

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

LUCAS EDUARDO BATISTA DE PAULO

**VIABILIDADE DA MOBILIDADE URBANA: ELETROMOBILIDADE DO
TRANSPORTE PÚBLICO EM BRASÍLIA-DF.**

Brasília, DF

2025



LUCAS EDUARDO BATISTA DE PAULO

**VIABILIDADE DA MOBILIDADE URBANA: ELETROMOBILIDADE DO
TRANSPORTE PÚBLICO EM BRASÍLIA-DF.**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Dra. Josiane do Socorro Aguiar de Souza de Oliveira Campos

**Brasília, DF
2025**

Paulo, Lucas Eduardo Batista de.

Viabilidade da Mobilidade Urbana: Eletromobilidade do Transporte Público em Brasília-DF. / Lucas Eduardo Batista de Paulo. Brasília-DF: UnB, 2025. 60 p. : il. ; 29,5 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília
Faculdade de Ciências e Tecnologia em Engenharia, Brasília, 2025. Orientação: Josiane do Socorro Aguiar de Souza de Oliveira Campos.

1. Viabilidade econômica. 2. Viabilidade ambiental. 3. Ônibus elétrico. 4. Transição energética. I. Josiane do Socorro Aguiar de Souza de Oliveira Campos. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Ciências e Tecnologia em Engenharia. IV. Viabilidade da Mobilidade Urbana: Eletromobilidade do Transporte Público em Brasília-DF.

CDU Classificação

Lucas Eduardo Batista de Paulo

**VIABILIDADE DA MOBILIDADE URBANA: ELETROMOBILIDADE DO
TRANSPORTE PÚBLICO EM BRASÍLIA-DF.**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 19 de Fevereiro de 2025 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.^a Dra. Josiane do Socorro Aguiar de Souza de Oliveira Campos, UnB/ FGA
Professora Orientadora

Prof.^a Dra. Glauceny Cirne de Medeiros, UnB/ FGA
Professora examinadora

Prof. Dr. Wesly Jean, Laboratório de Energia e Ambiente, UnB
Professor examinador

Suplente: Adrilane Batista de Oliveira

Brasília, DF
2025

*Dedico este trabalho à minha família, que
sempre esteve ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar a oportunidade de fazer aquilo que amo. Agradeço também a minha família, que tornou minha trajetória durante o curso mais amena, em especial à minha mãe, Ingrid, ao meu pai, José, e à minha irmã, Larissa. Com toda certeza, sem a presença de qualquer um deles, meu caminho teria sido muito mais difícil e triste. Agradeço aos meus amigos por trazerem alegria e diversão em momentos críticos do curso e da minha vida. Aos meus professores, em especial à minha orientadora Josiane do Socorro Aguiar de Souza de Oliveira Campos, por compartilharem seus conhecimentos e sabedoria de forma justa e sincera. Por fim, agradeço a qualquer pessoa que esteja lendo este trabalho, reconhecendo meu esforço e dedicação.

RESUMO

Os valores das emissões de gases de efeito estufa continuam crescentes a cada ano. Principalmente no setor de transporte onde os combustíveis fósseis são altamente consumidos. Neste contexto, os países participantes da ONU fizeram um acordo de redução dessas emissões até o ano de 2030. A eletromobilidade se mostra como uma forma de reduzir a dependência do setor nestes combustíveis. No presente trabalho discute-se a viabilidade econômica e ambiental de uma transição energética para a eletromobilidade no transporte público coletivo de Brasília-DF por meio de comparação econômica e ambiental dos ônibus a diesel e elétricos. Para tanto, foi realizada uma revisão de literatura para identificar as variáveis relevantes para a comparação. Em seguida, foram confeccionadas matrizes comparativas diferenciais entre os dois veículos e, por fim, foi realizada a análise destas matrizes a partir de indicadores econômicos e ambientais para estudar a viabilidade. Os resultados mostram que, ainda que os ônibus elétricos possuam um custo inicial de aquisição muito superior ao dos ônibus tradicionais a diesel, na fase de operação os seus custos são menores, devido ao baixo custo da eletricidade, comparada ao óleo diesel, e a baixa necessidade de manutenções. Os indicadores financeiros mostram um índice LAJIDA (Lucro Antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização) positivo, um payback de aproximadamente 6 anos e 9 meses e um VPL (Valor Presente Líquido) positivo, o que confirma a viabilidade econômica da transição dentro do período de vida útil estipulado para o ônibus elétrico. Os resultados também mostram que os ônibus elétricos, no contexto brasileiro de matérias-primas para construção de baterias e abundância de fontes renováveis em sua matriz elétrica, são uma alternativa com alto potencial de geração de impacto ambiental positivo, reduzindo tanto o consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa. A pesquisa mostrou que a transição para a eletromobilidade não é somente possível, como ambiental e economicamente atrativa para Brasília.

Palavras-chave: viabilidade econômica, viabilidade ambiental, ônibus elétrico, transição energética.

ABSTRACT

The values of greenhouse gas emissions continue to rise each year, especially in the transportation sector, where fossil fuels are heavily consumed. In this context, the UN member countries have agreed to reduce these emissions by the year 2030. Electromobility emerges as a way to reduce the sector's dependence on these fuels. This study discusses the economic and environmental feasibility of an energy transition to electromobility in public transportation in Brasília-DF through an economic and environmental comparison of diesel and electric buses. To this end, a literature review was conducted to identify relevant variables for the comparison. Next, differential comparative matrices were created for the two vehicle types, and finally, these matrices were analyzed using economic and environmental indicators to assess feasibility. The results show that, although electric buses have a significantly higher initial acquisition cost compared to traditional diesel buses, their operational costs are lower due to the low cost of electricity compared to diesel fuel and their reduced maintenance needs. The financial indicators show a positive EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization), a payback period of approximately 6 years and 9 months, and a positive NPV (Net Present Value), confirming the economic feasibility of the transition within the expected lifespan of the electric bus. The results also indicate that, in the Brazilian context—considering the availability of raw materials for battery production and the abundance of renewable energy sources in its electricity matrix—electric buses present a high potential for positive environmental impact, reducing both energy consumption and greenhouse gas emissions. The research demonstrated that the transition to electromobility is not only feasible but also environmentally and economically attractive for Brasília.

Keywords: economic feasibility, environmental feasibility, electric bus, electric transition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissões de CO ₂ e do setor de transporte no Brasil	16
Figura 2 - Frota de Ônibus elétricos em Brasília	18
Figura 3: Porcentagem de economia por quilômetro de veículos movidos a diferentes combustíveis.	18
Figura 4: EAP do projeto	20
Figura 5: Esquemática do método de análise	26
Figura 6: Modelo de ônibus elétrico da BYD (D9W).	28
Figura 7: Chassi do modelo BYD D9W 20.140	29
Figura 8: Histórico da taxa Selic nos últimos 10 anos	32
Figura 9: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	33
Figura 10: Modelo de ônibus a diesel	37
Figura 11: Modelo de ônibus elétrico	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis selecionadas e indicadores elaborados	20
Tabela 2: Classificação das principais variáveis econômicas envolvidas na análise	22
Tabela 3: Custos de aquisição (CAPEX)	38
Tabela 4: Custos anuais com abastecimento	39
Tabela 5: Custos anuais com manutenção	39
Tabela 6: Custos diferenciais	40
Tabela 7: Fluxo de caixa diferencial comparativo.	40
Tabela 8: Consumo de energia elétrica	43
Tabela 9: Consumo de recursos fósseis	43
Tabela 10: Consumo de energia por combustível (WTT)	44
Tabela 11: Consumo de energia por combustível (WTW)	45
Tabela 12: Emissões de escape por Litro de diesel consumido	46
Tabela 13: Emissões de GEE por combustível (KgCO ₂ eq/ano)	46
Tabela 14: Emissões WTT de GEE (KgCO ₂ eq/ano)	47
Tabela 15: Emissões WTW de GEE (KgCO ₂ eq/ano)	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTP	Associação Nacional de Transporte Público
BEN	Balanço Energético Nacional
BHTRANS	Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i>
CGO	<i>Compagnie Générale des Omnibus</i>
CO2e	Dióxido de Carbono equivalente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTPC	Conselho de Transporte Público Coletivo do Distrito Federal
EBITDA	<i>Earnings Before Interests, Taxes, Depreciation and Amortization</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LAJIDA	Lucro Antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPEX	<i>Operational Expenditures</i>
PROCONVE	Programa de controle de emissões veiculares
SEMOB	Secretaria de Transporte e Mobilidade
SPTRANS	Empresa de Transportes e Trânsito de São Paulo
STPC	Sistema de Transporte Público Coletivo do Distrito Federal
TCB	SOCIEDADE DE TRANSPORTES COLETIVOS DE BRASÍLIA
TTW	<i>Tank to Wheel</i>

VPL Valor Presente Líquido

WTT *Well to Tank*

WTW *Well to wheel*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. OBJETIVO.....	19
1.1.1. Objetivo geral.....	19
1.1.2. Objetivos específicos.....	19
2. METODOLOGIA.....	19
2.1. ESTRUTURA ANALÍTICA DE PROJETO.....	19
2.2. INDICADORES.....	20
2.2.1. Análise de investimento.....	20
2.2.2. Análise Ambiental.....	21
3. REVISÃO TEÓRICA.....	21
3.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ELETROMOBILIDADE.....	21
3.2. VARIÁVEIS ECONÔMICO-FINANCEIRAS.....	22
3.2.1 Custos fixos.....	23
3.2.2. Custos variáveis.....	23
3.2.3. Distância média percorrida.....	24
3.2.4. Rendimento.....	24
3.2.5. Definição de fluxo de caixa.....	25
3.3. VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	25
3.3.1. Fase de produção de bateria e combustíveis.....	26
3.3.2. Fase de utilização dos combustíveis.....	27
3.4. CENÁRIO DE TRANSIÇÃO PARA ELETROMOBILIDADE A PARTIR DO ÔNIBUS ELÉTRICO.....	27
3.4.1. Veículo.....	28
3.4.2. Operação, infraestrutura e fornecimento de energia.....	29
3.4.3. Bateria.....	30
3.4.4. Manutenção.....	30
3.5. INDICADORES FINANCEIROS.....	30
3.5.1. EBITDA (LAJIDA).....	30
3.5.2. Payback.....	31
3.5.3. Valor Presente Líquido (VPL).....	31
3.6. INDICADORES AMBIENTAIS DE ENTRADA (INPUT).....	32
3.6.1. Consumo de Energia Elétrica (TTW).....	32
3.6.2. Consumo de recursos fósseis (TTW).....	33
3.6.3. Consumo de energia (WTT).....	34
3.7. INDICADORES AMBIENTAIS DE SAÍDA (OUTPUT).....	34
3.7.1. Emissões de Gases de Efeito Estufa (TTW).....	34
3.7.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa (WTT).....	35
3.8. ANÁLISE WELL TO WHEEL (WTW).....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36

4.1. CUSTOS GERAIS DOS VEÍCULOS: CUSTO FIXOS E VARIÁVEIS.....	36
4.1.1. Custos Fixos: Custos de aquisição (CAPEX).....	36
4.1.2. Custos Variáveis: Custos com recarga/abastecimento.....	39
4.1.3. Custos Variáveis: Custos com manutenção.....	39
4.2. CUSTOS DIFERENCIAIS: CUSTOS FIXOS E VARIÁVEIS.....	39
4.3. INDICADORES FINANCEIROS.....	40
4.3.1. Fluxo de caixa.....	40
4.3.2. EBITDA diferencial.....	41
4.3.3. Payback.....	41
4.3.4. Valor Presente Líquido (VPL).....	42
4.4. INDICADORES AMBIENTAIS DE ENTRADA (INPUTS).....	42
4.4.1. Consumo de energia elétrica (TTW).....	42
4.4.2. Consumo de recursos fósseis (TTW).....	43
4.4.3. Consumo de energia (WTT).....	44
4.4.4. Consumo de energia (WTW).....	44
4.5. INDICADORES AMBIENTAIS DE SAÍDA (OUTPUTS).....	45
4.5.1. Emissões de Gases de Efeito Estufa (TTW).....	45
4.5.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa (WTT).....	46
4.5.3. Emissões de Gases de Efeito Estufa (WTW).....	47
4.6. DISCUSSÕES.....	47
4.6.1. Dimensão Econômico-Financeira.....	47
4.6.2. Dimensão Ambiental.....	48
5. CONCLUSÃO.....	50
BIBLIOGRAFIA.....	52

