



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO,
CONTABILIDADE E GESTÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS - FACE
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

PEDRO LUIZ SANTOS BASTOS

**TRANSIÇÃO PARA A ELETROMOBILIDADE DO TRANSPORTE PÚBLICO NO
DISTRITO FEDERAL: ESTUDO DE VIABILIDADE E VALORAÇÃO DOS
BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E SOCIAIS**

BRASÍLIA, DF

2023

PEDRO LUIZ SANTOS BASTOS

**TRANSIÇÃO PARA A ELETROMOBILIDADE DO TRANSPORTE PÚBLICO NO
DISTRITO FEDERAL: ESTUDO DE VIABILIDADE E VALORAÇÃO DOS
BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E SOCIAIS**

Monografia apresentada ao Departamento
de Economia da Universidade de Brasília
como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique
Zuchi da Conceição

BRASÍLIA, DF

2023

PEDRO LUIZ SANTOS BASTOS

**TRANSIÇÃO PARA A ELETROMOBILIDADE DO TRANSPORTE PÚBLICO NO
DISTRITO FEDERAL: ESTUDO DE VIABILIDADE E VALORAÇÃO DOS
BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E SOCIAIS**

Monografia apresentada ao Departamento
de Economia da Universidade de Brasília
como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Ciências Econômicas.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição
Orientador

Profa. Dra. Daniela Freddo
Examinadora

BRASÍLIA, DF

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, em especial à minha mãe Andréa, ao meu pai José e ao meu irmão Gabriel. Sou muito grato por tudo que vocês já fizeram por mim. Agradeço por todo o sacrifício para sempre me proporcionar o melhor, todos os conselhos, abraços, momentos e carinho. Tudo que eu sou eu devo a vocês e sou muito feliz por tê-los ao meu lado.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, que com muito orgulho chamo de irmãos, Sasso e Ricardo. Sou extremamente grato por todos os momentos que já vivemos e ainda vamos viver, a companhia de vocês torna toda a caminhada mais fácil, e quero levar a nossa amizade para o resto da vida. Mesmo que distantes uns dos outros, estaremos sempre juntos.

Gostaria de agradecer às amigadas que fiz na UnB, compartilhar esta jornada com vocês foi incrível. Todas as alegrias, desabafos, desesperos e festas que compartilhamos são memórias que jamais irei esquecer. A presença de vocês fez todo o processo ser mais leve, fazer tudo isso sozinho teria sido muito mais difícil.

Gostaria de agradecer à Universidade de Brasília e a todos os professores que tive ao longo desses anos por contribuírem tanto com a minha formação. Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador, Pedro Zuchi, pela colaboração e paciência na elaboração deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que já cruzaram a minha vida, a vivência com cada um de vocês me fez quem eu sou. Muito obrigado!

RESUMO

A poluição atmosférica representa uma preocupação crescente à sociedade, haja vista os efeitos negativos que ela pode causar sobre a saúde humana e o meio ambiente. Dentre os causadores desta poluição, destacam-se os veículos movidos por combustíveis fósseis, cujo processo de combustão interna expõe gases e partículas comprometedoras à natureza e ao bem-estar social. Em vista disso, a busca por meios de transporte ecologicamente responsáveis foi intensificada nos últimos anos, com os veículos elétricos ganhando protagonismo em virtude da maior sustentabilidade destes modelos. Dado o exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade econômico-financeira da utilização de ônibus elétricos no Distrito Federal. Para tanto, a ferramenta escolhida para realização deste estudo é a Análise Custo-Benefício, a qual avalia a viabilidade do projeto tanto para o acionista como para a sociedade. Como importante parte da avaliação social, estão as projeções das externalidades provenientes do projeto, estimadas de acordo com as emissões evitadas de poluentes, tais como os gases de efeito estufa e material particulado. Através dos resultados, foi possível concluir que as principais barreiras à introdução desta tecnologia no Brasil dizem respeito ao investimento necessário para aquisição dos veículos, em processo que pode ser ainda mais dificultado em um contexto de política monetária contracionista de maior inacessibilidade ao crédito. A viabilidade do projeto para as operadoras de transporte é assegurada pelos atuais modelos de concessão de exploração do transporte coletivo. Por outro lado, espera-se uma maior resistência do órgão público responsável pela licitação de apoiar a proposta dos ônibus elétricos tendo em vista que isto significaria repasses governamentais mais elevados, resistência que pode ser ainda mais forte em um cenário de rigidez fiscal. Os indicadores calculados sugerem uma maior atratividade do projeto para a sociedade do que para o acionista, conforme esperado. Isto se deve, além das projeções de externalidades, às distorções entre os preços de mercado utilizados na análise de viabilidade privada e os preços sombra adotados na avaliação social. Ressalta-se, entretanto, as prováveis imprecisões da valoração das externalidades tendo em vista as limitações dos dados utilizados no trabalho.

Palavras-chave: viabilidade econômico-financeira, Análise Custo-Benefício, ônibus elétricos, emissões veiculares, Distrito Federal.

ABSTRACT

Air pollution is a growing concern for society, given the negative effects it can have on human health and the environment. Among the causes of air pollution, vehicles powered by fossil fuels stand out, whose internal combustion process expels gases and particles that compromise nature and social well-being. Therefore, the search for ecologically responsible means of transport has been intensified in recent years, with electric vehicles gaining prominence due to the greater sustainability of these models. The purpose of this study is to evaluate the economic and financial feasibility of using electric buses in Distrito Federal (Brazil). Thus, the tool chosen for this study is the Cost-Benefit Analysis, which evaluates the viability of the project both for the shareholder and for society. As an important part of the social evaluation, there are the projections of externalities produced from the project, estimated according to the avoided emissions of pollutants, such as greenhouse gases and particulate matter. Through the results, it was possible to conclude that the main barriers to the introduction of this technology in Brazil are related to the investment required for the acquisition of vehicles, in a process that can be even more difficult in a context of contractionary monetary policy of greater inaccessibility to credit. The viability of the project for transport operators is ensured by the current public transport concession models. On the other hand, greater resistance is expected from the public agency responsible for the bidding to support the proposal for electric buses, considering that this would mean higher government transfers, resistance that may still be strong in a scenario of fiscal rigidity. The calculated indicators suggest a greater attractiveness of the project for society than for the shareholder, as expected. This is due, in addition to externality projections, to distortions between the market prices used in the private feasibility analysis and the shadow prices adopted in the social evaluation. It should be noted, however, the probable inaccuracies in the valuation of externalities since the limitations of the data used in the study.

Keywords: economic-financial viability, Cost-Benefit Analysis, electric buses, vehicle emissions, Distrito Federal.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Veículos registrados no Brasil e emissões veiculares de CO ₂ (2001 – 2021)	17
Gráfico 2 - Participação dos gases de efeito estufa na contribuição ao aquecimento global.....	19
Gráfico 3 - Evolução da idade média da frota de ônibus urbanos no Brasil (1995 – 2021)	23
Gráfico 4 – Participação nas emissões de CO ₂ por categoria de veículos (2001 – 2021)	24
Gráfico 5 – Quantidade de ônibus e CO ₂ emitido pelos ônibus no DF	29
Gráfico 6 – Frota de ônibus elétricos na América Latina	41
Gráfico 7 – Distribuição dos ônibus elétricos no Brasil.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de fontes de poluição, processos atmosféricos e receptores	20
Tabela 2 – Fontes de poluentes e efeitos ao meio ambiente e à saúde	21
Tabela 3 – Padrões de qualidade do ar	26
Tabela 4 – Níveis críticos de concentração de poluentes	26
Tabela 5 – Índice de Qualidade do Ar (IQA)	32
Tabela 6 – Qualidade do ar e efeitos sobre a saúde	32
Tabela 7 - Políticas nacionais benéficas à eletromobilidade	42
Tabela 8 - Impactos macroeconômicos da nacionalização da produção de ônibus elétricos e seus componentes	45
Tabela 9 - Variáveis principais do fluxo de caixa	47
Tabela 10 - Bacias de operação de ônibus	49
Tabela 11 – Linhas escolhidas para a substituição	50
Tabela 12 – Classificação de projetos	55
Tabela 13 – Fatores de emissão, custos por tonelada e PAG	61
Tabela 14 - CAPEX	62
Tabela 15 – OPEX	63
Tabela 16 – Indicadores de viabilidade privada	65
Tabela 17 – Emissões evitadas no ano 1 e valoração econômica	66
Tabela 18 – Indicadores de viabilidade social	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B/C	Relação Benefício-Custo
BCB	Banco Central do Brasil
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BNEF	<i>Bloomberg New Energy Finance</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CAPM	<i>Capital Asset Pricing Model</i>
CCAC	<i>The Climate and Clean Air Coalition</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CMPC	Custo Médio Ponderado do Capital
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CSC	Custo Social do Carbono
C40	<i>Climate Leadership Group</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GDF	Governo do Distrito Federal
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM	Instituto Brasília Ambiental
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
ME	Ministério da Economia

MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
N ₂ O	Óxido Nitroso
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
O ₃	Ozônio
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RMS	Região Metropolitana de Salvador
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SDI	Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SEMA-DF	Secretaria do Meio Ambiente do Distrito Federal
SEMARH	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SEMOB	Secretaria de Transporte e Mobilidade
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TIR	Taxa Interna de Retorno
TSD	Taxa Social de Desconto
VPL	Valor Presente Líquido
WACC	<i>Weighted Average Capital Cost</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 EMISSÕES VEICULARES.....	15
2.1 PARTICIPAÇÃO DOS ÔNIBUS DIESEL NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	22
2.2 MEDIDAS REGULATÓRIAS PARA CONTENÇÃO DAS EMISSÕES	25
2.3 QUALIDADE DO AR NO DISTRITO FEDERAL	28
3 ÔNIBUS ELÉTRICOS.....	35
3.1 BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO.....	36
3.2 PRÁTICA INTERNACIONAL	38
3.3 PRÁTICA NO BRASIL	41
4 METODOLOGIA	46
4.1 CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS	46
4.2 ESCOLHA DAS LINHAS PARA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA	49
4.3 DEFINIÇÃO DA TARIFA TÉCNICA	53
4.4 PROJEÇÃO DA DEMANDA	54
4.5 ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO	55
4.6 VALORAÇÃO DAS EXTERNALIDADES.....	59
5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
6 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICE A – FLUXO DE CAIXA PRIVADO DO CENÁRIO “ELÉTRICO”	84
APÊNDICE B – FLUXO DE CAIXA PRIVADO DO CENÁRIO “DIESEL”	85
APÊNDICE C – FLUXO DE CAIXA SOCIAL DO CENÁRIO “ELÉTRICO”	86

APÊNDICE D – FLUXO DE CAIXA SOCIAL DO CENÁRIO “DIESEL”	87
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica representa uma preocupação crescente para a sociedade tendo em vista os seus impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Dentre os fatores causadores da poluição, as emissões veiculares desempenham um papel central na deterioração da qualidade do ar. Além dos riscos gerados ao meio ambiente, os gases e partículas emitidos pelos veículos prejudicam a saúde das pessoas, elevando os riscos de doenças respiratórias e cardiovasculares.

A necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes e promover a sustentabilidade tem impulsionado a busca por alternativas menos danosas ao meio ambiente em todas as esferas da sociedade. No setor de transportes, mais especificamente, as emissões causadas por veículos movidos por combustão interna se sobressaem como um dos grandes causadores da crescente poluição atmosférica nas últimas décadas. Nesse sentido, os veículos elétricos têm conquistado maior espaço de mercado, de forma que a redução da emissão de gases e partículas representa uma das principais vantagens destes modelos.

De forma geral, os veículos elétricos têm ganhado maior popularidade dado que, além de representarem um modelo de transporte de maior sustentabilidade, possuem custos menores de manutenção, o que pode vir a compensar os altos valores iniciais investidos para a sua aquisição. No contexto do transporte público, a substituição dos ônibus movidos a diesel por modelos elétricos equivalentes se apresenta como uma importante alternativa para o setor.

Com o crescimento das zonas urbanas, a demanda por mobilidade tende a crescer nas regiões metropolitanas. Em vista disso, surge como uma necessidade para as grandes cidades a adaptação e transição para um modelo de transporte mais sustentável. No contexto do Distrito Federal, entretanto, a transição para a eletromobilidade ainda se encontra em fase inicial, o que sugere uma oportunidade para o desenvolvimento deste mercado.

Dado o exposto, este trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo a fim de avaliar a viabilidade da substituição de parte da frota de ônibus movidos a diesel por modelos elétricos equivalentes no Distrito Federal. A análise busca

determinar se os ganhos econômicos a longo prazo, juntamente com os benefícios sociais e ambientais resultantes, serão suficientemente altos de modo a compensar o investimento inicial necessário. Para tanto, o trabalho objetiva mensurar o impacto das emissões dos ônibus movidos a diesel sobre a poluição atmosférica na região de estudo e valorar os benefícios da mitigação destes poluentes, sendo a determinação das linhas prioritárias para a substituição importante parte do processo.

1.1 JUSTIFICATIVA

As emissões veiculares se destacam como um dos principais responsáveis pela poluição atmosférica. Os gases e partículas emitidos impactam negativamente no meio ambiente e na saúde da sociedade urbana, efeito o qual tem expressivo custo para o governo e agentes privados.

A elevada preocupação com as questões ambientais e a consequente necessidade de mitigar as emissões de gases e partículas poluentes têm levado a sociedade em geral a procurar alternativas de maior sustentabilidade. No contexto do transporte público, mais especificamente, a substituição de ônibus movidos a diesel por modelos elétricos se destaca como uma alternativa promissora e de grande relevância, capaz de reduzir de forma expressiva as emissões de gases poluentes, assim melhorando a qualidade do ar nas áreas urbanas.

A transição do setor de transportes para a eletromobilidade implica em benefícios diretos para a população e meio ambiente, representados pela menor incidência de doenças relacionadas à baixa qualidade do ar e pela menor concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. A economia também é afetada visto que as visitas hospitalares e internações causadas pela poluição afetam a produtividade dos trabalhadores debilitados, além de gerar excessivos gastos com a saúde.

Embora a adesão à eletromobilidade do transporte público seja bastante dificultada devido ao investimento inicial necessário, é importante ressaltar que, a longo prazo, a operação desses veículos tende a ser mais eficiente. Os ônibus não apenas possuem custos de manutenção menores, mas também o abastecimento por meio de recarga da bateria é mais econômico frente ao abastecimento dos ônibus

tradicionais, os quais ainda estão fortemente sujeitos às flutuações dos preços internacionais do petróleo.

A escolha deste tema leva em consideração a relevância e urgência necessária para a transição do setor de transporte público para um modelo sustentável. Em vista disso, a substituição de ônibus movidos a diesel por modelos elétricos equivalentes representa uma alternativa para a redução das emissões de poluentes, assim contribuindo para a construção de cidades ecologicamente responsáveis.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho de monografia tem como objetivo geral avaliar a viabilidade econômico-financeira da substituição de parte da frota de ônibus movidos a diesel por ônibus elétricos no Distrito Federal, bem como mensurar o impacto ambiental e os benefícios sociais resultantes dessa substituição.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mensurar o impacto das emissões dos ônibus movidos a diesel sobre a poluição atmosférica.
- Indicar as linhas prioritárias do DF para a substituição da frota por modelos elétricos.
- Valorar os benefícios sociais e ambientais da substituição da frota.
- Projetar a viabilidade econômico-financeira por meio dos indicadores.

2 EMISSÕES VEICULARES

A poluição atmosférica é uma ameaça crescente que compromete a saúde e o bem-estar da sociedade, além de impactar negativamente o equilíbrio do ecossistema como um todo. Segundo Elsom (1992), a poluição do ar pode ser definida pela presença concentrada na atmosfera de substâncias ou energia em quantidades suficientemente grandes para afetar a saúde e a segurança dos seres vivos.

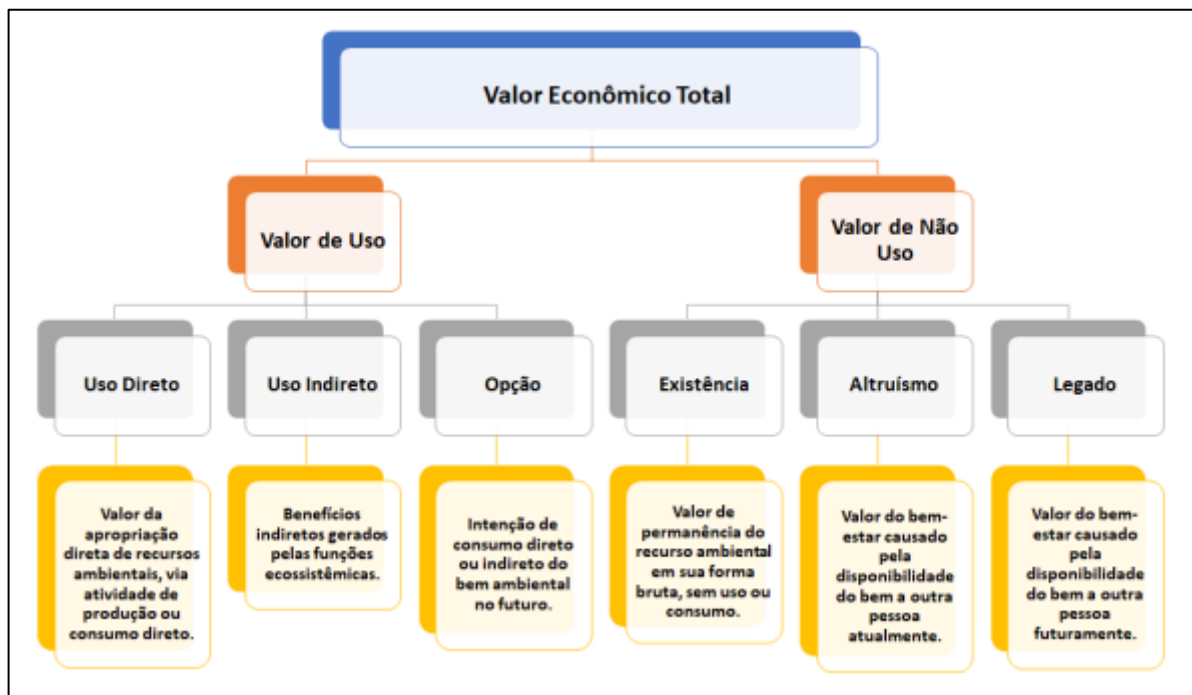
A necessidade do combate à poluição atmosférica se dá, entre outros motivos, pelo alto custo associado à poluição. Os problemas de saúde decorrentes da baixa qualidade do ar têm um peso significativo para a sociedade, gerando altos custos com tratamentos médicos e impactando negativamente a produtividade e a disponibilidade de mão de obra (ELSOM, 1992).

Assim, a poluição atmosférica se destaca como uma importante externalidade de diversos setores da economia, dentre eles o setor de transportes. O conceito de externalidade como um impacto à sociedade pode ser definido como o valor monetário da mudança do bem-estar do indivíduo em virtude de alterações na qualidade do ambiente em sua volta (MINISTÉRIO DA ECONOMIA – ME, 2021).

A valoração monetária de fatores ambientais, portanto, é uma questão fundamental para garantir a sustentabilidade das atividades econômicas. Isto se deve pelo fato de que os fatores naturais que possibilitam o pleno equilíbrio do meio ambiente não são transacionados no mercado, destarte, não possuem um preço propriamente estabelecido (MARQUES e COMUNE, 1997).

O valor econômico de um determinado recurso pode ser definido conforme as suas propriedades. Em uma análise mais abrangente, estes valores podem ser divididos entre *valor de uso* e *valor de não uso*, conforme a Figura 1. Segundo o Ministério da Economia (2021), o *valor de uso* é definido pelo valor social que os indivíduos atribuem a um recurso por poderem usufruí-lo, seja no presente ou no futuro. Já o *valor de não uso* é representado pelo valor que os indivíduos atribuem ao recurso pela sua simples existência, assim como o bem-estar que ele proporciona.

Figura 1 – Definição de valor econômico



Fonte: Ministério da Economia, 2021.

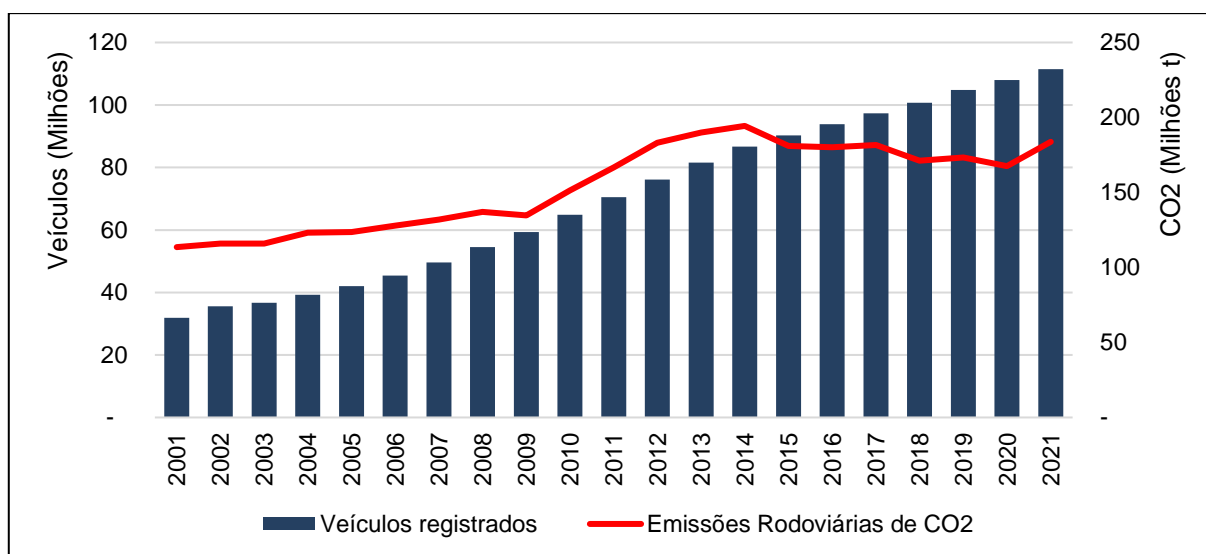
Assim, pode-se categorizar o ar como um recurso com *valor de não uso*, tendo em vista que ele não é consumido por opção, mas sim um recurso naturalmente vital para a sobrevivência. Portanto, sua valoração monetária é pautada no princípio de que uma boa qualidade do ar proporciona bem-estar aos indivíduos apenas pela sua existência.

