançado. Em decorrência disso, diferenças quanto a disponibilidade de fabricantes de veículos elétricos, incentivos governamentais, custos de insumos distintos e aceitação populacional fazem com que custos adotados nesses trabalhos sejam individualizados, não sendo necessariamente verdadeiros, para situações diferentes. Além disso, muitas das tecnologias adotadas nos ônibus elétricos são importadas e, portanto, dependentes da constante variação cambial e da consolidação da tecnologia utilizada, no mercado em questão.

Portanto, o critério de definição de dados visou o maior aproveitamento de informações de custos encontrados na realidade local. Porto Alegre atualmente regula o transporte público municipal com base na licitação Concorrência Pública 01/2015, onde estão divulgados todos os custos do sistema, pelas 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 – dividida em seis lotes, compostos por 5 consórcios privados e um público - com correção monetária para os dias atuais, utilizando a inflação acumulada desde a licitação até os dias atuais (empregando o índice 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 indispensáveis e que não foram encontrados em nenhuma das pesquisas realizadas, ou 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 Tabela 7 apresenta todos os parâmetros utilizados para esta simulação e suas origens.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações realizadas

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 (novo – similar ao adotado)	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 a.a.	%	Taxas e durações padrões da ferramenta, baseados em dados do BNDES
Taxa de empréstimo elétrico	9,4% e 6% a.a.	%	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	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 referências)
Tarifa da energia elétrica (considerando os impostos incidentes)	0,09	US\$/kwh	Valor calculado para a projeção de consumo necessária, de acordo com a concessionária de energia elétrica de Porto Alegre
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 referências)
Custo do combustível Euro 3	0,82	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	0,81	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.	%/ano	Valor variável, para análise de cenários favoráveis ao diesel e à energia elétrica, no futuro
Aditivo do combustível	0,006	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 Figura 25.
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 Figura 25.
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 Figura 25.
Taxa de desconto	10	%	Valor indicado por Cooper et al (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	5.829,69	km/ano/ônibus	Valor calculado a partir do percurso médio mensal total da frota, oriundo da licitação de Porto Alegre (2015)
Valor cambio	0,18	R\$/US\$	Cotação do dólar em outubro/2021
Inflação	10,15	%	IPCA acumulado 12 meses em outubro/2021

Fonte: Autor (2022)

3.2. Hipóteses adotadas

Para realizar as simulações deste trabalho, algumas hipóteses tiveram de ser adotadas, 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 empresas operadoras do transporte público não disponham de valores extras para aquisição dos veículos elétricos. Portanto, os valores de pagamento inicial e valores residuais foram ajustados para que o ônibus elétrico tenha um desembolso inicial igual aos ônibus diesel.

Com relação à operação da frota de ônibus de Porto Alegre, considerou-se que a distância média mensal percorrida pelos ônibus não se alterou do período da licitação (2015) até os dias atuais. No que diz respeito 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, considerou-se o cenário como sendo 50% para cada tecnologia (Euro 3 e 5), por considerar Porto Alegre um cenário mais desenvolvido e, portanto, acima da média nacional, apresentada na Figura 19, de cerca de 31% dos ônibus com tecnologia P7 (Euro 5). As análises de implementação gradual de ônibus elétricos na frota irão, prioritariamente, substituir os veículos com tecnologia Euro 3, até seu término, passando então para a substituição dos ônibus com tecnologia Euro 5.

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 Figura 25 apresenta o resumo da adaptação dos itens da licitação pública para o uso na ferramenta. Nela, estão descritos e separados todos os custos apresentados pelas empresas vencedoras da licitação pública de Porto Alegre.

Figura 25 – Enquadramento dos itens apresentados pela Licitação Pública de Porto Alegre para o uso na planilha de Cooper et al. (2019)

ITENS DE CUSTO	
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	Custos operacionais adicionais
Remuneração da frota	
Remuneração de terrenos, edificações, equipamentos e mobiliário de garagem	Custos operacionais adicionais
Remuneração de almoxarifado	
Remuneração dos veículos de apoio	Custos operacionais adicionais
Despesas com peças e acessórios	
Operacional	Custo total do motorista e trabalho a bordo
Manutenção	
Administrativo	Custos operacionais adicionais
Plano de Saúde dos Rodoviários	
Honorários da administração	
Outras Despesas	
Seguros (Passageiro e DPVAT)	
CUSTO DE REMUNERAÇÃO DO SERVIÇO (7,24%)	Custo total do trabalho de manutenção
CUSTO GESTÃO DA CCT (3%)+ ALÍQUOTA LEI FEDERAL 12715/12 (2%)	

Fonte: Autor (2022)

3.3. Custos Envolvidos na Operação com Ônibus a Diesel

Conforme os dados da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, existem diversos tipos de veículos em atuação na frota de ônibus municipal. Para esta análise, optou-se pelo modelo Volvo B7R *low entry*, com ar condicionado, por ser, à época, um modelo com grande representatividade. Segundo os dados públicos, o valor do veículo à época da licitação, em 2015, era de R\$ 479.000,00. Para obter valores atualizados, foi aplicado sobre esse valor o IPCA acumulado durante o período, o que gerou o valor de R\$ 693.282,85 para um similar, novo, nos dias atuais. A cotação dos veículos com tecnologia Euro 3 é inviável, uma vez que a tecnologia não é mais utilizada. Portanto, assumiu-se o valor de compra desses veículos como sendo o mesmo dos ônibus com tecnologia Euro 5.

3.4. Custo do combustível

A Agência Nacional do Petróleo – ANP, apresenta mensalmente valores médios, mínimos e máximos, para os combustíveis fósseis, em diversas cidades do Brasil. Assim, foi possível encontrar o preço médio de R\$ 4,850 por litro de diesel S-10 (utilizado em ônibus com tecnologia Euro 5), no município de Porto Alegre. No entanto, considerando o grande volume de combustível comprado pela empresa responsável pela linha, assumiu-se o custo mínimo informado pela ANP, de R\$ 4,489 por litro. Para os veículos com tecnologia Euro 3, a mesma lógica foi adotada, com a diferença da utilização de diesel comum (S-500) nestes veículos, com preço mínimo cotado à R\$ 4,569 por litro, para o município.

A tecnologia Euro 5 também exige o uso do fluído ARLA 32, para o correto funcionamento do filtro de emissão de partículas e gases poluentes. Para tal, uma pesquisa de mercado encontrou valores mínimos de R\$ 2,23 por litro. Foi considerado o consumo de ARLA 32 como sendo 5% do consumo de diesel.

3.5. Custo Envolvido com a Operação do Veículo Elétrico

Segundo informações obtidas junto à empresa BYD, o custo do veículo elétrico do modelo D9W, compatível em características com o modelo a diesel adotado, é de R\$ 1.590.000,00 para chassis, ar condicionado e banco de baterias, além da estimativa de R\$ 320.000,00 de custo para a carroceria, totalizando R\$ 1.910.000,00.