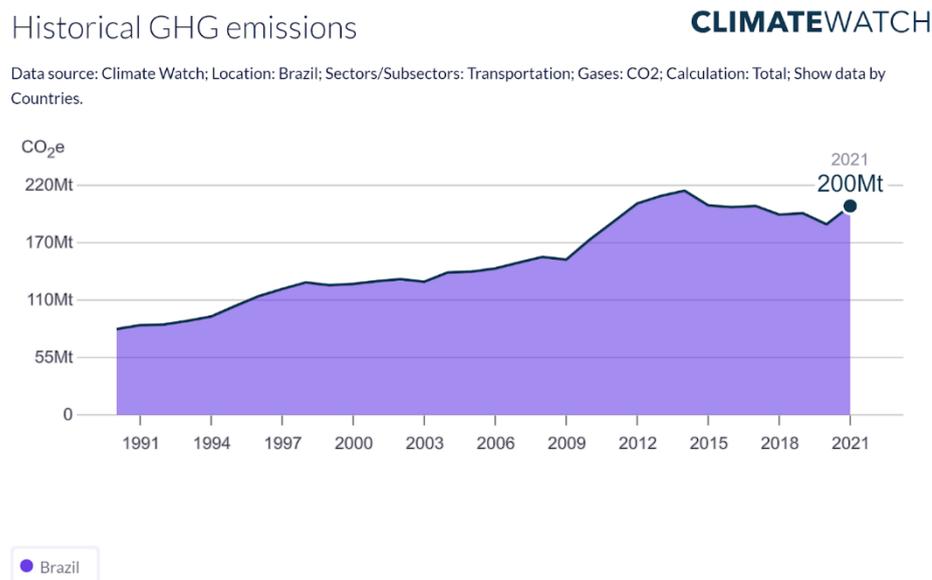
1. INTRODUÇÃO

Os países membros da Organização das Nações Unidas (ONU) promoveram, em 2015, na cidade de Paris, França, a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP-21). Na conferência, foi reconhecido que as mudanças climáticas representam uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para as sociedades humanas e para o planeta. Nos seus documentos, foram citadas as emissões de gases de efeito estufa (GEE) como uma das principais causadoras destas mudanças, sendo necessário, de forma urgente, a sua redução (ACORDO DE PARIS, 2015, p. 1-2).

No setor de transportes, estão presentes os principais agentes emissores de GEE do mundo, sendo responsáveis, em 2021, pela emissão de aproximadamente 8 bilhões de toneladas de CO₂e na atmosfera (OECD/IEA, 2021). Isso se dá principalmente pelo consumo quase que exclusivo de combustíveis fósseis deste setor. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), o setor de transportes é responsável por 60% do consumo de todo o petróleo e seus derivados no mundo (MCHUGH, 2017). O setor de transportes é responsável por cerca de 20% das emissões globais de CO₂e, um dos principais gases causadores do efeito estufa (OECD/IEA, 2021)

No Brasil, o setor de transportes foi responsável por cerca de 16% das emissões de CO₂e totais do país, alcançado o valor estimado de 200 Mt de GEE no ano de 2021, valor este que voltou a crescer após um recuo observado próximo de 2015 (OECD/IEA, 2021). (Figura 1). Isso se dá pelo alto consumo de combustíveis de origem fóssil, tais como a gasolina e o diesel e a rede de distribuição de produtos ter as rodovias como principal forma de transporte. De acordo com dados do Balanço Energético Nacional, o setor de transporte, no ano de 2022, consumiu o equivalente a aproximadamente 89 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep); deste total, 71,7% é referente ao consumo de óleo diesel e gasolina combinados, enquanto que os combustíveis de fontes renováveis, como o etanol e o biodiesel representam apenas 21,5% do total de combustível consumido por esse setor (EPE, 2023).

Figura 1 - Emissões de CO₂e do setor de transporte no Brasil



Fonte: *World Resources Institute, 2021*

Nesse contexto de alto consumo de combustíveis fósseis no setor de transporte, existe a necessidade de adotar métodos focados em mitigar as emissões de GEE neste setor de consumo energético. O transporte coletivo é uma forma de reduzir o gasto de energia e as emissões *per capita* de uma população, compartilhando a emissão total de um veículo em dezenas de pessoas (CARVALHO, 2016).

No ano de 2023, o transporte público coletivo no Distrito Federal (DF) transportou mais de 349 milhões de pessoas. A frota no DF teve um acréscimo de mais de 400 novos ônibus para operar a partir do ano de 2024 (LOBO, 2023). Esses novos veículos estão de acordo com o sistema de normas conhecido como Euro 6, ou fase PROCONVE P8, que tem por objetivo controlar e reduzir as emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário (CONAMA, 2018). Ainda assim, estão surgindo no mercado formas ainda mais eficientes de reduzir essas emissões.

O setor de transporte está afetado pela transição energética. Nesse processo existe os fatores de segurança energética (garantia de atendimento da demanda) e por sustentabilidade socioambiental fundamentada nos impactos negativos que afetam as mudanças climáticas globais (baseado no princípio da responsabilidade comum, mas diferenciada) e à redução da poluição local nas metrópoles e grandes cidades (EPE, 2024).

A eletromobilidade, conceito que se baseia na substituição do uso de veículos movidos a fontes de energia fóssil por equivalentes movidos à energia elétrica, é uma nova tendência da mobilidade urbana que se mostra como uma alternativa para atingir este objetivo. Países como a França (2030), Noruega (2030), Holanda (2035) e Reino Unido (2040) já determinaram prazos para encerrar a venda de veículos movidos a combustíveis fósseis (MCHUGH, 2017).

A cidade de Shenzhen, localizada no sudeste da China, foi a primeira cidade do mundo a implementar um sistema único de transporte público e privado, formado por ônibus e táxis 100% elétricos (Berlin; Zhang; Chen, 2020). Na cidade, a transição ocorreu em três estágios: entre 2009 e 2011 ocorreu um período de demonstração, onde os primeiros veículos foram introduzidos e testados; de 2012 a 2015 algumas linhas iniciaram o processo de migração plena; 2016 a 2017 foi o período em que todos os ônibus e táxis a diesel foram substituídos por seus respectivos elétricos. O país hoje conta com 98% da frota global de ônibus elétricos (IEA, 2021).

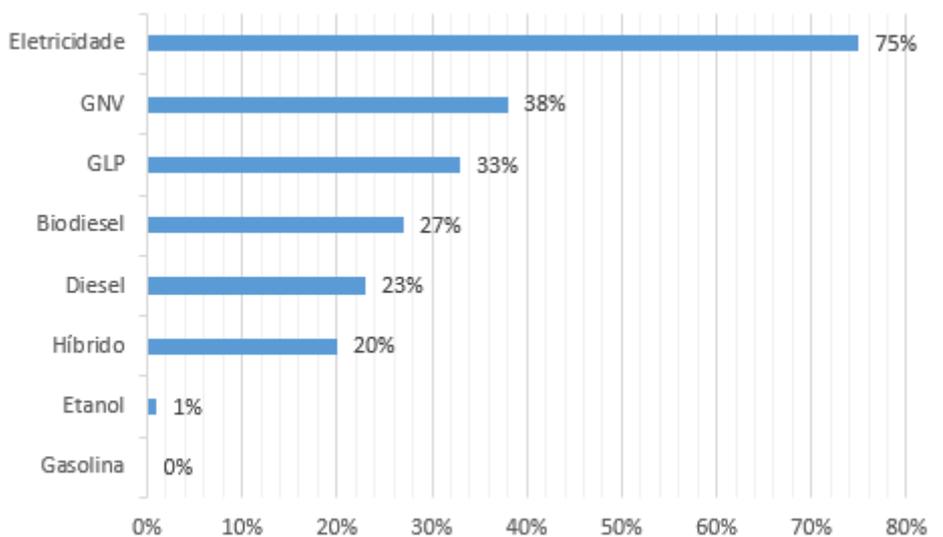
No cenário nacional, a situação da eletromobilidade urbana encontra-se em fase de crescimento, principalmente com os veículos leves de uso privado, onde a venda de veículos elétricos no ano de 2023 cresceu 128% quando comparado ao ano anterior, com um número total de 19.310 veículos elétricos vendidos, parcela que representa 0,9% do total de vendas de carros no Brasil no ano (NAPOLI, 2024). Já no caso dos ônibus elétricos, a expansão da matriz de transporte está ocorrendo a partir das grandes capitais, como é o caso de São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba, Goiânia e Salvador, que estão com planos de realizar a transição de ônibus movidos a diesel para ônibus híbridos e elétricos (RAMOS, 2023).

No caso de Brasília, a eletromobilidade está em um estágio bem inicial. A Viação Piracicabana, empresa responsável pelo transporte público das regiões que compõem a chamada “Bacia 1”, conta atualmente com seis ônibus 100% elétricos, modelo BYD D9W (Figura 2), cada um com uma capacidade de percorrer cerca de 200 quilômetros por carga, com tempo de recarga de aproximadamente 04 horas (PIRACICABANA, 2020).

Figura 2 - Frota de Ônibus elétricos em Brasília

Fonte: Piracicabana DF (2020).

Os ônibus ditos “elétricos” apresentam diversas vantagens quando comparados aos modelos tradicionais: Zero emissões de poluentes, mais conforto nas viagens, devido à falta de vibrações e barulhos do motor, menor número de partes e peças necessárias para o funcionamento do veículo, resultando em um menor número de manutenções e menos casos de “ônibus quebrado”, além do menor valor médio por km rodado, quando comparado com veículos movidos por diferentes combustíveis, como mostra a figura abaixo (Figura 3) (EPE, 2020).

Figura 3: Porcentagem de economia por quilômetro de veículos movidos por diferentes combustíveis

Fonte: Adaptado de Sanguesa *et al* (2021).

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade econômica e ambiental de uma transição energética para a eletromobilidade no transporte público coletivo de Brasília-DF por meio de comparação econômica e ambiental dos ônibus movidos por motor à combustão a diesel e motores elétricos.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão dispostos abaixo:

- Construir uma matriz econômica com indicadores econômico-financeiros para avaliar a viabilidade econômica por meio de comparação entre os ônibus movidos por motor à combustão a diesel e motores elétricos.;
- Elaborar uma matriz de avaliação das entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) dos processos produtivos dos tipos de combustíveis analisados e sua utilização, de forma a realizar uma comparação dos consumos e emissões intrínsecos a cada tipo de veículo analisado.

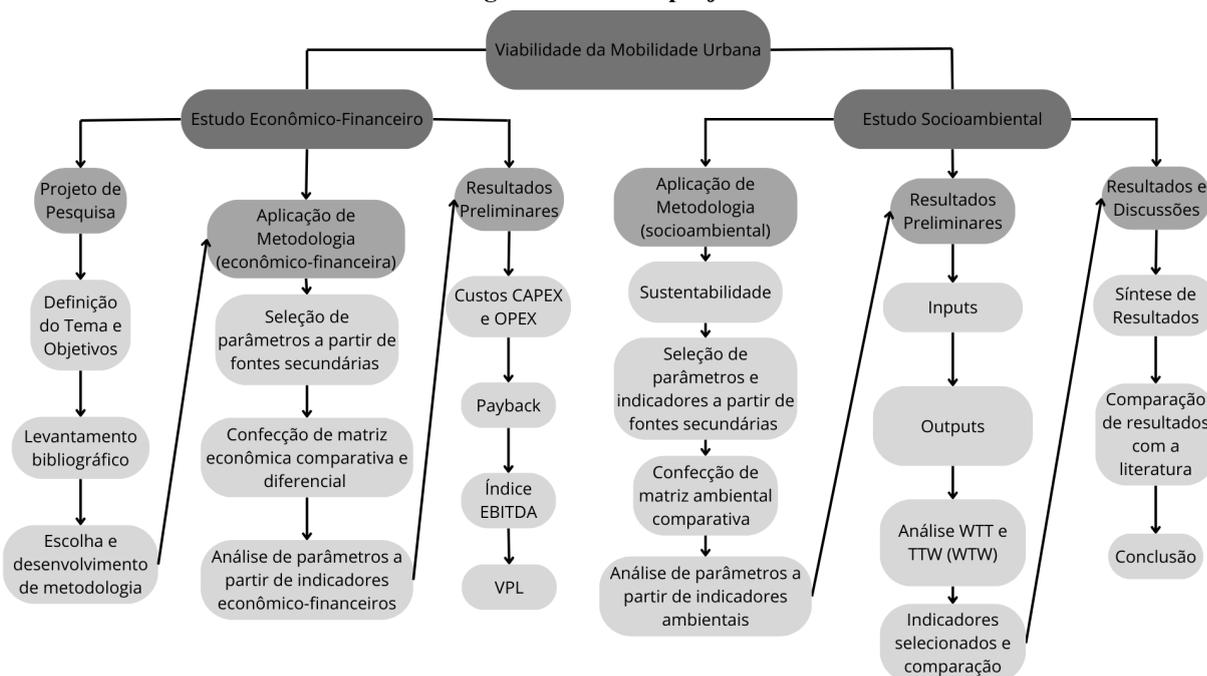
2. METODOLOGIA

Para este estudo, foi utilizado o método de análise comparativa entre os dois veículos dispostos, baseado em tópicos e variáveis de ordem econômico-financeira e ambiental percorridos previamente e, em seguida, alinhados da seguinte forma: seleção de parâmetros utilizando-se de fontes secundárias, construção de matriz para os dois tipos de ônibus e para os dois tipos de análises (econômica e ambiental), e análise de indicadores financeiros e ambientais relevantes.