Dentre os principais responsáveis pela poluição do ar, destaca-se o setor de transportes. Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa¹ (SEEG), em 2021, este setor contribuiu com 12,2% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) no Brasil através da queima de combustíveis fósseis. As queimadas e desmatamentos continuam sendo a principal fonte de emissões de CO₂, com uma participação de 67,5%.

¹ O Sistema de Estimativas de Emissões Climáticas (SEEG) é uma iniciativa do Observatório do Clima que realiza estimativas anuais acerca das emissões de gases de efeito estufa no território brasileiro. O Observatório do Clima é uma rede composta por 77 organizações não governamentais cujo objetivo consiste na promoção do debate sobre as mudanças climáticas no Brasil.

As grandes metrópoles demandam um sistema de mobilidade urbana complexo, o que impulsiona o uso de veículos para o transporte, principalmente em trajetos maiores. De acordo com a Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), em 2022 havia mais de 115 milhões de veículos rodoviários no Brasil, o que representa um crescimento de 51,2% frente a 10 anos antes, quando havia cerca de 76 milhões de veículos registrados. Este aumento, consequentemente, contribui para a elevação das emissões de poluentes atmosféricos (Gráfico 1). Nota-se, entretanto, que a partir de 2015 as emissões de CO₂ são estabilizadas tendo em vista as medidas utilizadas para a contenção da poluição, tópico que será abordado mais adiante neste trabalho.

Gráfico 1 – Veículos registrados² no Brasil e emissões veiculares de CO₂ (2001 – 2021)



Elaboração própria. Fonte: SENATRAN; SEEG.

Nas últimas décadas, os automóveis com motores a base de combustão interna têm dominado o setor de transportes. Para Santos (2020), isto se deve principalmente pela autonomia, versatilidade e funcionalidade destes veículos, em contrapartida, a crescente preocupação ambiental deu origem a um esforço global pela busca por alternativas de transporte de maior eficiência e que promovam a redução das emissões de poluentes.

² Os dados da frota para os anos de 2015 e 2017 não estavam disponíveis. Sendo assim, para 2015 foi feita uma média entre os dados de 2014 e 2016, e para 2017 foi feita uma média entre os dados de 2016 e 2018.

Os poluentes expelidos pelos motores dos veículos de combustão interna produzem diferentes efeitos sobre a vida humana e o meio ambiente, a depender das características destes componentes e da sua concentração na atmosfera. Lopez (2016) traçou um panorama pertinente acerca das consequências da poluição atmosférica sobre a saúde e o impacto econômico resultante da baixa qualidade ar:

“Três milhões e meio de pessoas morrem no mundo a cada ano por causa da poluição atmosférica; este número é muito maior do que as mortes associadas ao consumo de água contaminada e falta de serviços de saúde adequados. Cerca de 50% das mortes associadas à poluição atmosférica estão associadas às emissões dos transportes, especialmente os veículos movidos a diesel. Além desse impacto sobre a mortalidade, a poluição do ar aumenta a prevalência de doenças, os custos do sistema de saúde pública, reduz a renda e afeta a produtividade. De acordo com o Banco Mundial, a poluição do ar em países em desenvolvimento pode ter um custo econômico equivalente a 3,2% do PIB.” (LOPEZ, 2016, p. 39).

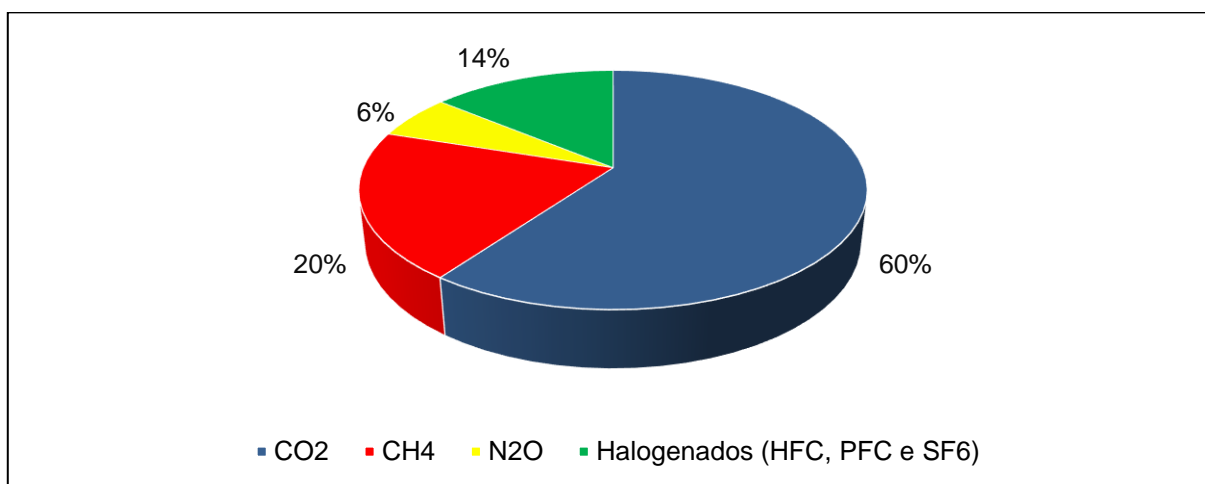
Diversos estudos científicos já apontaram correlação entre a baixa qualidade do ar e a ocorrência de doenças ou mortes prematuras. De acordo com Braga et al (2001), os grupos de maior vulnerabilidade quanto aos efeitos da poluição atmosférica são as crianças, idosos e as pessoas já diagnosticadas com doenças respiratórias. Ademais, o MP₁₀ (material particulado inalável) representa o poluente mais comumente relacionado com doenças respiratórias e cardiovasculares.

Gouveia et al (2003) estimou que incrementos de 10µg/m³ de MP₁₀ e SO₂ (dióxido de enxofre) no município de São Paulo elevaram as internações de crianças com doenças respiratórias em 6,7%. As internações de idosos aumentaram em 1,9% e 10,8% para os incrementos dos poluentes citados, respectivamente, enquanto a elevação de 1ppm (parte por milhão) de CO (monóxido de carbono) foi responsável pelo crescimento de 3,2% das internações.

No que diz respeito às doenças cardiovasculares dos idosos, foi estimado que incrementos de 10µg/m³ de MP₁₀ e SO₂ e 1ppm de CO elevaram a quantidade de internações em 0,3%, 4,9% e 1,7%, nessa ordem. Quanto às mortes deste grupo, foi projetado um aumento de 0,9%, 5,3% e 13,7% para os poluentes supracitados, respectivamente. Outros estudos, como em Martins et al (2002) e Gouveia e Fletcher (2000), também apontam uma correlação positiva entre poluição atmosférica e a incidência de doenças.

Além do impacto causado sobre a vida humana, as emissões também são grandes responsáveis pela degradação do meio ambiente, principalmente através do efeito estufa. Para Santos et al (2006), o efeito estufa é definido como a elevação da temperatura média da Terra em decorrência da maior concentração de determinados gases na atmosfera, sendo o principal destes gases o CO₂. O Gráfico 2 mostra a participação dos gases de efeito estufa na contribuição ao aquecimento global.

Gráfico 2 - Participação dos gases de efeito estufa na contribuição ao aquecimento global



Elaboração própria. Fonte: CETESB.

Segundo Callendar (1938 apud SANTOS, 2006, p. 60), a concentração de CO₂ na atmosfera é fortemente impactada pela utilização de combustíveis fósseis. O dióxido de carbono possui um tempo médio de permanência na atmosfera equivalente a centenas de anos e pode ser formado, além de pelo processo de combustão interna, através da reação química na atmosfera do CO emitido pelos veículos, reação a qual só tem início após 14 dias de sua emissão (MANZOLI, 2009). Sendo assim, apesar da maior toxicidade do monóxido de carbono para o ser humano, os efeitos do dióxido de carbono são de impacto global maior, tendo em vista que ele é capaz de elevar as temperaturas médias do planeta ao alterar o reflexo dos raios infravermelhos (MANZOLI, 2009).

Uma forma de classificar a poluição gerada pelas emissões veiculares é através das áreas de impacto dos poluentes. Para Carvalho (2011), essas substâncias podem ter efeitos localizados ou globais, apresentando consequências de magnitudes diferentes.

“Os poluentes locais causam impactos na área de entorno onde é realizado o serviço de transporte, por exemplo, os ruídos gerados pelos motores dos veículos e a fuligem expelida pelos escapamentos [...]. Os poluentes globais

são gases que são expelidos para a atmosfera e acabam impactando todo o planeta pelo aquecimento global, no caso da emissão de gases de efeito estufa (GEE). O principal poluente nesta categoria é o dióxido de carbono (CO₂) [...]” (CARVALHO, 2011, p.8).

Outra maneira de classificar as emissões veiculares é de acordo com o seu processo de formação. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente por fontes móveis ou fixas. Já os poluentes secundários são caracterizados pela reação química entre os poluentes primários e outros componentes na atmosfera. Dessa forma, o processo de contaminação atmosférica ocorre através da formação de poluentes primários, os quais reagem entre si e atingem os receptores, tais como as pessoas, a fauna e a flora.

Tabela 1 – Tipos de fontes de poluição, processos atmosféricos e receptores

Fontes de Poluição	Fontes móveis: Todos os tipos de veículos. Sendo que as emissões são efetuadas ao longo do percurso.	Fontes fixas: • Chaminés. • Pilhas de material seco. • Vias públicas (pavimentadas ou não).
Processos Atmosféricos	Físicos: • Diluição e transporte pela ação de ventos. • Remoção pela ação das chuvas. • Deposição seca.	Químicos: • Reação direta entre poluentes. • Reações fotoquímicas (necessitam radiação solar).
Receptores	Ambientais: • Pessoas. • Fauna e Flora. • Edifícios, monumentos e obras de arte.	Monitores: Aparelhos que medem as concentrações ambientais em determinado local.

Fonte: CETESB, 2021.

As emissões veiculares podem ter diferentes origens. Em sua maioria, os poluentes emitidos são provenientes do processo de combustão incompleta, o qual ocorre quando não há quantidade suficiente de ar para que a reação com o combustível ocorra dentro do cilindro do motor do veículo (GUARIEIRO; VASCONCELLOS; SOLCI, 2011). Em uma combustão considerada ideal, o oxigênio deveria reagir com todo carbono e hidrogênio no combustível e formar dióxido de carbono e água, entretanto, na prática outros componentes presentes no combustível também participam da reação, de forma que outros poluentes são formados como produto do processo químico (TAVARES, 2009).

Além da combustão incompleta, os veículos também podem emitir poluentes através do desgaste mecânico e pela ressuspensão de partículas do solo, como é o

caso do material particulado (GUARIERO; VASCONCELLOS; SOLCI, 2011). Este componente é definido pela mistura de partículas em suspensão no ar, sejam elas em estado líquido ou sólido (CANÇADO et al, 2006).

Várias outras variáveis exercem influência sobre as emissões veiculares. Segundo Filizola (2005 apud CASTRO, 2008, p. 15) a composição dos poluentes emitidos pode variar de acordo com o tipo de motor, o tipo de combustível, estado de conservação do veículo, qualidade das vias, fatores climáticos e a operação do veículo.

Em função da maior frequência de observação e aos efeitos adversos gerados, os principais poluentes utilizados como indicadores da qualidade do ar são: o dióxido de enxofre (SO_2), o material particulado (MP), o monóxido de carbono (CO), o ozônio (O_3) e o dióxido de nitrogênio (NO_2) (MANZOLI, 2009). De forma sintetizada, os efeitos destes poluentes sobre a saúde humana e o meio ambiente e suas fontes podem ser descritos conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Fontes de poluentes e efeitos ao meio ambiente e à saúde

Poluente	Fonte	Efeitos ao meio ambiente	Efeitos à saúde humana
MP (Material Particulado)	Processo de combustão e ressuspensão de partículas do solo.	Degradação da flora. Redução da visibilidade pela fumaça preta e mau cheiro.	Problemas respiratórios e cardiovasculares.
SO_2 (Dióxido de Enxofre)	Queima de combustíveis com enxofre.	Chuva ácida. Redução da visibilidade na transformação em sulfato.	Problemas respiratórios e cardiovasculares. Irritação dos olhos.
CO (Monóxido de Carbono)	Combustão incompleta do combustível.	Formação de dióxido de carbono.	Redução da capacidade de transporte de oxigênio no sangue.
O_3 (Ozônio)	Reação entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos.	Degradação da flora.	Problemas respiratórios. Irritação dos olhos.
NO_2 (Dióxido de Nitrogênio)	Processo de combustão.	Chuva ácida e formação de ozônio.	Problemas respiratórios.

Elaboração própria. Fonte: CETESB, 2021; DRUMM; et al, 2014.

Dado o exposto, é evidente a necessidade de buscar alternativas sustentáveis que sejam capazes de mitigar as emissões e atenuar os seus impactos. Diante deste cenário, é fundamental compreender como os ônibus tradicionais contribuem para as emissões veiculares e avaliar de que forma os modelos elétricos podem ser benéficos para a sociedade e o meio ambiente.

2.1 PARTICIPAÇÃO DOS ÔNIBUS DIESEL NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A utilização do ônibus no transporte coletivo é uma prática de grande sucesso tanto no Brasil como em outros países. Pelo fato de os veículos circularem em rodovias, este modal costuma ter custos de implementação e de infraestrutura menores frente a outros meios de transporte coletivo, como o metroviário. Além disso, o ônibus apresenta maior flexibilidade para adaptação e remanuseio das rotas, conforme a necessidade da região.

Em decorrência do processo de urbanização, os grandes centros urbanos precisaram se readequar e realizar investimentos em infraestrutura para suportar este crescimento. Grande parte da pressão para a readequação ao novo contexto ocorreu sobre o transporte público, o qual precisou atender à crescente demanda da população por mobilidade. De acordo com o SENATRAN, em 2021 havia registrados pouco menos de 673 mil ônibus em todo território nacional, valor que sobe para quase 1,1 milhão se contabilizados os micro-ônibus. Estes valores representam um crescimento de 38,3% e 40,3%, respectivamente, frente à década anterior. Como consequência direta do aumento das frotas, cria-se uma tendência de crescimento para as emissões.

Outro fator que pode colaborar com o aumento das emissões de gases e partículas é o envelhecimento da frota nacional³ nos últimos anos. De acordo com a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), em 2021 a idade média da frota era quase 2 anos maior do que uma década antes (Gráfico 3). Conforme citado na seção anterior, um dos fatores que pode influenciar as emissões é o estado de conservação do veículo, o qual tende a ser menor quanto maior for a idade da frota.

³ Os dados de idade média da frota são referentes aos veículos de nove capitais brasileiras, são elas: Belo Horizonte, Curitiba, Fortaleza, Goiânia, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo.

Gráfico 3 - Evolução da idade média da frota de ônibus urbanos no Brasil (1995 – 2021)



Fonte: NTU, 2022.

A utilização do óleo diesel como principal combustível dos ônibus é um fator que tem contribuído para a poluição atmosférica nos centros urbanos. O uso do óleo diesel em veículos pesados se deve em grande parte devido à sua capacidade de gerar energia em alta potência, o que é necessário para veículos deste porte (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2003). Ademais, a alta eficiência do combustível e os seus menores preços em relação à gasolina são outros fatores que explicam a preferência por este tipo de combustível (FARRAUTO; et al, 1992 apud BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2003).

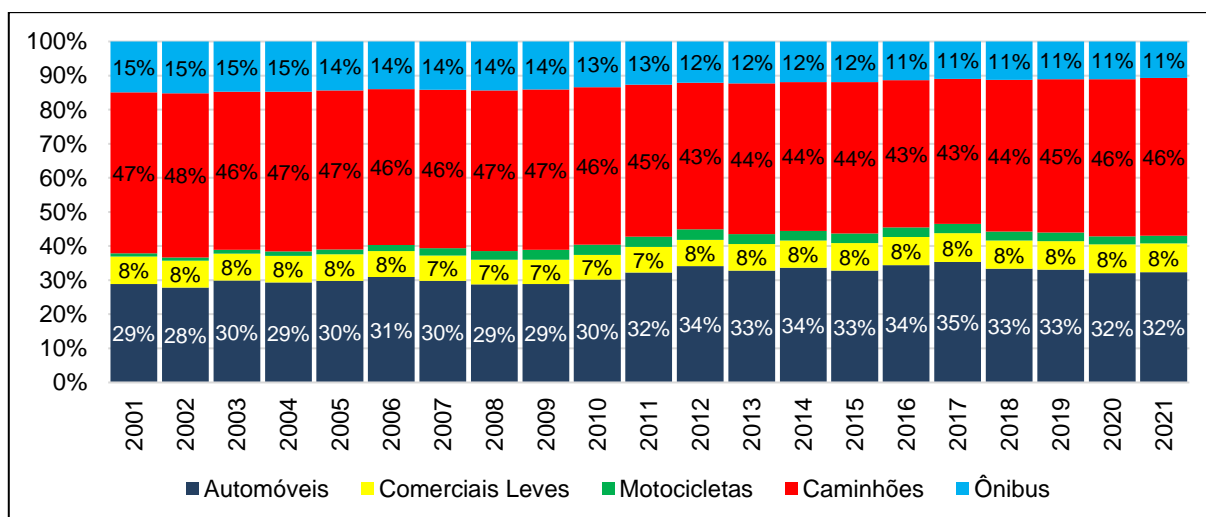
Em contrapartida, os veículos pesados movidos a diesel se destacam quanto à emissão de alguns poluentes, em especial àqueles de efeito local, os quais tem grande impacto sobre a saúde humana. Segundo a CETESB (2022), os veículos pesados foram responsáveis por 44,9% e 32% da emissão total de óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado inalável inferior a 10 micrômetros (MP₁₀) na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em 2020.

No que concerne aos ônibus urbanos em particular, embora estes representassem apenas 0,46% da frota de veículos na RMSP em 2020, neste ano eles foram responsáveis pelas emissões de 11,8% de toda produção veicular de

óxidos de nitrogênio (NO_x) e 7,26% de toda produção veicular de MP₁₀, representando a principal categoria de veículos nas emissões dos poluentes em questão (CETESB, 2022).

Os ônibus também são responsáveis por uma parcela expressiva das emissões de CO₂. Conforme dados do SEEG, os ônibus lançaram à atmosfera por pouco mais de 19,6 milhões de toneladas de dióxido de carbono⁴, o que representa cerca de 11% do total emitido pelo modal rodoviário no ano de 2021. Esta participação esteve em movimento de queda ao longo do século, visto que em 2001 este valor era de aproximadamente 15%, o equivalente a pouco menos de 17 milhões de toneladas. A distribuição das emissões por categoria de veículo está demonstrada no Gráfico 4, onde é possível observar que, apesar da participação significativa dos ônibus, os automóveis e caminhões são as categorias de maior representatividade na emissão do gás em foco.

Gráfico 4 – Participação nas emissões de CO₂ por categoria de veículos (2001 – 2021)



Elaboração própria. Fonte: SEEG.

Conforme os dados do SENATRAN, a quantidade de ônibus registrados no Brasil cresceu 157% desde o início do século, apesar disso, as emissões de CO₂ não foram elevadas na mesma magnitude. Um dos fatores que explica a contenção deste crescimento foi a formulação de medidas regulatórias nos últimos anos, as quais limitaram as emissões de gases e partículas.

⁴ Somente está sendo considerado o CO₂ emitido através da queima do combustível.

2.2 MEDIDAS REGULATÓRIAS PARA CONTENÇÃO DAS EMISSÕES

Com a elevação das preocupações ambientais, políticas e medidas regulatórias foram adotadas ao longo dos anos com o intuito de conter as emissões veiculares e mitigar seus efeitos à sociedade e ao meio ambiente. Estas medidas podem ser divididas em duas categorias diferentes, uma referente ao padrão da qualidade do ar, no qual são estabelecidos limites máximos para os poluentes e partículas emitidos, e outra que busca a melhoria dos combustíveis através da alteração da composição química dos mesmos, assim os tornando menos nocivos ao ecossistema (CARVALHO, 2011).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), criado pela Lei Federal nº 6.938/81, é um órgão brasileiro responsável pelo estudo e assessoria em questões ambientais, sendo sua função a formulação de normas e padrões acerca do meio ambiente (BRASIL, 1981). Segundo a Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, o impacto ambiental é definido como qualquer alteração do meio ambiente que tenha sido causada por atividades humanas, seja de forma direta ou indireta, as quais possam afetar o bem-estar da população, suas atividades econômicas e sociais e o ecossistema como um todo.

O CONAMA foi responsável pela criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), ocorrida na Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986. Os programas tinham como objetivo, entre outras questões, atender aos padrões de qualidade do ar por meio da redução das emissões dos novos veículos a serem vendidos no país.

Os padrões de qualidade do ar estão estabelecidos conforme a Resolução CONAMA nº 491/2018 e são definidos pela concentração de determinado poluente na atmosfera durante um intervalo de tempo em exposição (Tabela 3). Os limites estabelecidos na resolução são divididos entre metas intermediárias (PI) e finais (PF), sendo estas metas de longo prazo guiadas pelas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS). A resolução adota os seguintes poluentes como parâmetro para controle da qualidade do ar: material particulado, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, partículas totais em suspensão, fumaça, ozônio, monóxido de carbono e chumbo.

Tabela 3 – Padrões de qualidade do ar

Poluente Atmosférico	Sigla	Período de Referência	PI-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ppm
Material Particulado	MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
		Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado	MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
		Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre	SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
		Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio	NO ₂	1 horas ²	260	240	220	200	-
		Anual ¹	60	50	45	40	-
Partículas Totais em Suspensão	PTS	24 horas	-	-	-	240	-
		Anual ⁴	-	-	-	80	-
Fumaça	-	24 horas	120	100	75	50	-
		Anual ¹	40	35	30	20	-
Ozônio	O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Monóxido de Carbono	CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Chumbo	PB ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-
1- Média aritmética anual							
2 - Média horária							
3 - Máxima média móvel obtida no dia							
4 - Média geométrica anual							
5 - Medido nas partículas totais em suspensão							

Fonte: Resolução CONAMA nº 491/2018.