Para simular o carregamento das baterias dos ônibus elétricos, serão necessários pontos de carregamento na garagem da empresa, para carregamento no período noturno. Estudos apresentam a necessidade de um carregador de garagem para cada dois ônibus elétricos. Além disso, estimou-se a utilização de um carregador de maior capacidade no terminal, para cargas rápidas, tendo em vista que somente o carregamento noturno não é suficiente para atender a demanda diária de algumas linhas. Presume-se que um carregador rápido possa suprir até 10 ônibus elétricos, em recargas de oportunidade.

Diante disso, foi realizada consulta ao mercado, cotando os valores dos carregadores para a garagem e terminal. Para a garagem foi considerado o carregador fornecido pela própria BYD com custo cotado em R\$ 65.000,00 e uma carga completa entre 4 e 5 horas. Para o carregador rápido dos terminais, o modelo escolhido, foi o WEG WEMOB-S-150-E-H-1CS, com 150 kW de potência e custo de R\$ 314.793,65.

3.6. Custo da energia elétrica

Em consulta à concessionária de energia local, dadas as potências envolvidas nos terminais de carregamento, a unidade consumidora seria do tipo A, de consumidores de média e alta tensão, classe 4, com tensão de fornecimento entre 13,8 e 25 kV. Neste caso, o custo da energia no horário fora de ponta é de R\$ 0,34222 por kilowatt hora (kWh), sem a incidência de impostos. O preço final, com a incidência de impostos, é calculado a partir da equação abaixo:

$$Preço\ final\ (R\$) = \frac{\frac{Preço\ homologado\ (R\$)}{(1 - PIS(\%) - COFINS(\%))}}{1 - ICMS(\%)}$$

Calculou-se, portanto, que o valor da energia consumida será de R\$ 0,5006/kWh.

3.7. Sistema Fotovoltaico

De acordo com a ficha técnica do ônibus elétrico adotado (BYD, 2022), é prevista uma autonomia de até 250 km com sua bateria de 324 kWh. Estes dados permitem estimar um consumo médio de 1,3 kWh por quilômetro. Visando considerar a eficiência do carregamento e uma margem de segurança adicional, foi adotado um fator de eficiência da ordem de 80%, resultando em um gasto energético de operação de 1,6 kWh consumido da rede elétrica por quilômetro rodado. Com este valor, foi possível dimensionar um sistema fotovoltaico, que, conectado à rede elétrica, fosse capaz de fornecer a energia necessária para a operação em base anual. O sistema de compensação utilizado para este caso seria o de autoconsumo remoto, garantido pela norma regulamentadora RN 482 da ANEEL (2012).

Para tal, foi considerado a produtividade fotovoltaica anual típica, para Porto Alegre, de 1300 kWh/kWp, equivalente a uma produtividade diária média de 3,56 kWh/kWp.

$$P_{nominal/km} = \frac{1,6 \text{ kWh}}{km} \times \frac{kWp}{3,56 \text{ kWh}} = 0,449 \frac{kWp}{km} = 449 \frac{Wp}{km \text{ diário}}$$

Considerando, para este projeto, o uso de módulos fotovoltaicos com 340Wp, com área de 1,94 m² por módulo, pode-se calcular o número de módulos necessários, em função da quilometragem percorrida diariamente.

$$num_modulos_{por \text{ km diário}} = \frac{449 \text{ Wp}}{km} \times \frac{1}{340 \text{ Wp}} = 1,32 \frac{\text{módulos fotovoltaicos}}{km \text{ rodado diariamente}}$$

Ou seja, nas condições do estudo, com uma quilometragem diária de 194,33 km, seriam necessários 257 módulos fotovoltaicos, demandando uma área de aproximadamente 500 m² para equivaler ao consumo energético de cada ônibus. De acordo com dados fornecidos pelo Portal Solar, uma instalação industrial tem um custo estimado de R\$ 3,82 por Wp (Portal Solar, 2021). Para considerar fatores como incerteza cambial, complexidade das estruturas de montagem ainda não definidas e demais fatores que não foram computados, por se tratar de um estudo preliminar, foi considerado o custo de R\$ 5,50 por Wp instalado nos sistemas fotovoltaicos, o valor total do sistema, por ônibus, considerado o percurso médio mensal da frota de Porto Alegre é de R\$ 479.897,00. Considerando a frota de 1480 ônibus, o valor total para a amortização dos custos com combustível dos veículos da frota é de R\$ 710.248.943,80.

Cabe ressaltar que o dimensionamento deste sistema fotovoltaico visa abater totalmente os custos com o deslocamento do veículo elétrico, que por estar compensando a energia consumida, consegue fixar o custo energético, trazendo mais segurança para o projeto. Dentro deste contexto, não foi realizada análise

da capacidade de instalação local do sistema, que compreende área disponível para a instalação, estrutura preexistente para fixação dos módulos e área exposta a radiação solar, sem sombreamento.

3.8 Cenários

Feitas todas as considerações de custos a serem utilizados, os cenários criados para o desenvolvimento deste trabalho serão apresentados a seguir.

3.8.1 Cenário padrão

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 considerados os custos do ônibus diesel como sendo os encontrados e atualizados na licitação de Porto Alegre.

Já a implementação dos ônibus elétricos considerou a simples substituição de um ônibus diesel por um elétrico, com sua estrutura de carregamento necessária. No cenário padrão, não foi utilizado o sistema fotovoltaico para gerar a nova demanda energética, por considerar que a geração própria de energia ainda não é usual para este fim, nos dias atuais.

3.8.2 Cenário favorável aos ônibus elétricos

Para considerar 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 RN 482 da Aneel, que garantem o direito do consumidor de gerar energia e utilizá-la para atenuar seus custos mensais. 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.

Como não se sabe com precisão os valores residuais para revenda tanto do ônibus elétrico quanto de suas baterias, foi aumentado o valor residual padrão da ferramenta, de 5%, para 15%, considerando um acréscimo no valor padrão da ferramenta de 10%, como sendo o valor residual das baterias, que podem ter, após o uso veicular, atribuições residenciais, por apresentarem alta densidade de carga e poderem realizar diversas outras operações. Considerando o banco de baterias como responsável por 50% do custo do ônibus, as baterias teriam o valor de US\$ 6.178,50 ao final de sua vida útil no ônibus.

Apesar de as taxas de juros utilizadas no cenário padrão seguirem as diretrizes do BNDES, foi adotado, para taxas de financiamentos, valores inferiores para os veículos elétricos, representando assim uma forma de subsídio e incentivo governamental à eletrificação das frotas de ônibus. Para isso, reduziu-

se o valor padrão, de 9,4% a.a, para 6% a.a.

3.8.3 Cenário favorável aos ônibus elétricos

O cenário futuro favorável aos ônibus diesel, por outro lado, baseia-se mais na não concretização das tendências de diminuição de preço esperadas para os ônibus elétricos do que na queda de custos dos veículos de combustão interna, por estes já apresentarem um amplo lastro e histórico tecnológico que dificilmente resultará em quedas abruptas de preços.

No entanto, 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 produtos do que os ônibus diesel, consolidados tanto em fabricação quanto em manutenção, em território nacional.