2.1. ESTRUTURA ANALÍTICA DE PROJETO

A EAP (Estrutura Analítica de Projeto) é uma forma de apresentar resumidamente o trabalho a ser realizado, de uma forma que divide as ações a serem realizadas em pequenos passos e decisões a serem tomadas (PMI, 2017). A Figura 4 apresenta a EAP desenvolvida para este trabalho, dividindo-o em duas fases: TCC1 e TCC2.

Figura 4: EAP do projeto



Fonte: Autoria própria (2024).

2.2. INDICADORES

Os indicadores elaborados para este estudo foram construídos a partir de diversas variáveis de ordem econômica, financeira e ambiental, conforme apresentado a seguir (Tabela 1).

Tabela 1: Variáveis selecionadas e indicadores elaborados

Análise Econômico-Financeira							
Variáveis	Indicadores						
Aquisição de veículos	Custos Fixos	Custos Variáveis	Custos Diferenciais	Fluxo de Caixa	Payback	Índice EBITDA	Valor Presente Líquido
Aquisição de infraestrutura de carregamento							
Recarga/reabastecimento							
Manutenção							
Rendimento							
Distância média percorrida	Análise Ambiental						
Variáveis	Indicadores						
Produção de óleo Diesel	Consumo de Energia	Consumo de Energia Elétrica	Consumo de Recursos Fósseis	Emissão de GEE			
Produção de Bateria LMNC							
Utilização do ônibus tradicional							
Utilização do ônibus "elétrico"							

Fonte: Autoria própria (2024).

2.2.1. Análise de investimento

Como um investimento desse porte pode impactar o desempenho futuro das empresas de transporte, criando ou destruindo valor para as mesmas, é necessário se utilizar de métricas de avaliação econômico-financeiras de projetos de investimento para observar a viabilidade da substituição dos ônibus a diesel por ônibus elétricos (EPE, 2020). A partir disso, os indicadores econômicos

selecionados para esta análise foram: fluxo de caixa, EBITDA, *payback* e VPL (Valor Presente Líquido) diferencial dos dois tipos de veículos, construídos a partir das seguintes variáveis: custo de aquisição veículos, custo de aquisição de infraestrutura de recarga, custos com abastecimento, custos com manutenção, rendimento e distância média percorrida.

2.2.2. Análise Ambiental

A região de Brasília possui cerca de 3 mil ônibus em circulação atualmente (CARABALLO, 2024). Realizar a substituição plena da frota por ônibus elétricos implica em um grande impacto ambiental que deve ser meticulosamente analisado previamente. O intuito desta análise ambiental é comparar os *inputs* (entradas, em inglês) de recursos e *outputs* (saídas, em inglês) de emissões de cada tipo de ônibus analisados de forma que seja possível verificar se os veículos elétricos de fato possuem um impacto ambiental positivo, quando comparado ao veículo tradicional, movido a óleo diesel. Assim sendo, foram selecionados 4 indicadores ambientais para análise comparativa: Consumo de energia elétrica, consumo de recursos fósseis, consumo de energia (elétrica, térmica, química, entre outras) e emissão de GEE, construídos a partir de dados referentes a produção dos combustíveis e bateria de íons de Lítio, e utilização dos veículos.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ELETROMOBILIDADE

Os 193 Estados membros da ONU firmaram o compromisso de cumprir com os chamados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especificados pela Agenda Pós-2015. Dentre os 17 objetivos apontados, a eletromobilidade aplicada no transporte público urbano é relevante à 4 deles, sendo eles: Energia limpa e acessível; indústria, inovação e infraestrutura; cidades e comunidades sustentáveis; consumo e produção responsáveis e combate às alterações climáticas. O setor de transportes é responsável pela emissão de 25% de todo o dióxido de carbono emitido no Brasil no ano de 2021(OECD/IEA, 2021).

A dimensão ambiental da mobilidade sustentável está associada à necessidade de se considerarem os atributos de efetividade tão importantes quanto os atributos de eficiência e eficácia na gestão, operação e planejamento dos sistemas de transporte. Tudo isso tem de ser feito respeitando também o meio

ambiente no qual a operação de transporte está inserida. Em meio a isso, faz-se necessário a implementação de novas tecnologias que visem minimizar ou, idealmente, zerar a emissão de gases poluentes na atmosfera (CARVALHO, 2016).

O desenvolvimento da mobilidade urbana sustentável é definido como um princípio, diretriz e objetivo geral da Política Nacional de Mobilidade Urbana (BRASIL, 2012). A mobilidade urbana sustentável pode ser alcançada de diversas formas, se destacando o uso de transporte público, de forma a reduzir congestionamentos e veículos em circulação, e o uso de veículos motorizados propelidos por fontes de energia não-fóssil (RAÍZEN, 2022).

Diversas empresas como a americana Tesla e a chinesa BYD possuem sua frota formada 100% de veículos elétricos, mostrando a tendência da indústria em direção à transição. A eletromobilidade entra como meio de conectar toda a logística envolvendo, por exemplo, os ônibus. Desde o momento da escolha do tipo de veículo, com tipos diferentes de baterias, com adaptações ao tipo de operação que será executada em cada linha para migrar para esse tipo de tecnologia, também sendo bastante significativa a estratégia de carregamento utilizada para cada caso (CARVALHO, 2016).

3.2. VARIÁVEIS ECONÔMICO-FINANCEIRAS

Estas variáveis incluem todos os itens de ordem monetária referentes à aquisição e funcionamento de ambos os veículos com motor à combustão e elétrico. Dentre estas variáveis, a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2020) destaca e agrupa os seguintes custos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação das principais variáveis econômicas envolvidas na análise

Custos Fixos	Custos Variáveis	Distância	Rendimento
Aquisição de veículos Aquisição de carregadores Infraestrutura	Óleo Diesel Energia Elétrica Manutenção	Distância média percorrida	Rendimento dos veículos

Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas (2020).

O princípio básico que norteia a proposta de uma substituição de tecnologia referentes à motorização, com enfoque dos princípios econômicos, é o de ponto de equilíbrio financeiro, ou seja, o equilíbrio entre os custos fixos e variáveis, avaliados de forma comparativa entre as duas opções. De forma mais específica, a partir dos

estudos realizados neste trabalho, a redução dos custos variáveis análogos ao funcionamento dos ônibus elétricos deve ser, de forma cumulativa com o tempo, equivalentes ao aumento dos custos fixos provenientes da aquisição dos veículos elétricos e de sua infraestrutura de recarga; para que a substituição seja considerada economicamente viável (EPE, 2020).

3.2.1 Custos fixos

Os custos fixos envolvidos em ambos os tipos de ônibus envolvem o custo de aquisição dos veículos e o custo de aquisição dos carregadores para os modelos elétricos. Os preços dos ônibus urbanos podem variar conforme as características dos mesmos mudam, como por exemplo, as dimensões do veículo, a presença de ar-condicionado, a quantidade de bancos e a capacidade total de passageiros. Já para ônibus elétricos, além dessas condições, itens que podem alterar o valor final do veículo; como por exemplo a capacidade das baterias, a potência dos carregadores e o tempo total de carregamento; são variáveis que devem também ser levadas em conta no valor final do ônibus elétrico. Independente da alternativa, estes fatores devem ser minuciosamente analisados quanto à aquisição e operação dos veículos para resultar em eventuais reduções no preço unitário dos veículos e, conseqüentemente, refletir em custos fixos inferiores (EPE, 2020).

No geral, é um consenso que, até o presente momento, os custos fixos associados aos ônibus elétricos são superiores aos dos ônibus a diesel. O custo do sistema de baterias nestes veículos é uma das parcelas que mais contribui para os seus preços elevados e, embora nos últimos 15 anos o valor das baterias tenha caído cerca de 90%, custando em 2023 o valor médio de US\$138/KWh (EDELSTEIN, 2024), os custos de aquisição são considerados uma barreira à adoção destes veículos.

3.2.2. Custos variáveis

Os custos variáveis envolvidos na utilização dos ônibus incluem os custos de abastecimento dos veículos, seja eletricidade ou combustível, os custos relacionados às manutenções, tanto corretivas, quanto preventivas, ao longo do período de operação dos veículos, que na cidade de Brasília-DF, não deve ser superior aos 7 (sete) anos para os modelos tradicionais e de até 10 anos para os modelos elétricos (SEMOB, 2021).

A manutenção de ônibus elétricos se apresenta com um valor reduzido devido ao menor número de quantidade de peças, quando comparado ao veículo a diesel. Os sistemas envolvidos na composição dos veículos elétricos são mais reduzidos e estão sujeitos a condições de pressão e temperatura menos extremas do que em veículos motorizados via combustão interna.

Uma vez que os custos fixos inerentes aos ônibus elétricos são superiores aos dos a diesel, cabe aos custos variáveis trazerem com o tempo a relação de equivalência entre os dois modelos de veículos. Isso se torna possível pelo rendimento superior dos motores elétricos quando comparados aos motores de combustão interna, o que leva a uma redução ainda maior dos custos variáveis, como afirma o estudo realizado pelo ICCT (2019). Ou seja, nesses casos, a compensação dos custos fixos superiores das novas tecnologias se dá, em maior medida, pela sua operação naturalmente mais eficiente.

3.2.3. Distância média percorrida

A distância média percorrida por um ônibus é um indicador dado pelo tamanho do percurso realizado pelo veículo e da sua frequência de ocorrência. De acordo com a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2018), uma forma de se estimar esta distância é baseando-se no tamanho médio da população da cidade analisada. A distância média percorrida pode ser assumida como função da demografia local, de certa forma.

A influência desta variável frente a uma análise técnico-econômica a respeito dos ônibus elétricos pode ser explicada da seguinte forma. Os custos variáveis de operação de um ônibus elétrico apresentam valores inferiores frente aos custos variáveis que incidem em um ônibus a diesel (ICCT, 2018). Logo, quanto maior a quilometragem percorrida por esses veículos, maior a economia de custos variáveis gerada e, portanto, mais facilmente pode se dar a compensação dos custos fixos superiores inerentes aos modelos elétricos.

3.2.4. Rendimento

O rendimento dos veículos podem ser expressados em unidades usuais como quilômetros por litro (km/l), para veículos à combustível, e quilômetros por quilowatt-hora (km/kWh), para veículos elétricos. No geral, à condições constantes e com a tecnologia atual, os veículos elétricos tendem a ser mais eficientes que as

suas contrapartes a diesel (ICCT, 2019). A grande contribuição para tal se deve à eficiência de conversão da eletricidade em força motriz superior à eficiência de conversão do óleo diesel ou outro tipo de combustível que utiliza um ciclo térmico.

3.2.5. Definição de fluxo de caixa

As entradas (receitas) e as saídas (despesas) de capital de um investimento são chamadas de fluxo de caixa (BLANK *et al.*, 2008), e para esta análise foram consideradas os custos CAPEX (sigla para *Capital Expenditures*, Despesas de Capital em inglês), que são os custos iniciais para se realizar um investimento, e os custos OPEX (sigla para *Operational Expenditures*, Despesas operacionais em inglês), que são os custos operacionais de um investimento para ele se manter funcional, ao longo do período de vida útil dos veículos, que de acordo com o Conselho de Transporte Público Coletivo do Distrito Federal - CTPC/DF, é de no máximo 10 anos para ônibus elétricos (SEMOB, 2021). Para os fins deste trabalho, não foi considerado um valor residual para os veículos no final de sua vida útil e, portanto, não houve alterações no fluxo de caixa no final do período de análise (valor de revenda).