A Resolução CONAMA nº 491/2018 também define os níveis críticos de concentração para os poluentes atmosféricos citados, conforme as categorias de atenção, alerta e emergência (Tabela 4).

Tabela 4 – Níveis críticos de concentração de poluentes

Nível	Poluentes e concentrações					
	SO ₂ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 24h)	Material Particulado		CO ppm (média móvel de 8h)	O ₃ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média móvel de 8h)	NO ₂ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média móvel de 1h)
		MP ₁₀ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 24h)	MP _{2,5} $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 24h)			
Atenção	800	250	125	15	200	1.130
Alerta	1.600	420	210	30	400	2.260
Emergência	2.100	500	250	40	600	3.000

Fonte: Resolução CONAMA nº 491/2018.

Os controles das emissões estabelecidos pelo PROCONVE são atualizados por fases, as quais gradativamente reduziram os limites permitidos para cada poluente. De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (2011), as emissões produzidas pelos escapamentos dos veículos pesados⁵ passaram a ser controladas em 1993, com a introdução da

⁵ Conforme o PROCONVE, os veículos pesados são aqueles de massa total máxima superior a 3.856 kg ou massa em ordem de marcha superior a 2.720 kg, podendo ser utilizados para o transporte de passageiros e/ou carga.

Fase P3. Atualmente, está em vigor a Fase P8, que foi instituída pela Resolução CONAMA nº 490 e segue a regulamentação europeia, definida pela UE 582/2011 (Euro VI). Os programas elaborados pelo CONAMA são inspirados em normas internacionais, nas quais as metas de redução de emissões induziram o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes dos veículos (IBAMA, 2011).

Além do controle das emissões por meio dos programas supracitados, estas também puderam ser reduzidas graças às melhorias referentes à composição dos combustíveis. A maior utilização do álcool anidro, a fabricação de veículos *flex-fuel*⁶ e a eliminação do chumbo tetraetila ($C_8H_{20}Pb$) da gasolina foram algumas medidas que contribuíram para o aumento da sustentabilidade no setor (CETESB, 2018?).

No que concerne aos ônibus, a redução do teor do enxofre nos diesel também foi uma medida relevante, uma vez que reduziu as emissões dos óxidos de enxofre e material particulado (CARVALHO, 2011). Segundo a CETESB, o teor de enxofre, antes de 2.000 mg/kg, hoje é limitado a 500 mg/kg, além disso, nas regiões metropolitanas, os veículos que dispuserem de controle de emissões por catalisador podem ser limitados a 10 mg/kg.

Outra medida importante é a utilização de biodiesel na composição do diesel que abastece os veículos pesados. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) elevou o percentual de biodiesel de 10% para 12% em medida válida a partir de 1º de abril de 2023, valor o qual irá subir até 15% em 2026 (BRASIL, 2023). O biodiesel passou a ser utilizado tendo em vista que é um combustível biodegradável, de forma que gera menos poluentes frente a outros derivados do petróleo, como o próprio óleo diesel (BRASIL, 2023).

Não obstante, esta medida foi recebida com críticas por parte do setor em decorrência do menor desempenho dos veículos, impactos negativos sobre o meio ambiente e um possível reajuste tarifário nas passagens, dado o maior custo do biodiesel (NTU, 2023). Contudo, o Ministério de Minas e Energia afirma que o impacto no custo final do combustível é pequeno, de apenas R\$ 0,01 para cada 1% de biodiesel adicional na mistura total (MONTEIRO, 2023). Segundo Francisco

⁶ Veículos que podem ser abastecidos por gasolina, etanol ou pela mistura entre os combustíveis.

Christovam, presidente executivo da NTU, o desempenho dos veículos pode ser afetado tendo em vista que a utilização de biodiesel em grandes quantidades na mistura pode resultar na formação de borra no motor, substância que também é altamente poluente (NTU, 2023).

Apesar das medidas regulatórias para contenção das emissões citadas, outros fatores acabam limitando os benefícios dessas ações. Segundo o SENATRAN (2023), até dezembro do ano passado o número de veículos registrados no país já havia crescido cerca de 265% desde o início do século, crescimento o qual naturalmente provoca aumento da produção de gases e partículas poluentes. Ademais, medidas como o barateamento de combustível e estímulos à venda de veículos privados caminham em sentido contrário na questão ambiental quanto à redução das emissões (CARVALHO, 2011).

2.3 QUALIDADE DO AR NO DISTRITO FEDERAL

O processo de rápida urbanização do Distrito Federal (DF) observado desde a sua fundação o tornou uma das maiores regiões metropolitanas do Brasil. Segundo o Censo de 2022, a cidade de Brasília representa a 4ª maior concentração urbana do país com mais de 3,8 milhões de habitantes, somente atrás de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

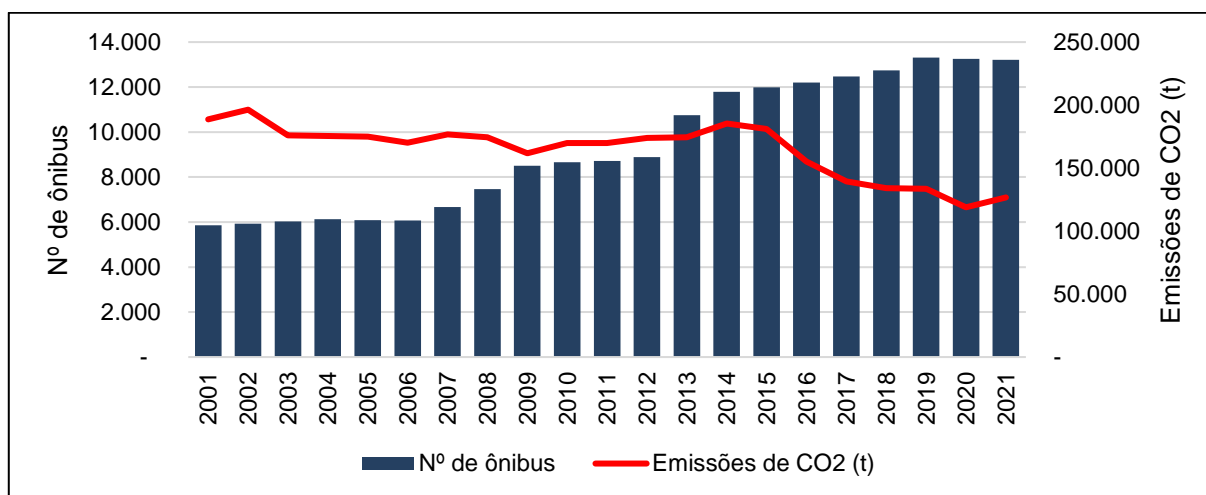
Correlacionada ao crescimento populacional, a demanda por mobilidade urbana expandiu de forma expressiva no Distrito Federal. Tal fato está diretamente conectado com a distribuição espacial centralizada das oportunidades de trabalho no DF e da forte concentração de equipamentos coletivos⁷ no Plano Piloto, fatores os quais aumentam as distâncias dos deslocamentos e exigem uma maior quantidade de veículos para o transporte (WAYCARBON, 2014). Com uma alta de 213% no século, o Distrito Federal terminou o ano de 2022 com mais de 2 milhões de veículos registrados, dos quais 13.644 são ônibus (SENATRAN, 2023).

⁷ Por equipamentos coletivos, leia-se estabelecimentos comerciais e de prestações de serviços, tais como escolas, universidades, mercados, hospitais, entre outros.

Diante do cenário exposto, as emissões veiculares no DF tiveram importante contribuição para a poluição do ar. De acordo com os dados do SEEG, aproximadamente 55% do dióxido de carbono produzido na queima de combustíveis em 2021 foi emitido pelo setor de transportes. Dentro deste, os veículos leves movidos a gasolina aparecem como os principais responsáveis pelas emissões, de forma que a participação dos ônibus foi de apenas 2,5%. Os dados do SEEG, no entanto, são mais baixos quando comparados a outras fontes. De acordo com a Secretaria do Meio Ambiente do Distrito Federal (SEMA-DF) (2021), de todo dióxido de carbono emitido no setor de transportes de 2009 a 2018, os ônibus contribuíram com um valor entre 6% e 7%, contribuição que foi de 4,5% no mesmo período segundo o SEEG.

O Gráfico 5 mostra a evolução da quantidade de ônibus no Distrito Federal assim como as emissões de dióxido de carbono realizadas por estes. Percebe-se que, apesar do aumento no número de veículos, as emissões de dióxido de carbono foram minimizadas nos últimos anos, consequência das medidas adotadas para o controle destas.

Gráfico 5 – Quantidade de ônibus e CO₂ emitido pelos ônibus no DF



Elaboração própria. Fonte: SENATRAN; SEEG.

Segundo a SEMA-DF (2021), um dos grandes fatores que contribuíram para a redução das emissões de CO₂ no setor de transportes foi a utilização de biocombustível, como o etanol nos automóveis e o biodiesel nos ônibus e caminhões.

Conforme a SEMA-DF (2021), no ano de 2005, 12,33% das emissões evitadas foram devidas a utilização de biocombustível, valor que subiu para 19,89%

em 2018. Em 2005 toda poluição evitada foi decorrente do uso do etanol, tendo em vista que os veículos pesados do Distrito Federal ainda não utilizavam o biodiesel em seus combustíveis. Em 2018, no entanto, a participação do biodiesel cresceu de forma expressiva, de sorte que 9,43% das emissões evitadas se deveram pela sua utilização.

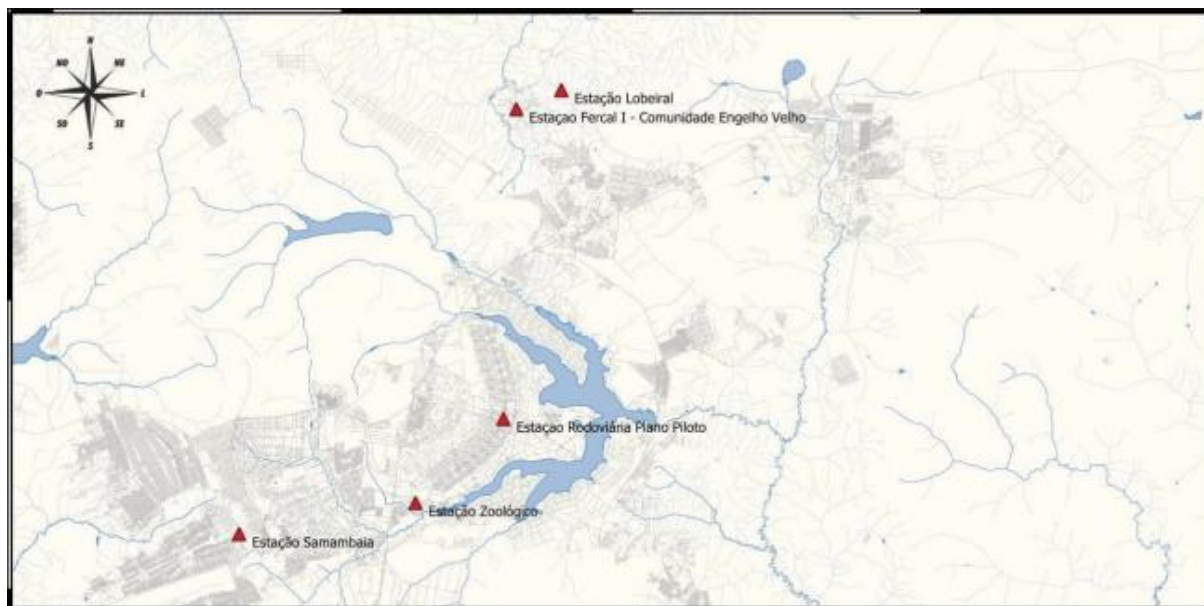
É válido pontuar que, embora as emissões representam um componente central na qualidade do ar, estas não são os únicos fatores que contribuem para a poluição atmosférica. Outro importante fator é representado pelas condições meteorológicas, as quais podem interferir diretamente na concentração de poluentes no ar.

Segundo a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH) (2005), a qualidade do ar naturalmente é menor durante os meses de inverno em virtude do fenômeno atmosférico chamado de “inversão térmica”, no qual, devido a diferentes fatores climáticos, a diluição dos poluentes na atmosfera é dificultada. Além disso, a ausência de chuvas também pode contribuir para a manutenção da qualidade do ar em níveis mais baixos, tendo em vista que não ocorrerá a retirada dos poluentes do solo. Diante deste contexto, o período de maio a setembro no DF costuma apresentar os piores índices de qualidade do ar em decorrência da estiagem e do período mais frio no inverno.

Para medir a concentração atmosférica de poluentes locais, os indicadores de qualidade do ar no Distrito Federal são realizados pelo Instituto Brasília Ambiental (IBRAM) através do Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar do Distrito Federal. Atualmente o programa conta com seis equipamentos de monitoramento, espalhados em cinco localizações diferentes: Rodoviária do Plano Piloto, Zoológico, Samambaia e duas na Fercal (Figura 2). A estação Fercal 1, da Comunidade Engenho Velho, dispõe ainda de duas estações, uma para o monitoramento de partículas totais em suspensão (PTS) e outra para MP_{10} , os quais são os únicos poluentes atualmente avaliados.

Além das citadas acima, o programa em outros anos também cobriu outras regiões na rede de monitoramento, como Taguatinga, Setor Comercial Sul e a cimenteira CIPLAN, próxima à Fercal. Ademais, o programa também já avaliou a concentração de outros poluentes, tais como SO_2 e fumaça.

Figura 2 – Estações de monitoramento de qualidade do ar no DF



Fonte: IBRAM, 2022.

A partir dos dados de concentração obtidos pelas estações, o impacto dos poluentes emitidos é calculado pelo Índice de Qualidade do ar, conforme a fórmula abaixo (IBRAM, s.d.). O índice é utilizado para cada poluente separadamente, de forma que ele classifica a concentração dos gases/partículas analisados entre boa, moderada, ruim, muito ruim e péssima (Tabela 5). Sendo assim, o índice serve como uma ferramenta importante para a padronização da avaliação da qualidade do ar, sendo fundamental tendo em vista que a concentração nociva para o ser humano varia para cada poluente, conforme descrito na Tabela 6.

$$IQAr = \frac{I_{Sup} - I_{Inf}}{C_{Sup} - C_{Inf}} * (C - C_{Inf}) + I_{Inf}$$

Na fórmula, I_{Sup} é o valor crítico superior do índice, I_{Inf} é o valor crítico inferior do índice, C_{Sup} é a concentração do poluente que corresponde ao I_{Sup} , C_{Inf} é a concentração do poluente que corresponde ao I_{Inf} e C é a concentração medida para o poluente em questão.

Os equipamentos utilizados no monitoramento são amostradores de grande volume de uso manual que determinam os valores médios de concentração de acordo com o período de amostragem escolhido, sendo normalmente considerado 24h. Nesse sentido, os equipamentos não são capazes de coletar dados instantâneos acerca dos poluentes. Para estes casos, a comunidade internacional

recomenda que a coleta de dados seja realizada a cada 6 dias, no entanto, devido às limitações de pessoal do IBRAM, nem sempre este prazo é cumprido (IBRAM, 2022).

Tabela 5 – Índice de Qualidade do Ar (IQAr)

Índice de Qualidade do Ar (IQAr)									
Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m³) 24h	MP _{2,5} (µg/m³) 24h	SO ₂ (µg/m³) 24h	NO ₂ (µg/m³) 1h	CO (ppm) 8h	O ₃ (µg/m³) 8h	PTS (µg/m³) 24h	Fumaça (µg/m³) 24h
Boa	0-40	0-50	0-25	0-20	0-200	0-9	0-100	0-80	0-60
Moderada	41-80	>50-100	>25-50	>20-40	>200-240	>9-11	>100-130	>80-375	>60-250
Ruim	81-120	>100-150	>50-75	>40-365	>240-320	>11-13	>130-160	>375-625	>250-420
Muito Ruim	121-200	>150-250	>75-125	>365-800	>320-1130	>13-15	>160-200	>625-875	>420-500
Péssima	>200	>250	>125	>800	>1130	>15	>200	>875	>500

Fonte: CETESB; IBRAM⁸.

Tabela 6 – Qualidade do ar e efeitos sobre a saúde

Qualidade	Índice	Efeito sobre a saúde
Boa	0-40	
Moderada	41-80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
Ruim	81-120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
Muito Ruim	121-200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
Péssima	>200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB.

Ao longo da série, as estações que apresentaram os piores índices foram as da Fercal, CIPLAN e Taguatinga. A CIPLAN, localizada às margens da Rodovia DF-205 e próxima à Fercal, foi o local que registrou os piores resultados, chegando a

⁸ A tabela original é de autoria da CETESB, porém foi adaptada pelo IBRAM para incluir a concentração das partículas totais em suspensão (PTS) e fumaça.

registrar em alguns anos índices equivalentes à qualidade “péssima” da Tabela 6 para PTS. Os valores observados são justificados pelo fato de que as cimenteiras são estruturas altamente poluentes, além disso, a DF-205, rodovia com circulação de veículos pesados, não contava com pavimentação nos anos avaliados, fator que contribui para a ressuspensão de partículas (IBRAM, 2010).

Devido à proximidade às cimenteiras e vias não pavimentadas com circulação de veículos pesados, a Fercal registrou indicadores equivalentes à qualidade “ruim” da Tabela 6 para a concentração de PTS em determinados anos. Estes mesmos resultados foram observados para a estação de Taguatinga, sendo alguns anos para PTS e outros para fumaça. Estes resultados se devem principalmente pelo alto fluxo de veículos leves e pesados na região, o qual é fortemente impactado pelo trecho entre Taguatinga e Ceilândia (SEMARH, 2005), que são justamente as duas cidades mais populosas do DF, conforme dados da Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN) (2019). A estação de Taguatinga, no entanto, não está em funcionamento desde novembro de 2013 quando foi atingida em um acidente de trânsito, de forma que o monitoramento no local ainda não foi restabelecido (IBRAM, 2014).

Apesar dos estudos do IBRAM, existem poucos trabalhos acadêmicos que abordam a relação entre a poluição do ar no Distrito Federal e a incidência de problemas de saúde em decorrência deste problema.

Um estudo de maior relevância para este trabalho é o de Réquia Júnior e Abreu (2011), no qual foi avaliada a correlação entre as concentrações de PTS e os óbitos e internações hospitalares de idosos e crianças. Os resultados do trabalho apontam uma correlação forte para os óbitos e internações de idosos, entretanto, não foi encontrada correlação positiva forte para as crianças.

Em outro estudo, Réquia Júnior (2015) avaliou a correlação entre a presença de determinados poluentes e a saúde da população de todas as faixas etárias no

DF. Todos os poluentes apresentaram correlação positiva, porém só os coeficientes de idosos e crianças⁹ foram estatisticamente significantes.

Dado o exposto, percebe-se que há uma ausência de estudos que apontem a correlação entre a poluição do ar e os efeitos sobre a saúde da população geral do DF, de forma que os poucos trabalhos nesta área indicam a correlação positiva apenas para grupos específicos.

A boa qualidade do ar da região, em comparação a outros centros urbanos, contribui para a menor incidência de doenças relacionadas à poluição atmosférica, fato que é corroborado pelos resultados discutidos nos trabalhos acima. Apesar disso, é importante frisar que o monitoramento da qualidade do ar no DF é precário, tendo em vista a pequena quantidade de estações de monitoramento, além da tecnologia defasada utilizada.

Para que se possa estimar os reais efeitos da redução da poluição do ar sobre a saúde da população local de forma precisa, é fundamental que exista uma ampla rede de monitoramento de poluentes, visto que os dados referentes às concentrações atmosféricas destes componentes, captados somente pelas estações, são elementos primordiais para possibilitar a realização de projeções de grande eficácia.

Isto posto, Réquia Júnior (2015) fez grande contribuição ao tema a partir da definição de localizações prioritárias para a instalação de novas estações de monitoramento, como Ceilândia, Taguatinga, Gama, Guará e Asa Sul. Os locais avaliados foram considerados prioritários devido principalmente à elevada densidade populacional, acompanhada pelo intenso uso de veículos, além do perfil dos residentes locais, como é o caso de locais com maior concentração de idosos, os quais são mais suscetíveis a apresentarem problemas de saúde relacionados à baixa qualidade do ar.

⁹ Para as crianças somente CO₂ e CH₄ apresentaram significância.

3 ÔNIBUS ELÉTRICOS

Diante dos problemas abordados em tópicos anteriores decorrentes da poluição gerada pelos veículos com motores de combustão interna, os modelos elétricos têm ganhado maior protagonismo por representarem uma alternativa menos prejudicial ao meio ambiente e ao bem-estar social. Com a menor utilização de combustíveis fósseis, pretende-se reduzir as emissões de poluentes, medida a qual teria impacto direto sobre o meio ambiente e a saúde humana, com a mitigação de doenças respiratórias e cardiovasculares (SANTOS, 2020).

No contexto do transporte público, a substituição dos ônibus movidos a diesel por modelos elétricos está sendo feita de forma gradual em uma escala global, iniciativa que tem como um de seus principais objetivos elevar a sustentabilidade do setor. Para Rugeri e Gasparin (2021), a crescente demanda pelos modelos elétricos se deve em grande parte por estes representarem uma forma de combate direta contra as emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa.

Os ônibus elétricos se destacam por apresentarem um modelo de transporte ecologicamente responsável, dado que as emissões são reduzidas de forma significativa. A ausência de combustão interna elimina a produção de GEE estufa expelidos pelo escapamento dos veículos, tais como o CO₂, além disso, a emissão de material particulado é consideravelmente menor, sendo gerada apenas através do desgaste mecânico e contato dos pneus com o solo (LIMA; SILVA; NETO, 2019).

A maior eficiência energética dos motores elétricos é outro fator que explica a crescente demanda por estes modelos. A eficiência total de um veículo inteiramente elétrico é de aproximadamente 59% a 62% (VAZ; BARROS; CASTRO, 2015). Já no caso dos veículos de combustão interna, a eficiência total fica em torno de 12% a 30%, segundo o *U.S. Department of Energy* (s. d.).

