

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA PROPULSÃO ELÉTRICA E  
SISTEMA BRT NO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES  
DE CO<sub>2</sub> NO TRANSPORTE PÚBLICO NO DISTRITO  
FEDERAL**

**CAMILA PADOVAN DA SILVA**

**ORIENTADOR: AUGUSTO CÉSAR DE MENDONÇA BRASIL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**PUBLICAÇÃO: T.DM-002/2020  
BRASÍLIA/DF: MARÇO/2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA PROPULSÃO ELÉTRICA E SISTEMA  
BRT NO CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> NO  
TRANSPORTE PÚBLICO NO DISTRITO FEDERAL**

**CAMILA PADOVAN DA SILVA**

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Transportes do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Transportes.

**APROVADA POR:**

---

**Prof. AUGUSTO CÉSAR DE MENDONÇA BRASIL, Dr. (PPGT-UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**Prof. PASTOR WILLY GONZALES TACO, Dr. (PPGT-UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Prof. MÁRCIO DE ALMEIDA D'AGOSTO, Dr. (PET-UFRJ)  
(EXAMINADORA EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 2 de MARÇO de 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

DA SILVA, CAMILA PADOVAN

Avaliação do Impacto da Propulsão Elétrica e Sistema BRT no Consumo Energético e Emissões de CO<sub>2</sub> no Transporte Público no Distrito Federal. Brasília, 2020.

xii, #90 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2020).

Dissertação de Mestrado– Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Ônibus elétrico

2 – Emissões de GEE

3 – Consumo de combustível

4 – Mobilidade urbana sustentável

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DA SILVA, C. P. (2020). Avaliação do impacto da propulsão elétrica e sistema BRT no consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> no transporte público no Distrito Federal. Publicação T.DM-002/2020. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, #90 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: CAMILA PADOVAN DA SILVA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do Impacto da Propulsão Elétrica e Sistema BRT no Consumo Energético e Emissões de CO<sub>2</sub> no Transporte Público no Distrito Federal.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

*Camila Padovan da Silva*

Nome

## DEDICATÓRIA

*À minha mãe, Arlete, pelo intenso amor e incentivo aos estudos.*  
*Aos meus irmãos, Igor e Paula, que mesmo longe sempre estiveram ao meu*  
*lado.*  
*Aos meus amigos que tornaram esse processo muito mais fácil.*

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é fruto de dois anos de muito esforço e dedicação. No entanto, nada seria possível sem o apoio e colaboração de pessoas e instituições que estiveram presentes durante esse processo.

Primeiramente agradeço à minha mãe, que sempre acreditou em mim e foi a minha maior incentivadora em seguir com esse sonho. Agradeço ao meu pai, José Ademir (*in memorian*), que mesmo ausente fisicamente, sempre foi um exemplo de caráter e continua me inspirando a procurar me tornar uma pessoa melhor. Aos meus irmãos, Igor e Paula, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos em que precisei de apoio. À minha sobrinha, Taylane, que também é uma irmã pra mim e me ajuda muito a seguir em frente. À minha sobrinha, Lívia, que me faz querer ser uma tia melhor. Aos meus amigos que me incentivaram e souberam compreender a minha eventual ausência em alguns momentos, em especial ao Tassio, Laurieny e Gabriel, que me acolheram tão bem em Brasília.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT) e à Universidade de Brasília por concederem o espaço, as oportunidades e as instalações necessárias para o desenvolvimento dessa dissertação. E aos meus colegas de mestrado do PPGT pelos momentos de apoio, companheirismo e de aprendizado e pelos fundamentais momentos de descontração que fazem parte da jornada.