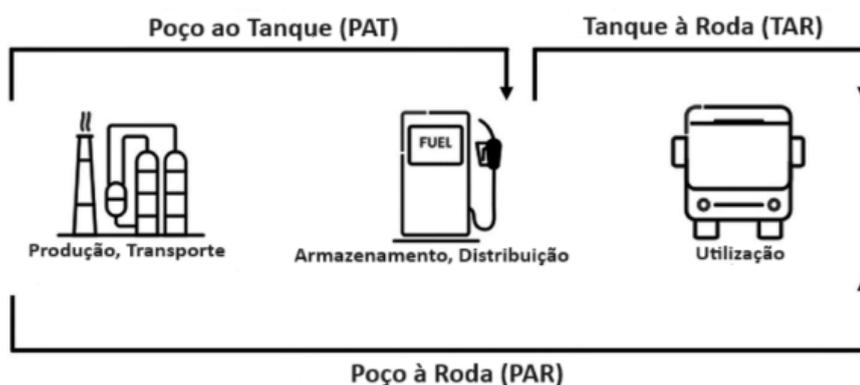
3.3. VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Essas variáveis incluem aspectos como emissões e reciclabilidade que ambos os tipos de veículos oferecem ao longo de sua vida útil e durante a fase de descomissionamento. Conforme observado por Kuyumcu *et al.* (2024), os dois tipos de veículos se assemelham em sua estrutura geral, diferenciando-se principalmente no sistema de propulsão, conhecido como *powertrain* (trem de força, em inglês). O *powertrain* é composto por componentes que realizam transformações químicas e físicas, convertendo-as em movimento. No caso do ônibus a diesel, o motor de combustão interna é o principal elemento do *powertrain*, enquanto no ônibus elétrico, essa função é desempenhada pela bateria.

Assim sendo, é possível dividir as emissões dos dois tipos de veículos em duas fases principais: emissões liberadas durante a produção e distribuição dos combustíveis, chamadas de emissões WTT, sigla de *Well to tank* (Poço ao tanque, em inglês), onde, para garantir uma comparação precisa, as emissões provenientes do processo de fabricação de baterias para veículos elétricos são incorporadas à análise; e emissões liberadas durante o uso do veículo, a depender do seu

rendimento, chamadas de emissões TTW, sigla de *Tank to wheel* (Tanque à roda, em inglês). A união das duas fases especificadas é conhecida como o ciclo de vida WTW, sigla de *Well to wheel* (Poço à roda, em inglês) (KUYUMCU *et al.*, 2024) (Figura 6).

Figura 5: Esquemática do método de análise



Fonte: Adaptado de Kuyumcu *et al.* (2024).

3.3.1. Fase de produção de bateria e combustíveis

O processo produtivo do diesel envolve diversos procedimentos realizados com o petróleo bruto nas refinarias (KUYUMCU *et al.*, 2024). O processo de refino do petróleo pode ser dividido em três conjuntos de processos: Processos de separação, onde os derivados são divididos conforme suas características físicas e químicas, como por exemplo os processos de destilação, desaromatização e desparafinação; Processos de conversão, onde os hidrocarbonetos de maior cadeia são quebrados em cadeias menores por meio de processos químicos, podendo ser utilizados catalisadores, como por exemplo no processo de craqueamento catalítico; e os Processos de tratamento, também chamados de processos de acabamento, onde se busca melhorar as propriedades dos derivados do petróleo bruto, conforme suas finalidades. Na produção de óleo diesel, um processo de tratamento é a de aditivação, onde se aplica aditivos e misturas com a finalidade de reduzir a quantidade de enxofre em sua composição, tornando-o menos poluente (FARAH, 2012).

O processo produtivo da bateria de veículos elétricos, que neste trabalho será analisada a bateria LNMC (Lítio, Níquel, Manganês e Cobalto), envolve diversos processos, desde a extração de metais pesados, como por exemplo o carbonato de

lítio, extraído a partir da calcinação por evaporação de grandes lagos salgados localizados na América do Sul, e a bauxita, que passa por diversos processos para ser refinada em alumínio primário; até a sua etapa de produção e montagem, que consome cerca de 544,44 kWh de energia elétrica para cada kWh de capacidade da bateria montada (FREITAS e MARCHESINI, 2022).

3.3.2. Fase de utilização dos combustíveis

Esta etapa se baseia principalmente no rendimento e distância média percorrida pelos veículos, tema discutido anteriormente nos itens 2.3.3. e 2.3.4.; ambos os tipos de ônibus são abastecidos, ou recarregados, diariamente ao final do seu expediente.

O que diferencia os ônibus elétricos dos ônibus tradicionais a diesel nesta etapa é devido ao fato que os veículos em si não emitem poluentes durante a sua utilização (DELGADO, 2017). No entanto, vale ressaltar que, como o ônibus elétrico se recarrega a partir da rede elétrica, ele está, de forma indireta, emitindo poluentes provenientes da produção de energia elétrica no Brasil.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2022, o Brasil dispunha de uma matriz elétrica predominantemente renovável (87,7%), com destaque para a fonte hídrica, que responde por 61,9% da oferta interna de energia elétrica. Conforme divulgado pelo Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023, o Distrito Federal aumentou, de 2021 para 2022, a sua produção de energia elétrica em mais de 65%, sendo a energia solar fotovoltaica responsável por cerca de 77% do total de energia elétrica produzida na região.

3.4. CENÁRIO DE TRANSIÇÃO PARA ELETROMOBILIDADE A PARTIR DO ÔNIBUS ELÉTRICO

A transição de veículos movidos por motores de combustão interna de combustível fóssil para os motores elétricos alimentados por fontes de energia sustentável está sendo bem visado pela indústria automotiva nos últimos anos, a prova disso é o crescimento constante de vendas de veículos elétricos, tanto no cenário internacional, onde a venda destes veículos atingiu o número aproximado de 14 milhões de unidades, 95% deste valor se concentrando na China, Estados Unidos e países da Europa (IEA, 2024). No cenário nacional, a venda destes veículos vem crescendo de forma mais sutil; no ano de 2023, o número de veículos

elétricos registrados foi de cerca de 19 mil unidades, valor este que representa aproximadamente 1% do total de veículos vendidos no ano (NAPOLI, 2024).

No primeiro trimestre de 2023, o número de ônibus elétricos vendidos na Europa superou o número de ônibus à diesel pela primeira vez na história (SUSTAINABLE BUS, 2023).

Para realizar essa transição, é necessário levar em conta os diversos componentes e acessórios que se diferenciam entre os veículos à combustão dos elétricos, além dos diferentes métodos a serem adotados para operar de forma segura e duradoura os novos ônibus.

3.4.1. Veículo

O ônibus elétrico seria o principal veículo coletivo do cenário de transição para a eletromobilidade na cidade de Brasília. Diversas empresas automobilísticas já possuem sua própria linha de veículos pesados totalmente elétricos, como por exemplo a BYD (Figura 7), que já possui seu modelo implantado na cidade de Brasília, Mercedes-Benz, Volvo, etc. e todas elas tendem a seguir um padrão na arquitetura do veículo.

Figura 6: Modelo de ônibus elétrico da BYD (D9W).

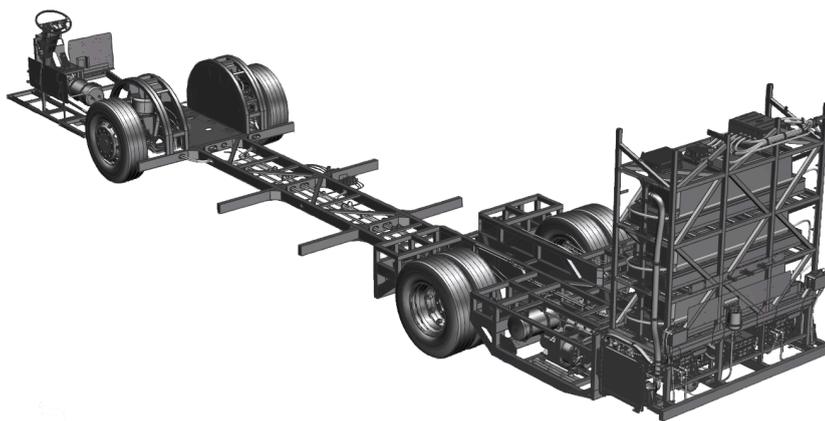


Fonte: Piracicabana DF (2020).

No geral, os ônibus seguem o mesmo modelo interno dos tradicionais, a diesel, possuindo componentes diferenciados (Figura 8). Os freios possuem o chamado sistema regenerativo, que transforma a energia cinética dos veículos em

movimento em energia elétrica ao realizar a ação de frenagem do veículo, recarregando o ônibus a cada frenagem que ocorrer, aumentando sua autonomia, o banco de baterias fica próximo ao sistema de resfriamento para manter a vida útil das mesmas e os motores são posicionados próximos às rodas (BYD, 2024).

Figura 7: Chassi do modelo BYD D9W 20.140



Fonte: BYD (2020).

A manutenção dos modelos elétricos, necessita de uma mão de obra qualificada, mas é menos dispendiosa pois não há, por exemplo, velas de ignição, troca de óleo e há uma menor quantidade de partes móveis, o que torna baixo o custo de manutenção, além de serem maiores os intervalos entre as manutenções, resultando em menos custo ao longo da vida útil do veículo (SANGUESA et al., 2021).

3.4.2. Operação, infraestrutura e fornecimento de energia

O transporte coletivo rodoviário urbano em Brasília ocorre de três modos diferentes: linhas circulares dentro da região administrativa, linhas que ligam regiões administrativas e viagens de longas distâncias e integração. Atualmente, os ônibus elétricos fazem parte apenas das viagens mais curtas (SEMOB, 2024).

Com a transição para a eletromobilidade, as linhas seriam desenhadas para extrair o máximo de eficiência dos ônibus elétricos. O número de veículos em cada rota seria estruturado para que fosse compatível com a autonomia e adotada a estratégia de carregamento compatível com cada caso (EPE, 2020).

A principal estratégia utilizada para o carregamento é na garagem. A rede elétrica de alta voltagem precisa ser instalada no local, para então serem instalados

os pontos de carregamentos de veículos. O tópico de infraestrutura é um dos mais dispendiosos de todo o processo de implementação, sendo, portanto, mais interessante a implantação de uma garagem em um local que também contemple, nas redondezas, uma rede de alta tensão (EPE, 2020).

3.4.3. Bateria

No mercado, existem diferentes tipos de baterias disponíveis para serem utilizadas pelos veículos elétricos, sendo as baterias mais utilizadas, as de íons de Lítio, devido a vantagens significativas em termos de densidade de energia, vida útil, segurança, potência e custo (ZENG et al., 2019; MESHRAM et al., 2020; ZHANG et al., 2020).

O funcionamento de baterias de fosfato de lítio-ferro (LiFePO₄) atinge o total da sua capacidade relativa em temperaturas iguais ou superiores a 25°C. Em Brasília, a temperatura média anual fica em torno dos 21°C (NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, 2021) que, em conjunto com aquecimento da própria bateria, pode ocasionar um desempenho médio mais eficiente das baterias em regiões com essas temperaturas (QUINTERO *et al.*, 2022).

3.4.4. Manutenção

A economia gerada pelo uso de ônibus com propulsão elétrica se comparados aos com propulsão a diesel, durante sua vida útil, é muito expressiva, pois, por exemplo, há elevados custos de reparo no motor. Em um estudo conduzido nos Estados Unidos, os ônibus elétricos são estimados a proporcionar uma redução de 0,25 dólares por milha percorrida, para uma média anual de 40.000 milhas, gerando uma economia de aproximadamente U\$10.000,00 dólares por ano (APPENDIX G, 2016).

3.5. INDICADORES FINANCEIROS

3.5.1. EBITDA (LAJIDA)

EBITDA, da sigla inglesa *Earnings Before Interests, Taxes, Depreciation and Amortization*, que significa Lucro Antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização (LAJIDA) é um indicador de saúde financeira de um projeto. Assim, o EBITDA é percebido como o resultado da operação de um investimento, ou seja, a capacidade de geração um fluxo de caixa positivo (CRUNDWELL, 2008).

O cálculo do EBITDA é dado como a receita líquida do projeto ou da empresa subtraído das despesas operacionais. Nesta análise, foi considerado que não houve alteração no valor da Tarifa Técnica paga às empresas prestadoras de serviço de transporte público coletivo, ou seja, não foi acrescido o preço da passagem, nem a quantidade de passageiros médios nos ônibus. Sendo assim, o diferencial dos EBITDA de ambos os tipos de ônibus se dá pelos gastos operacionais de cada.

3.5.2. *Payback*

Payback representa o período de tempo necessário para que o fluxo de caixa gerado por um projeto iguale o valor do investimento inicial, marcando o ponto em que o projeto começa a gerar lucro. O *payback* é expresso em anos e é considerado um indicador de risco: quanto menor o período de *payback*, menor o risco associado ao investimento, pois o capital é recuperado mais rapidamente (CRUNDWELL, 2008).

O valor do *payback* pode ser calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$\textit{Payback} = \frac{\textit{Investimento Inicial}}{\textit{Fluxo de Caixa}} \quad (1)$$

Onde:

Payback é dado em anos;

Investimento Inicial é dado em R\$;

Fluxo de caixa é dado em R\$/ano.