A atratividade dos veículos elétricos também está relacionada a uma economia de longo prazo, apesar do investimento inicial. Em decorrência da menor quantidade de peças utilizadas no veículo, a manutenção dos ônibus elétricos representa um dispêndio menor quando comparado aos modelos convencionais, além disso, a troca de óleo diesel por eletricidade para a recarga dos veículos

possibilita menores custos de abastecimento (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2020).

Segundo Dallmann (2019), os fatores supracitados em conjunto com a maior eficiência dos motores diminuem os custos operacionais dos modelos elétricos ao longo de sua vida útil. Nesse sentido, o custo total de propriedade dos ônibus elétricos, dependendo de sua configuração, pode ser menor comparativamente a um ônibus convencional movido a diesel (BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE - BNEF, 2018).

Dado o exposto, é fundamental ressaltar que, para que os benefícios gerados a partir da eletrificação do setor de transportes se concretizem, é de extrema importância que a energia utilizada para a recarga da frota seja proveniente de fontes limpas e renováveis. De outra forma, o balanço final de uma transição para a mobilidade elétrica pode não ser positivo em virtude dos impactos negativos associados à geração de energia não limpa (VAZ; BARROS; CASTRO, 2015). Nesse contexto, o processo de eletrificação do setor no Brasil é facilitado, uma vez que as fontes de energia renováveis representam 85% da matriz energética brasileira (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2022).

3.1 BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO

Apesar dos benefícios atrelados à adesão à eletromobilidade, existem diversas barreiras relacionadas à sua implementação, as quais podem dificultar o processo ou até mesmo, dependendo do contexto, torná-la inviável. Conforme a Bloomberg New Energy Finance (2018), são exemplos de barreiras:

Investimento inicial: apesar da possibilidade de o custo total de propriedade dos ônibus elétricos serem menores do que o dos ônibus diesel, o investimento inicial necessário para a aquisição desses veículos aparece como um dificultador, mesmo com o auxílio do governo por meio de subsídios. Os contratos de *leasing* aparecem como alternativas a esse entrave, os quais podem ser feitos tanto para o veículo inteiro como somente para as baterias, visto que estas compõem parte substancial do preço do veículo.

Escalabilidade: atualmente é comum a ajuda governamental por meio de subsídios para a aquisição de ônibus elétricos, auxílio o qual é inviável em contextos

de eletrificação geral da frota. Sendo assim, para que a implementação destes veículos se torne algo escalável é necessário que o investimento inicial necessário seja menor, só assim os modelos elétricos poderão ser mais competitivos frente aos ônibus convencionais.

Flexibilidade e experiência operacional: devido às opções de abastecimento mais limitadas comparado aos ônibus diesel, a implementação de modelos elétricos às linhas tradicionais pode ser dificultada. Em vista disso, a falta de experiência das empresas do setor com estes veículos e a sua operacionalização se apresenta como uma barreira ao processo de transição para a mobilidade elétrica. Ademais, a menor autonomia dos ônibus elétricos gera problemas logísticos, no sentido de que a quilometragem diária percorrida por estes veículos é menor do que a realizada pelos ônibus movidos a diesel. Sendo assim, é comum observar o crescimento das frotas em cidades em que o transporte coletivo urbano é 100% elétrico, movimento necessário para compensar a menor autonomia destes veículos. Não obstante, uma logística de rotas e recarga adaptada a este contexto pode suavizar os problemas citados, porém a custos maiores (EPE, 2023).

Baixa dos custos tecnológicos: com o avanço da tecnologia, seus custos tendem a cair, ideia a qual também se aplica aos ônibus elétricos. Assim, muitos municípios estão adiando a aquisição de ônibus elétricos contando com a queda dos custos para a compra e manutenção dos veículos no médio e longo prazo.

Infraestrutura de recarga: a aquisição de veículos elétricos implica necessariamente na adaptação da infraestrutura destinada para a recarga dos veículos, o que pode ser um problema a depender da disponibilidade de espaço das empresas de transporte. Além disso, a falta de mão de obra qualificada e os investimentos necessários para a instalação da infraestrutura podem ser uma barreira adicional (EPE, 2023).

Fornecimento e custo de energia: com o aumento da demanda por energia em decorrência da maior quantidade de veículos elétricos, as empresas de transportes se tornam receosas com possíveis aumentos no custo da energia para recarga e taxas extras que possam existir. Além disso, a falta de energia devido a acontecimentos de força maior, como eventos climáticos, representa outra

preocupação aos operadores de ônibus, tendo em vista que a indisponibilidade de energia impossibilitaria o funcionamento dos veículos.

Falta de padronização das infraestruturas de recarga entre as fabricantes: este fator pode ser um problema na aquisição de veículos usados ou na aquisição de veículos de fabricantes diferentes. A ausência de compatibilidade entre as fabricantes com relação às infraestruturas de recargas afeta negativamente a competitividade do setor, de forma que empresas já estabelecidas em determinado local teriam enorme vantagem competitiva frente a novos entrantes no mercado, a não ser que estes usem a mesma infraestrutura.

Menor autonomia: os ônibus elétricos não são capazes de rodar distâncias equivalentes aos ônibus movidos entre os abastecimentos, sendo assim, a operação desses modelos estará limitada à linhas de distâncias menores enquanto não houver maior desenvolvimento tecnológico que permita a rodagem destes veículos em trajetos maiores.

Adicionalmente, pode-se citar ainda a questão do descarte das baterias como uma barreira adicional à implementação dos veículos elétricos no geral. A toxicidade destes componentes é maléfica ao meio ambiente quando o descarte ocorre de forma incorreta, podendo causar poluição do ar e contaminação da água com o vazamento de ácidos (LIMA et al, 2022).

Como forma de mitigar os efeitos negativos do descarte das baterias, a reciclagem deste item pode gerar diversos benefícios, como a recuperação de metais presentes nestes componentes, que além de gerar um ganho econômico, reduz as atividades de mineração. Não obstante, a falta de regulamentação e a falta de segurança no transporte das baterias aparecem como problemas frequentes no processo de reciclagem (LIMA et al, 2022).

3.2 PRÁTICA INTERNACIONAL

A implementação dos ônibus elétricos ao redor do mundo tem sido um processo gradual, envolvendo diversas partes interessadas no processo, cujo trabalho conjunto se mostrou essencial para tornar esse projeto uma realidade. Como os principais *stakeholders*, pode-se citar os fabricantes, bancos multilaterais e entes governamentais, estes que têm desempenhado importante papel no que

concerne a viabilização dos investimentos necessários para a eletrificação da frota através de políticas de subsídio (EPE, 2020).

Um exemplo de iniciativa criada foi a *Clean Bus Declaration* (Declaração de Ônibus Limpos), idealizada pelo *Climate Leadership Group* (C40) em 2015 que contava inicialmente com 22 cidades participantes. A iniciativa tem como objetivo principal melhorar a qualidade ar através da utilização de ônibus de emissão zero¹⁰ nas frotas veiculares. A meta estabelecida pela iniciativa foi de adquirir mais de 40.000 ônibus limpos até 2020, o que reduziria as emissões de gases de efeito estufa em aproximadamente 880 mil toneladas (C40, 2015). Atualmente a iniciativa conta com 96 cidades, sendo 4 brasileiras: Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro e Salvador.

O *Soot-Free Urban Bus Fleets* (Frota de Ônibus Urbanos Sem Fuligem), realizado pelo *The Climate and Clean Air Coalition* (CCAC) é um projeto similar que visa estimular o desenvolvimento tecnológico e a transição para motores livres de fuligem nas frotas de ônibus urbanos, contando com o apoio de 39 países (CCA, s.d.). Segundo Miller et al. (2017), um motor livre de fuligem é definido como qualquer motor a diesel ou combustível alternativo que esteja de acordo com os padrões estabelecidos pelo Euro VI ou U.S. 2010, tais como motores diesel com filtro de partículas, motores movidos a gás ou elétricos.

Dado o contexto, a demanda por ônibus elétricos esteve em alta nos últimos anos, tendência que deve continuar no futuro próximo. Segundo a *International Energy Agency* (IEA) (2023), no ano de 2022 já havia mais de 800 mil ônibus elétricos em todo o mundo, o equivalente a 3% de todos os ônibus. A IEA ainda prevê que o tamanho da frota seja de 1,4 milhão em 2025 e 2,7 milhões em 2030.

A China se destaca como país protagonista na eletrificação dos ônibus urbanos. Ao final de 2017, o país já contava com mais de 370 mil unidades em circulação, sendo o país com a maior frota ativa (IEA, 2018). O auxílio governamental em forma de subsídios foi uma política de importante contribuição, de

¹⁰ São veículos de emissão zero: veículo elétrico a bateria (100% elétrico), veículo elétrico híbrido Plug in e veículo movido a células de combustível.

forma que, somente no ano de 2015, US\$ 8,4 bilhões foram destinados para a compra de veículos elétricos comerciais. (IEA, 2018).

Somente no ano de 2020, foram registrados mais 78 mil ônibus elétricos na China, o que indica o aumento da demanda por veículos do modelo no país (IEA, 2021). Este movimento se deve em grande parte às políticas de redução de emissões adotadas nos últimos anos, como a *14th FYP for Green Transportation*, a qual estabelece em uma de suas metas que até 2025 os veículos elétricos devem compor 72% de todo sistema de transporte coletivo urbano (IEA, 2022).

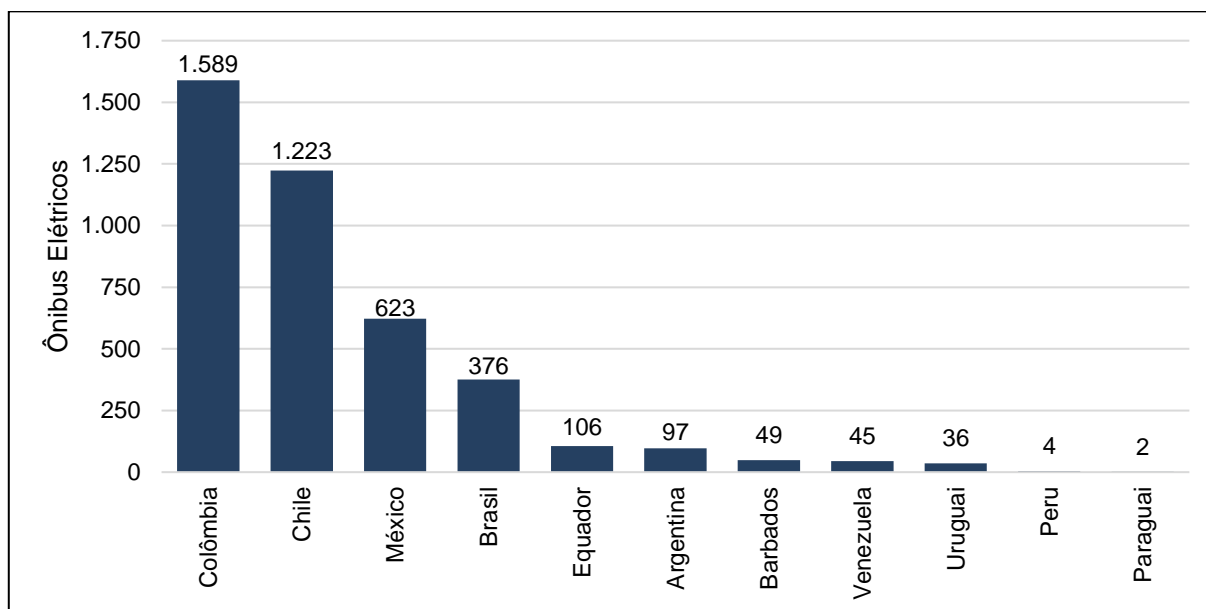
Na Europa, uma política de relevância para o tema foi o *European Green Deal*, que objetiva reduzir as emissões totais de CO₂ de veículos pesados em 45% até 2030, 65% até 2035 e 90% até 2040, assim como propõe que a partir de 2030 todos os novos ônibus devem ser veículos de emissão zero (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Medidas como esta desempenham um papel central no que diz respeito a eletrificação das frotas urbanas no continente europeu, de forma que governos locais estão promovendo políticas de subsídios para atender às normas estabelecidas, como nos Países Baixos, Finlândia, Áustria, Espanha e Reino Unido, por exemplo (IEA, 2022).

Nos Estados Unidos, o governo também tem trabalhado ativamente quanto à eletrificação do setor de transporte. O governo americano destinou uma verba de US\$ 7,5 bilhões para a aquisição de ônibus urbanos e escolares elétricos, além de mais US\$ 7,5 bilhões destinados somente para investimento em infraestrutura para veículos elétricos (WHITE HOUSE, 2021). Ademais, US\$ 1,1 bilhão foi disponibilizado para a modernização da frota de ônibus urbanos, de forma a atender as metas estabelecidas no *Low or No Emissions Program* (IEA, 2022).

Na América Latina, a Colômbia e Chile são os países de maior representatividade com relação à eletromobilidade urbana (Gráfico 6), com frotas de ônibus elétricos de 1.589 e 1.223, respectivamente (E-BUS RADAR, 2023). O Ministério da Energia do Chile (2022) elaborou a *Estrategia Nacional de Eletromovilidad*, a qual determina que todos os veículos urbanos de transporte público vendidos devem ser veículos de zero emissão a partir de 2035, medida que também passa a valer para os ônibus intermunicipais a partir de 2045. Na Colômbia,

foi estabelecido que 10% dos ônibus urbanos vendidos devem ser de emissão zero até 2025, valor que é elevado gradualmente até atingir a marca de 100% em 2035 (IEA, 2023).

Gráfico 6 – Frota de ônibus elétricos na América Latina



Elaboração própria. Fonte: E-BUS RADAR (2023).

3.3 PRÁTICA NO BRASIL

Conforme pode ser observado no Gráfico 6, o Brasil está consideravelmente atrás de determinados países vizinhos no que tange a eletrificação das frotas de ônibus. Segundo a EPE (2020), uma das principais barreiras enfrentadas no país para a introdução desta tecnologia é o atual modelo utilizado para os processos de licitação e os contratos firmados com as operadoras de transporte urbano, documentos que priorizam veículos de menor custo. Sendo assim, a aquisição dos modelos elétricos é bastante dificultada tendo em vista o investimento inicial necessário.

Não obstante, esforços têm sido realizados em diferentes esferas com o objetivo de construir um ambiente mais favorável para desenvolvimento do setor. A Tabela 7 contém uma série de medidas válidas em âmbito nacional que são benéficas à questão da mobilidade elétrica, se estendendo desde programas de P&D até estímulos fiscais através da redução de impostos. Apesar destas medidas não serem voltadas diretamente aos ônibus, são passos importantes para o

desenvolvimento tecnológico brasileiro, para a definição das regulações necessárias e para a consolidação do setor em pauta no cenário nacional (EPE, 2020).

Tabela 7 - Políticas nacionais benéficas à eletromobilidade

Nome	Início	Integrantes	Objetivos
Programa de P&D ANEEL (Projetos em Mobilidade Elétrica)	2008	ANEEL e concessionárias e 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 modicidade 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 é que, em 2020, estejam 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 nº 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 nº 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".	2019	ANEEL	Desenvolvimento de modelos de negócio que contribuam, de maneira significativa, para a criação de massa crítica e base tecnológica para o desenvolvimento de produtos e serviços nacionais na área de Mobilidade Elétrica Eficiente, e que demonstrem sua viabilidade técnico-econômica em território nacional.

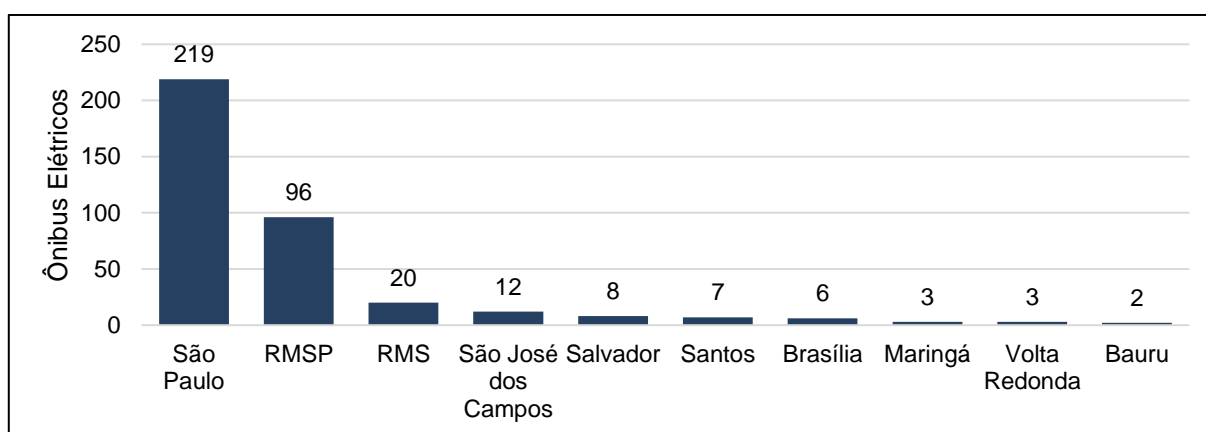
Fonte: EPE, 2020.

A nível municipal, ações também estão sendo tomadas em prol de um sistema de transportes mais limpo. Em uma das medidas de maior impacto, foi promulgada em São Paulo a Lei nº 16.802 de 17 de janeiro de 2018, a qual dispõe sobre a descarbonização dos veículos de transporte coletivo na cidade, entre outras questões. A lei estabelece que as emissões de CO₂ devem ser reduzidas em 50% em um prazo de 10 anos e 100% em até 20 anos, medida que impossibilita a aquisição de novos ônibus movidos a diesel e impacta diretamente na demanda pelos modelos elétricos. Além disso, a lei também define metas para as emissões de poluentes de efeito local como o MP e o NO_x.

Estimativas apontam que as medidas de descarbonização adotadas no município de São Paulo evitarão a emissão acumulada de 1.924.662 toneladas de dióxido de carbono entre 2022 e 2028, sendo estes valores relacionados à implementação de 2.602 ônibus de emissão zero até 2024 e 6.602 até 2028 (ARAUJO; REBOUÇAS; CIEPLINSKI, 2022). Atualmente, o município conta com uma frota de 219 veículos (E-BUS RADAR, 2023).

Outro município com metas desafiadoras quanto à eletrificação da frota de coletivos urbanos é Curitiba. De acordo com os planos de urbanização da cidade, a meta estabelecida é de que os ônibus elétricos representem 10% da frota total em um período de 2 anos, de forma que é esperado em uma primeira etapa a aquisição de 134 veículos (CURITIBA, 2022). O Gráfico 7 mostra a atual distribuição dos ônibus elétricos no Brasil.

Gráfico 7 – Distribuição dos ônibus elétricos no Brasil¹¹



Elaboração própria. Fonte: E-BUS RADAR, 2023.

De acordo com a Secretaria de Transporte e Mobilidade (SEMOB) (2020), os seis ônibus elétricos em circulação no Distrito Federal pertencem Viação Piracicabana e foram incorporados à linha 0.108, que faz o trajeto entre a Rodoviária do Plano Piloto e a Praça dos Três Poderes. Os veículos são do modelo D9W da BYD com carroceria Marcopolo e já deixaram de emitir cerca de três mil toneladas de CO₂ (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2023). Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2019), a autonomia dos ônibus é de aproximadamente 250 quilômetros e o tempo de recarga das baterias é de quatro horas, sendo realizada no pátio da Piracicabana.

Segundo o E-Bus Radar (2023), de toda a frota nacional, apenas 59 dos veículos são de modelo convencional movido por bateria, sendo a maioria dos veículos (302) do modelo Trólebus. Quanto aos fabricantes, as duas marcas com maior número de veículos em circulação são a Eletra e BYD, com 282 e 65 veículos, respectivamente (E-BUS RADAR, 2023).

¹¹ RMS: Região Metropolitana de Salvador

Atualmente existem quatro fabricantes instaladas em território nacional, são elas: BYD em Campinas (SP), Eletra em São Bernardo do Campo (SP), Marcopolo em Caxias do Sul (RS) e Mercedes-Benz em São Bernardo do Campo (SP) (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2023). O incentivo à produção nacional, inclusive, representa uma das preocupações existentes acerca do processo de eletrificação da frota de ônibus urbanos. Aloizio Mercadante, presidente do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), afirma que o banco será peça importante na transição para a eletromobidade através de financiamentos ao setor, assim com ressalta o papel fundamental da mão de obra nacional durante o processo:

“Já tem algumas empresas produzindo estes ônibus no Brasil. O BNDES vai financiar estes projetos e nós estamos trabalhando também um modelo de financiamento para as prefeituras, para que elas tenham condições de fazer a concessão e utilizar este equipamento, usando modelos de negócios internacionais que estão em andamento. Nós temos de disputar este mercado com produto brasileiro e não simplesmente importar o ônibus pronto.” (Diário do Transporte, 2023).

Barassa et al (2022) realizaram um estudo acerca dos impactos econômicos diretos e indiretos da produção nacional dos ônibus elétricos a bateria. Este trabalho levou em consideração não apenas a produção dos veículos em si, mas também o investimento em infraestrutura necessário para a sua realização e, em um cenário mais otimista, a nacionalização da produção dos componentes dos ônibus, como as baterias.

A partir da matriz insumo produto do IBGE (2018), o estudo estimou que a cada R\$ 1 milhão em vendas de ônibus elétricos, são gerados 15 empregos em toda economia. No que concerne os impactos macroeconômicos decorrentes da nacionalização gradual da produção, o estudo elaborou uma projeção até 2050 separada em três cenários distintos¹²: conservador, moderado e otimista, conforme a Tabela 8.

¹² A distinção entre os cenários é realizada com base em diferentes variáveis, tais como: quantidade de municípios que aderiram à nova tecnologia; subsídios; presença de demanda externa para a produção nacional, composição da frota entre produtos importados e produzidos nacionalmente; custo de produção total; entre outros fatores.