Ao professor e orientador Dr. Augusto Cesar de Mendonça Brasil, um agradecimento especial, pois, além toda sua competência como pesquisador e docente e por ter aceitado a orientação, foi um mentor fundamental para o delineamento da pesquisa, mostrando caminhos que levaram ao escopo final da mesma e a importantes aprendizados. Agradeço também ao Prof. Dr. Pastor Taco pelos ensinamentos em diferentes disciplinas e pela atenção e disponibilidade em participarem da banca de defesa. Por fim, agradeço também a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho com seus conhecimentos, por acreditarem em mim ou por simples palavras de incentivo.

Muito Obrigada!

## RESUMO

O presente trabalho avaliou o impacto da tecnologia de propulsão elétrica pura e híbrida, nos consumos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> do sistema de transporte público por ônibus do Distrito Federal, bem como, comparou os ganhos energéticos e redução de emissões de CO<sub>2</sub>, tanto para o sistema convencional, quanto para o sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) . O método de trabalho partiu de uma revisão sistemática da literatura analisando os trabalhos publicados sobre metodologias de determinação dos consumos energéticos, emissões de CO<sub>2</sub> e o inventário do ciclo de vida de sistemas de transportes, com foco na possibilidade de aplicação a cenários brasileiros. A partir dessa revisão e uma avaliação preliminar, notou-se que a metodologia usualmente adotada no Brasil, aplica valores de referência predeterminados dos consumos de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, com base em testes padronizados nos EUA, os quais não levam em conta as velocidades instantâneas nas vias, nem a propulsão elétrica. Portanto, uma metodologia simplificada de funções de correlações matemáticas, com base em dados experimentais da literatura, foi desenvolvida neste trabalho e aplicada a cinco rotas principais de transporte de Brasília, Distrito Federal. O Inventário do Ciclo de Vida foi aplicado aos ônibus elétricos, híbridos e com motor à combustão interna, bem como inseridos em um sistema BRT. Os resultados obtidos indicam que, se comparado com os ônibus a combustão interna, os ônibus elétricos têm o potencial de reduzir em até 30,2% no consumo de energia e 73,3% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Os híbridos podem reduzir em até 18,8% no consumo de combustível, 24,4% no consumo de energia e 23% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, as emissões durante a Fase de Uso podem corresponder em até 76,5% das emissões totais e em até 87,3% do consumo total de energia. Por fim, o sistema BRT mostrou-se como um dos cenários de menor potencial para a redução nos consumos energéticos e emissões, com a inserção de ônibus elétricos e híbridos, já que as velocidades são otimizadas para esse cenário. A partir dos resultados, discute-se a importância da priorização de fontes renováveis na matriz energética brasileira, com vista a uma maior utilização de combustíveis alternativos.

**Palavras-chave:** Ônibus elétrico. Emissões de gases de efeito estufa. Consumo de combustível. Mobilidade urbana sustentável. BRT.

## ABSTRACT

The present work evaluated the impact of pure and hybrid electric propulsion technology, on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the public transport system by buses in the Federal District, as well as comparing the energy gains and reduction of CO<sub>2</sub> emissions, both for the conventional system and the Bus Rapid Transit (BRT) system. The working method began with a systematic review of the literature analyzing the works published methodologies for determining energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and life cycle inventory assessment of transport systems, focusing on the possibility of application to Brazilian scenarios. From this review and a preliminary assessment, it was noticed that the methodology usually adopted in Brazil, applies predetermined reference values for fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions, based on standardized tests in the USA, which do not take into account the speeds on the roads or electric propulsion. Therefore, a simplified methodology of mathematical correlation functions, based on experimental data from the literature, was developed in this work and applied to five main transport axes in Brasília, Distrito Federal. A life cycle inventory analysis was applied to electric, hybrid and internal combustion engine buses, as well as inserted in a BRT system. The results indicate that, comparing electric buses with internal combustion engine buses, electric buses have the potential to reduce up to 30.2% in energy consumption and 73.3% in CO<sub>2</sub> emissions. Hybrids can reduce 18.8%, of fuel consumption, 24.4% of energy consumption and 23% of CO<sub>2</sub> emissions. In addition, the Operation Phase can be responsible for 76.5% of totals emissions and 87.3% of total energy consumed. Finally, the BRT system has the lowest potential to reduce energy consumption and emissions with the insertion of electric and hybrid buses. Based on the results, the importance of prioritizing renewable sources and technologies of buses is discussed.