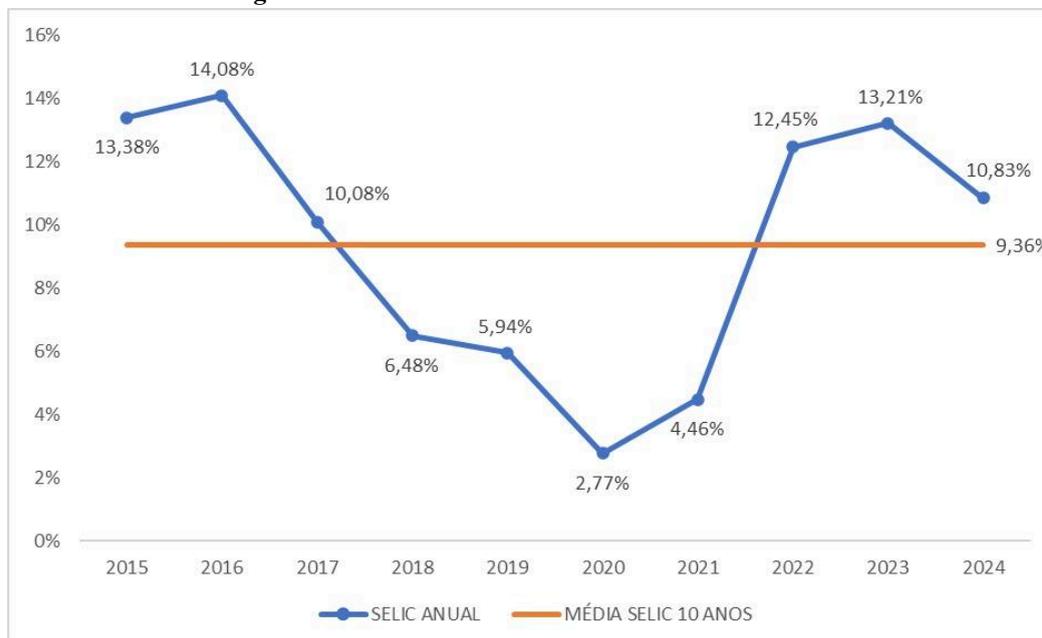
3.5.3. Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma métrica financeira que traz ao período zero (momento do investimento do capital), o valor do fluxo de caixa futuro de um investimento a uma taxa de desconto padrão, uma vez que o valor futuro, no tempo zero, é inferior devido a desvalorização do dinheiro no tempo.

A taxa de desconto do investimento adotada nesta análise foi a média taxa Selic dos últimos 10 anos: 9,36% (Figura 17). A taxa Selic (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) é a taxa básica de juros da economia, ela influencia a variação de outras taxas do país, como juros e descontos em empréstimos, financiamentos, aplicações financeiras ou investimentos, além de ser o principal

instrumento de controle da inflação utilizado pelo Banco Central do Brasil (BCB, 2025).

Figura 8: Histórico da taxa Selic nos últimos 10 anos.



Fonte: Adaptado de Banco Central do Brasil (2025).

O VPL pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$VPL = \left(\sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \right) - FC_0 \quad (2)$$

Onde:

VPL é dado em R\$;

n é o último período analisado e é dado em anos;

FC é o fluxo de caixa a partir do primeiro período após o investimento inicial, dado em R\$/ano;

i é a taxa de desconto do investimento, apresentado em %;

t é o período, dado em anos;

FC₀ é o fluxo de caixa no período 0, ou seja, o investimento inicial, dado em R\$;

3.6. INDICADORES AMBIENTAIS DE ENTRADA (*INPUT*)

3.6.1. Consumo de Energia Elétrica (TTW)

Este indicador representa a quantidade de energia elétrica consumida na fase TTW (*Tank to Wheel*, poço à roda em inglês), ou seja, durante o abastecimento (ou

recarga) do ônibus analisado e uso do mesmo. Para o ônibus tradicional a diesel, esse consumo está concentrado apenas na utilização da bomba de combustível, necessária para o abastecimento do veículo. Já para o ônibus elétrico, esse valor é mais significativo, pois todo o funcionamento do veículo depende da carga presente na bateria (AZEVEDO, 2018).

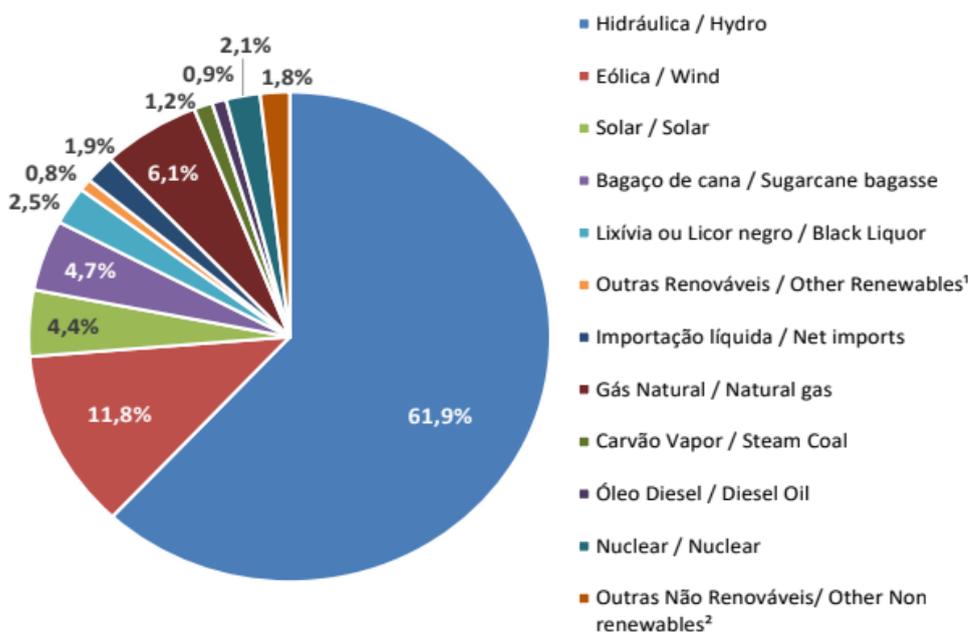
3.6.2. Consumo de recursos fósseis (TTW)

Este indicador representa a quantidade de recursos fósseis, sejam eles óleo diesel, ou outros derivados do petróleo e gás natural, consumidos pelos veículos analisados.

Para o ônibus tradicional a diesel, a quantidade analisada é basicamente o volume de óleo diesel consumido pelo veículo para se locomover, observando o rendimento e distância média percorrida pelo mesmo.

Já para o ônibus elétrico, este consumo é proveniente da matriz elétrica brasileira, que se utiliza de usinas termelétricas baseadas em combustíveis fósseis para suprir sua demanda energética. A partir de dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), é estimado que cerca de 8% da oferta interna de energia elétrica é proveniente de recursos fósseis, como o gás natural e o óleo diesel (Figura 10).

Figura 9: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2024).

3.6.3. Consumo de energia (WTT)

Este indicador representa a quantidade de energia total (térmica, elétrica, química, entre outras) consumidas nos processos de produção dos combustíveis utilizados pelos ônibus analisados.

No caso do ônibus tradicional a Diesel foram consideradas as entradas de energia no processo de refinamento do petróleo bruto. Durante este processo, o petróleo bruto passa por processos de separação, conversão e tratamento, para gerar diversos produtos, como o óleo diesel (FARAH, 2012). Em um estudo realizado na China (JIA *et al.*, 2020), foi calculado que o total de energia consumido na refinaria de petróleo *Fushun Petrochemical* durante o estudo foi de aproximadamente 0,755 Mtce (Mega toneladas de carvão equivalente). Este valor foi então dividido entre os produtos manufaturados na refinaria, chegando-se ao valor de 84.7 kg de carvão equivalente por tonelada de produto. No Brasil, os valores de consumo de energia são regidos pelo art.29 da Resolução ANP N°852/2021 e são comunicados apenas entre as refinarias e a ANP (ANP, 2021).

No caso do ônibus elétrico, o consumo de energia nesta fase está ligado à produção da bateria de íons de lítio analisada. Estudos realizados por Amarakoon *et al.* (2013) e Romare e Dahllöf (2017), estimam que as etapas de produção e montagem da baterias consomem cerca de 544,44 kWh de energia elétrica para cada kWh de capacidade da bateria montada.

3.7. INDICADORES AMBIENTAIS DE SAÍDA (*OUTPUT*)

3.7.1. Emissões de Gases de Efeito Estufa (TTW)

Este indicador aponta a quantidade de GEE emitidos a partir da utilização de cada ônibus analisado. Vale ressaltar que, por definição, os GEE são os gases que, em excesso, contribuem para o aumento excessivo da temperatura terrestre, provocando alterações climáticas extremas (IEMA, 2022).

Para o ônibus tradicional a diesel, serão contabilizados os GEE emitidos a partir do cano de escapamento de veículo, uma vez que estes gases são puramente provenientes da combustão do combustível analisado (LUBECKI; SZCZUROWSKI; ZARĘBSKA, 2023).

O ônibus elétrico, por outro lado, tem como uma das suas principais características atrativas a não-emissão de GEE durante a sua direção. No caso do ônibus elétrico analisado (BYD D9W), a energia flui a partir da movimentação dos elétrons na bateria e é transmitida ao motor elétrico tipo síncrono de ímã permanente, convertendo a energia elétrica em tração nas rodas e enfim, em energia cinética, movimentando o veículo (AZEVEDO, 2018).

3.7.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa (WTT)

Este indicador quantifica os GEE oriundos da produção e distribuição dos combustíveis analisados.

No caso do ônibus tradicional a diesel, foram consideradas as emissões provenientes dos processos de refinamento do petróleo bruto em óleo diesel, além das emissões ligadas ao transporte do combustível para os centros de distribuição e garagens de ônibus. Em um estudo realizado por Kuyumcu *et al* (2024), foram quantificadas as emissões no formato de gramas de CO₂ equivalente por litro de diesel produzido e transportado.

Já no caso do ônibus elétrico, as principais emissões desta fase da análise são resultados das emissões da matriz elétrica brasileira e da produção da bateria de íons de lítio. De acordo com o BEN 2023 (EPE, 2023), a matriz elétrica brasileira obteve uma geração de 677,1 TWh de energia elétrica, sendo cerca de 86,1% dessa geração originária de fontes renováveis. Ainda assim, de acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (2024), o setor energético, especificamente o subsetor de produção elétrica, emitiu cerca de 19 milhões de toneladas de CO₂eq, além disso, em um estudo realizado por Kuyumcu *et al* (2024) é estimado que os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica emitem cerca de 19,8 gCO₂eq/kWh de energia elétrica.

As emissões referentes a produção de bateria de íons de lítio concentram diversos processos que vão desde a extração dos principais minérios necessários para sua construção, até sua produção, montagem e transporte. Foi estimado que, na região da América do Sul, a região com a maior concentração de Lítio do mundo, a produção de uma bateria de LMNC (Lítio, Níquel, Manganês e Cobalto) emite cerca de 81,36 toneladas de CO₂eq (FREITAS E MARCHESINI, 2022).

3.8. ANÁLISE *WELL TO WHEEL* (WTW)

As análises *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW) englobam uma avaliação abrangente do ciclo de vida completo de cada combustível, desde sua produção até sua aplicação como fonte de energia para os respectivos veículos (KUYUMCU *ET AL.*, 2024).

De forma simplificada, a análise WTW das entradas de recursos e saídas de resíduos é dada como uma soma respectiva dos *inputs* e *outputs* das análises WTT e TTW, ou seja, $WTW = WTT + TTW$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade econômica e ambiental da transição energética para a eletromobilidade no transporte público coletivo de Brasília-DF por meio de comparação econômica e ambiental dos ônibus com sistemas de combustão a diesel e elétricos.

Para a análise de viabilidade econômico-financeira, os valores utilizados como base de paridade são os custos diferenciais entre o ônibus elétrico e o modelo tradicional a diesel.

Para a análise ambiental, foi realizada uma comparação entre os indicadores ambientais selecionados anteriormente, utilizando como base os *inputs* e *outputs* do ônibus tradicional a diesel e do ônibus elétrico.

4.1. CUSTOS GERAIS DOS VEÍCULOS: CUSTO FIXOS E VARIÁVEIS

4.1.1. Custos Fixos: Custos de aquisição (CAPEX)

No cálculo do CAPEX, sigla em inglês para *Capital Expenditures*, é considerado para o investimento inicial a aquisição do veículo e a construção de uma infraestrutura de recarga, respectivamente.