3.9 Composição da frota

Este trabalho visa criar um cenário representativo da realidade local no que tange a introdução de ônibus elétricos na frota de Porto Alegre. Por se tratar de algo ainda não observado na prática, optou-se por fazer análises introdutórias, contabilizando, neste estudo, as simulações da frota municipal com 10, 20 e 30% de ônibus elétricos, para os cenários propostos.

3.10 Emissões e poluentes de cada tipo de ônibus

A análise deste trabalho, em termos de emissões de poluentes, foi realizada a partir dos dados padrão da ferramenta, para o Brasil. A Tabela 8 apresenta as emissões anuais individuais, de todas as tecnologias usadas na simulação.

Tabela 8 – Análise das emissões unitárias, em toneladas anuais

Emissões (toneladas anuais)	Ônibus elétrico	Ônibus Euro 3	Ônibus Euro 5
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,00	118,36	118,36
Hidrocarbonetos totais (THC)	0,00	0,00	0,00
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,00	0,02	0,00
Metano (CH ₄)	0,00	0,00	0,00
Óxido de nitrogênio (NO _x)	0,00	0,60	0,15
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,00	0,00	0,00

Óxido nítrico (NO)	0,00	0,00	0,00
Material Particulado (MP)	0,00	0,01	0,00
Monóxido de Carbono (CO)	0,00	0,10	0,03
Gases de Efeito Estufa (GEE)	0,00	0,00	0,00
Gases de Efeito Estufa Total	0,00	119,10	118,54

Fonte: Autor (2022)

Conhecidos os impactos econômicos e ambientais de cada tipo de ônibus, é possível simular a proporção de cada tipo de veículo na frota de Porto Alegre, a partir frota circulante, de 1480 ônibus no transporte público, sem especificar a tecnologia adotada.

A análise da emissão da frota sem veículos elétricos considerou uma proporção de 50% de ônibus com tecnologia Euro 3 e 50% de ônibus com tecnologia Euro 5. Já as frotas com 10, 20 e 30% de ônibus elétricos mantiveram o número inicial de ônibus de cada tecnologia, substituindo, prioritariamente, os ônibus diesel com tecnologia Euro 3, por serem mais antigos e desatualizados, tecnologicamente.

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 TCO estimado de cada tecnologia adotada.

4.1. TCO unitário - cenário padrão

A Tabela 9 apresenta um resumo dos custos anuais unitários para cada tipo de ônibus utilizado neste trabalho, com os dados de entrada utilizados no cenário padrão. Neste cenário, o TCO do ônibus elétrico apresentou-se como 110,60% do TCO de um ônibus diesel com tecnologia Euro 5, o que implica em um custo anual 10,60% superior para cada ônibus elétrico adotado na frota.

Tabela 9 – Custo anual unitário de cada tecnologia de ônibus simulada, para o cenário padrão

Custo anual unitário - em US\$ - cenário padrão			
Custo anual unitário (US\$/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 %

Fonte: Autor (2022)

4.2. TCO unitário - cenário favorável aos ônibus elétricos

Adotados os parâmetros do cenário favorável aos ônibus elétricos, foram obtidos os resultados descritos na Tabela 10, onde o TCO do veículo elétrico apresenta-se como sendo 97,74% do TCO do ônibus diesel Euro 5, o que representa uma diminuição gradual no custo total da frota de Porto Alegre ao introduzir-se os ônibus elétricos.

Tabela 10 – Custos anual unitário de cada tecnologia de ônibus simulada, para o cenário favorável aos ônibus elétricos

Custo anual unitário - em US\$ - cenário favorável ao ônibus elétrico			
Custo anual unitário (US\$/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%

Fonte: Autor (2022)

4.3. TCO unitário - cenário favorável aos ônibus diesel

Por fim, os dados de entrada utilizados no cenário favorável aos ônibus diesel são apresentados na Tabela 11, onde pode-se notar a maior disparidade entre os ônibus diesel e elétricos de todos os cenários propostos. Para o cenário em questão, o ônibus diesel Euro 5 apresenta um TCO 18,19% menor do que o ônibus elétrico.

Tabela 11 – Custos anual unitário de cada tecnologia de ônibus simulada, para o cenário favorável aos ônibus diesel

Custo anual unitário - em US\$ - cenário favorável ao ônibus elétrico			
Custo anual unitário (US\$/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%

Fonte: Autor (2022)

4.4. Simulações: composição da frota

A partir dos cenários criados, é possível fazer uma simulação da introdução gradual dos ônibus elétricos na frota de Porto Alegre. As tabelas abaixo apresentam os resultados do não uso de ônibus elétricos e da frota com 10, 20 e 30%, respectivamente, apresentando seus custos totais anuais. Os resultados econômicos podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise da composição da frota para cada cenário criado

Custo das frotas - em US\$ - cenário padrão				
Custo total (US\$/ano)	Frota 1 (sem VE)	Frota 2 (10% VE)	Frota 3 (20% VE)	Frota 4 (30% VE)
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	\$ 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 (US\$/ônibus/km/ano)	\$ 3,04	\$ 3,07	\$ 3,10	\$ 3,14
Custo das frotas - em US\$ - cenário favorável ao ônibus elétrico				
Custo total (US\$/ano)	Frota 1 (sem VE)	Frota 2 (10% VE)	Frota 3 (20% VE)	Frota 4 (30% VE)
Custo operacional	\$ 179.197.829,88	\$ 190.318.327,28	\$ 193.098.451,63	\$ 195.878.575,98
Custo com combustível	\$ 81.103.919,98	\$ 65.036.744,45	\$ 61.019.950,57	\$ 57.003.156,69
Custo com manutenção	\$ 25.996.648,15	\$ 24.676.559,88	\$ 24.346.537,81	\$ 24.016.515,74
Custo de capital	\$ 19.852.374,01	\$ 22.340.393,27	\$ 22.962.398,45	\$ 23.584.403,62
Custo de financiamento	\$ 8.927.793,39	\$ 11.000.330,49	\$ 11.518.464,40	\$ 12.036.598,31
Custo total anual	\$ 315.078.565,42	\$ 313.372.355,37	\$ 312.945.802,86	\$ 312.519.250,34
Custo total de operação de toda vida útil	\$ 1.936.021.388,82	\$ 2.015.351.603,43	\$ 2.035.184.157,08	\$ 2.055.016.710,73
Custo total anual (US\$/ônibus/km/ano)	\$ 3,04	\$ 3,02	\$ 3,02	\$ 3,02
Custo das frotas - em US\$ - cenário favorável ao ônibus diesel				
Custo total (US\$/ano)	Frota 1 (sem VE)	Frota 2 (10% VE)	Frota 3 (20% VE)	Frota 4 (30% VE)
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	\$ 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 (US\$/ônibus/km/ano)	\$ 2,93	\$ 2,98	\$ 3,03	\$ 3,08

Fonte: Autor (2022)

4.5. Análise Qualitativa da Viabilidade

É possível perceber, com base nos dados apresentados, que os resultados finais das três simulações diferem pouco entre si, notabilizado pelo fato da variação dos parâmetros adotados ser fundamental na definição do menor TCO da tecnologia utilizada

Dos três modelos adotados, o que apresenta maior segurança econômica é o modelo elétrico com uso de sistema fotovoltaico, pois o valor gasto na operação do veículo fica congelado, não sujeito às variações de custo dos combustíveis e da energia elétrica, que usualmente apresentam reajustes superiores à inflação.