**Keywords:** Electric Buses. Hybrid Buses. GHG Emissions. Fuel Consumption. Sustainable Urban Mobility. BRT.

# ÍNDICE

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1      | DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA.....                                                           | 5         |
| 1.2      | OBJETIVOS.....                                                                         | 6         |
| 1.2.1    | Objetivo Geral .....                                                                   | 6         |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos.....                                                             | 6         |
| 1.3      | JUSTIFICATIVA.....                                                                     | 7         |
| 1.4      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....                                                         | 9         |
| <b>2</b> | <b>CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> NO SETOR DE TRANSPORTES.....</b>     | <b>11</b> |
| 2.1      | REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....                                                 | 11        |
| 2.1.1    | Etapa 1: Planejamento .....                                                            | 12        |
| 2.1.2    | Etapa 2: Pesquisa .....                                                                | 13        |
| 2.1.3    | Etapa 3: Estudos relevantes em território nacional .....                               | 21        |
| 2.2      | CENÁRIO DO TRANSPORTE PÚBLICO E SEU IMPACTO NO BRASIL E DISTRITO FEDERAL.....          | 21        |
| 2.3      | INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS..... | 25        |
| 2.4      | VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM AS EMISSÕES VEICULARES.....                                  | 28        |
| 2.5      | HISTÓRICO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NO MUNDO E NO BRASIL .....                       | 29        |
| 2.6      | CONCEITOS GERAIS DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA para os transportes.....                  | 31        |
| 2.7      | TRANSPORTES E SUAS TECNOLOGIAS .....                                                   | 33        |
| 2.7.1    | Motor alternativo de combustão interna.....                                            | 34        |
| 2.7.2    | Sistema de propulsão Híbrida .....                                                     | 35        |
| 2.7.3    | Sistema de propulsão Elétrica.....                                                     | 37        |
| 2.8      | SISTEMA BRT.....                                                                       | 39        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                | <b>42</b> |
| 3.1      | TRANSPORTE COLETIVO NO DF E ROTAS ESCOLHIDAS .....                                     | 42        |
| 3.2      | CONDIÇÕES, VEÍCULO E CICLOS DE CONDUÇÃO .....                                          | 44        |
| 3.3      | EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA (EPMP).....                                       | 46        |
| 3.3.1    | Ônibus movidos a Diesel.....                                                           | 46        |
| 3.3.2    | Ônibus Híbrido .....                                                                   | 46        |
| 3.3.3    | Ônibus Elétricos.....                                                                  | 47        |