O valor final de aquisição de ônibus urbanos está sujeito a variações a depender das suas características, tais quais as dimensões do veículo, a presença de ar-condicionado, a capacidade de passageiros e o tipo de câmbio. Para os ônibus elétricos ainda, esse valor pode variar principalmente pela capacidade da bateria,

componente responsável por cerca de 50% a 60% do valor final do veículo elétrico (EPE, 2020).

O estudo teve como base comparativa os modelos de ônibus mais recentes em circulação no Distrito Federal. Para os ônibus a diesel, o ônibus selecionado é o adquirido recentemente pela empresa *BSBus*, em circulação desde o início do ano de 2024 e de acordo com a norma ecológica Euro 6, ou Proconve P8 (LOBO, 2023). O veículo é composto de um chassi Mercedes-Benz OF 1721/59 e carroceria Marcopolo Torino S (Figura 9). O valor de aquisição deste veículo é estimado em R\$600.000,00 (MARCOPOLO, 2018). Já o ônibus elétrico escolhido é o único modelo elétrico em circulação no Distrito Federal, se trata do *e-bus* da viação Piracicabana, em circulação desde junho de 2020. O veículo elétrico destacado é composto por um chassi BYD D9W e uma carroceria Marcopolo Viale BRS *Low Entry* (Figura 10). O valor de aquisição deste ônibus elétrico é de aproximadamente R\$1.700.000,00 (VINHOTE, 2020).

Figura 10: Modelo de ônibus a diesel



Fonte: Bazani, 2024.

Figura 11: Modelo de ônibus elétrico



Fonte: Piracicabana DF (2020).

O custo de aquisição de uma infraestrutura de carregamento é proveniente das alterações necessárias no espaço atual das garagens de ônibus para fornecer o devido combustível para cada tipo de veículo analisado. Os ônibus a diesel já contam com uma estrutura de abastecimento existente, não será considerado este custo no cálculo CAPEX para este tipo de veículo (EPE, 2020). Os ônibus elétricos, no entanto, precisam de uma adequação das garagens para comportar os carregadores destes veículos. De acordo com o Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC, 2018), a empresa chinesa BYD estimou um valor de aproximadamente R\$160.000,00 de custo de infraestrutura de carregamento por veículo.

Estes custos incluem a aquisição de ambos os tipos de veículos e a aquisição e montagem da infraestrutura de carregamento do ônibus elétrico nas garagens.

Tabela 3: Custos de aquisição (CAPEX)

ITEM	ELÉTRICO (R\$)	TRADICIONAL (R\$)
Veículo	1.700.000,00***	600.000,00*
Infraestrutura de carregamento	160.000,00**	-
Valor total de aquisição	1.860.000,00	600.000,00

Fonte: Autoria própria (2024) com dados obtidos de Marcopolo (2024)*, (MDIC, 2018)** e Vinhote (2020)***.

4.1.2. Custos Variáveis: Custos com recarga/abastecimento

Estes custos incluem os valores atuais para o quilowatt-hora da energia elétrica e o litro do óleo diesel no Distrito Federal, o rendimento de cada veículo e a distância percorrida pelos mesmos anualmente.

Tabela 4: Custos anuais com abastecimento

ITEM	ELÉTRICO	TRADICIONAL
Valor diesel/eletricidade (R\$/L ou R\$/Kwh)	0,5199****	5,306*
Rendimento (L/km ou Kwh/km)	1,25***	0,52*****
Custo em 80.000 km/ano** (R\$/ano)	51.990,00	220.729,60

Fonte: Autoria própria (2024) com dados obtidos de ANP (2024)*, BHTRANS (2019)**, GOMES (2020)***, NEONERGIA (2024)**** e SEMOB (2022)*****.

4.1.3. Custos Variáveis: Custos com manutenção

Estes custos incluem gastos com a manutenção periódica, reposição de peças, lubrificantes e mão de obra especializada anualmente.

Tabela 5: Custos anuais com manutenção

ITEM	ELÉTRICO	TRADICIONAL
Manutenção (R\$/km)	0,6729*	0,8854**
Custo anual em 80.000 km (R\$/ano)	53.832,00	70.832,00

Fonte: Autoria própria (2024) com dados obtidos de MDIC (2018)* e SEMOB (2022)**.

4.2. CUSTOS DIFERENCIAIS: CUSTOS FIXOS E VARIÁVEIS

A Tabela 4 apresenta os custos diferenciais de aquisição, energia, combustível e manutenção entre o ônibus a diesel comparado ao modelo elétrico, seguindo a equação abaixo.

$$\text{Custo diferencial} = - \text{custo elétrico} - (- \text{custo diesel}) \quad (3)$$

Onde:

Custo diferencial é dado em reais (R\$);

Custo elétrico é dado em reais (R\$);

Custo diesel é dado em reais (R\$);

Os valores diferenciais obtidos foram usados no cálculo dos indicadores financeiros do tópico 4.3.

Tabela 6: Custos diferenciais

ITEM	CUSTO ELÉTRICO	CUSTO TRADICIONAL	CUSTO DIFERENCIAL
Aquisição (R\$)	1.860.000	600.000	-1.260.000,00
Operação e Manutenção (R\$/ano)	105.822,00	291.561,60	185.739,60

Fonte: A autoria própria (2024).

4.3. INDICADORES FINANCEIROS

4.3.1. Fluxo de caixa

No fluxo de caixa elaborado foi calculado a previsão de receita diferencial, a partir do ano um, gerada pela substituição do ônibus tradicional pelo elétrico (Tabela 5). O valor do período zero foi o investimento inicial diferencial entre a compra dos veículos. O período final do fluxo de caixa foi o tempo de vida útil adotado como padrão para o estudo.

Tabela 7: Fluxo de caixa diferencial comparativo.

PERÍODO/ANO	DIFERENCIAL ELÉTRICO X TRADICIONAL
0	-1.260.000,00
1	185.739,60
2	185.739,60
3	185.739,60
4	185.739,60
5	185.739,60
6	185.739,60

7	785.739,60
8	185.739,60
9	185.739,60
10	185.739,60

Fonte: Autoria própria (2024).

4.3.2. EBITDA diferencial

O EBITDA é calculado a partir da diferença entre receita líquida e gastos operacionais, no caso dela: energia, combustível e manutenção. Para os fins deste estudo, foi considerada uma entrada líquida fixa para os dois tipos de veículos, ou seja, não foi acrescido o preço da passagem, nem a quantidade de passageiros médios nos ônibus.

Dentro desse contexto, uma vez que os veículos elétricos possuem um custo operacional diferencial menor, o EBITDA de um veículo a diesel foi menor se comparado aos modelos elétricos, vide cálculo.

$$\begin{aligned}
 EBITDA &= Receita (R) - Custos (C) \quad (4) \\
 EBITDA_{elétrico} &= R - (C_{recarga} + C_{manutenção-elétrico}) \\
 EBITDA_{tradicional} &= R - (C_{abastecimento} + C_{manutenção-tradicional}) \\
 EBITDA_{diferencial\ elétrico-tradicional} &= -C_{elétrico} + C_{tradicional} \\
 EBITDA_{diferencial\ elétrico-tradicional} &= R\$185.739,60 \\
 EBITDA_{diferencial\ elétrico-tradicional} &> 0
 \end{aligned}$$

Portanto, o ônibus elétrico é financeiramente superior ao ônibus a diesel no potencial de geração de um fluxo de caixa positivo, ou seja, na geração de valor econômico.

4.3.3. Payback

O *payback* é uma estimativa do tempo em que o investidor reaverá o valor integral do seu investimento inicial. A partir da equação (1), o cálculo do *payback* para o fluxo de caixa estimado no item 4.3.1 é de 6,78 anos, ou 6 anos, 9 meses e 12 dias, aproximadamente.

Isso indica que mesmo no período de funcionamento estipulado pelo Conselho de Transporte Público Coletivo do Distrito Federal (CTPC, 2021) para os

ônibus tradicionais, que é de 7 anos, o investimento em ônibus elétricos consegue ser abatido, consideradas as economias com os gastos OPEX.

4.3.4. Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL é o valor do fluxo de caixa futuro de um investimento trazido ao momento presente do investimento inicial, descontado de uma taxa de desconto padrão. No caso deste trabalho, o VPL utiliza a receita diferencial futura do fluxo de caixa estimado para a aquisição dos veículos elétricos (item 4.3.1.), a uma taxa de desconto padrão. Representa a taxa mínima de atratividade de um investimento e sua viabilidade econômica.

A partir da equação (2), foi possível obter o valor de R\$233.799,61. Este valor indica que o investimento é rentável para as empresas privadas de ônibus. Isso se dá principalmente pela diferença de vida útil estipulada pela legislação distrital vigente, que determina que os ônibus tradicionais a diesel operem por 7 anos, e os ônibus elétricos, por 10 anos (CTPC, 2021). Em razão disso, foi considerado no período 7 do fluxo de caixa (Tabela 5) a compra de um novo veículo a diesel, além dos custos operacionais do veículo a ser descartado.

4.4. INDICADORES AMBIENTAIS DE ENTRADA (*INPUTS*)

4.4.1. Consumo de energia elétrica (TTW)

O consumo de energia elétrica leva em consideração a energia consumida para recarregar os ônibus elétricos e abastecer os tradicionais a partir da bomba de combustível, calculados em uma escala anual, utilizando como base a distância anual percorrida adotada e o rendimento de cada veículo (Tabela 6).

Para o ônibus tradicional a diesel, foi calculado a partir do seu rendimento e distância anual percorrida que o mesmo passa cerca de 5,3 horas por ano sendo abastecido por uma bomba de combustível de vazão 130L/min e 1210W de potência, resultando num consumo anual de energia elétrica de 6,5 KWh.

Para o ônibus elétrico, foi calculado que anualmente ele consome cerca de 100.000 KWh de energia elétrica, ou 0,1 GWh/ano.

Tabela 8: Consumo de energia elétrica

VEÍCULO	CONSUMO (KWh/ano)
Diesel	6,49*
Elétrico	100.000**

Fonte: Autoria própria (2025) com dados de FILL-RITE (2014)* e GOMES (2020)** .

4.4.2. Consumo de recursos fósseis (TTW)

O consumo de recursos fósseis considera a quantidade, em toneladas equivalentes de petróleo por ano (tep/ano), de combustíveis fósseis utilizados anualmente por cada tipo de ônibus, com base na distância anual percorrida e no rendimento de cada veículo (Tabela 7).

No caso do ônibus a diesel, os cálculos indicam que ele consome aproximadamente 41,6 m³ de óleo diesel por ano, considerando seu rendimento e a distância anual percorrida. De acordo com a tabela de “Coeficientes de Equivalência Médios para os Combustíveis Líquidos” do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023, elaborado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (2023), esse volume corresponde a cerca de 35 tep anuais.

Por outro lado, para o ônibus elétrico, foi considerado o percentual de 8,2% de combustíveis fósseis na matriz elétrica brasileira, conforme dados do BEN 2023 (Figura 10). Com base nisso, estima-se que, dos 100.000 kWh consumidos anualmente por esses veículos, uma fração equivalente a essa porcentagem tenha origem em combustíveis fósseis. Aplicando os dados da tabela de “Fatores de Conversão para Energia” do BEN 2023, conclui-se que esse consumo equivale a aproximadamente 0,7 tep por ano.

Tabela 9: Consumo de recursos fósseis

VEÍCULO	CONSUMO (tep/ano)
Diesel	35*
Elétrico	0,7*

Fonte: Autoria própria (2025) com dados de EPE (2023)*.

4.4.3. Consumo de energia (WTT)

O consumo de energia nesta fase (*Well to Tank*, Poço ao posto, em inglês) considera o consumo de energia (elétrica, térmica, química, entre outras) necessárias para a produção do óleo diesel e de uma bateria LMNC para ônibus elétricos, em GJ/ano (Tabela 8).

Para o ônibus tradicional a diesel foi considerado, a partir do rendimento do ônibus analisado e de seu deslocamento anual médio, que o mesmo consome cerca de 41,6 m³ de óleo diesel anualmente. A densidade do combustível é de 840 kg/m³, resultando em 34,9 toneladas de Diesel consumidos anualmente por ônibus tradicional. A partir de dados de Jia *et al.* (2020), foi calculado que o consumo de energia para a produção necessária de óleo diesel é de 2,96 toneladas de carvão equivalente, ou 86,75 GJ/ano (IEA, 2023).

Para o ônibus elétrico, é estimado que sejam consumidos cerca de 544,44 kWh por kWh de capacidade da bateria. A bateria em questão, presente no veículo selecionado para esta análise, possui uma capacidade de 344 kWh. Logo, o consumo de energia necessária para a produção desta bateria é calculado em 187,29 MWh, ou 674,23 GJ. A bateria analisada possui uma vida útil estimada em 10 anos, logo seu consumo anual proporcional será de 67,42 GJ/ano.