Apesar da simulação proposta considerar o abatimento total dos custos com energia elétrica, no cenário favorável aos ônibus elétricos, cabe-se ressaltar que o uso de sistema fotovoltaico para reduzir o consumo de energia não precisa, necessariamente, abater todo o gasto energético dos veículos. Em casos de incapacidade técnica, por falta de área disponível, excesso de sombreamento ou orçamento limitado, é possível utilizar um sistema reduzido, que teria custo inicial inferior e atenuaria, parcial e proporcionalmente, o consumo de energia do modal.

Os anos posteriores, não considerados neste trabalho, apresentam favorecimento aos ônibus elétricos, pois a infraestrutura instalada – de carregadores e módulos fotovoltaicos, possuem vida útil superior ao primeiro ciclo de uso dos ônibus elétricos. Estando a infraestrutura executada, as benfeitorias poderão ser utilizadas no período subsequente, sem custo residual.

Na modalidade elétrica, cabe ressaltar que os carregadores considerados podem ser compartilhados, tendo em vista que a carga suficiente para a demanda diária seria de cerca de 4 horas na garagem em 1 hora e 20 minutos no terminal nos carregadores considerados, de acordo com os fabricantes. Com uma programação adequada e horários de carregamento diferentes, estes carregadores poderiam atender outras linhas de ônibus, diluindo, com isso, o custo da infraestrutura.

4.6. Ganhos ambientais

Este estudo apresenta a relação da redução de emissão de materiais poluentes com a introdução dos veículos elétricos, pois o fato de não produzirem gases poluentes durante a operação gera uma diminuição de emissões diretamente proporcional a quantidade de veículos elétricos introduzidos. Pode-se notar, entre outras coisas, a evolução gerada pela adoção das normas Proconve, com reduções das emissões locais significativas entre um ônibus Euro 3 e Euro 5, especialmente nos poluentes locais mais críticos, como NO_x e MP. Cabe acrescentar que os estudos encontrados sobre ônibus elétricos tendem a ser enviesados, não considerando a evolução na eficiência energética que os veículos à diesel vem apresentando. A evolução das regulamentações do Proconve, devem melhorar ainda mais a redução das emissões oriundas da queima

do diesel, podendo, em um futuro próximo, frear ou reverter o cenário futuro, que neste momento parece ser favorável aos veículos elétricos.

Entretanto, é inegável que a introdução dos ônibus elétricos nas frotas causa melhora ambiental, seja qual for a tecnologia diesel adotada. Este estudo demonstrou que, mesmo a introdução gradativa destes veículos, apresenta ganhos ambientais significativos.

A Tabela 13 apresenta emissões totais ao longo da vida útil das frotas propostas, que evidencia a diferença ambiental causada pela tecnologia aplicada no transporte. A tecnologia Euro 5, empregada atualmente, apresenta nível total de gases de efeito estufa similar aos ônibus com tecnologia Euro 3, porém apresenta reduções significativas em relação a poluentes locais, como NOx e MP. Já o ônibus elétrico proposto representaria uma redução de 100% de emissão operacional com relação aos ônibus diesel, sendo possível demonstrar que a introdução 10, 20 e 30% de veículos elétricos na frota representaria uma redução de aproximadamente 17, 35 e 52 mil toneladas anuais de gases de efeito estufa, respectivamente.

Tabela 13 – Análise das emissões totais de cada uma das frotas simuladas, em toneladas anuais

Emissões da frota (toneladas anuais)	Frota sem VE	Frota 10% VE	Frota 20%VE	Frota 30%VE
Dióxido de carbono (CO ₂)	175.168,33	158.124,92	140.134,66	122.617,83
Hidrocarbonetos totais (THC)	0,00	0,00	0,00	0,00
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	18,58	15,30	11,83	8,46
Metano (CH ₄)	6,21	5,61	4,97	4,35
Óxido de nitrogênio (NO _x)	549,64	463,87	373,33	285,17
Óxido Nitroso (N ₂ O)	3,11	2,80	2,48	2,17
Óxido nítrico (NO)	0,00	0,00	0,00	0,00
Material Particulado (MP)	9,01	7,46	5,82	4,22
Monóxido de Carbono (CO)	99,75	84,77	68,96	53,57
Gases de Efeito Estufa (GEE)	0,00	0,00	0,00	0,00
Gases de Efeito Estufa Total	176.261,61	159.111,83	141.009,29	123.383,13
Redução poluição	0	17.149,78	35.252,32	52.878,48

Fonte: Autor (2022)

Portanto, é possível notar que a retirada gradual dos ônibus diesel de circulação pode importar na redução de até 52.880 toneladas anuais de gases de efeito estufa.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho conseguiu converter os dados de custos mais atuais encontrados na realidade local em dados de entrada na ferramenta utilizada para as simulações, através das quais foram demonstrados os custos e emissões da implantação de ônibus elétricos na frota pública do município de Porto Alegre. Os dimensionamentos e cotações realizados ao longo deste estudo visaram uma substituição onde o itinerário atual não sofresse mudanças devido a incapacidades técnicas do novo modo adotado. Foi possível, em um dos três cenários propostos (favorável aos ônibus elétricos), obter uma redução de custos ao introduzir os ônibus elétricos na frota. Foi apresentado neste trabalho uma possível solução de reutilização das baterias usadas dos ônibus elétricos, que são um tópico fundamental para sua implantação, além da energia fotovoltaica como forma de atenuar as novas demandas de energia elétrica.

O estudo realizado apresentou aspectos relevantes para 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.

Como diferencial, este trabalho considerou todos os custos e despesas descritos pelas empresas ganhadoras da licitação pública do município, fazendo com que os percentuais de variação de custos sejam expostos com base nos custos totais da operação. Os cenários criados permitem a avaliação do peso de cada parâmetro em relação às incertezas futuras.

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 da 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 aponta 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 em relação a peças, componentes e mão de obra. Para este cenário, o TCO do veículo elétrico foi 18% superior aos modelos diesel.

Se, por um lado, a análise econômica ainda apresenta incertezas com relação melhor tecnologia a ser adotada, a análise ambiental não deixa dúvida que os ônibus elétricos são superiores aos veículos de combustão interna. Os dados encontrados evidenciam que a operação sem geração de poluentes por parte dos elétricos diminui muito as emissões locais. Apesar da não obtenção de dados precisos em relação à geração de poluentes do meio à roda, a análise do Balanço Energético Nacional aponta maior percentual de uso energia renovável na geração elétrica brasileira do que na industrialização dos combustíveis fósseis, indicando ganho ambiental ao implementar a eletrificação das frotas.