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4      | FASE DE USO .....                                                         | 47        |
| 3.4.1    | Consumo de combustível.....                                               | 47        |
| 3.4.2    | Emissões de CO <sub>2</sub> .....                                         | 50        |
| 3.4.3    | Consumo energético .....                                                  | 53        |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>                                        | <b>55</b> |
| 4.1      | RELATÓRIO DA CETESB (2018) APLICADOS AOS CENÁRIOS DO PRESENTE ESTUDO..... | 55        |
| 4.2      | CICLO DE CONDUÇÃO.....                                                    | 56        |
| 4.3      | CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....                                               | 59        |
| 4.4      | CONSUMO ENERGÉTICO.....                                                   | 60        |
| 4.5      | EMISSIONES DE CO <sub>2</sub> .....                                       | 62        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>                                    | <b>66</b> |
| 5.1      | LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....                                               | 68        |
| 5.2      | PESQUISA FUTURAS.....                                                     | 68        |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1: Número de publicações por palavra-chave e base de dados.....                     | 14 |
| Tabela 2.2: Fator de emissão para ônibus urbano, ano 2017. ....                              | 27 |
| Tabela 3.1: Características das Rotas Utilizadas .....                                       | 43 |
| Tabela 3.2: Tipos dos ônibus urbanos analisados.....                                         | 45 |
| Tabela 4.1: Fatores de emissão da CETESB aplicado e em comparação com outros estudos.....    | 55 |
| Tabela 4.2: Velocidade média dos cenários analisados. ....                                   | 58 |
| Tabela 4.3: Resultados do consumo de combustível para os ônibus convencionais e híbrido..... | 59 |
| Tabela 4.4: Consumo energético para os ICB, HEB e BEB, nos cenários analisados. ....         | 60 |
| Tabela 4.5: Emissões de CO <sub>2</sub> para os ICB, HEB e BEB, nos cenários analisados...   | 63 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Fluxo energético. ....                                                                                      | 3  |
| Figura 1.2: Estrutura da dissertação. ....                                                                              | 10 |
| Figura 2.1: Procedimentos da revisão da literatura. ....                                                                | 12 |
| Figura 2.2: Frequência das palavras-chave nos estudos identificados. ....                                               | 16 |
| Figura 2.3: Relevância das palavras-chave. ....                                                                         | 18 |
| Figura 2.4: Crescimento da frota circulante total e de ônibus. ....                                                     | 22 |
| Figura 2.5: Evolução da quantidade de passageiros transportados por mês no sistema de ônibus urbano - 1995 – 2015. .... | 23 |
| Figura 2.6: Evolução da quilometragem mensal produzida no sistema de ônibus urbano - 1995 – 2015. ....                  | 24 |
| Figura 2.7: Metodologia adotada para estimar as emissões. ....                                                          | 27 |
| Figura 2.8: Limite do sistema do Inventário do Ciclo de Vida. ....                                                      | 32 |
| Figura 2.9: Sistemas de propulsão para veículos rodoviários. ....                                                       | 34 |
| Figura 2.10: Sistema de propulsão convencional. ....                                                                    | 35 |
| Figura 2.11: Configurações do sistema de propulsão híbrido. ....                                                        | 36 |
| Figura 2.12: veículo elétrico <i>plug-in</i> . ....                                                                     | 37 |
| Figura 2.13: Diagrama esquemático de tipos selecionados de baterias para veículos elétrico. ....                        | 38 |
| Figura 2.14: Sistema de propulsão elétrico com pilha a combustível. ....                                                | 38 |
| Figura 2.15: Sistema BRT em Brasília - DF. ....                                                                         | 40 |
| Figura 2.16: Extensão da via segregada do BRT. ....                                                                     | 41 |
| Figura 3.1: Rotas escolhidas. ....                                                                                      | 43 |
| Figura 3.2: Viagens do DF segundo o horário de chegada, para principais motivos de atração. ....                        | 44 |
| Figura 3.3: Função proposta pelo estudo da correlação do consumo de combustível com a velocidade. ....                  | 48 |
| Figura 3.4: Relação entre velocidade e consumo de combustível para o ônibus. ....                                       | 49 |
| Figura 3.5: Consumo de combustível para ônibus convencional e híbrido. ....                                             | 50 |
| Figura 3.6: Correlação entre estudos. ....                                                                              | 51 |
| Figura 3.7: Correlação entre velocidade e emissão de CO <sub>2</sub> . ....                                             | 52 |
| Figura 3.8: Correlação do consumo de combustível e emissões de CO <sub>2</sub> para ônibus. ....                        | 53 |
| Figura 3.9: Correlação entre a velocidade e consumo energético para os ônibus elétricos. ....                           | 54 |
| Figura 4.1: Velocidades instantâneas. ....                                                                              | 57 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.2: Valores correspondentes a cada etapa produtiva em relação aos valores totais de consumo de energia. ....           | 61 |
| Figura 4.3: Variação do consumo de energia.....                                                                                | 62 |
| Figura 4.4: Valores correspondentes a cada etapa produtiva em relação aos valores totais de emissões de CO <sub>2</sub> . .... | 64 |
| Figura 4.5: Variação das emissões de CO <sub>2</sub> .....                                                                     | 65 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1: Países, porcentagem de estudos e autores com maior número de publicações..... | 17 |
| Quadro 2.2: Estudos relevantes a temática .....                                           | 19 |
| Quadro 2.3: Categorias veiculares contempladas nos Relatórios .....                       | 26 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