Tabela 10: Consumo de energia por combustível (WTT)

VEÍCULO	CONSUMO (GJ/ano)
DIESEL	86,75***
ELÉTRICO	67,42* **

Fonte: Autoria própria (2025) com dados de EPE (2023)*, Freitas e Marchesini (2022)** e Jia *et al.* (2020)***.

4.4.4. Consumo de energia (WTW)

O consumo de energia desta fase é a combinação de consumo de energia dos itens 4.4.1., 4.4.2. e 4.4.3. convertidos para o sistema internacional (SI), cuja unidade será de GJ/ano, para isso foi utilizado a Tabela de Fatores de Conversão para Energia, presente no Balanço Energético Nacional (EPE, 2023). (Tabela 9).

Os fatores de conversão utilizados para esta comparação estão dispostos abaixo:

- 1 tep (tonelada equivalente de petróleo) = 41,868 GJ (Giga-Joule ou Bilhões de Joules);
- 1 kWh (quilowatt-hora) = 0,0036 GJ.

Tabela 11: Consumo de energia por combustível (WTW)

VEÍCULO	CONSUMO (GJ/ano)
DIESEL	1552,15*
ELÉTRICO	456,72*

Fonte: Autoria própria (2025) com dados de Empresa de Pesquisa Energética (2023)*.

4.5. INDICADORES AMBIENTAIS DE SAÍDA (*OUTPUTS*)

4.5.1. Emissões de Gases de Efeito Estufa (TTW)

Durante esta fase, foram considerados os GEE emitidos pela utilização do combustível anualmente, considerando a distância média percorrida e o rendimento dos mesmos (Tabela 11).

No caso do ônibus tradicional, foram levados em consideração as emissões provenientes da combustão de 41,6 m³ de óleo diesel. No estudo realizado por Lubecki, Szczurowski e Zarębska (2023), foram dispostas as quantidades de gases emitidos a partir da queima de 1 litro de diesel (Tabela 10).

Para os ônibus elétricos, não foram consideradas emissões de GEE durante a fase de utilização dos veículos, uma vez que motores elétricos não emitem gases poluentes durante o seu funcionamento (Gupta *et al*, 2016).

Tabela 12: Emissões de escape por Litro de diesel consumido

Tipo de emissão	Quantidade emitida pela combustão de 1 Litro de Diesel (Kg)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2,67
Monóxido de Carbono (CO)	8,06 x 10E-4
Metano (CH ₄)	1,25 x 10E-5
Óxidos de Nitrogênio (Nox)	1,49 x 10E-3
Óxido Nitroso (N ₂ O)	9,92 x 10E-5
Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metálicos (COVNM)	1,17 x 10E-4

Fonte: Adaptado de Lubecki, Szczurowski e Zarębska (2023).

Tabela 13: Emissões de GEE por combustível (KgCO₂eq/ano)

VEÍCULO	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	N ₂ O	COVNM	CO ₂ eq
Diesel**	111.072	33,53	5,2	61,98	4,13	4,87	112.372,4
Elétrico*	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2025) com dados de Gupta *et al* (2016)* e Lubecki, Szczurowski e Zarębska (2023)**.

4.5.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa (WTT)

Nesta fase, foram consideradas as emissões provenientes da produção e distribuição dos combustíveis discutidos neste trabalho, acrescentando no caso dos ônibus elétricos os GEE emitidos durante a produção das baterias de íons de Lítio (Tabela 12).

No caso dos ônibus tradicionais a diesel, foram consideradas as emissões de GEE provenientes dos processos de refinamento do petróleo bruto em óleo diesel, além dos métodos de distribuição que incluem o transporte marítimo e rodoviário do combustível, como especifica Kuyumcu *et al*(2024).

Para os ônibus elétricos, foram incluídas as emissões de GEE originárias da produção e montagem das baterias de íons de Lítio (FREITAS e MARCHESINI, 2022); além das emissões proporcionais ao recarregamento das baterias, considerando o total emitido pela matriz elétrica brasileira. Para isto, foram utilizados dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (2024), além dos dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2023).

Tabela 14: Emissões WTT de GEE (KgCO₂eq/ano)

VEÍCULO	Emissões de CO ₂ eq	Processos avaliados
Diesel	23.356,74**	Refinamento e Transporte
Elétrico	4.877,59***	Geração, Transmissão e Distribuição
Bateria de LI-íon	8.136,00*	Extração e Produção

Fonte: Autoria própria (2025) com dados de Freitas e Marchesini (2022)*, Kuyumcu *et al*(2024)** e SEEG(2024)***.

4.5.3. Emissões de Gases de Efeito Estufa (WTW)

As emissões de GEE desta fase são o resultado da união das emissões descritas nos itens 4.5.1. e 4.5.2. (Tabela 13).

Tabela 15: Emissões WTW de GEE (KgCO₂eq/ano)

VEÍCULO	EMISSIONES
DIESEL	135.729,14
ELÉTRICO	13.013,59

Fonte: Autoria própria (2025).

4.6. DISCUSSÕES

4.6.1. Dimensão Econômico-Financeira

Os resultados encontrados indicam que o ônibus elétrico é viável economicamente no estudo de caso abordado. Essa afirmativa está em consonância com alguns autores de referência citados a seguir.

No estudo a respeito da transição do transporte público para a eletromobilidade realizado na Itália, o Scenari e prospettive dell'elettrificazione del trasporto pubblico su strada (GREEN Università Bocconi, 2021), foi estimado que o custo de aquisição de um ônibus elétrico é, em média, 3 vezes maior que o de um ônibus tradicional; neste trabalho o valor de um ônibus elétrico foi de cerca de 2,83 vezes o valor de um ônibus a diesel.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020) concluiu que o veículo elétrico se tornaria proveitoso economicamente caso o valor do litro do diesel fosse superior a R\$4,50/l, o que pode ser observado a partir deste trabalho.

Na investigação sobre a transição do transporte público para eletromobilidade efetuado para a cidade de Natal-RN foi observado que no melhor cenário econômico, o payback diferencial entre os ônibus se dá em aproximadamente 9,8 anos (NUNES, 2022). Este valor é maior que o apontado por este trabalho por não haver ônibus elétricos na cidade de Natal para ter uma base de cálculos sólida, logo o valor do mesmo foi estimado em dólares, aumentando os seus custos CAPEX.

Algumas iniciativas de ordem política podem tornar a adoção plena de ônibus elétricos ainda mais economicamente interessante, à exemplo, o caso de Shenzhen, na China, onde o governo deu um subsídio de 500.000 yuan chineses, aproximadamente 400.000 reais na cotação atual (BCB, 2024), para cada ônibus adquirido, além de um subsídio na compra de potência de energia elétrica para cada carregador adquirido; isso fez com que o transporte público, que conta com ônibus, táxis e metrô, ser 100% eletrificado em um período de 6 anos, entre 2011, quando os primeiros veículos elétricos foram apresentados, e 2017, quando a cidade se tornou totalmente eletrificada (BERLIN, ZHANG, CHEN, 2020).

4.6.2. Dimensão Ambiental

As avaliações dos resultados de *inputs* e *outputs* e da análise *Well to wheel* (Poço à roda, em inglês) mostram que o ônibus elétrico possui tanto um consumo de energia quanto uma emissão de GEE expressivamente menor que o de um ônibus tradicional a diesel. Para fins de discussão, foram comparados os resultados obtidos com autores de referência.

Na análise TTW, os valores de consumo de energia para o ônibus elétrico são 75,43% menores quando comparados ao ônibus a diesel, o que é condizente com o estudo realizado por Gupta *et al* (2016), onde o consumo de um veículo puramente elétrico é cerca de 72,67% menor quando comparado a um veículo convencional a diesel.

No entanto, os valores de consumo de energia se divergiram na análise WTT deste estudo onde, neste trabalho o consumo de energia para o ônibus elétrico é 22,28% menor que o de um ônibus tradicional, enquanto no estudo citado acima, o consumo de energia médio é aproximadamente 300% maior que o de um veículo tradicional a diesel. Isso se dá, como conclui o autor, pela baixa eficiência da matriz elétrica do país onde o estudo foi realizado (Índia), uma vez que a mesma é dominada por termelétricas de baixa eficiência, sendo mais de 80% da geração do país advindo de fontes fósseis não-renováveis, 69,9% sendo termelétricas a carvão mineral, com uma eficiência geral de 22%. No Brasil, a matriz elétrica é dominada por fontes renováveis de alta eficiência, como por exemplo as usinas hidrelétricas, que são responsáveis por 61,9% da geração de energia elétrica do país e sua eficiência geral é de aproximadamente 60% (EPE, 2023).

Ainda no estudo conduzido por Gupta *et al* (2016a), foram comparadas as saídas de emissões de GEE e os resultados foram semelhantes aos observados acima, onde na análise TTW o veículo elétrico se mostrou definitivamente superior ao veículo a diesel por não emitir gases de efeito estufa em sua utilização, mas na análise WTT, pela diferença entre a matriz elétrica brasileira e indiana, o veículo elétrico foi considerado mais emissor que o convencional no estudo citado acima, enquanto que neste trabalho ele emitiu cerca de 44,28% menos CO₂eq/ano que o ônibus tradicional a diesel.

Os estudos conduzidos por Gupta *et al* (2016a), Kuyumcu *et al* (2023), Lubecki, Szczurowski e Zarębska (2023) e Nanaki e Koroneos (2013) e os trabalhos em que eles se baseiam afirmam unanimemente em suas conclusões que o impacto ambiental dos veículos elétricos depende fortemente da fonte de energia elétrica que alimenta a sua bateria. Dentre os estudos citados acima, os que foram realizados em países da Europa mostram um cenário de impacto ambiental positivo, já que a matriz elétrica destes países desenvolvidos como Grécia e Polônia é baseada em fontes renováveis e de energia limpa, como usinas eólicas, hidrelétricas e nucleares. Já estudos desenvolvidos em países asiáticos subdesenvolvidos, como a Índia por exemplo, mostram um impacto ambiental negativo dos veículos elétricos quando comparados aos tradicionais a diesel, devido sua matriz elétrica depender de fontes fósseis, como carvão mineral e gás natural. Este trabalho mostrou que o Brasil, por possuir uma matriz elétrica majoritariamente limpa e renovável, possui grande potencial de gerar um impacto ambiental positivo ao se realizar uma transição energética do transporte público urbano para a eletromobilidade, comprovando as conclusões dos estudos citados acima.

5. CONCLUSÃO

Ao desenvolver este trabalho, observou-se a situação global, nacional e local atual da eletromobilidade por meio de ônibus elétrico, com o objetivo geral de estudar a viabilidade econômica e ambiental de uma transição energética para a eletromobilidade no transporte público coletivo de Brasília-DF por meio de comparação econômica e ambiental dos ônibus a diesel e elétricos.

Ao aplicar a metodologia a partir da análise econômico-financeira foi possível constatar que, embora os ônibus elétricos exijam um investimento inicial significativamente maior, seus custos operacionais, especialmente em termos de manutenção e combustível, são menores ao longo do tempo. Isso resulta em um índice EBITDA superior e um payback dentro do período de vida útil estipulado, demonstrando que os ônibus elétricos são economicamente viáveis a longo prazo.

Na análise ambiental foi observado que devido ao fato dos ônibus elétricos não emitirem gases poluentes durante seu uso, e pela matriz elétrica brasileira ser altamente eficiente e ser fortemente alimentada por fontes renováveis, durante as fases de produção e operação, os ônibus elétricos apresentaram um potencial de gerar um impacto ambiental menor que o dos ônibus tradicionais a diesel, por meio da redução de emissão de gases de efeito estufa, consumo de energia e consumo de recursos fósseis.

Na execução deste trabalho, foram identificadas algumas limitações apresentadas na baixa quantidade de dados que os ônibus elétricos possuem na cidade de Brasília, sendo necessário se utilizar de dados secundários, ainda que existam 6 ônibus na capital desde 2018. A carência de dados de testes reais dos ônibus elétricos na cidade de Brasília reduz a precisão dos parâmetros utilizados.

Para próximos trabalhos a respeito deste tema, recomenda-se realizar pesquisas mais intensivas do processo produtivo não somente dos combustíveis, mas também dos veículos em si. Por mais que os componentes dos ônibus tradicionais e elétricos, que não sejam relacionados ao seu *powertrain* (trem de força, em inglês), sejam análogos, ainda se faz necessário estimar o impacto de suas construções, durante todo seu ciclo de vida. Além disso, recomenda-se analisar os impactos ambientais que tal transição energética do transporte público coletivo pode vir a trazer para a população, além de analisar os conceitos de melhora de qualidade de vida para motoristas e passageiros e poluição sonora, uma vez que ônibus elétricos são mais silenciosos que suas contrapartes de motor à combustão.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 3.276**, DE 17 DE OUTUBRO DE 2023. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2023, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referentes à Neoenergia Distribuição Brasília S.A. – NDB, e dá outras providências. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233276ti.pdf>. Acesso em: 3 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Informações sobre o levantamento de preços de combustíveis**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://bit.ly/4ebixTk>. Acesso em: 02 de Set. de 2024.