Ao fazer uma análise de longo prazo, para o período posterior ao examinado neste 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 proveitoso, 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 economicamente é necessário um período de uso superior à idade média dos ônibus atuantes em Porto Alegre. No que concerne ao aspecto ambiental, entretanto, 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.

Os desafios para trabalhos futuros ainda se mantêm, principalmente com relação à qualidade da informação disponível acerca dos veículos elétricos e sua performance técnica e econômica no cenário local. As incertezas especialmente em relação ao valor residual dos ônibus elétricos e suas baterias, além da insegurança quanto a sua revenda ainda demandam estudos especializados.

De maneira geral, a decisão da adoção de ônibus elétricos em função dos ganhos ambientais e sociais é majoritariamente governamental, 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, para o período posterior à concessão.

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.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, ficam aqui alguns tópicos relevantes para serem abordados:

- Exploração de diferentes estratégias e modelos de negócio para implementação dos ônibus elétricos nas frotas brasileiras
- Mapeamento dos principais agentes do transporte público municipal brasileiro e seus benefícios e receitas quanto à eletrificação das frotas
- Teste das possibilidades de reutilização das baterias usadas nos ônibus como armazenadoras na geração de energia fotovoltaica, como uma alternativa de segunda vida para as baterias
- Análise do TCO para ônibus elétricos após os primeiros 15 anos de implantação, quando a infraestrutura já estiver adequada e amortizada
- Criação de uma tabela para cálculo de TCO e emissões similar a de Cooper et al (2019), com maior especificidade e riqueza de dados no cenário brasileiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABVE. **IPVA – para veículos elétricos**. 2017. Disponível em: <http://www.abve.org.br/ipva-para-veiculos-eletricos/>. Acesso em 22/01/2022.

ANUÁRIO NTU: 2017-2018 / Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Brasília: NTU, 2018.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: História e perspectivas no Brasil. **BNDES Setorial**, v. 33, p. 207–224, 2011.

BARASSA, E.; CRUZ, R.; MORAES, H. **1º ANUÁRIO BRASILEIRO DE MOBILIDADE ENERGÉTICA, PLATAFORMA NACIONAL DA MOBILIDADE ELÉTRICA**. Brasília e Rio de Janeiro. PNME, 2020. Disponível em: <https://www.pnme.org.br/biblioteca/1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>. Acesso em 31/05/2021.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **CALCULADORA DO CIDADÃO**. 2022. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/acessoinformacao/calculadoradocidadao>. Acesso em 22/01/2022.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. 2018. **Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2**. Disponível em: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=em_US. Acesso em 12/01/2022.

BUZATTO, H.; GORTZ, M.; OLIVEIRA, L.; LOCATELLI, S.; KAKINOHANA, E.; CATAPAN. Transporte público elétrico em Curitiba: é possível. **ANTP-Revista dos transportes públicos** v. 153 p. 8-24, 2019.

BYD – CHASSIS DE ÔNIBUS 100% ELÉTRICOS. Disponível em: <https://www.byd.com.br/chassi-byd-d9w-20-410/>. Acesso em 26/01/2022.

CASTRO, B. H. R. DE; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. DA. 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, 2013.

CASTRO, B. H. R. DE; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial** 32, p. 267–310, 2010.

CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2019. São Paulo, SP, 2020. 137p. (Série de Relatórios)**, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf>. Acesso em 22/01/2022.

CETESB. **PCPV Plano de Controle de Poluição Veicular 2020 – 2022**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2021/01/PCPV-Plano-de-Controle-de-Poluicao-Veicular-do-Estado-de-Sao-Paulo-2020-2022.pdf>. Acesso em 22/01/2022.

COOPER, E.; KENNEY, E.; VELASQUEZ, J. M.; LI, X.; TUN, T. H. **Costs and Emissions Appraisal Tool for Transit Buses. Technical Note**. Washington, DC: World Resources Institute, 2019. Disponível em: www.wri.org/publication/transit-buses-tool. Acesso em 31/05/2021.

C40/ISSRC. **Low carbon technologies can transform Latin America’s bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Eletrical**. 2013. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Low-Carbon-Technologies-Can-Transform-Latin-America-Bus-Fleets.pdf>. Acesso em 31/05/2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese 2021 Ano base 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em 10/01/2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE ÔNIBUS ELÉTRICO NO BRASIL**. Nota técnica, 2020. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/wp-content/uploads/2020/09/NT-SEE-SDB-Avaliacao-Tecnico-Economica-de-Onibus-Eletrico-no-Brasil.pdf>. Acesso em 10/01/2022.

EPTC. **Pesquisa de Satisfação Qualionibus Porto Alegre**. 2019. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/eptc/usu_doc/eptc_pesquisa_qualionibus_2019.pdf. Acesso em 31/05/2021.

GUENTHER, P. R.; PADILHA, T. D. **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.

GOHLICH, D.; FAY, T.; JEFFERIES, D.; LAUTH, E.; KUNITH, A.; ZHANG, X. Design of urban electric bus systems. **Design Science**, 4, E15. Disponível em: doi:10.1017/dsj.2018.10. 2018.

HALL, D.; LUTSEY, N. **Emerging best practices for electric vehicle charging infrastructure.** **International Council on Clean Transportation.** 2017. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-charging-best-practices_ICCT-white-paper_04102017_vF.pdf. Acesso em 23/01/2022.

HALL, D.; LUTSEY, N. **Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions.** **International Council on Clean Transportation.** 2018. Disponível em: <https://theicct.org/publication/effects-of-battery-manufacturing-on-electric-vehicle-life-cycle-greenhouse-gas-emissions/>. Acesso em 23/01/2022.

IBGE. **Panorama de Porto Alegre.** 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>. Acesso em 31/05/2021.

ICCT. **BENEFÍCIOS DE TECNOLOGIAS DE ÔNIBUS EM TERMOS DE EMISSÕES DE POLUENTES DO AR E DO CLIMA EM SÃO PAULO.** 2019. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Emissions_benefits_bus_sao_paulo_Port_20190201.pdf. Acesso em 22/01/2022.

IEA - International Energy Agency. **Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive?** 2020. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf. Acesso em 22/01/2022.

IEA International Energy Agency. **Global electric vehicle stock by region, 2010-2020**, IEA, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-vehicle-stock-by-region-2010-2020>IEA. Acesso em 07/03/2022.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Desafios da mobilidade urbana no Brasil.** 2016.

Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6664/1/td_2198.pdf. Acesso em 12/01/2022.

LEURENT, F.; WINDISCH, E. Triggering the development of electric mobility: a review of public policies. **European Transport Research Review**. 3, 221–235, 2011.

LIMA, G.; SILVA, G.; NETO, G. Mobilidade elétrica: o ônibus elétrico aplicado ao transporte público no Brasil. 2019. **Revista dos Transportes Públicos – ANTP**. v 152 p. 53-72. 2019.

MAHMOUD, M.; GARNETT, R.; FERGUSON, M.; KANAROGLU, P. Electric buses: A review of alternative powertrains. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>. 2016.