|                 |                                                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| ABCV            | Associação Brasileira de Ciclo de Vida                   |
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                 |
| ACV             | Avaliação do Ciclo de Vida                               |
| AE              | Acumulador de Energia                                    |
| AT              | Acoplador de Torque                                      |
| BAT             | Bateria                                                  |
| BEB             | Ônibus Movidos à Propulsão Elétrica                      |
| BRT             | <i>Bus Rapid Transit</i>                                 |
| C               | Controlador                                              |
| CO              | Monóxido de Carbono                                      |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono                                       |
| DF              | Distrito Federal                                         |
| DFTTrans        | Secretaria de Transporte e Mobilidade                    |
| EPMP            | Extração e Produção da Matéria-Prima                     |
| FR              | Freio Regenerativo                                       |
| G               | Gerador                                                  |
| GANÁ            | Grupo de Apoio à Normalização Ambiental                  |
| GEE             | Gases de Efeito Estufa                                   |
| HEB             | Ônibus Híbridos                                          |
| ICB             | Ônibus a Combustão Interna                               |
| INMETRO         | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| MCI             | Motor Alternativo de Combustão Interna                   |
| ME              | Motor Elétrico                                           |
| MP10            | Material Particulado                                     |
| NO <sub>x</sub> | Óxido de Nitrogênio                                      |
| NMCOV           | Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos               |
| ONU             | Organização das Nações Unidas                            |
| PC              | Pilha a Combustível                                      |
| PGV             | Polos Geradores de Viagens                               |
| PNUMA           | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente          |
| RPP             | Rodoviária do Plano Piloto                               |
| RSL             | Revisão Sistemática da Literatura                        |

|                 |                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| SETAC           | Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental                   |
| SPH             | Sistema de Propulsão Híbrido                                   |
| STM             | Sistema de Transmissão Mecânico                                |
| T               | Transmissão mecânico                                           |
| TEMAC           | Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado                   |
| UCE             | Unidade de Conversão de Energia                                |
| UEE             | Unidade de Estocagem de Energia                                |
| UNFCCC<br>Clima | Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do<br>Clima |
| UT              | Unidade de Tração                                              |
| VE              | Veículos Elétricos                                             |
| WOS             | <i>Web of Science</i>                                          |

# 1 INTRODUÇÃO

Juntamente com tecnologias e estilos de consumo, o modo como as atividades humanas são organizadas no espaço geográfico representam campos de pesquisa cruciais - e fontes de preocupação - no que se refere ao equilíbrio ecológico (CAMAGNI *et al.*, 1998). Um dos papéis principais das cidades é o de maximizar a troca entre bens, serviços e conhecimentos entre os seus habitantes, mas isso não é possível em más condições de mobilidade (COSTA, 2008). Assim, a mobilidade é caracterizada pela interação entre os indivíduos com o espaço em que habitam, com os meios e objetos empregados para o seu deslocamento e com os demais indivíduos que integram a sociedade (CIDADES, 2006).