ALMIRANTE, Marcelo. **Resumo Histórico do Sistema de Transporte Coletivo**. Memória do Transporte Público. 2008. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20090902054933/http://zrak7.ifrance.com/df-bus-1956-1960.pdf>. Acesso em: 28 de Jul. de 2024.

APPENDIX G. **Literature Review on Transit Bus Maintenance Cost**. California Air Resources Board, 2016. Disponível em: <https://bit.ly/3H9j1tj>. Acesso em: 14 de Ago. de 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICO. **Relatório geral 2016**. Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transporte Público – Simob/ANTP. São Paulo, 2018. Disponível em <https://bit.ly/2VJDGM2>. Acesso em: 02 de Set. de 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Conversor de Moedas**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em: 09 de Set. de 2024.

BAZANO, Adami. **Marcopolo diz que venda de 473 ônibus Torino para a BSBus Mobilidade (Expresso São José), no Distrito Federal, foi uma das maiores da marca do País**. Diário do Transporte. 2024. Disponível em: <https://bit.ly/4g63o7X>. Acesso em: 03 de Set. de 2024.

BERLIN, A; ZHANG, X; CHEN, Y. **Case Study: Electric buses in Shenzhen, China**. Shenzhen, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3ucEOFP>. Acesso em: 08 de maio de 2024.

BHTrans. **Base de dados da Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTrans)**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/3jqbCKw>. Acesso em 03 de Set. de 2024.

BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. **Engenharia Econômica**. 6a Edição. Nova York, Estados Unidos. McGraw-Hill, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 4 jan. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: 17 de fev. de 2025.

BYD. **BYD D9W 20.410 - PADRON PISO BAIXO**. China, 2020. Disponível em: <https://byd.com.br/chassi-byd-d9w-20-410/>. Acesso em: 13 de Ago. de 2024.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. **California's advanced clean cars midterm review**: summary report for the technical analysis of the light duty vehicle standards. Califórnia, 2017. Disponível em: www.arb.ca.gov/msprog/acc/mtr/acc_mtr_finalreport_full.pdf. Acesso em: 03 de Set. de 2024.

CARVALHO, C. H. R. D. **MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: CONCEITOS, TENDÊNCIAS E REFLEXÕES**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2016. (Texto para Discussão, n. 2194).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução N° 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. Brasília, 2018. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767. Acesso em: 07 de maio de 2024.

CONSELHO DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO DO DISTRITO FEDERAL. **Ata da 395ª Reunião Ordinária do Conselho de Transporte Público Coletivo do Distrito Federal - CTPC/DF**. SEMOB. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.semob.df.gov.br/atas/>. Acesso em: 18 de Jul. de 2024.

CRUNDWELL, F. K. **Finance for engineers**: Evaluation and funding of capital projects. Londres, Reino Unido. Springer-Verlag, 2008.

DUMÉZ, Hervé. **Les carrosses à cinq sols; ou une innovation au XVII siècle**. Le Libellio d'AEGIS, [S.l.], v. 12, n. 4, p. 17-19, Inverno 2016. Disponível em: <http://lelibellio.com/>. Acesso em: 22 de Jul. de 2024.

EDELSTEIN, Stephen. **EV Battery costs dropped 90% in last 15 years**. Green car reports. Estados Unidos, 2024. Disponível em: https://www.greencarreports.com/news/1144049_ev-battery-costs-dropped-90-in-last-15-years. Acesso em: 27 de Jun. de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Eletromobilidade e Biocombustíveis**. Documento de apoio ao PNE 2050. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Eletromobilidade%20e%20Biocombustiveis.pdf>. Acesso em: 10 de Set. de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/34kQQZZ>. Acesso em: 10 de maio de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional (BEN) 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://bit.ly/3g0xMCO>. Acesso em: 08 de maio de 2024.

FREITAS, Felipe Tomaz; MARCHESINI, Márcia Maria Penteado. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos**. *Produto & Produção*, v. 23, n. 3, p. 1-20, Rio Grande do Sul, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22456/1983-8026.121904>. Acesso em: 01 de Fev. de 2025.

GOMES, Ediltron Temporal. **Apresentação de Ediltron Temporal Gomes da Sunwin**, realizada durante o Taller Virtual Buses Cero Emisiones em 25 de março de 2020.

GUPTA, Shreshtha Kumar *et al.* **Life-cycle analysis of energy and greenhouse gas emissions of automotive fuels in India: Part 1 – Tank-to-Wheel analysis**. *Energy*, v. 96, p. 610-620. Índia, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.031>. Acesso em: 06 de Jan. de 2025.

GUPTA, Shreshtha Kumar *et al.* **Life-cycle analysis of energy and greenhouse gas emissions of automotive fuels in India: Part 2 – Well-to-wheels analysis**. *Energy*, v. 96, p. 699-712. Índia, 2016a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.076>. Acesso em: 06 de Jan. de 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **Avaliação internacional de políticas públicas para eletromobilidade em frotas urbanas**. Washington DC, EUA, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3KWCTCc>. Acesso em: 13 de Ago. de 2024.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo**. Tim Dallmann. Washington DC, EUA, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/31ofSTV>. Acesso em: 13 de Ago. de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2021**. IEA. Paris, p. 101. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Climate Watch Historical GHG Emissions**. World Resources Institute. Paris, França, 2022. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 07 de Ago. de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2024**. Trends in heavy electric vehicles. Paris, França, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-heavy-electric-vehicles#electric-truck-and-bus-sales>. Acesso em: 07 de Ago. de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama: Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 3 set. 2024.

KUYUMCU, Alen Murat *et al.* **Well-to-wheel carbon footprint and cost analysis of gasoline, diesel, hydrogen ICE, hybrid and fully electric city buses**. Elsevier. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131685>. Acesso em: 22 de Jul. de 2024.

LOBO, Carolina. **Transporte público coletivo registra mais de 349 milhões de acessos em 2023**. Agência Brasília. Brasília, 2023. Disponível em: <http://bit.ly/3XhgiXU>. Acesso em: 03 de Jun. de 2024.

LUBECKI, Adrian; SZCZUROWSKI, Jakub; ZAREBSKA, Katarzyna. **A comparative environmental Life Cycle Assessment study of hydrogen fuel, electricity and diesel fuel for public buses**. Applied Energy, v. 350, p. 121766, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121766>. Acesso em: 15 de Jan. de 2025.

MAGNAUDEIX, Patrick. **La grève des omnibus de 1891 et le soutien du "Réunion Coach"**. Attelage-patrimoine. França, 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3ue4FUY>. Acesso em: 04 de Jun. de 2024.

MARCOPOLO. **Torino**. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://onibus.marcopolo.com.br/produtos/urbanos/torino>. Acesso em: 02 de Set. de 2024.

MCHUGH, David. **Os planos para proibir carros a diesel e a gasolina na Europa são realistas?**. Folha de São Paulo. São Paulo, 04 ago. 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3r7tPTd>. Acesso em: 06 de Jun. de 2024

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/2VS8MIC>. Acesso em: 03 de Set. de 2024.

MIŠANOVIĆ, SLOBODAN; VASIĆ, MILOŠ; STANOJEVIĆ, NADA. **Maintenance of electric city buses – cost benefit analysis**. In: Maintenance Forum, 2018, Ática, Grécia.

MISHRA, G., JHA, R., MESHAM, A., & SINGH, K. K. (2022). **A review on recycling of lithium-ion batteries to recover critical metals**. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(6), 108534. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108534>. Acesso em: 02 de Ago. de 2024.

MOREIRA, Yago Henrique Barbosa; MANTEGAZINI, Diunay Zuliani; ANDRADE, George Ricardo Santana; BACELOS, Marcelo Silveira. **Reciclagem de baterias de íon-lítio: uma breve revisão sobre os processos, avanços e perspectivas**. Brazilian Journal of Production Engineering, São Mateus, Espírito Santo, Brasil, v. 10, n. 1, p. 36–52, 2024. DOI: 10.47456/bjpe.v10i1.42817. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42817>. Acesso em: 13 de Ago. de 2024.

NANAKI, Evanthia A.; KORONEOS, Christopher J. **Comparative economic and environmental analysis of conventional, hybrid and electric vehicles – the case study of Greece**. Journal of Cleaner Production, v. 53, p. 261-266, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.010>. Acesso em: 22 de Jan. de 2025.

NAPOLI, Eric. **Venda de carros elétricos corresponde a 0,9% do total em 2023**. Poder 360. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://bit.ly/3z9azvk>. Acesso em: 01 de Ago. de 2024.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Past weather. National Oceanic and Atmospheric Administration.** EUA, 2021. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/past-weather/Brasília,%20Brazil>. Acesso em: 07 de Ago. de 2024.

NEONERGIA. **Composição Tarifária.** Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/brasilia/sua-casa/composicao-tarifaria>. Acesso em: 03 de Set. de 2024.

NUNES, Eloy Oliveira Brandão Nunes. **Um estudo de viabilidade econômico-financeira sobre a transição para a eletromobilidade com ônibus elétrico no transporte público em Natal, Brasil.** 2022. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 43, 2022. Disponível em <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/46215>. Acesso em: 28 de Jul. de 2024.

Omnibus Magazine: **125 years of Mercedes-Benz Buses.** Mannheim, Alemanha. EvoBus GmbH, Mercedes-Benz. 2020.

PIRACICABANA DF. **Ônibus elétricos começam a circular nesta segunda (29).** Piracicabana. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.piracicabanadf.com.br/2020/06/29/onibus-eletricos-comecam-a-circular-nesta-segunda-29/>. Acesso em: 31 de maio de 2024.

QUINTERO, Deyber et al. **Baterias de fosfato de ferro-lítio versus baterias de lítio ternárias: uma revisão.** Centro de Tecnologia da Informação (CTI) Renato Archer. São Paulo, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cti/pt-br/publicacoes/producao-cientifica/seminario-pci/xii_seminario_pci-2022/pdf/seminario-2022_paper_8.pdf. Acesso em: 31 de maio de 2024.

RAÍZEN. **Mobilidade urbana sustentável: saiba tudo sobre o conceito.** Raízen Power e Sustentabilidade da Raízen. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/mobilidade-urbana-sustentavel>. Acesso em: 17 de fev. de 2025.

RAMOS, Andrea. **Ônibus elétrico já é realidade no Brasil; veja os modelos disponíveis.** Estadão. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/onibus/onibus-eletrico-ja-e-realidade-no-brasil-veja-os-modelos-disponiveis/>. Acesso em: 03 de Jun. de 2024.

SANGUESA, J. A. et al. **A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges.** Multidisciplinary Digital Publishing Institute – MDPI, p. 33, mar. 2021.

SECRETARIA DE TRANSPORTE E MOBILIDADE. **Cálculo da tarifa técnica.** SEMOB. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.semob.df.gov.br/calculo-da-tarifa-tecnica-2/>. Acesso em: 04 de Set. de 2024.

SOCIEDADE DE TRANSPORTES COLETIVOS DE BRASÍLIA LTDA. **A TCB.** TCB. Brasília, 2024. Disponível em: <https://tcb.df.gov.br/2465-2/>. Acesso em: 22 de Jul. de 2024.

SPTRANS. **Valores das Tarifas Vigentes a partir de 01/01/2020**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://bit.ly/327ishU>. Acesso em 03 de Set. de 2024.

SUSTAINABLE BUS. **Electric city buses outpaced diesel bus sales in Europe in Q1 2023**. Sustainable Bus. 2024. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-buses-more-than-diesel-city-europe-2023/>. Acesso em: 10 de Jul. de 2024.

TEOH, L.E., KHOO, H.L.; GOH, S.Y; CHONG, L. M., 2018. **Scenario-based electric bus operation**: A case study of Putrajaya, Malaysia. International Journal of Transportation Science and Technology 7 (1), 10-25.

VINHOTE, Ana Luiza. **Ônibus elétricos começam a circular nesta segunda (29)**. Agência Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2020/06/28/onibus-eletricos-comecam-a-circular-nesta-segunda-29/>. Acesso em: 02 de Set. de 2024.

ZHANG, N., XU, Z., DENG, W., & WANG, X. (2022). **Recycling and Upcycling Spent LIB Cathodes**: A Comprehensive Review. Electrochemical Energy Reviews, 5(1), 1-38. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S41918-022-00154-6>. Acesso em: 31 de maio de 2024.