MALUF FILHO, A. F. **Avaliação do ciclo de vida de diferentes tecnologias de ônibus: Eficiência energética e emissões de poluentes em operação real**. Disponível em: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/10/07/5B72F3AA-0DC5-468E-A6F7-17474BBD1FB8.pdf. Acesso em 31/05/2021. 2013.

MCTIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. 2015. **ACORDO DE PARIS**. 2015. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf. Acesso em 14/03/2022

MILLER, J. **Effect of P-8 standards on bus system costs in Brazil**. **International Council on Clean Transportation**. 2017. Disponível em: www.theicct.org/sites/default/files/publications/Brazil-bus-fare-briefing_ICCT_14042017_vF.pdf. Acesso em 12/01/2022.

MILLER, J.; MINJARES, R.; DALLMANN, T.; JIN, L. Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities. **International Council on Clean Transportation**. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/financing-transition-soot-free-urban-bus-fleets-20-megacities>. Acesso em 12/01/2022. 2017.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÕES DO CONAMA**. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>. Acesso em 12/01/2022.

RUTHER, R. **A Revolução das Baterias e a Ameaça Real de Deserção da Rede**. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cffc/apresentacoes-em-eventos/2019/20-11-19-ricardo-ruther>. Acesso em 22/01/2022. 2021.

PORTAL SOLAR. **Painel Solar: Preços e Custos de Instalação**. 2022. Disponível em <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>. Acesso em 11/03/2022

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 22/01/2022.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **LEI Nº 14.933, DE 5 DE JUNHO DE 2009**. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/comite_do_clima/legislacao/leis/index.php?p=15115. Acesso em 14/03/2022.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **LEI Nº 16.802, DE 17 DE JANEIRO DE 2018**. Disponível em: <http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>. Acesso em 14/03/2022.

PROMOB-e - Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**, 2018. Disponível em: <https://theicct.org/publication/avaliacao-internacional-de-politicas-publicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas/>. Acesso em 22/01/2022.

STANGUETO, K.; SILVA, E. Análise do suprimento de frota de veículos elétricos por usina solar fotovoltaica de 1MWp. **ANTP- Revista dos transportes públicos** v. 141 p. 109-124, 2015.

THE WORLD BANK BLOGS. **The transition to low-carbon buses in Mexico: it's not (only) about the money**. **World Bank Transport for Development** blog, 2017. Disponível em: <https://blogs.worldbank.org/transport/transition-low-carbon-buses-mexico-it-s-not-only-about-money>. Acesso em 12/01/2022.

WEG/Fale conosco. **Modelos de estações de carregamento de veículos elétricos** (mensagem pessoal). Mensagem recebida por: rugeriguilherme@gmail.com em: 21/05/2021

7. ANEXOS

Table A.1 | Description of input data

INPUT	DESCRIPTION	
Annual operations data	Records all operating costs incurred in a year, including the total cost of driver and on-board labor, electricity use and cost, fuel economy and cost, fuel cost projections, fuel additive cost, fuel station operating costs, insurance, and additional operating costs. Options do not include inputs for national or local subsidies. Users can populate the values automatically, using the default values.	
Emissions factors	Asks user to input values for exhaust and upstream emissions or select default data. Exhaust emissions refer to the emissions caused directly by the bus, including carbon monoxide (CO), total hydrocarbons (THC), nitrogen oxides (NO _x), particulate matter (PM), carbon dioxide equivalent (CO ₂ e), and greenhouse gas/carbon dioxide equivalent (GHG/CO ₂ e). Upstream emissions refer to the emissions caused during fuel production, including GHG/CO ₂ e and PM.	
Fleet-specific data	Provides information about the bus and how it will be financed, including the useful life of the bus; the final purchase price per bus; the residual value; and the down payment, loan interest rate, and loan tenure. (The interest rate and tenure are input as zero if the operator does not plan to finance the bus purchase.)	
Infrastructure	Takes into account any capital-related, one-time updates or construction. Parameters include depot/fuel station construction cost and the number of buses it refers to, depot/fuel station retrofit cost and the number of buses it refers to, and special tools and the number of buses it refers to. Users can populate the values with local data if this is relevant.	
Maintenance data	Records all maintenance data. Users can report maintenance as a fixed annual cost per bus or as itemized costs with prescribed frequencies. Itemized costs include annual maintenance labor; the cost and frequency of brake reline, tires, battery conditioning, diesel particulate filter (DPF) cleaning, fuel station maintenance, and lubricant; and any additional annual maintenance costs. Users can populate the values with default option or local data.	
Overhaul or retrofitting	Considers all vehicle retrofits or overhauls that might take place over the vehicle's useful life. Parameters include the cost and frequency of engine overhaul, transmission overhaul, compressed natural gas (CNG) fuel system overhaul, hybrid system overhaul, battery replacement, and vehicle retrofit. Users can populate the values with local data.	
Additional maintenance costs	\$/year/bus	Maintenance costs not covered in previous categories. Costs included should also be included in subsequent bus types and fleets, to remain consistent.
Additional operational costs	\$/year/bus	Operations costs not covered in previous categories. Costs included should also be included in subsequent bus types and fleets, to remain consistent.
Annual (individual) bus distance traveled	Km/year/bus	Average annual distance each bus travels for each bus type
Battery conditioning	\$/bus; years	Cost and frequency of battery conditioning
Battery replacement	\$/bus; years	Cost and frequency of battery replacement
Brake reline	\$/bus; years	Cost and frequency of brake relining
Bus length	Meters	Bus length (12 meters [standard] or 18 meters [articulated])
Compressed natural gas (CNG) fuel system overhaul	\$/bus; years	Cost and frequency of transmission overhaul (applies only if bus type includes CNG)
Country	Brazil or United States	
Depot/fuel station construction	\$/bus quantity	Cost of and capacity for constructing a station for each bus type
Depot/fuel station retrofit	\$/bus quantity	Cost of and capacity for fuel station retrofitting for each bus type
Discount rate	Percent	Figures vary widely around the world. The public discount rate is 3–7 percent for high-income countries and 8–15 percent for the Global South, depending on the country's socioeconomic conditions (Zhuang et al. 2007). For private companies, the value also differs greatly; users should input their own data, based on local conditions. Users are encouraged to perform sensitivity analysis using different discount rates.