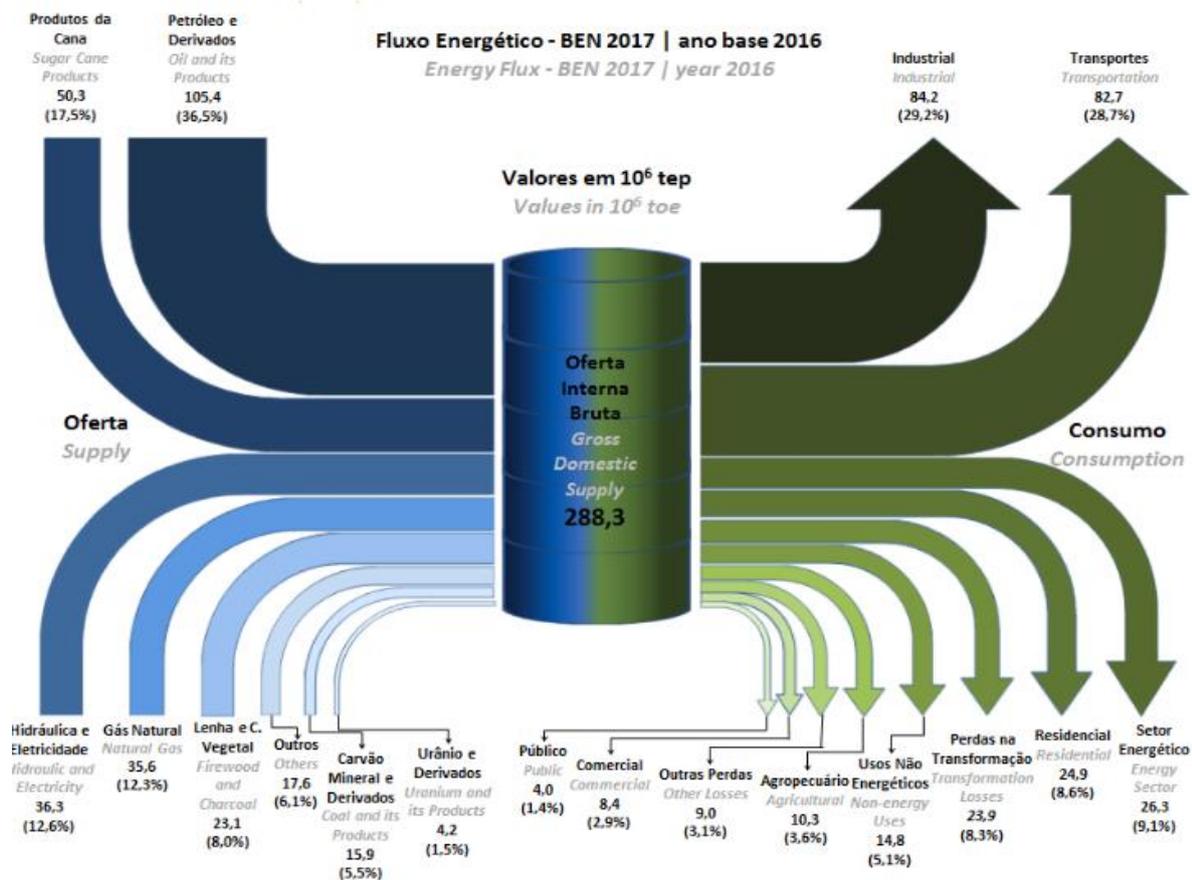
Deste modo, a mobilidade sustentável é aquela que contribui para o bem-estar econômico e social, sem prejudicar a saúde humana e o meio ambiente, integrando as dimensões sociais, econômicas e ambientais. Podendo ainda ser definida como aquela que permite a satisfação das necessidades básicas de acesso e mobilidade de pessoas, empresas e sociedade, de forma compatível com a saúde humana e o equilíbrio do ecossistema, promovendo igualdade dentro das gerações e entre as mesmas; possui custos aceitáveis, funciona eficientemente, oferece a possibilidade de escolha do modo de transporte e apoia uma economia dinâmica e o desenvolvimento regional; limita as emissões e os resíduos em função da capacidade da Terra para absorvê-los, utiliza recursos renováveis a um ritmo inferior ou igual a sua renovação, utiliza os recursos não renováveis a um ritmo inferior ou igual ao desenvolvimento de substitutos renováveis e reduz ao mínimo o uso do solo e a emissão de ruído (CIDADES, 2006).