Tabela 8 - Impactos macroeconômicos da nacionalização da produção de ônibus elétricos e seus componentes¹³

Impactos macroeconômicos	Conservador	Moderado	Otimista
Ônibus produzidos	45.253	78.220	317.501
Investimento (R\$ bilhões)	30	48,3	201
Impostos arrecadados (R\$ bilhões)	5	9,3	44,3
Incrementos médios anuais no PIB (R\$ bilhões)	0,982	1,1	3,1
Incrementos médios anuais no PIB (% do PIB de 2020)	0,013	0,016	0,040
Postos de trabalho criados	46.794	117.328	561.985

Elaboração própria. Fonte: Barassa et al (2022).

Segundo Barassa et al (2022), a baixa demanda e pequeno volume de produção impossibilitam a produção nacional de boa parte dos componentes dos veículos que são atualmente importados. Apesar disso, as projeções apontam que os impactos econômicos gerados a partir da nacionalização da produção seriam positivos até mesmo no cenário mais conservador, no qual há grande participação dos componentes importados na cadeia de produção. Nesse sentido, o trabalho aponta que a expansão do setor pode ser benéfica ao crescimento econômico, de forma que o tamanho dos benefícios está diretamente relacionado com o montante investido.

¹³ As variáveis de “ônibus produzidos”, “investimento”, “impostos arrecadados” e “postos de trabalho criados” dizem respeito às projeções acumuladas, isto é, até 2050. A variável “postos de trabalhos criados” considera o saldo final da geração de emprego, sendo assim, esses valores já contabilizam os postos de trabalho extintos no processo. As variáveis correspondentes aos incrementos médios anuais do PIB compreendem somente o período de 2021 a 2030.

4 METODOLOGIA

Este capítulo detalha toda a metodologia adotada para a realização deste trabalho, desde a explicação dos procedimentos aplicados até a descrição dos dados utilizados. Para tanto, este capítulo foi dividido em quatro partes: construção de cenários, Análise Custo-Benefício, valoração das externalidades e escolha das linhas para substituição das frotas.

4.1 CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS

A avaliação de viabilidade do projeto consistirá na análise comparativa entre dois cenários. O primeiro destes, chamado de “Diesel”, será correspondente ao atual modelo predominante de transporte coletivo rodoviário do DF, composto por ônibus movidos a diesel, enquanto no outro cenário, chamado de “Elétrico” ocorrerá a substituição da frota por modelos elétricos.

Projetos de substituição de ônibus diesel por modelos elétricos tem sua viabilidade pautada no princípio do ponto de equilíbrio financeiro. Portanto, a substituição por ônibus elétricos será viável somente se a redução dos custos variáveis relacionados à sua utilização for no mínimo igual ao acréscimo do custo fixo referente à aquisição destes veículos, dado o seu investimento inicial mais elevado frente aos modelos tradicionais (EPE, 2020).

O custo total do projeto pode ser dividido entre fixos e variáveis. Os custos fixos são compostos por: custo de capital, despesas com pessoal e despesas administrativas (D’AGOSTO; GONÇALVES; ALMEIDA, 2017). Visto que neste trabalho não será assumida nenhuma mudança no quadro de funcionários da transportadora nem na estrutura organizacional da empresa, as despesas com pessoal e administrativas não serão projetadas visando a simplificação do estudo. Sendo assim, o custo fixo será representado pelo investimento em capital.

Já o custo variável é dividido entre os custos de abastecimento e manutenção (lubrificante, rodagem, peças e acessórios), os quais crescem à medida que a distância percorrida pelos veículos se eleva. Ademais, neste trabalho será considerado também o custo proveniente do *leasing* das baterias, cujas premissas utilizadas para a escolha desta opção estão detalhadas mais adiante.

Dado o exposto, as principais variáveis que irão nortear a análise comparativa entre os cenários são podem ser divididas em: investimento em capital (*Capital Expenditure* - CAPEX), os custos operacionais (*Operational Expenditure* – OPEX) e as receitas, conforme detalhado na Tabela 9.

Tabela 9 - Variáveis principais do fluxo de caixa

Cenário	CAPEX	OPEX	Receitas
Diesel	Ônibus diesel	Manutenção; Combustível	Tarifas
Elétrico	Ônibus elétricos; Infraestrutura de recarga	Manutenção; Energia; <i>Leasing</i> da bateria	Tarifas

Elaboração própria.

Para os custos de manutenção do ônibus diesel, este trabalho teve como referência o praticado pela Expresso São José, cujo valor corrigido pela inflação é de aproximadamente R\$ 0,3/km (SEMOB, 2023). Para o modelo elétrico, o reparo é realizado tanto no veículo como na infraestrutura de recarga. Atualizando pela inflação o valor estimado pela EPE (2020), tem-se um custo para os carregadores de R\$ 0,06. Para os ônibus, o custo de manutenção é 24% inferior comparado a modelos diesel equivalentes, do tipo Padron, todavia, este modelo possui um custo mais elevado que o modelo básico utilizado pela Expresso São José. Dessa forma, o custo de manutenção para o cenário “Elétrico” adotado é superior ao do cenário “Diesel”, com R\$ 0,57.

O custo de abastecimento está diretamente relacionado ao rendimento¹⁴ do veículo e ao preço do combustível¹⁵ (EPE, 2020). Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023), o preço médio do óleo diesel atualmente praticado no Distrito Federal é de R\$ 4,92/l, valor que foi adotado neste trabalho. Para o custo de energia elétrica, a partir da premissa de carregamento realizado fora do horário de pico para o grupo A4, foi considerado o valor de R\$ 0,48/kWh (NEOENERGIA, 2023).

¹⁴ Expresso em km/l para os veículos movidos a diesel e km/kWh para os modelos elétricos.

¹⁵ Expresso em R\$/l para os veículos movidos a diesel e R\$/kWh para os modelos elétricos.

No que diz respeito ao rendimento dos veículos, foi adotado o valor de 2,8 km/l para os veículos diesel, conforme praticado pela Expresso São José (SEMOB, 2023). Para os modelos elétricos, foi calculada uma média dos rendimentos registrados em outras três cidades brasileiras, chegando-se ao valor de 0,77 km/kWh (EPE, 2020).

Quanto à bateria, o *leasing* deste componente dos ônibus elétricos é uma alternativa importante para diminuir o investimento inicial necessário para a aquisição dos ônibus, uma vez que essa é a parte mais custosa do veículo. Segundo Greenpeace (2016), o *leasing* deste item reduz o investimento inicial em 60%. Como referência para o custo do aluguel da bateria, foi utilizado o preço pago pela Prefeitura de São Paulo em 2019 (EPE, 2023), cujo valor atualizado pela inflação é de R\$ 1,94/km.

No que concerne à vida útil dos veículos, segundo a NTU (2022), a idade média da frota brasileira chegou ao valor máximo histórico de 6,12 anos em outubro de 2021 (Gráfico 3), sendo composta quase que inteiramente por veículos diesel. Nas capitais, mais especificamente, observa-se uma tendência de manter a idade média da frota em aproximadamente 5 anos, quando os veículos são revendidos (EPE, 2020). Para os modelos elétricos, um estudo do *International Council on Clean Transportation* (ICCT) indica que a vida útil destes veículos é de 10 anos, podendo chegar em 12 a 15 anos para os ônibus 100% elétricos (SLOWIK et al, 2018).

Para simplificação da avaliação, foi considerada uma vida útil de 5 anos para os modelos diesel, tempo mais propício para a adequação do investimento à projeção do fluxo de caixa de 10 anos, período normalmente considerado nas concessões de transporte público. Para os modelos elétricos, adotou-se uma vida útil de 10 anos, mantendo a projeção mais conservadora. Portanto, enquanto no cenário “Elétrico” a aquisição de veículos só ocorre no investimento inicial, no cenário “Diesel” é necessária uma nova reposição da frota na metade do período de análise.

A depreciação aplicada na projeção do fluxo de caixa é constante, com um valor residual equivalente a aquisição de um veículo novo na ordem de 30% para os

modelos diesel e 10% para os modelos elétricos¹⁶, conforme praticado pela Expresso São José (SEMOB, 2023).

4.2 ESCOLHA DAS LINHAS PARA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA

As linhas de ônibus do Distrito Federal são divididas em cinco bacias, de forma que cada uma delas é de responsabilidade de uma empresa diferente, conforme demonstrado na Tabela 10. Embora o sistema de transporte coletivo no DF seja público, as companhias transportadoras são entidades privadas, as quais tem o direito da exploração do transporte coletivo local por meio de concessões, cujo tempo de contrato é de 10 anos (SEMOB, 2023).

A escolha das bacias para eletrificação da frota leva em consideração os possíveis efeitos da poluição gerada pelos ônibus diesel sobre a população. Nesse sentido, com base na composição das bacias observada na tabela abaixo e nas informações acerca da qualidade do ar no Distrito Federal abordadas no tópico 2.3, as bacias de número 4 e 5 aparecem como as de maior urgência quanto a eletrificação das frotas tendo em vista o benefício potencial do investimento.

Tabela 10 - Bacias de operação de ônibus

Bacia	Empresa	Região de Operação
1	Viação Piracicabana	Brasília, Cruzeiro, Lago Norte, Varjão, Sobradinho e Planaltina
2	Viação Pioneira	Paranoá, Itapoã, São Sebastião, Jardim Botânico, Gama, Santa Maria, Park Way (Epia) e Candangolândia
3	Viação HP-ITA (Urbi)	Núcleo Bandeirante, Riacho Fundo I e II, Recanto das Emas e Samambaia
4	Viação Marechal	Guará, Park Way (Arniqueiras), Águas Claras, Taguatinga (ao sul da Hélio Prates) e Ceilândia
5	Expresso São José	SIA, SAAN, SOF Norte, Estrutural, Vicente Pires, Taguatinga (ao norte da Hélio Prates - M Norte), Ceilândia Norte e Brazlândia

Elaboração própria. Fonte: SEMOB, 2023.

Para a definição de uma bacia prioritária para a implementação do projeto, levou-se em consideração o índice de passageiros transportados por quilômetro.

¹⁶ Para o valor residual de 10% dos veículos elétricos, utilizou-se como referência o valor praticado pela Expresso São José nos ônibus articulados com ar-condicionado, os quais apresentam configuração mais similares aos modelos elétricos.

Embora as duas bacias contenham dados históricos similares, a de número 5 apresenta média histórica levemente superior, com 1,21 frente aos 1,19 da bacia 4 (SEMOB, 2023). Sendo assim a bacia de número 5, operacionalizada pela empresa Expresso São José, foi considerada prioritária para eletrificação da frota.

Atualmente, a Expresso São José conta com uma frota de 576 veículos e é responsável pela operação de 206 linhas (DIÁRIO DO TRANSPORTE, 2023). A empresa teve o seu contrato renovado com o Governo do Distrito Federal no dia 27 de junho de 2023, termo que pode ser rompido caso alguma das cláusulas acordadas não seja cumprida. Uma destas cláusulas prevê a renovação da maior parte da frota, de sorte que 473 ônibus devem ser obrigatoriamente substituídos, em caráter de urgência, tendo em vista a baixa qualidade das instalações (GIOVANNI e LIMÃO, 2023).

Diante deste contexto, a análise comparativa entre os cenários abordados no subcapítulo 4.1 será realizada com base na substituição de parte da quantidade de veículos requisitados para renovação. Ao todo, foram escolhidas 4 linhas circulares para o projeto, todas localizadas em Ceilândia (Tabela 11). Um dos fatores que orientaram a escolha desta localização é o fato de que esta é a Região Administrativa (RA) mais populosa do DF, com 443.824 habitantes (CODEPLAN, 2019). Nesse sentido, o número de residentes beneficiados com uma melhor qualidade do ar em Ceilândia é consideravelmente maior do que em outros locais. À título de comparação, a segunda RA mais populosa do DF é Samambaia, com 244.960 habitantes, número bem menor ao observado em Ceilândia.

Tabela 11 – Linhas escolhidas para a substituição

Linha	Nº de ônibus	Origem	Destino
0.929	7	Terminal Setor O	Ceilândia Centro
929.1	4	Terminal Setor O	JK Shopping
0.927	4	Terminal Setor O	Ceilândia Centro
0.926	3	Terminal Setor O	Ceilândia Centro

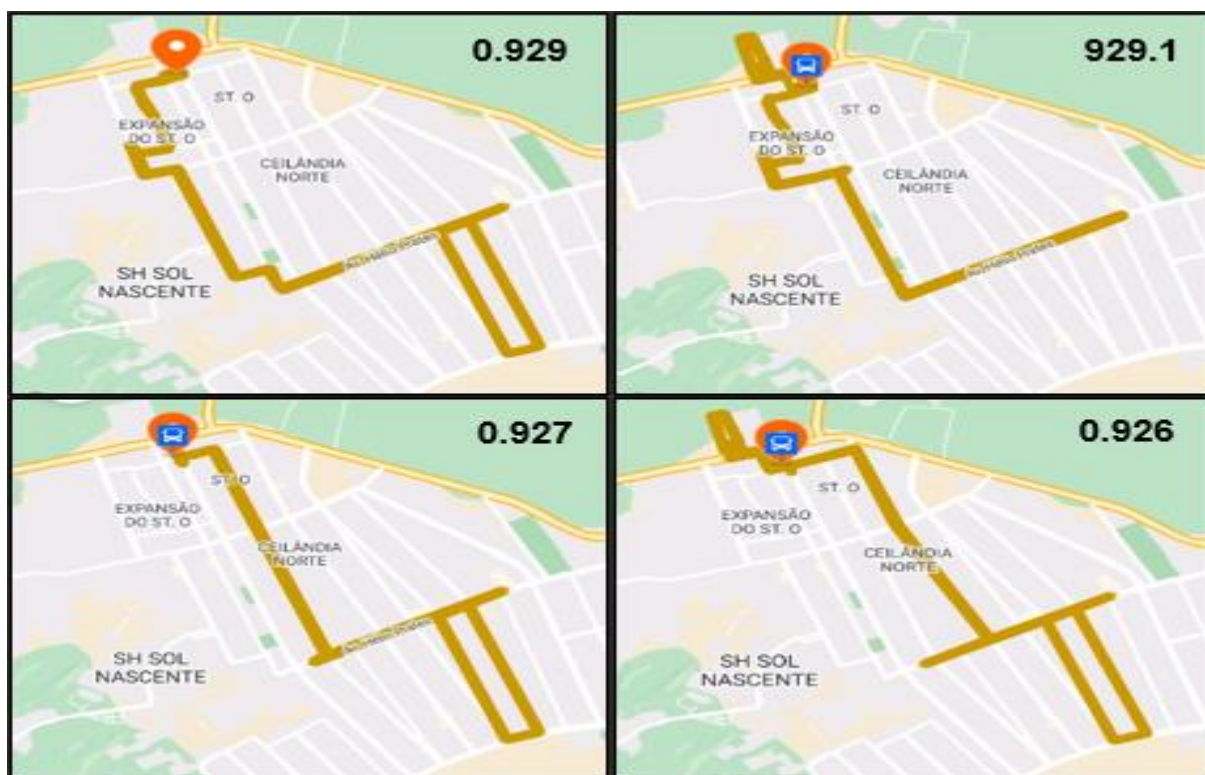
Elaboração própria a partir de SEMOB, 2023.

A escolha destas linhas, mais especificamente, é diretamente influenciada pela autonomia dos ônibus elétricos. Enquanto os ônibus diesel são capazes de percorrer distâncias de 450 km entre os abastecimentos, a autonomia dos modelos elétricos costuma ser de somente 200 km (REVISTA AUTOBUS, s.d.). Em vista

disso, a utilização destes veículos em linhas maiores é impossibilitada, de forma que, enquanto não houver maior desenvolvimento tecnológico, os ônibus elétricos tendem a estar concentrados em linhas menores distâncias. No Distrito Federal, por exemplo, os veículos já em operação realizam a rota circular entre a Rodoviária e a Praça dos Três Poderes, trecho com aproximadamente 6 km.

Uma forma de eliminar esta barreira é através da utilização de infraestruturas de recarga rápida, as quais podem recarregar parcialmente o veículo no próprio terminal no intervalo de tempo entre as viagens, com os passageiros dentro do veículo. Segundo Guenther e Padilha (2016), um período de 15 minutos é suficiente para recarregar a bateria em 30% a 60%, o que evidencia a importância desta infraestrutura para abastecer ônibus que circulam em trechos maiores. Não obstante, o alto custo destes equipamentos dificulta a sua aquisição, de sorte que o seu preço é cerca de quatro vezes maior do que o praticado no carregador padrão, cujo tempo de recarga máxima é de 4 horas.

Figura 3 – Linhas escolhidas para a substituição (mapa)



Elaboração própria a partir do Google Maps.

O cenário “Diesel”, será estruturado com a aquisição de ônibus movidos a diesel do modelo básico sem ar-condicionado, modelo atualmente predominante na frota da Expresso São José. O cenário “Elétrico” será baseado na aquisição de

ônibus elétricos do modelo D9W da BYD, equivalentes àqueles já em circulação no Distrito Federal, conforme colocado no tópico 3.3. Ao todo, cada um dos cenários contará com 18 ônibus, os quais são divididos entre as 4 linhas vide Tabela 11.

Para os modelos elétricos, será considerado como base o valor de R\$ 1,7 milhão dos ônibus adquiridos no DF em 2020 (AGÊNCIA BRASÍLIA, 2020). Atualizando este valor pela inflação e deduzido da margem de 60% correspondente à bateria, tendo em vista a opção pelo seu aluguel, chega-se ao investimento inicial de R\$ 852,607,87 por veículo. Quanto aos modelos diesel, utilizou-se como referência o custo de R\$ 248.000,00 pago pela Expresso São José em 2014 (SEMOB, 2023). Corrigindo este valor pela inflação, tem-se um investimento por ônibus de R\$ 417.264,64.

A estimativa de distância diária média percorrida é de 215 km, valor inferior à autonomia do modelo elétrico utilizado no projeto, de aproximadamente 250 km (CNT, 2019). Um fator que contribuiu para a redução da distância percorrida, que também foi levado em consideração para a escolha das linhas, é a localização da garagem da Expresso São José, posicionada em frente ao terminal rodoviário de onde os ônibus partem.

Para recarregar a frota, foi considerada a instalação de 7 carregadores, com tempo de recarga de aproximadamente 4 horas, a serem instalados na garagem da empresa. Esta quantidade é necessária para a recarga completa dos veículos fora do horário de circulação, permitindo que estes operem ininterruptamente ao longo do dia. Segundo a EPE (2020), os carregadores ainda não são fabricados no Brasil, portanto, devem ser importados. De acordo com a *California Air Resources Board* (CARB), cada carregador requer um investimento de US\$ 50 mil (SLOWIK et al, 2018). Atualizando este valor pela inflação americana e convertendo em reais¹⁷, tem-se um investimento de R\$ 285.323,51 por carregador.

¹⁷ Aplicou-se a taxa de câmbio de R\$ 4,78/US\$.

4.3 DEFINIÇÃO DA TARIFA TÉCNICA

A tarifa técnica é representada pela quantia necessária por usuário pagante para pagar todo o serviço do transporte coletivo. No entanto, no Distrito Federal, assim como em outras partes do país, o usuário do transporte público não paga todos os custos e despesas das operadoras de transporte, visto que o preço da passagem adquirida pelo usuário representa somente uma parte da tarifa técnica. Esta diferença entre a tarifa técnica e o preço da passagem, portanto, é de responsabilidade do governo, o qual quita o montante restante através de repasses às empresas.

As tarifas técnicas são definidas conforme as propostas vencedoras do processo de licitação, sendo fixadas no contrato da concessão acordado entre a parte concedente e a concessionária. Anualmente, a tarifa é revisada e ajustada de forma a preservar o equilíbrio econômico-financeiro do contrato, assim assegurando a proteção dos indicadores de Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL) acordados entre as partes (SEMOB, 2023).

No momento da realização deste trabalho, a tarifa vigente da Expresso São José é de R\$ 10,8994 (SEMOB, 2023). A utilização desta tarifa neste estudo, no entanto, é inadequada, visto que este é o valor necessário para pagar toda a operação da empresa, porém neste trabalho será feita uma simulação de apenas parte desta operação, de forma que a tarifa vigente seria muito maior do que a necessária para as projeções deste estudo.

Assim, as tarifas técnicas adotadas neste trabalho são equivalentes às tarifas necessárias para que a TIR estabelecida no contrato da concessão seja cumprida. Em razão da indisponibilidade do novo contrato recente firmado com a Expresso São José, utilizou-se como referência a TIR definida no contrato anterior, firmado em 2012, de 15,96%.

Quanto ao preço das passagens, manteve-se o valor atualmente pago pelo usuário nas linhas selecionadas para este trabalho, de R\$ 2,70 (SEMOB, 2023). O método de precificação das passagens no DF é definido conforme o perfil das linhas. As linhas circulares, como as tratadas nas projeções deste estudo, são responsáveis

pelo deslocamento dos passageiros dentro de uma mesma RA (GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL – GDF, 2018).

Os outros modelos de linhas são as de ligações curtas e ligações longas/integração. Esta última realiza os trajetos mais longos de conexão entre RAs diferentes, com uma passagem de R\$ 5,50. Já as linhas de ligações curtas fazem os trechos de conexão entre as cidades satélites mais próximas e o Plano Piloto, além dos trajetos na zona central de Brasília. As passagens destas linhas atualmente são R\$ 3,80 (GDF, 2018; GDF, 2021).

Logo, nota-se que a distinção do preço das passagens entre as linhas não está relacionada ao modelo do ônibus especificamente, mas sim à distância percorrida pelos veículos. Dessa forma, espera-se neste trabalho que o repasse governamental no cenário “Elétrico” seja superior, tendo em vista à maior tarifa esperada em decorrência do custo elevado dos modelos elétricos.

4.4 PROJEÇÃO DA DEMANDA

Como não foram encontrados dados a respeito do fluxo de passageiros por linha, para estimar a demanda do serviço utilizou-se a média da quantidade de passageiros transportados por ônibus da Expresso São José conforme a sua última planilha financeira disponível (SEMOB, 2023).

Para uma projeção da evolução dos dados ao longo dos anos, considerou-se a estimativa de elevação da demanda por transporte público estimada por EPE (2023), em estudo que considera um crescimento médio da quantidade de passageiros transportados de 3,1% ao ano. A alta esperada se deve à expectativa da retomada do crescimento de fatores como o PIB *per capita*, emprego e distribuição de renda.