Table 3.4 | Default cost data for Brazil

FUEL	DIESEL-ELECTRIC HYBRID (10 PPM)		ELECTRIC		ULTRA-LOW SULFUR DIESEL (10 PPM)	
	12M		12M		18M	
Fleet-specific data						
Useful life of bus (years)	12		15		10	
Final purchase price for a single bus (\$/bus)	322,500		537,500		215,000	
Residual value (percent of final purchase price)	10		5		10	
Down payment (percent of total cost)	20		20		30	
Loan interest rate (percent)	9.9		9.4		9.9	
Loan life (years)	9		14		9	
Annual operations data						
Energy use (kwh/km)			1.3			
Energy cost (\$/kwh)			0.215			
Fuel consumption (L/100km)	41.5				45.0	
Fuel cost (\$/L)	1.43				1.43	
Maintenance data						
Fixed annual maintenance cost (\$/year/bus)	19,350		7,310		12,900	

Table 3.5 | Default emissions data for Brazil

FUEL	ULTRA-LOW SULFUR DIESEL (10PPM)			DIESEL-ELECTRIC HYBRID (10 PPM)	ELECTRIC	
	EURO V		EURO III			EURO V
	12M	12M	18M			12M
Carbon dioxide (CO ₂), g/L	2,603	2,603	2,603	2,352		
Non-methane hydrocarbons (NMHC), g/km	0.033	0.326	0.033	0.46		
Methane (CH ₄), g/km	0.06	0.06	0.06	0.06		
Nitrogen oxide (NO _x), g/km	2.103	8.515	2.103	1.70		
Nitrous oxide (N ₂ O), g/km	0.03	0.03	0.03	0.03		
Particulate matter (PM), g/km	0.02	0.154	0.02	0.02		
Carbon monoxide (CO), g/km	0.44	1.487	0.44	1.55		
Upstream GHG/CO ₂ e, g/km					179	
Total GHG, g/km					179	

Table 3.6 | Formulae for calculating lifetime costs

COST	FORMULA
Capital (or upfront procurement) cost	<p>For each bus type, the present value (PV) of the capital cost includes any down payment, residual value, infrastructure, and principal over the course of the loan's lifetime (if there is a loan). Infrastructure costs can be included either as part of the overall capital cost or separately, under depot/infrastructure cost. Total capital costs are calculated over the course of the bus's useful life, as follows:</p> $\text{PV of Lifetime Capital Cost} = DP - BR + IF + \sum_{i=1}^L \frac{P_i}{(1+r)^i}$ <p>where DP = down payment; BR = PV of bus's residual value (BRV) = $\frac{BRV}{(1+r)^L}$ IF = infrastructure cost; P_i = principal in year i; r = discount rate; and L = bus useful life.</p>
Financing cost	<p>For each bus type, the financing cost is based on the interest on the loan financing the bus purchase:</p> $\text{PV of Lifetime Financing} = \sum_{i=1}^L \frac{I_i}{(1+r)^i}$ <p>where I_i = interest in year i; r = discount rate; and L = bus useful life.</p>
Additional depot/infrastructure cost	<p>For each bus type, the (additional) depot/infrastructure cost is considered a one-time cost in the initial year (year 0). It is calculated based on the depot/fuel station construction cost, the depot/fuel station retrofit cost, and the cost of other special tools:</p> $\text{Additional Depot/Infrastructure Cost} = N \times \left(\frac{C}{N_C} + \frac{R}{N_R} + \frac{SP}{N_{SP}} \right)$ <p>where N = number of buses within a bus type; C = depot/infrastructure construction cost; N_C = number of buses that share the depot/infrastructure; R = depot/infrastructure retrofit; N_R = number of buses that share the depot/infrastructure retrofit; SP = special tools cost; and N_{SP} = number of buses that share the special tools.</p>
Annual cost of each bus type	$\frac{PV * r}{1 - (1+r)^{-L}}$ <p>where PV = net present value for each cost type (from table 3.6); r = discount rate; and L = bus useful life. (Note: A built-in Excel function, $-PMT()$, is used to calculate this equivalent annual cost.)</p>
Annual unit cost of each bus type	$\frac{A}{N}$ <p>where A = annual cost for all buses within a bus type and N = number of buses within a bus type.</p>
Annual unit cost of each bus type traveling for one kilometer	$\frac{A}{d * N}$ <p>where A = annual cost for all buses within a bus type; N = number of buses within a bus type; and d = annual bus distance traveled.</p>
Annual unit cost of each bus fleet traveled for one kilometer	$\frac{A_F * n}{\sum_{i=1}^n (d_i * N_i)}$ <p>where A_F = annual cost for all buses within a bus fleet; n = number of bus types within a bus fleet; d_i = annual bus distance traveled for bus type i; and N_i = number of buses within bus type i.</p>

Table 3.6 | Formulae for calculating lifetime costs

COST	FORMULA
<p>Total operating cost</p>	<p>For each bus type, the total operating cost is broken down into operating cost (driver labor, fuel station operation cost, insurance cost, etc.); fuel cost; maintenance cost; and overhaul cost (not all of these costs are required for the calculation). The formula does not subtract out any national or local subsidies (e.g., for electric buses), although they could strongly affect the costs for fleet operators.</p> <p style="text-align: center;">PV of Lifetime Total Operating Cost = PV of Lifetime Operating Cost + PV of Lifetime Fuel Cost + PV of Lifetime Maintenance Cost + PV of Lifetime Overhaul Cost</p> <p style="text-align: center;">PV of Lifetime Operating Cost = $N = \sum_{t=1}^L (FSO + DL + IN + AO) \frac{1}{(1+r)^t}$</p> <p>where N = number of buses within a bus type; FSO = lump-sum number for operating costs related to fuel stations; DL = driver labor; IN = insurance; AO = additional operating costs; r = discount rate; and L = bus useful life.</p> <p style="text-align: center;">PV of Lifetime Fuel Cost = $N = \sum_{t=1}^L d \times 0.01 \times FE \times (FA + FC) \times \frac{(1+p)^t}{(1+r)^t}$</p> <p>where N = number of buses within a bus type; d = annual bus distance travelled; FE = fuel consumption (fuel economy, in liters per 100 kilometers); FA = fuel additive (\$ per liter); FC = fuel cost (\$ per liter); p = fuel cost projection; r = discount rate; and L = bus useful life.</p> <p style="text-align: center;">PV of Lifetime Maintenance Cost = $N \sum_{t=1}^L \frac{(FAM + AM + ML + \alpha BR + \beta TI + \gamma BC + dDC + \phi FSM + \mu LU)_t}{(1+r)^t}$</p> <p>$\alpha, \beta, \gamma, d, \phi,$ and μ are 1, for $\Gamma \frac{t}{bf, tf, bcf, df, fs, \text{ and } lf}$ respectively Γ = integer; otherwise 0</p> <p>where N = number of buses within a bus type; FAM = fixed annual maintenance cost; AM = additional maintenance cost; ML = maintenance labor; BR = brake reline cost; bf = brake reline frequency; TI = tires cost; tf = tire frequency; BC = battery conditioning cost; bcf = battery conditioning frequency; DC = diesel particulate filter (DPF) cleaning cost; df = DPF cleaning frequency; FSM = fuel station maintenance cost; fs = fuel station maintenance frequency; LU = lubricant cost; lf = lubricant frequency; r = discount rate; and L = bus useful life.</p> <p style="text-align: center;">PV of Lifetime Overhaul Cost = $N \sum_{t=1}^L \frac{(\sigma EO + \tau TO + xCF + \omega HS + \rho BA + \xi VR)_t}{(1+r)^t}$</p> <p>$\sigma, \tau, x, \omega, \rho,$ and ξ are 1, for $\Gamma \frac{t}{eof, tof, cof, hos, brf, \text{ and } vf}$ respectively Γ = integer; otherwise 0</p> <p>where N = number of buses within a bus type; EO = engine overhaul cost; eof = engine overhaul frequency; TO = transmission overhaul cost; tof = transmission overhaul frequency; CF = CNG system overhaul cost; cof = CNG system overhaul frequency; HS = hybrid system overhaul cost; hos = hybrid system overhaul frequency; BA = battery replacement cost; brf = battery replacement frequency; VR = vehicle retrofits; vf = vehicle retrofits frequency; r = discount rate; and L = bus useful life.</p>

Table 3.7 | Formulae for calculating unit costs

COST	FORMULA
Annual cost of each bus type	$\frac{PV * r}{1 - (1+r)^{-L}}$ <p>where PV = net present value for each cost type (from table 3.6); r = discount rate; and L = bus useful life. (Note: A built-in Excel function, $-PMT()$, is used to calculate this equivalent annual cost.)</p>
Annual unit cost of each bus type	$\frac{A}{N}$ <p>where A = annual cost for all buses within a bus type and N = number of buses within a bus type.</p>
Annual unit cost of each bus type traveling for one kilometer	$\frac{A}{d * N}$ <p>where A = annual cost for all buses within a bus type; N = number of buses within a bus type; and d = annual bus distance traveled.</p>
Annual unit cost of each bus fleet traveled for one kilometer	$\frac{A_F * n}{\sum_{i=1}^n (d_i * N_i)}$ <p>where A_F = annual cost for all buses within a bus fleet; n = number of bus types within a bus fleet; d_i = annual bus distance traveled for bus type i; and N_i = number of buses within bus type i.</p>

Fonte: Cooper et al. (2019)

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIODIESEL - ANP
 COORDENADORIA DE DEFESA DA CONCORRÊNCIA
 SISTEMA DE LEVANTAMENTO DE PREÇOS

Síntese dos Preços Praticados - RIO

GRANDE DO SUL

Resumo II - OLEO DIESEL R\$/l

Período: De 10/10/2021 a 16/10/2021

DADOS MUNICIPIO					
MUNICIPIO	Nº DE POSTOS PESQUISADOS	Preço Consumidor			
		PREÇO MÉDIO	DESVIO PADRÃO	PREÇO MÍNIMO	PREÇO MÁXIMO
ALEGRETE	6	4,986	0,084	4,89	5,099
ALVORADA	4	4,867	0,022	4,849	4,899
BAGE	8	5,39	0,093	5,249	5,489
BENTO GONCALVES	5	4,689	0,09	4,639	4,849
CACHOEIRA DO SUL	7	4,941	0,237	4,69	5,249
CACHOEIRINHA	8	4,613	0,055	4,549	4,699
CANOAS	10	4,669	0,082	4,549	4,779
CAXIAS DO SUL	14	4,827	0,247	4,049	5,199
ESTEIO	5	4,749	0,15	4,599	4,999
GRAVATAI	10	4,653	0,014	4,639	4,669
GUAIBA	8	4,743	0,144	4,659	5,069
LAJEADO	4	4,786	0,165	4,629	5,018
NOVO HAMBURGO	10	4,623	0,108	4,499	4,799
OSORIO	4	4,649	0,1	4,599	4,799
PELOTAS	12	4,983	0,193	4,779	5,327
PORTO ALEGRE	7	4,733	0,118	4,569	4,899
RIO GRANDE	7	4,942	0,141	4,789	5,124
SANTA CRUZ DO SUL	8	4,785	0,133	4,649	4,989
SANTA MARIA	7	4,996	0,113	4,799	5,149
SANTA ROSA	6	4,919	0,094	4,809	5,09
SANTANA DO LIVRAMENTO	4	5,172	0,137	4,989	5,299
SANTO ANGELO	7	5,006	0,173	4,89	5,39
SAO GABRIEL	7	4,819	0,063	4,749	4,899
SAO LEOPOLDO	9	4,593	0,07	4,519	4,719
SAO LUIZ GONZAGA	4	4,88	0,148	4,79	5,099
SAPUCAIA DO SUL	8	4,595	0,05	4,569	4,699
TORRES	3	4,749	0,05	4,699	4,799
VIAMAO	3	4,754	0,221	4,499	4,897

Data de Emissão : 20/10/2021

Fonte: ANP (2021)

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP
 COORDENADORIA DE DEFESA DA CONCORRÊNCIA
 SISTEMA DE LEVANTAMENTO DE PREÇOS

Síntese dos Preços Praticados - RIO

GRANDE DO SUL

Resumo II - OLEO DIESEL S10 R\$/l

Período: De 10/10/2021 a 16/10/2021

DADOS MUNICIPIO					
MUNICIPIO	Nº DE POSTOS PESQUISADOS	Preço Consumidor			
		PREÇO MÉDIO	DESVIO PADRÃO	PREÇO MÍNIMO	PREÇO MÁXIMO
ALEGRETE	5	5,081	0,058	4,99	5,149
ALVORADA	2	4,904	0,078	4,849	4,959
BAGE	9	5,507	0,114	5,349	5,659
BENTO GONCALVES	9	4,807	0,07	4,749	4,928
CACHOEIRA DO SUL	7	4,983	0,228	4,73	5,299
CACHOEIRINHA	7	4,693	0,113	4,599	4,899
CANOAS	15	4,732	0,147	4,399	4,969
CAXIAS DO SUL	15	4,973	0,101	4,849	5,299
ESTEIO	6	4,802	0,166	4,649	5,099
GRAVATAI	10	4,695	0,024	4,669	4,749
GUAIBA	8	4,807	0,158	4,699	5,139
LAJEADO	6	4,81	0,108	4,649	4,968
NOVO HAMBURGO	13	4,662	0,107	4,539	4,859
OSORIO	6	4,759	0,138	4,649	4,999
PELOTAS	12	5,083	0,178	4,859	5,387
PORTO ALEGRE	24	4,85	0,219	4,489	5,299
RIO GRANDE	10	5,009	0,115	4,879	5,174
SANTA CRUZ DO SUL	8	4,894	0,153	4,749	5,149
SANTA MARIA	8	5,039	0,15	4,799	5,259
SANTA ROSA	7	4,988	0,073	4,909	5,14
SANTANA DO LIVRAMENTO	6	5,148	0,129	4,999	5,349
SANTO ANGELO	7	5,001	0,034	4,96	5,069
SAO GABRIEL	7	4,919	0,063	4,849	4,999
SAO LEOPOLDO	11	4,698	0,119	4,595	4,999
SAO LUIZ GONZAGA	3	4,966	0,201	4,85	5,199
SAPUCAIA DO SUL	7	4,65	0,076	4,599	4,799
TORRES	5	4,827	0,031	4,799	4,87
URUGUAIANA	6	4,913	0,028	4,89	4,949
VIAMAO	4	4,851	0,145	4,639	4,967

Data de Emissão : 20/10/2021

Fonte: ANP (2021)