Ademais, com base em dados passados da CODEPLAN (2013) e do Instituto de Pesquisa e Estatística do Distrito Federal – IPEDF (2022), projetou-se uma estimativa de crescimento médio da população idosa no DF de 0,9% ao ano, para assim estimar o impacto sobre as gratuidades no fluxo de caixa.

4.5 ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO

Para avaliar a viabilidade econômico-financeira da eletrificação da frota, será aplicada a metodologia da Análise de Custo-Benefício (ACB). Esta é uma ferramenta utilizada na orientação e priorização de projetos de investimento, em que são estimados todos os custos e benefícios esperados ao longo dos anos, além das externalidades decorrentes da implementação do projeto (CONTADOR e MELLO, 2022).

A ACB é um instrumento importante tendo em vista que, além de avaliar a viabilidade do projeto do ponto de vista privado, também realiza a avaliação do ponto de vista social, no sentido de estimar quais os custos e benefícios gerados à sociedade. Sendo assim, os projetos podem ser classificados de acordo com a sua atratividade para os agentes privados e à sociedade, conforme colocado por Contador (2000) e detalhado na Tabela 12.

Segundo a metodologia elaborada pelo autor, projetos de classificação I são viáveis tanto no ponto de vista privado como no ponto de vista social, projetos de classificação II são inviáveis em ambas as perspectivas, projetos de classificação III são ruins para os agentes privados e benéficos para a sociedade e, por fim, projetos de classificação IV são positivos do ponto de vista privado, porém negativos para a economia como um todo.

Tabela 12 – Classificação de projetos

Classificação de Projetos		Ponto de Vista Social	
		+	-
Ponto de Vista Privado	+	I	II
	-	III	IV

Fonte: CONTADOR, 2000.

Parte Privada

Na análise de viabilidade financeira do projeto, isto é, na avaliação de rentabilidade do empreendimento para os agentes privados¹⁸, os principais instrumentos de análise são os custos e receitas diretos gerados ao empreendedor, sendo eles medidos a preço de mercado. Estes valores serão projetados para todos os anos de vida do projeto, assim compondo o fluxo de caixa.

Sobre o fluxo de caixa é aplicada uma taxa de desconto, a qual representa o custo de oportunidade de se investir no projeto em detrimento de outras opções de investimento, podendo ser interpretada como a taxa de atratividade mínima do empreendimento. Para o cálculo desta taxa, será utilizado o método do Custo Médio Ponderado do Capital (CMPC), do inglês *Weighted Average Capital Cost* (WACC), que realiza uma ponderação entre o custo de capital próprio e o custo de endividamento:

$$WACC = r_e * \frac{E}{D + E} + r_d * \frac{D}{D + E}$$

Na fórmula acima, r_e é o custo de capital próprio, r_d é o custo do endividamento, E é o montante de capital próprio e D é o montante da dívida. O custo de capital próprio será calculado conforme a metodologia do *Capital Asset Pricing Model* (CAPM):

$$E(R) = R_f + B_i * (R_m - R_f) + R_s$$

$E(R)$ é o retorno esperado, R_f é a taxa livre de risco¹⁹, B_i é o risco inerente ao mercado²⁰, R_m é o retorno de mercado esperado²¹ e R_s é o risco país²², também chamado de risco soberano.

¹⁸ Por agente privado, subentende-se o investidor do projeto, podendo ele ser uma empresa privada ou até mesmo o próprio setor público, como seria o caso para obras e investimentos governamentais.

¹⁹ A taxa livre de risco aplicado foi a média do último ano do Tesouro americano de 10 anos, de 3,57%.

²⁰ Foi considerado como risco de mercado o beta para o setor de transportes estimado por Damodaran (2023), de 0,70.

²¹ Como indicador de retorno de mercado, foi utilizada a média da rentabilidade anual do índice S&P500 dos últimos 10 anos, de 10,76%.

²² Tendo em vista que os parâmetros utilizados nas outras variáveis do CAPM foram do mercado americano, foi adicionada a variável de risco país, ou risco soberano, de 2,65%. Esta variável é

Conforme as planilhas financeiras da Expresso São José, as aquisições de veículos previamente realizadas foram quitadas sem a utilização de financiamentos (SEMOB, 2023). Isto posto, este trabalho seguirá o padrão praticado pela empresa, com custo de endividamento nulo. Assim, tem-se que a taxa de desconto será composta somente pelo produto entre o custo de capital próprio e o seu montante, de forma que o WACC utilizado para trazer o fluxo de caixa a valor presente será de 11,25%.

Conforme metodologia do Ministério da Economia (2021), os indicadores utilizados para a avaliação de viabilidade privada do projeto são:

Valor Presente Líquido (VPL): representado pelo fluxo de caixa acumulado do projeto atualizado por uma taxa de desconto (WACC). O projeto é considerado viável se o VPL for positivo, de modo que quanto maior for o seu valor, maior será a rentabilidade do projeto.

Taxa Interna de Retorno (TIR): é a taxa de desconto que iguala o VPL a zero. Sendo assim, pode ser interpretado como a taxa que iguala o valor presente das receitas do projeto ao valor presente dos custos. O projeto é considerado viável se a TIR for maior do que a taxa de desconto.

Parte Social

Diferentemente da análise privada, na qual os principais instrumentos de análise eram os custos e receitas, na avaliação social tem-se o foco sobre os custos e benefícios do projeto gerados à sociedade. Em vista disso, nas projeções desta seção são utilizados os preços sociais (preços sombra), dado que os preços de mercado aplicados na avaliação privada sofrem distorções, inviabilizando a sua utilização (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2021).

As distorções supracitadas são definidas pela diferença entre a unidade e os fatores de conversões sociais. Estes, por sua vez, variam de acordo com a sua aplicação. Para fins específicos deste trabalho, os fatores utilizados são os fatores

representada pelo EMBI+ Brasil, índice calculado pelo Banco JP Morgan e fornecido pelo IPEA, o qual indica a diferença de desempenho entre os títulos de dívida brasileiro e americano (IPEADATA, 2023).

de conversão padrão²³ (93,5%) e setorial²⁴ (87,5%), calculados por Oliveira e Perdigão (2022). Estes fatores, portanto, geram distorções sociais de 6,5% e 12,2%.

A avaliação de viabilidade social também leva em consideração a incidência de externalidades oriundas do projeto, as quais são valoradas e projetadas ao longo do fluxo de caixa.

Para trazer todo o fluxo de caixa a valor presente, é utilizada a Taxa Social de Desconto (TSD), a qual reflete o custo de oportunidade do capital para novos investimentos de acordo com a perspectiva da sociedade. Conforme recomendação da Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura (SDI) (2020), a TSD utilizada para projetos de investimento em infraestrutura é de 8,5%.

Segundo o ME (2021), os indicadores que orientam a avaliação de viabilidade social do projeto são:

Valor Social Presente Líquido (VSPL): equivalente ao VPL utilizado na parte privada, porém segundo a ótica social. O indicador é representado pelo fluxo de caixa social acumulado do projeto trazido a valor presente pela TSD. O projeto é considerado viável pela ótica social se o VSPL for positivo, de sorte que quanto maior for o seu valor, maior será a rentabilidade do projeto.

Taxa de Retorno Econômica (TRE): é a taxa de desconto que iguala o VSPL a zero, podendo ser interpretada como a taxa de retorno do projeto. Este será viável se a TRE for maior do que a Taxa Social de Desconto (TSD).

Relação Benefício-Custo (B/C): indicador definido pelo quociente entre os benefícios e custos econômicos do projeto trazidos a valor presente pela TSD. O projeto é considerado viável se o B/C for maior que a unidade, de forma que quanto maior for o indicador, maior será a atratividade do projeto.

Além dos indicadores orientados pelo Ministério da Economia supracitados, o *Payback Descontado* também será utilizado na avaliação de viabilidade dos cenários, tanto para a parte privada como para a social. Este indicador indica o

²³ Utilizado para bens domésticos não comercializáveis.

²⁴ Utilizado para bens domésticos comercializáveis.

tempo necessário para o retorno do capital investido no projeto, conforme a taxa de desconto aplicada (CONTADOR, 2000).

4.6 VALORAÇÃO DAS EXTERNALIDADES

As externalidades consideradas no projeto dizem respeito às emissões evitadas de poluentes locais e de gases de efeito estufa (GEE) a partir da eletrificação da frota. Quanto a este último grupo, dado que eles são poluentes de efeito global, no sentido de influenciarem a temperatura do planeta como um todo, o local onde as emissões ocorreram não interfere no processo metodológico para a sua quantificação e valoração (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2021). Sendo assim, a metodologia aplicada para estimar as externalidades de projetos que promovem a redução das emissões de GEE é mais facilmente padronizada a nível internacional.

A metodologia para valoração das emissões de GEE adotada pelo Ministério da Economia (2021) tem como referência o procedimento técnico formulado pelo Banco Europeu de Desenvolvimento, sendo dividida em quatro etapas:

Quantificação das emissões evitadas: para estimar o volume evitado de gases emitidos, leva-se em consideração os fatores de emissão do objeto do projeto. Portanto, para este trabalho será utilizado o fator de emissão de veículos pesados movidos a óleo diesel. A métrica adotada pode ser tanto expressa em toneladas de CO₂ por unidade de combustível queimado como em quilogramas por quilômetro de viagem.

Projeção de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂e): embora em menor quantidade, outros gases de efeito estufa são emitidos além do CO₂, como o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Dessa forma, o impacto desses gases é estimado através da conversão em CO₂e, em que a quantidade do gás é multiplicada pelo fator equivalente ao seu potencial de aquecimento global (PAG).

Precificação das emissões: existem 3 formas de precificar o preço sombra das emissões: Custo Social do Carbono (CSC), preços formulados com objetivos específicos de redução e por preços de mercado, de forma que a primeira opção foi adotada nesta pesquisa. Campoli e Feijó (2022) estimaram que o preço sombra do carbono no Brasil em 2020 era de US\$ 8,45, valor este que foi utilizado neste trabalho. Ainda segundo os autores, este valor pode ser extrapolado para o futuro

conforme o crescimento do PIB, de forma que foi projetado um incremento de 0,08977 no preço do carbono a cada 1% de aumento no PIB nacional. Para as variações futuras dos preços foi adotada como referência as projeções de crescimento do PIB detalhadas no Relatório Focus, de autoria do Banco Central do Brasil (BCB).

Valoração das emissões: esta etapa é realizada através do produto entre a quantidade total de gases emitidos pelo custo unitário do CO₂e utilizado no trabalho, expresso em R\$/ton.

Para a valoração das emissões de poluentes locais, será utilizado método similar. Portanto, de forma geral pode-se definir a monetização dos gases e partículas emitidos conforme a fórmula abaixo:

$$\$E_p = Quantidade(t)_p * \$t_p$$

Em que: $\$E_p$ representa o valor das emissões do poluente p , $Quantidade(t)_p$ é a quantidade de toneladas emitidas de p e $\$t_p$ é o custo unitário da tonelada de p . Por fim, tem-se que a externalidade do projeto é dada pelo somatório das emissões evitadas para cada poluente:

$$\$E_{total} = \sum \$E_p$$

Portanto, a partir da valoração das emissões pretende-se avaliar o benefício direto gerado à sociedade e ao meio ambiente por meio da eletrificação da frota de ônibus urbanos. Os dados referentes aos fatores de emissão, os custos da tonelada e Potenciais de Aquecimento Global (PAG) utilizados na projeção estão detalhados na Tabela 13:

Tabela 13 – Fatores de emissão²⁵, custos por tonelada e PAG²⁶

Poluentes		Fator de emissão (g/km)	R\$/ton	PAG
Locais	MP	0,03	114.869,28	-
	NO _x	2,69	22.456,74	-
	CO	0,47	4.389,05	-
	HC	0,03	19.427,77	-
Globais	CO ₂	953,93	44,45	-
	CH ₄	0,06	1.111,20	25
	N ₂ O	0,03	13.245,51	298

Elaboração própria. Fonte: (ME, 2021); (CETESB, 2021); (ARAUJO; REBOUÇAS; CIEPLISNKI, 2022); (PAIVA; 2021).

É importante citar que as externalidades estimadas serão incluídas no fluxo de caixa somente como uma entrada positiva no cenário “Elétrico”, não sendo realizadas entradas negativas no cenário “Diesel” para evitar o problema de dupla contagem.

²⁵ O fator de emissão do CO₂, fornecido por Araujo, Rebouças e Cieplinski (2022), foi de 2,671 kg/l, valor o qual foi convertido para g/km a partir do rendimento dos ônibus diesel aplicado neste estudo, de 2,80 km/l.

²⁶ Para a determinação do custo das toneladas de CH₄ e N₂O, realizou-se o produto entre o custo do CO₂ e o PAG dos dois gases.

5 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção será feita a análise e discussão acerca dos resultados obtidos nas projeções do estudo. Os fluxos de caixa estarão demonstrados nos apêndices ao final deste trabalho, de forma que neste capítulo a análise será guiada pelos componentes que compõem a viabilidade do projeto, assim como os seus indicadores.

A Tabela 14 detalha o CAPEX dos cenários analisados. Todos os valores foram trazidos a valor presente conforme a taxa de desconto estabelecida na metodologia. O investimento total do cenário “Elétrico” é cerca de 46% maior do que o do cenário “Diesel”, discrepância fortemente impactada pelo alto custo unitário dos modelos elétricos, que é pouco mais que o dobro dos ônibus diesel. Assim, percebe-se que este é um fator altamente relevante mesmo com a escolha do *leasing* das baterias, medida que reduziu o custo de aquisição dos modelos elétricos em 60%.

Tabela 14 - CAPEX

CENÁRIO ELÉTRICO				CENÁRIO DIESEL			
Investimento	Custo unitário	Qtd.	CAPEX	Investimento	Custo unitário	Qtd.	CAPEX
Ônibus Elétrico	R\$ 852.608	18	R\$ 15.346.942	Ônibus Diesel	R\$ 417.265	36	R\$ 11.918.377
Infraestrutura de recarga	R\$ 285.324	7	R\$ 1.997.265	-	-	-	-
Total	-	-	R\$ 17.344.206	Total	-	-	R\$ 11.918.377

Elaboração própria.

Os ônibus elétricos e as infraestruturas de recarga são todas adquiridas no ano 0, diferentemente do ocorrido no cenário “Diesel”, em que também ocorre uma rodada extra de investimentos no ano 5 em virtude da aquisição de novos veículos tendo em vista a menor vida útil dos modelos diesel. Analisando-se somente o investimento inicial, os ônibus diesel representaram um dispêndio de aproximadamente R\$ 7,5 milhões, portanto, menos da metade do valor investido inicialmente no cenário “Elétrico”. Tal fato evidencia uma das principais barreiras para a introdução à eletromobilidade, o investimento necessário.

Neste estudo, não foi considerada a prática de financiamentos, de forma que todo o investimento foi realizado pela própria empresa, conforme feito previamente pela Expresso São José. No entanto, é bastante comum que investimentos dessa magnitude sejam realizados com o auxílio de alguma linha de crédito, dado que nem sempre as empresas dispõem do valor em caixa necessário para se realizar o investimento inicial. Torna-se evidente, portanto, o impacto que um contexto de altas

taxas de juros pode ter sobre a viabilidade de um projeto como este, o que aumentaria em grande escala as despesas financeiras no médio e longo prazo.

Dado o exposto, é nítida a importância que o Estado tem para viabilizar a transição para a eletromobidade no país. O auxílio governamental, em uma perspectiva fiscal, pode ocorrer tanto através de desonerações de impostos quanto por meio de políticas subsidiárias, as quais podem ser realizadas para suavizar o custo de aquisição dos veículos assim como das infraestruturas de recarga. Quanto a estes equipamentos, é válido ressaltar ainda o alto impacto da taxa de câmbio, tendo em vista que os carregadores ainda não são produzidos no Brasil.

Os custos operacionais anuais do projeto estão demonstrados na Tabela 15. Toda a estrutura do OPEX é composta por custos variáveis relacionados à distância percorrida dos veículos, tendo em vista a não inclusão dos custos fixos dado que eles são idênticos para ambos os cenários, de forma que foram suprimidos para simplificação da análise. É pertinente ressaltar que, embora os custos projetados sejam variáveis, eles foram constantes ao longo do período de avaliação, haja vista que não foram consideradas variações nas rotas das linhas, assim mantendo as distâncias anuais inalteradas.

Tabela 15 – OPEX²⁷

CENÁRIO ELÉTRICO	R\$	%	CENÁRIO DIESEL	R\$	%
Manutenção	675.592	18,2%	Manutenção	356.462	14,8%
Energia	730.341	19,7%	Combustível	2.058.649	85,2%
<i>Leasing</i> das baterias	2.304.681	62,1%	-	-	-
Total	3.710.614	100,0%	Total	2.415.111	100,0%

Elaboração própria.

O custo operacional do cenário “Elétrico” é cerca de 54% superior ao do cenário “Diesel”, o que pode parecer contraditório, dado que uma das principais vantagens dos modelos elétricos é justamente o menor custo de operação dos veículos. Todavia, este valor elevado é uma consequência direta da opção considerada de realizar o *leasing* das baterias, componente responsável por 62,1% do custo operacional total dos ônibus elétricos.

²⁷ Nos custos de manutenção estão inclusos os gastos com lubrificantes, pneus, peças e acessórios e, exclusivamente para o cenário “Elétrico”, os custos com a manutenção da infraestrutura de recarga.

Nesse sentido, é possível perceber o *trade-off* presente na escolha do aluguel deste item, em que foi preferível a elevação dos custos de médio e longo prazo frente ao investimento superior para a aquisição de um veículo com a bateria integrada. Não obstante, esta opção se mostra benéfica para a viabilidade do projeto, visto que o somatório entre o CAPEX e OPEX totais trazidos a valor presente é cerca de 25% maior quando se opta pela não realização do *leasing*.

No comparativo entre os custos para abastecimento dos veículos, tem-se uma grande vantagem para os modelos elétricos, de sorte que a recarga dos ônibus via energia elétrica é cerca de 65% mais barata que o custo de combustível do cenário “Diesel”. Ademais, é estima-se um consumo evitado de pouco mais de 418 mil litros de óleo diesel por ano, valor que sobe para quase 4,2 milhões de litros em toda duração do projeto.

Apesar disso, é importante ressaltar que no cenário “Elétrico” há um consumo extra de 1,5 milhão de kWh por ano para a recarga da frota. Sendo assim, ressalta-se a importância de uma matriz energética limpa para suprir a demanda por energia em um contexto de eletrificação intensiva do setor de transportes, de outra forma, a transição para a eletromobidade geraria extenso impacto negativo sobre o meio ambiente. Nesse contexto, o cenário brasileiro é mais favorável para este movimento, haja vista a predominância de fontes de energia renováveis.

No que diz respeito aos custos de manutenção, nota-se que estes foram mais altos no cenário “Elétrico”, o contrário do normalmente observado. Embora neste valor tenha sido incluído também o custo com a manutenção da infraestrutura de recarga, este componente compõe apenas 11% do custo total, de forma que ainda assim dispêndio seria maior frente o cenário “Diesel”.

Portanto, destaca-se como motivo para o custo de manutenção mais elevado no cenário “Elétrico” a incompatibilidade dos modelos de ônibus analisados. Embora seja fato que em geral os ônibus elétricos apresentam custos de manutenção mais baixos em decorrência da menor quantidade de peças, esta afirmativa só é válida quando feita a comparação entre veículos de configurações similares.

Isto posto, caso o ônibus elétrico fosse comparado a um ônibus diesel modelo Padron com ar-condicionado, o modelo elétrico seria mais vantajoso quanto ao custo da sua manutenção. Contudo, neste estudo foi considerada a aquisição de modelos

diesel básicos sem ar-condicionado, em consonância ao tipo de veículo atualmente predominante na frota da Expresso São José, os quais apresentam custos de manutenção menores dada a maior simplicidade dos veículos.

A Tabela 16 dispõe dos indicadores financeiros para avaliação da viabilidade privada do projeto. Como exposto no tópico 4.3, a taxa técnica dos cenários foi escolhida de forma a igualar a TIR ao valor estabelecido para este indicador no contrato de concessão firmado com a Expresso São José em 2012, o que explica a equivalência do indicador nos dois cenários.

Assim, a taxa técnica utilizada para igualar a TIR ao valor de 15,96% foi de R\$ 6,85 no cenário “Elétrico” e R\$ 4,15 no cenário “Diesel”. A título de informação, a taxa necessária para zerar o VPL, isto é, para se obter o retorno de todo o capital investido no projeto, é de R\$ 6,04 e R\$ 3,75 para os dois cenários, respectivamente.

Tabela 16 – Indicadores de viabilidade privada

Indicadores	Cenário Elétrico	Cenário Diesel
VPL	R\$ 3.975.991	R\$ 1.807.927
TIR	15,96%	15,96%
Payback Descontado	7 anos e 10 meses	8 anos e 10 meses

Elaboração própria.

O VPL do cenário “Elétrico” é cerca de 120% superior ao do cenário “Diesel”, com um *payback* descontado 1 ano menor. O que explica a disparidade entre os dois cenários é a diferença entre a tarifa técnica e o preço da passagem paga pelo usuário, influenciado pelo atual modelo de precificação das passagens.

No Distrito Federal, o preço da passagem é definido conforme o perfil do trajeto das linhas, conforme destacado no tópico 4.3. As linhas de ligações curtas, que são as tratadas neste estudo, tem uma passagem precificada em R\$ 2,70. Assim, o repasse governamental por passageiro pagante, equivalente à diferença entre a tarifa técnica e a passagem, foi de R\$ 4,15 no cenário “Elétrico” e R\$ 1,45 no cenário “Diesel”. Esta discrepância, portanto, resultou em um montante total repassado pelo governo de aproximadamente R\$ 28,9 milhões e R\$ 10,1 milhões para os dois cenários, respectivamente.

Os indicadores acima mostram que, no atual modelo de concessão, a empresa de transporte encontra-se protegida pelo contrato estabelecido com o governo, dado que é de responsabilidade deste a realização dos repasses para preservar os valores acordados para o VPL e TIR. Contudo, essa discussão levanta a questão de até que ponto é interessante para o governo, em termos financeiros, a introdução de ônibus elétricos nas frotas urbanas.

Supondo um cenário em que duas empresas participam de uma licitação sobre a exploração do transporte público em uma determinada região, em que a empresa X prevê a utilização de ônibus diesel e a empresa Y prevê a utilização de somente modelos elétricos. Tendo em vista o atual modelo de precificação das passagens segundo as distâncias percorridas pelas linhas e supondo taxas internas de retorno similares definidas pelas duas operadoras, é evidente que o repasse governamental será significativamente maior para a empresa com os ônibus elétricos. Nesse contexto, é natural supor que o órgão público responsável pela licitação iria aceitar a proposta da empresa X pelo seu menor custo envolvido, ainda mais em contexto de maior rigidez fiscal.

Apesar disso, é de responsabilidade do governo a análise social de investimentos em projetos de infraestrutura, sendo assim, os indicadores privados não podem ser os únicos indicativos para a determinação de prioridades na realização de projetos. Voltando aos cenários definidos neste estudo, a Tabela 17 detalha a quantidade de toneladas emitidas evitadas para cada poluente analisado, bem como a externalidade positiva decorrente representada pela valoração das emissões.

Tabela 17 – Emissões evitadas no ano 1 e valoração econômica

Poluente	ton	Valoração das emissões (R\$)
MP	0,03	3.412
NO _x	3,19	71.684
CO	0,56	2.461
HC	0,04	762
CO ₂ e	1.358	50.922
Total	-	129.240

Elaboração própria.

Ao todo, a utilização dos 18 ônibus gerou um benefício econômico estimado em cerca de R\$ 129 mil no primeiro ano somente. Para todo o período de duração

do projeto, projeta-se um benefício total trazido a valor presente de aproximadamente R\$ 872 mil.

Dentre os poluentes de maior representatividade, destacam-se o NO_x e o CO_2e , com uma participação de 95% nas emissões evitadas. No CO_2e estão consideradas, além do CO_2 , as emissões de CH_4 e N_2O , porém a participação destes componentes é ínfima, com somente 1% de todo dióxido de carbono equivalente.

Embora se tenha uma ideia do benefício econômico gerado a partir da introdução dos ônibus elétricos nas frotas urbanas decorrentes das informações descritas acima, é importante ressaltar que a valoração destes benefícios pode não ser tão precisa. Para se ter uma estimativa de maior precisão e eficácia, é fundamental a existência de uma ampla rede de monitoramento da qualidade do ar, principalmente no que tange os efeitos dos poluentes sobre a saúde dos indivíduos.

Isto se deve ao fato de que a saúde humana está diretamente relacionada à concentração destes poluentes na atmosfera, a qual só pode ser determinada de fato com o auxílio dos equipamentos descritos. A utilização de veículos de emissão zero é benéfica pela redução das emissões de poluentes pelos escapamentos, porém, esta redução não necessariamente se traduz em uma diminuição na concentração dos poluentes em igual proporção, dado que a concentração é afetada por diversos outros fatores, como a temperatura da região e a incidência de chuvas.

Não obstante, as externalidades estimadas e as distorções sociais derivadas dos preços sombra foram incluídas no fluxo de caixa social. A Tabela 18 detalha os indicadores utilizados para a avaliação da viabilidade do projeto do ponto de vista social.

Tabela 18 – Indicadores de viabilidade social

Indicadores	Cenário Elétrico	Cenário Diesel
VSPL	R\$ 18.679.394,68	R\$ 9.569.967,60
TRE	28,98%	31,53%
Índice Benefício-Custo	2,53	2,23
Payback Descontado	4 anos e 2 meses	3 ano e 4 meses

Elaboração própria.

A partir dos indicadores estimados acima, pode-se concluir que os dois cenários são mais atrativos na perspectiva ótica social do que na privada, com um

crescimento substancial dos indicadores calculados, bem como uma redução do *payback* descontado.

O cenário “Diesel” tem pequena vantagem na TRE e no *payback*, sendo este último esperado tendo em vista o menor investimento em capital do projeto. O Índice Benefício-Custo é bastante positivo em ambos os casos, indicando que os benefícios são mais de 1 vez maiores do que os custos.

Assim como na avaliação privada, o cenário elétrico se destaca como o maior atrativo, tendo em vista a grande disparidade no indicador de VSPL. Porém, em conformidade com a avaliação financeira, ressalta-se a influência do modelo vigente do contrato de concessão e do método de precificação das passagens sobre a indicação de viabilidade por meio deste indicador.

Naturalmente, espera-se uma maior atratividade dos veículos elétricos em uma análise de viabilidade social frente à avaliação privada, tendo em vista os benefícios sociais e ambientais consequentes. No entanto, o tamanho do investimento necessário para aquisição destes veículos ainda é um grande entrave ao maior desenvolvimento do setor no Brasil, de forma que a viabilidade privada do projeto esteve diretamente relacionada ao auxílio governamental decorrente do contrato de concessão firmado.

Dado o exposto, em conformidade com as projeções realizadas neste estudo e as premissas adotadas, pode-se considerar o projeto de introdução de ônibus elétricos nas quatro linhas de Ceilândia como positivo tanto para os agentes privados como para a sociedade, o que classifica o empreendimento na categoria I de atratividade de projetos segundo a metodologia de Contador (2000), vide Tabela 12.

6 CONCLUSÃO

Embora o presente trabalho tenha tido foco sobre uma pequena parte da frota de ônibus do Distrito Federal, as informações discutidas geram importantes conclusões sobre o tema. É importante frisar também que, em decorrência da utilização de parâmetros mais abrangentes acerca do setor e operação dos veículos, as projeções realizadas contêm imprecisões.

Talvez a imprecisão mais importante esteja relacionada à projeção da demanda do projeto. Uma vez que os dados de movimentação para as linhas específicas do estudo não foram encontrados, estimou-se uma média para cada ônibus a partir dos dados de movimentação da empresa como um todo.

Tendo em vista o desenvolvimento urbanístico do Distrito Federal e entorno ao longo dos anos, a maior parte do fluxo de pessoas é convergido para o Plano Piloto, em especial para a zona central onde está localizada a rodoviária. Assim, a utilização da média de passageiros transportados por ônibus para este estudo pode estar sobrevalorizando a demanda, haja vista que as linhas estudadas circulam somente em Ceilândia.

De modo geral, a introdução desta tecnologia no Brasil ainda é bastante dificultada tendo em vista o investimento em capital necessário. Apesar de não ter sido considerada a utilização de financiamento neste trabalho, as linhas de crédito desempenham importante papel na viabilização de investimentos em projetos de infraestrutura como o estudado. Assim, o desenvolvimento deste mercado no país é diretamente impactado pela acessibilidade ao crédito, a qual pode ser bastante dificultada em um contexto de política monetária contracionista.

Ainda a respeito do investimento, uma parte expressiva do valor necessário para a aquisição dos ônibus elétricos diz respeito à bateria, que representa cerca de 60% do valor total do veículo. Apesar do *leasing* ser uma boa alternativa para reduzir o investimento inicial, o pagamento deste componente limita em grande escala uma das principais vantagens dos modelos elétricos, que é o seu menor custo operacional.

Ademais, a baixa autonomia destes veículos comparada aos modelos diesel representa um enorme desafio logístico para as operadoras de transporte, o que limita a utilização destes veículos a linhas circulares de distâncias menores, como é o caso dos ônibus elétricos já em circulação no Distrito Federal. Como alternativas para reduzir esta barreira, estão a utilização de carregadores de recarga rápida ou o aumento da quantidade de ônibus nas frotas, entretanto, ambas alternativas representariam um expressivo investimento adicional. Sobre os carregadores, mais especificamente, ressalta-se ainda o impacto das oscilações da taxa de câmbio sobre o preço deste produto, dado que ele ainda não é produzido nacionalmente.

Outra questão importante diz respeito à incompatibilidade entre os prazos de concessão estabelecidos com as concessionárias e o tempo de vida útil e revenda dos veículos. Conforme exposto neste trabalho, a vida útil de ônibus elétricos pode chegar a 15 anos, tempo superior ao prazo de 10 anos normalmente definido para as concessões. Tal fato indica que prazos de concessão maiores podem ser mais atrativos para os modelos elétricos.

No que concerne às reduções das emissões de poluentes, a introdução de ônibus elétricos se mostra bastante benéfica, especialmente devido à grande quantidade de emissões de GEE evitadas. Quanto aos poluentes locais, por outro lado, ressalta-se a imprecisão dos benefícios estimados, tendo em vista que não existem dados em quantidade satisfatória sobre a concentração atmosférica destes poluentes no Distrito Federal.

Como possíveis impactos negativos da transição para a eletromobilidade, destacam-se a relevância de uma matriz energética e a questão do descarte das baterias. Quanto à questão da matriz energética, tem-se que os benefícios gerados a partir da utilização dos modelos elétricos podem ser contrabalanceados pelos malefícios criados em decorrência da utilização de energia não limpa.

No que concerne ao descarte das baterias, quando feito de forma incorreta esta operação pode trazer consequências graves ao meio ambiente, como no caso da contaminação da água em decorrência do vazamento dos ácidos presentes neste componente. Sendo assim, como sugestão de pesquisa para complementação deste estudo, podem ser estimados os custos econômicos provenientes do descarte das

baterias, podendo ser projetado como um custo operacional para o caso do descarte correto ou como uma externalidade negativa da implementação dos modelos elétricos para o caso do descarte de forma indevida, fato que pode ser influenciado pela regulamentação ainda nova do setor.

Por fim, destaca-se a importância de novos investimentos para aprimorar o sistema de monitoramento da qualidade do ar no Distrito Federal. Tal medida é de suma importância para que seja possível realizar projeções precisas acerca dos benefícios sociais e ambientais de projetos de infraestrutura, servindo de grande utilidade para elevar a qualidade do debate acerca da sustentabilidade no Distrito Federal como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL reforça protagonismo do Brasil em fontes renováveis no Energyyear 2022**. [S.l.]: 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-reforca-protagonismo-do-brasil-em-fontes-renovaveis-no-energyyear-2022>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Série histórica do levantamento de preços**. Brasília: 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

ARAUJO, C.; REBOUÇAS, A. B.; CIEPLINSKI, A. **Benefícios da entrada exclusiva de ônibus de emissão zero na frota de São Paulo**. [S. l.]: 2022. Disponível em: < <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/Beneficios-ZEBRA-A4-v3.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS - NTU. **Anuário NTU 2021**. Brasília, 2022. Disponível em: < <https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637956588268708311.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS - NTU. **Aumento do volume de biodiesel no combustível pode elevar custo do transporte público no país, diz NTU**. Brasília: 15 mar. 2023. Disponível em: < <https://www.ntu.org.br/novo/NoticiaCompleta.aspx?idArea=10&idNoticia=1630>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Focus – Relatório de Mercado**. Brasília: 2023. Disponível em: < <https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

BARASSA, E. et al. **Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono**. Santiago, Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2022. Disponível em: < <https://hdl.handle.net/11362/47833>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE - BNEF. **Electric Buses in Cities: Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂**. Disponível em: https://c40.my.site.com/CommunityKnowledge/resource/C40KnowledgeHub_BNEF_C40_Electric_buses_in_cities. Acesso em: 08 jul 2023.

BRAGA, A.; et al. **Poluição atmosférica e saúde humana**. Revista USP, São Paulo, n. 51, p. 58-71, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i51p58-71>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

BRASIL. **Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 31 ago. 1981. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 29 jun. 2023

BRASIL. **Governo oficializa ampliação da mistura de biodiesel no diesel vendido no país**. [S. l.]: 29 de mar. de 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2023/03/governo-oficializa-ampliacao-da-mistura-de-biodiesel-no-diesel-vendido-no-pais>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – IBAMA. **Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986**. Brasília: IBAMA, 23 jan. 1986. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. **Diário Oficial da União**: seção 1, [s. l.], p. 8792-8795, 17 jun. 1986. Disponível em: < http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41> . Acesso em: 29 jun. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 490, de 16 de novembro de 2018**. Estabelece a Fase PROCONVE P8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras providências. Brasília: MMA, 16 nov. 2018. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: seção 1, [s. l.], n. 223, p. 155, 19 nov. 2018. Disponível em: < <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/11/2018&jornal=515&pagina=155&totalArquivos=178>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Padrões de Qualidade do Ar**. Brasília, [2018?]. Disponível em: < <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/padroes-de-qualidade-do-ar.html>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. **A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel – a questão dos particulados**. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. Química Nova, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, p. 472-482, 2003. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000300018>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

CAMPOLI, J. S.; FEIJÓ, J. R. **Preço do carbono para projetos de investimentos de infraestrutura no Brasil**. [S. l.]: 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.38116/ntdiset102>>. Acesso em: 16 jul. 2023.

CANÇADO, J. E. D.; et al. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica**. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, São Paulo, v. 32, n. 2, p. S5–S11, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-37132006000800003>>. Acesso em: 17 jun. 2023.

CARVALHO, C. H. R.; **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1578>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

CASTRO, C. F. C. **Avaliação de fatores intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus**. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 180. 2008. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp071293.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CHILE. Ministerio de Energía. **Estrategia Nacional de Eletromovilidad**. Santiago: 01 jan. 2022. Disponível em: <<https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3773>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

CLIMATE LEADERSHIP GROUP – C40. **C40 Clean Bus Declaration urges cities and manufacturers to adopt innovative clean bus technologies**. [S. l.]: 2015. Disponível em : <<https://www.c40.org/news/c40-clean-bus-declaration-urges-cities-and-manufacturers-to-adopt-innovative-clean-bus-technologies/>>. Acesso em: 09 jul. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2021**. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2021.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Proconve**. [S. l.]: [2018?]. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>>. Acesso em: 28 de jun. de 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Gases do efeito estufa e outras fontes de emissões**. [S. l.]: [s.d.]. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Padrões de qualidade do ar**. [S. l.]: [2022?]. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatórios e Publicações – Emissão Veicular**. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2022/12/Fator-de-emissao-2021.xlsx>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL - CODEPLAN. **Projeções populacionais para as regiões administrativas do Distrito Federal 2010-2020**: sumário executivo. [S. l.]: 2019. Disponível em: <<https://shre.ink/Codeplan>>. Acesso em: 06 jul. 2023.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL – CODEPLAN. **Perfil dos idosos no Distrito Federal, segundo as regiões administrativas**. Brasília: 2013. Disponível em: < https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/Perfil_dos_Idosos_no-Distrito_Federal-Segundo-as-Regioes_Administrativas.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Ônibus 100% elétricos chegam a Brasília**: dois ônibus 100% circulam na capital federal desde julho e agosto de 2018; as linhas, da empresa Piracicabana, passam pela Esplanada dos Ministérios e pela UnB. Brasília: 24 abr. 2019. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-avalia-eficiencia-onibus-eletricos>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

CONTADOR, C. R. **Projetos Sociais**: Avaliação e Prática. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CONTADOR, C. R.; MELLO, P. C. **Avaliação de projetos e formulação de políticas públicas com base em custos e benefícios sociais**. Estudos e Negócios Academics, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 27-37, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.58941/26760460/v2.n3.73>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

CURITIBA. **Ônibus elétricos devem representar 10% da frota em dois anos**. Curitiba: 06 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/onibus-eletricos-devem-representar-10-da-frota-em-dois-anos/64047>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

D'AGOSTO, M. A.; GONÇALVES, D. N. S.; ALMEIDA, I. R. P. L. **Ônibus elétricos a bateria (plug-in)**: uma primeira avaliação da viabilidade econômica e do impacto na tarifa para o uso nas cidades brasileiras. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS), 2017. Disponível em: <https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/11/relat_ltc_onibusbev.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2023.

DALLMANN, T. **Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo**. The International Council on Clean Transportation (ICCT): relatório técnico. São Paulo. Washington, DC: ICCT, 2019. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/beneficios-de-tecnologias-de-onibus-em-termos-de-emissoes-de-poluente-do-ar-e-do-clima>. Acesso em: 08 jul. 2023.

DAMODARAN, A. **Emerging Markets – NYU Stern**. 2023. Disponível em: <<https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/betaemerg.xls>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **ÁUDIO: BNDES estima mais de mil ônibus elétricos produzidos no Brasil e diz que fabricação nacional deve ser incentivada e não coletivos prontos importados**. [S. l.]: 17 mar. 2023. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2023/03/17/audio-bndes-estima-mais-de-mil-onibus-eletricos-produzidos-no-brasil-e-diz-que-fabricacao-nacional-deve-ser-incentivada-e-nao-coletivos-prontos-importados/>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Linha da Piracicabana, em Brasília, operada por seis ônibus elétricos, já poupou três mil toneladas de CO₂ na atmosfera**. [S. l.]: 25 mar. 2023. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2023/03/25/linha-da-piracicabana-em-brasilia-operada-por-seis-onibus-eletricos-ja-poupou-tres-mil-toneladas-de-co2-na-atmosfera/>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Empresa Expresso São José tem contrato renovado por mais 10 anos e segue com atuação no transporte público do Distrito Federal**. [S. l.]: 27 jun. 2023. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2023/06/27/empresa-expresso-sao-jose-tem-contrato-renovado-por-mais-10-anos-e-segue-com-atuacao-no-transporte-publico-do-distrito-federal/>>. Acesso em: 17 jul. 2023.

DRUMM, F. C.; et al. **Air Pollution from the burning of fuels derived from petroleum in motor vehicles**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 66-78, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.5902/2236117010537>>. Acesso em: 14 jun. 2023

E-BUS RADAR. **Ônibus Elétricos América Latina**. 2023. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org/>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

ELSOM, D. M. **Atmospheric pollution**: a global problem. 2. ed. Oxford: Blackwell, 1992.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil**. [S. l.]: 2020. Disponível em: <<https://shre.ink/EPE-ViabilidadeOnibus>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**: Eletromobilidade. [S. l.]: 2023. Disponível em: <<https://shre.ink/EPE-Eletromobilidade>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. White House. **Presidente Biden Announces Support for the Bipartisan Infrastructure Framework**. Washington: 24 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/06/24/fact-sheet-president-biden-announces-support-for-the-bipartisan-infrastructure-framework/>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **European Green Deal**: Comissão propõe 2030 zero-emissions target for new city buses and 90% emissions reductions for new trucks by 2040. Strasbourg: 14 fev. 2023. Disponível em: < https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_762>. Acesso em: 10 jul. 2023.

GIOVANNI, P.; LIMÃO, J. A. **GDF renova contrato com a empresa de transporte público Expresso São José**. Brasília: 27 jun. 2023. Disponível em: < <https://www.correiobraziliense.com.br/cidades-df/2023/06/5104955-gdf-renova-contrato-com-a-empresa-de-transporte-publico-expresso-sao-jose.html>>. Acesso em: 17 jul. 2023.

GOUVEIA, N.; et al. **Poluição do ar e efeitos na saúde nas populações de duas grandes metrópoles brasileiras**. Epidemiologia e Serviços de Saúde – Revista do Sistema Único de Saúde do Brasil, Brasília, v. 12, n. 1, p. 29-40, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.5123/s1679-49742003000100004>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

GOUVEIA, N.; FLETCHER, T. **Time series analysis of air pollution and mortality: effects by cause, age and socioeconomic status**. Epidemiology & Community Health, v. 54, n. 10, p. 750-755, 2000. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1136/jech.54.10.750>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL – GDF. **Reajuste do transporte público**: entenda cada tarifa: a partir de segunda (02) começam a valer os novos preços das passagens em Brasília. Conheça mais detalhes sobre cada tipo de tarifa. Brasília: 2018. Disponível em: <<https://www.df.gov.br/reajuste-do-transporte-publico-entenda-cada-tarifa/>>. Acesso em: 23 jul. 2023.

GREENPEACE. **Dossiê Ônibus Limpo**: benefícios de uma transição para combustíveis renováveis na frota de São Paulo. São Paulo: 2016. Disponível em: < https://www.greenpeace.org/static/planet4-brasil-stateless/2018/07/2016-greenpeace_dossie_onibus_limpo.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2023.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. **Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis**: uma breve revisão, Revista Virtual de Química, Salvador, v. 3, n. 5, p. 434-445, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20110047>>. Acesso em: 17 jun. 2023.

GUENTHER, P. R.; PADILHA, T. D. **Estudo de viabilidade para substituição de veículos a combustão por veículos de tração elétrica em uma linha de ônibus em Curitiba**. Curitiba: 2016. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/391.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Manual PROCONVE/PROMOT**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2011. Disponível em: < <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e->

residuos/emissoes/arquivos/manual%20proconve%20promot_portugues.pdf>.
Acesso em: 29 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo 2022**. [S. l.]: 2023. Disponível em: < <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/mapas.html>>.
Acesso em: 03 jul. 2023.

INSTITUTO BRÁSÍLIA AMBIENTAL - IBRAM. **Relatório anual do monitoramento da qualidade do ar no Distrito Federal**. Brasília: 2010. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Relat%C3%B3rio-anual-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-2010.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO BRÁSÍLIA AMBIENTAL - IBRAM. **Monitoramento da qualidade do ar no Distrito Federal**. Brasília: 2014. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Relat%C3%B3rio-anual-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-2014.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO BRÁSÍLIA AMBIENTAL - IBRAM. **Relatório Anual de Monitoramento Fixo da Qualidade do Ar no Distrito Federal 2021**. Brasília: 09 nov. 2022. Disponível em: < <http://www.brasiliaambiental.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/RELATORIO-ANUAL-DE-MONITORAMENTO-FIXO-DA-QUALIDADE-DO-AR-2021.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

INSTITUTO BRÁSÍLIA AMBIENTAL - IBRAM. **Índice de Qualidade do Ar (IQAR)**. [S. l.]: [s. d.]. Disponível em: < <http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/IQAR-utilizado-pelo-IBRAM.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

INSTITUTO BRÁSÍLIA AMBIENTAL - IBRAM. **Relatórios anuais de monitoramento – 2005 a 2021**. [S. l.]: 2023. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/relatorios-anuais-de-monitoramento-2005-a-2016/>>.
Acesso em: 06 jul. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL – IPEDF. **Pessoas idosas equivalem a 11,84% da população total do DF**. Brasília: 2022. Disponível em: <<https://ipe.df.gov.br/pessoas-idosas-equivalem-a-1184-da-populacao-total-do-df/>>. Acesso em: 21 jul. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Global EV Outlook 2018**: towards cross-modal electrification. [S. l.]: 2018. Disponível em: < https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global_EV_Outlook_2018.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Global EV Outlook 2021**: accelerating ambitions despite the pandemic. [S. l.]: 2021. Disponível em: < <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVO Outlook2021.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Global EV Outlook 2022**: securing supplies for an electric future. [S. l.]: 2022. Disponível em: <

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Global EV Outlook 2023**: catching up with climate ambitions. [S. l.]: 2023. Disponível em: < <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Global EV Policy Explorer**: key policies and measures that support the deployment of electric and zero-emission vehicles. [S. l.]: 26 abr. 2023. Disponível em: < <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-policy-explorer>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

IPEADATA. **EMBI+ Risco-Brasil**. 2023. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=40940&module=M>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

LIMA, G. C. L. S.; SILVA, G. L. R.; NETO, G. S. A. **Mobilidade elétrica**: o ônibus elétrico aplicado ao transporte público no Brasil. Revista dos Transportes Públicos-ANTP-Ano, v. 41, p. 53-72, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Gregorio-Luz/publication/334772996_Mobilidade_eletrica_o_onibus_eletrico_aplicado_ao_transporte_publico_no_Brasil/links/5d408f4fa6fdcc370a6ef3cd/Mobilidade-eletrica-o-onibus-eletrico-aplicado-ao-transporte-publico-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2023.

LIMA, M. C. C.; et al. **Economic aspects for recycling of used lithium-ion batteries from electric vehicles**. Energies, v. 15, n. 6, p. 2203, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15062203>>. Acesso em: 19 set. 2023.

LOPEZ, G. **A importância de modernização da frota de ônibus**. Revista AutoBus, n. 39, p. 39-40, 2016. Disponível em: < <https://revistaautobus.com.br/revista-digital/>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

MANZOLI, A. **Análise das emissões veiculares em trajetos urbanos curtos com localização GPS**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p.200. 2009. Disponível em: < <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp087905.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MARQUES, J. F.; COMUNE, A. E. **A teoria neoclássica e a valoração ambiental**. Economia do meio ambiente: teoria, políticas e a gestão de espaços regionais. Tradução. Campinas: UNICAMP, 1997. Disponível em: < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/159620/1/1997PL054-Marques-A-teoria-3309.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

MARTINS, L. C.; et al. **Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil**. Revista de Saúde Pública, v. 36, n. 1, p. 88-94, 2002.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0034-89102002000100014>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MILLER, J.; et al. **Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities**. [S. l.]: 2017. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/financing-the-transition-to-soot-free-urban-bus-fleets-in-20-megacities/>>. Acesso em: 09 jul. 2023.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Guia Geral de Análise Socioeconômica de Custo-Benefício de Projetos de Investimento em infraestrutura**. Brasília: 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/governanca/comite-interministerial-de-governanca/arquivos/guia-geral-de-analise-socioeconomica-de-custo-beneficio.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

MONTEIRO, R. **Governo aumenta mistura do biodiesel no diesel com impacto em R\$ 0,02**. [S. l.]: 17 mar. 2023. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2023/03/governo-aumenta-mistura-do-biodiesel-no-diesel-com-impacto-em-r-002.ghtml>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

NEOENERGIA. **Composição tarifária**: tarifas de energia. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/web/brasil/sua-casa/composicao-tarifaria>>. Acesso em: 19 jul. 2023.

PAIVA, V. R. C. **Monetização dos benefícios sociais e ambientais da eletrificação de frotas de ônibus**. In: 9º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2021 DIGITAL), 2021. Disponível em: <<https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper1021.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2023.

OLIVEIRA, J. M.; PERDIGÃO, C. **Estimação do fator de conversão da taxa de câmbio para o Brasil**. [S. l.]: 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/economia/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2022/arquivos/arquivos-catalogo-de-parametros-fator-de-conversao-da-taxa-cambial-valor-da-vida-estatistica-e-fator-de-conversao-do-gasto-publico/fator-de-conversao-da-taxa-cambial>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

RÉQUIA JÚNIOR, W. J.; ABREU, L. M. **Poluição atmosférica e a saúde de crianças e idosos no Distrito Federal no Período de 2007 a 2009**: utilização do método de correlação com *time delay*. Hygeia: Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v. 7, n. 13, 2011. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/download/17072/9410>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

RÉQUIA JÚNIOR, W. J. **Modelagem espacial da exposição humana às fontes de poluição do ar no Distrito Federal**: o uso e ocupação do solo como variável preditora. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília. Brasília, p. 316, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/20255>>. Acesso em: 14 jul. 2023.

REVISTA AUTOBUS. **Ônibus elétrico**: próximo ou distante? [S. l.]: [s. d.]. Disponível em: <<https://shre.ink/revista-autobus>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

RUGERI, G. A. O.; GASPARIN, F. P. **Análise econômica e ambiental da substituição de ônibus de combustão interna por elétrico em uma linha de ônibus do transporte público de Porto Alegre**. In: SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS, 6., 2021, Toledo. *Anais [...]*. UFRGS. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/231102>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3. Ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

SANTOS, M. M. D. **Veículos elétricos e híbridos**: fundamentos, características e aplicações. 1.ed. São Paulo: Érica, 2020.

SÃO PAULO. **Lei n. 19.802, de 17 de janeiro de 2018**. Dá nova redação ao art. 50 da Lei nº 14.933/2009, que dispõe sobre o uso de fontes motrizes de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo e dá outras providências. São Paulo: Câmara Municipal de São Paulo, 17 jan. 2018. Disponível em: <<http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO DA INFRAESTRUTURA – SDI. **Nota técnica: Taxa social de desconto para avaliação de investimentos em infraestrutura**: atualização pós consulta pública. Brasília: 22 maio 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/notas-tecnicas/2020/nt_taxa-social_vf.pdf/@@@download/file/NT_Taxa%20Social_VF.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEMARH. **Relatório de monitoramento da qualidade do ar no Distrito Federal**. Brasília: 2005. Disponível em: <http://www.ibram.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/Relat%C3%B3rio-anual-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-2005.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2023.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE – SEMOB. **Linha 0.108 terá reforço de viagens e ônibus elétricos**: novidades começam nesta segunda (29). Semob cria também linha circular entre a Rodoviária e o Memorial JK. Brasília: 24 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.semob.df.gov.br/linha-0-108-tera-reforco-de-viagens-e-onibus-eletrico/>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE – SEMOB. **Dados do STPC**. Brasília: 2023. Disponível em: <<https://semob.df.gov.br/dados-do-sistema-de-transporte-publico-do-df/>>. Acesso em: 16 jul. 2023.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE – SEMOB. **Cálculo da tarifa técnica**. Brasília: 2023. Disponível em: <<https://semob.df.gov.br/calculo-da-tarifa-tecnica-2/>>. Acesso em: 16 jul. 2023.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE – SEMOB. **DF no Ponto**. 2023. Disponível em: <<https://dfnoponto.semob.df.gov.br/>>. Acesso em: 17 jul. 2023.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE – SEMOB. **Preço das Passagens**: confira os valores das passagens de ônibus e do metrô. Brasília: 2021. Disponível em: <<https://semob.df.gov.br/precos-das-passagens/>>. Acesso em: 23 jul. 2023.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO DISTRITO FEDERAL - SEMA-DF. **Inventário do Distrito Federal de Emissões de GEE**: antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2022/06/INVENTARIO-CLIMA-E-BOOK-FINAL.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

SECRETARIA NACIONAL DE TRÂNSITO - SENATRAN. **Estatísticas – Frota de Veículos**. Brasília: 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - SEEG. **Tabela Geral de Dados**. Disponível em: < <https://seeg.eco.br/download/>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SLOWIK, P.; et al. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**. Brasília: 2018. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/avaliacao-internacional-de-politicas-publicas-para-eletromobilidade-em-frotas-urbanas/>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

TAVARES, F. V. F. **Estudo do processo de dispersão de emissões veiculares em uma microrregião de Belo Horizonte utilizando simulação numérica**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Belo Horizonte, p.153. 2009. Disponível em: < <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp100176.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

THE CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION (CCAC). **Soot-free urban bus fleets**. [S. l.]: [s. d.]. Disponível em: < <https://www.ccacoalition.org/en/activity/soot-free-urban-bus-fleets>>. Acesso em: 09 jul. 2023.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **All-Eletric Vehicles**. [S. l.]: [s. d.]. Disponível em: <<https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>>. Acesso em: 08 jul. 2023.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. **Veículos híbridos e elétricos**: sugestões de políticas públicas para o segmento. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, p. 295-344, 2015. Disponível em: < <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4284>>. Acesso em: 08 jul.2023.

VINHOTE, A. L. **Ônibus elétricos começa a circular nesta segunda (29)**. Brasília: 29 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2020/06/28/onibus-eletricos-comecam-a-circular-nesta-segunda-29/>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

WAYCARBON. **Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de GEE do DF – Produto 8**. [S. l.]: 2014. Disponível em: <https://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/inventario-de-emissoes-por-fontes-e-remocoes-por-sumidouros-de-gases-de-efeito-estufa-do-df.pdf>. Acesso em: 03 jul 2023.

APÊNDICE A – Fluxo de caixa privado do cenário “Elétrico”

Fluxo de Caixa Privado - Cenário Elétrico	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Passageiros pagantes	-	1.064.261	1.097.253	1.131.267	1.166.337	1.202.493	1.239.770	1.278.203	1.317.828	1.358.680	1.400.799
Tarifa técnica	-	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85	6,85
Tarifa paga pelo usuário	-	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
(+) Receita operacional	-	2.873.504	2.962.582	3.054.422	3.149.109	3.246.732	3.347.380	3.451.149	3.558.135	3.668.437	3.782.158
(+) Repasse governamental	-	4.420.761	4.557.804	4.699.096	4.844.768	4.994.956	5.149.800	5.309.443	5.474.036	5.643.731	5.818.687
(=) Receita Bruta	-	7.294.264	7.520.386	7.753.518	7.993.877	8.241.688	8.497.180	8.760.592	9.032.171	9.312.168	9.600.845
(-) Tributos sobre Faturamento	-	145.885	150.408	155.070	159.878	164.834	169.944	175.212	180.643	186.243	192.017
Pis/Pasep - COFINS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
INSS	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
INSS	-	145.885	150.408	155.070	159.878	164.834	169.944	175.212	180.643	186.243	192.017
(=) Receita Líquida	-	7.148.379	7.369.979	7.598.448	7.834.000	8.076.854	8.327.236	8.585.381	8.851.527	9.125.925	9.408.828
Quilometragem percorrida	-	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980
(-) Custos variáveis (OPEX)	-	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614	3.710.614
Energia	-	730.341	730.341	730.341	730.341	730.341	730.341	730.341	730.341	730.341	730.341
Manutenção	-	675.592	675.592	675.592	675.592	675.592	675.592	675.592	675.592	675.592	675.592
Leasing das baterias	-	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681	2.304.681
(=) EBITDA	-	3.437.765	3.659.364	3.887.834	4.123.386	4.366.240	4.616.622	4.874.766	5.140.913	5.415.311	5.698.214
(-) Depreciação	-	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951
(=) EBIT	-	1.856.813	2.078.413	2.306.883	2.542.434	2.785.288	3.035.671	3.293.815	3.559.962	3.834.359	4.117.263
(-) Imposto de renda e CSLL	-	495.908	557.956	621.927	687.882	755.881	825.988	898.268	972.789	1.049.621	1.128.834
CSLL	9,0%	167.113	187.057	207.619	228.819	250.676	273.210	296.443	320.397	345.092	370.554
Imposto de renda	15,0%	167.113	187.057	207.619	228.819	250.676	273.210	296.443	320.397	345.092	370.554
Adicional de IR (acima de 240 mil ano)	10,0%	161.681	183.841	206.688	230.243	254.529	279.567	305.382	331.996	359.436	387.726
(=) Lucro líquido do exercício	-	1.360.906	1.520.458	1.684.955	1.854.553	2.029.408	2.209.683	2.395.547	2.587.173	2.784.739	2.988.429
(+) Depreciação	-	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951
(=) Fluxo de caixa operacional	-	2.941.857	3.101.409	3.265.907	3.435.504	3.610.359	3.790.634	3.976.498	4.168.124	4.365.690	4.569.381
(-) CAPEX	-17.344.206	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ônibus elétricos a bateria	-15.346.942	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Infraestrutura de recarga	- 1.997.265	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(+) Revenda da frota	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.534.694
(=) Fluxo de caixa livre	-17.344.206	2.941.857	3.101.409	3.265.907	3.435.504	3.610.359	3.790.634	3.976.498	4.168.124	4.365.690	6.104.075
(=) Fluxo de caixa livre descontado	-17.344.206	2.644.390	2.505.918	2.372.004	2.242.880	2.118.702	1.999.563	1.885.506	1.776.526	1.672.584	2.102.126
(=) Fluxo de caixa livre descontado acumulado	-17.344.206	- 14.699.817	- 12.193.899	- 9.821.895	- 7.579.016	- 5.460.314	- 3.460.751	- 1.575.244	201.282	1.873.866	3.975.991

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE B – Fluxo de caixa privado do cenário “Diesel”

Fluxo de Caixa Privado - Cenário Diesel	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Passageiros pagantes	-	1.064.261	1.097.253	1.131.267	1.166.337	1.202.493	1.239.770	1.278.203	1.317.828	1.358.680	1.400.799
Tarifa técnica	-	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15
Tarifa paga pelo usuário	-	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
(+) Receita operacional	-	2.873.504	2.962.582	3.054.422	3.149.109	3.246.732	3.347.380	3.451.149	3.558.135	3.668.437	3.782.158
(+) Repasse governamental	-	1.548.236	1.596.231	1.645.714	1.696.732	1.749.330	1.803.560	1.859.470	1.917.113	1.976.544	2.037.817
(=) Receita Bruta	-	4.421.739	4.558.813	4.700.137	4.845.841	4.996.062	5.150.940	5.310.619	5.475.248	5.644.981	5.819.975
(-) Tributos sobre Faturamento	-	88.435	91.176	94.003	96.917	99.921	103.019	106.212	109.505	112.900	116.400
Pis/Pasep - COFINS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
INSS	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
INSS	-	88.435	91.176	94.003	96.917	99.921	103.019	106.212	109.505	112.900	116.400
(=) Receita Líquida	-	4.333.305	4.467.637	4.606.134	4.748.924	4.896.141	5.047.921	5.204.407	5.365.743	5.532.081	5.703.576
Quilometragem percorrida	-	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980
(-) Custos variáveis (OPEX)	-	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111	2.415.111
Combustível	-	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649	2.058.649
Manutenção	-	356.462	356.462	356.462	356.462	356.462	356.462	356.462	356.462	356.462	356.462
(=) EBITDA	-	1.918.194	2.052.526	2.191.023	2.333.813	2.481.030	2.632.810	2.789.296	2.950.632	3.116.970	3.288.465
(-) Depreciação	-	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507
(=) EBIT	-	866.687	1.001.019	1.139.516	1.282.306	1.429.523	1.581.303	1.737.789	1.899.125	2.065.464	2.236.958
(-) Imposto de renda e CPLL	-	270.674	316.347	363.435	411.984	462.038	513.643	566.848	621.703	678.258	736.566
CSLL	9,0%	78.002	90.092	102.556	115.408	128.657	142.317	156.401	170.921	185.892	201.326
Imposto de renda	15,0%	130.003	150.153	170.927	192.346	214.428	237.195	260.668	284.869	309.820	335.544
Adicional de IR (acima de 240 mil ano)	10,0%	62.669	76.102	89.952	104.231	118.952	134.130	149.779	165.913	182.546	199.696
(=) Lucro líquido do exercício	-	596.013	684.673	776.081	870.322	967.485	1.067.660	1.170.941	1.277.423	1.387.206	1.500.392
(+) Depreciação	-	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507
(=) Fluxo de caixa operacional	-	1.647.520	1.736.180	1.827.588	1.921.829	2.018.992	2.119.167	2.222.448	2.328.930	2.438.713	2.551.899
(-) CAPEX	-	7.510.764	-	-	-	7.510.764	-	-	-	-	-
Ônibus diesel	-	7.510.764	-	-	-	7.510.764	-	-	-	-	-
(+) Revenda da frota	-	-	-	-	-	2.253.229	-	-	-	-	2.253.229
(=) Fluxo de caixa livre	-	7.510.764	1.647.520	1.736.180	1.827.588	1.921.829	2.119.167	2.222.448	2.328.930	2.438.713	4.805.128
(=) Fluxo de caixa livre descontado	-	7.510.764	1.480.930	1.402.822	1.327.363	1.254.672	1.117.863	1.053.801	992.630	934.320	1.654.794
(=) Fluxo de caixa livre descontado acumulado	-	7.510.764	6.029.833	4.627.012	3.299.648	2.044.976	3.945.481	2.827.618	1.773.817	781.187	1.807.927

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE C – Fluxo de caixa social do cenário “Elétrico”

Fluxo de Caixa Social - Cenário Elétrico	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
(+) Receita Bruta	-	7.294.264	7.520.386	7.753.518	7.993.877	8.241.688	8.497.180	8.760.592	9.032.171	9.312.168	9.600.845
(+) Externalidades	-	129.240	129.902	130.882	131.934	133.006	134.100	135.215	136.353	137.514	138.698
(=) Benefício Operacional Líquido	-	7.423.504	7.650.289	7.884.401	8.125.811	8.374.694	8.631.280	8.895.808	9.168.524	9.449.682	9.739.543
Quilometragem percorrida	-	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980
(-) Custos variáveis (OPEX)	-	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549	3.299.549
Energia	-	682.869	682.869	682.869	682.869	682.869	682.869	682.869	682.869	682.869	682.869
Manutenção	-	593.170	593.170	593.170	593.170	593.170	593.170	593.170	593.170	593.170	593.170
Leasing das baterias	-	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510	2.023.510
(=) EBITDA	-	4.123.956	4.350.740	4.584.852	4.826.262	5.075.145	5.331.731	5.596.259	5.868.975	6.150.133	6.439.995
(-) Depreciação	-	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951
(=) EBIT	-	2.543.005	2.769.789	3.003.901	3.245.311	3.494.194	3.750.780	4.015.308	4.288.024	4.569.182	4.859.043
(-) Imposto de renda e CSLL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(=) Lucro líquido do exercício	-	2.543.005	2.769.789	3.003.901	3.245.311	3.494.194	3.750.780	4.015.308	4.288.024	4.569.182	4.859.043
(+) Depreciação	-	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951	1.580.951
(=) Fluxo de caixa operacional	-	4.123.956	4.350.740	4.584.852	4.826.262	5.075.145	5.331.731	5.596.259	5.868.975	6.150.133	6.439.995
(-) CAPEX	-	15.228.213	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ônibus elétricos a bateria	-	13.474.615	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Infraestrutura de recarga	-	1.753.598	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(+) Revenda da frota	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.534.694
(=) Fluxo de caixa livre social	-	15.228.213	4.123.956	4.350.740	4.584.852	4.826.262	5.075.145	5.331.731	5.596.259	5.868.975	7.974.689
(=) Fluxo de caixa livre social descontado	-	15.228.213	3.800.881	3.695.759	3.589.518	3.482.507	3.375.202	3.268.058	3.161.474	3.055.796	2.951.324
(=) Fluxo de caixa livre social descontado acumulado	-	15.228.213	11.427.332	7.731.573	4.142.055	659.549	2.715.653	5.983.712	9.145.186	12.200.982	15.152.306
											18.679.395

Fonte: Elaboração própria.

APÊNDICE D – Fluxo de caixa social do cenário “Diesel”

Fluxo de Caixa Social - Cenário Diesel	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
(+) Receita Bruta	-	4.421.739	4.558.813	4.700.137	4.845.841	4.996.062	5.150.940	5.310.619	5.475.248	5.644.981	5.819.975
(+) Externalidades	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(=) Benefício Operacional Líquido	-	4.421.739	4.558.813	4.700.137	4.845.841	4.996.062	5.150.940	5.310.619	5.475.248	5.644.981	5.819.975
Quilometragem percorrida	-	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980	1.187.980
(-) Custos variáveis (OPEX)	-	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810	2.237.810
Combustível	-	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837	1.924.837
Manutenção	-	312.973	312.973	312.973	312.973	312.973	312.973	312.973	312.973	312.973	312.973
(=) EBITDA	-	2.183.929	2.321.003	2.462.326	2.608.031	2.758.252	2.913.130	3.072.809	3.237.438	3.407.171	3.582.165
(-) Depreciação	-	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507
(=) EBIT	-	1.132.422	1.269.496	1.410.819	1.556.524	1.706.745	1.861.623	2.021.302	2.185.931	2.355.664	2.530.658
(-) Imposto de renda e CSLL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(=) Lucro líquido do exercício	-	1.132.422	1.269.496	1.410.819	1.556.524	1.706.745	1.861.623	2.021.302	2.185.931	2.355.664	2.530.658
(+) Depreciação	-	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507	1.051.507
(=) Fluxo de caixa operacional	-	2.183.929	2.321.003	2.462.326	2.608.031	2.758.252	2.913.130	3.072.809	3.237.438	3.407.171	3.582.165
(-) CAPEX	-	6.594.450	-	-	-	6.594.450	-	-	-	-	-
Ônibus diesel	-	6.594.450	-	-	-	6.594.450	-	-	-	-	-
(+) Revenda da frota	-	-	-	-	-	2.253.229	-	-	-	-	2.253.229
(=) Fluxo de caixa livre social	-	6.594.450	2.183.929	2.321.003	2.462.326	2.608.031	1.582.970	2.913.130	3.072.809	3.237.438	5.835.394
(=) Fluxo de caixa livre social descontado	-	6.594.450	2.012.838	1.971.588	1.927.775	1.881.888	1.052.747	1.785.588	1.735.911	1.685.635	2.580.910
(=) Fluxo de caixa livre social descontado acumulado	-	6.594.450	4.581.612	2.610.024	682.249	1.199.639	146.892	1.932.481	3.668.391	5.354.026	6.989.058

Fonte: Elaboração própria.