O setor de transporte é importante quando se trata da mobilidade urbana. Segundo Ribeiro (2001), o transporte de bens e pessoas é fundamental ao desenvolvimento das cidades. Em resumo, o setor de transporte deve satisfazer três requisitos básicos. Primeiramente, assegurar a melhoria da capacidade existente de manutenção do padrão de consumo material. Isto se refere ao conceito de sustentabilidade econômica financeira. Em segundo, os benefícios devem ser repartidos de maneira equitativa entre todos os setores da sociedade, caracterizando uma sustentabilidade social. E terceiro, ele deve gerar uma melhora na qualidade de vida e não apenas se ater às

questões de circulação de bens, o que está relacionado a sustentabilidade ambiental (RIBEIRO, 2001). Entretanto, as externalidades ambientais do setor de transporte se concentram mais nas áreas urbanas onde a poluição atmosférica atinge níveis por vezes perigosos para a saúde humana (LIMA, 2014).

Nas últimas décadas tem se falado muito a respeito da degradação ambiental, principalmente a respeito da qualidade do ar em grandes centros urbanos (FERNANDES *et al.*, 2015). As principais fontes de emissões em regiões urbanas são fixas (indústrias, queimadas, etc.) ou móveis, tais como os veículos automotores, aviões, etc (MMA, 2009). A demanda por transporte de maior capilaridade, ou seja, um sistema que alcance locais onde outras modalidades não chegam, gerou um aumento de dependência no transporte rodoviário (HUERTAS, 2014). Esta dependência tende a aumentar o consumo de energia, provocando um aumento nos problemas de poluição, muitas vezes cumulativo e irreversível, como é o caso da poluição atmosférica, e, portanto, não é sustentável (RIBEIRO, 2001).

Somente o setor de transportes detém 28,7% do consumo de energia total do país. Juntamente com a produção industrial, eles respondem por aproximadamente 58% do consumo de energia do país, conforme Figura 1.1. Percebe-se também que as fontes de energia mais consumidas no setor de transportes foram os derivados de petróleo (diesel, querosene e gasolina), e marginalmente, os biocombustíveis e o gás natural (EPE, 2017).



**Figura 1.1:** Fluxo energético.  
**Fonte:** EPE (2017).

Por ser dependente da queima de combustíveis fósseis como fonte de energia, o setor de transporte é um dos principais contribuintes da emissão de poluentes atmosféricos e ruídos (EPE, 2017). Em 2015, o setor de transporte respondeu por 49,7% do consumo total de petróleo e em 2014, por 35% do consumo global de energia (IEA, 2012; ORSI *et al.*, 2016). Entre 1970 e 2010, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor de transporte global aumentaram em 250%, uma taxa significativamente maior do que outros setores (IPCC, 2014). Neste contexto, o transporte rodoviário foi majoritariamente responsável pela emissão de 79 % de Monóxido de Carbono (CO), 57% de Óxido de Nitrogênio (NOx), e 71% dos compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMCOV) e 60 % do material particulado (MP10) das emissões totais do setor. E em 2011, o transporte rodoviário foi responsável pelo consumo de 87% de toda a energia consumida em transportes no Brasil (D'AGOSTO, 2015).

Outro desafio ainda enfrentado é a dominância de veículos particulares sobre o transporte público de alta capacidade (HENSHER, 2007). Para obter uma maior atratividade do sistema, alguns países reverteram cenários de declínio da participação de mercado, principalmente por meio de investimentos em sistemas de ônibus baseados em infraestrutura, comumente chamados de *Bus Rapid Transit* (BRT) (WRI BRASIL, 2014). Além disso, estudos apontaram que esse sistema pode trazer benefícios como a redução do tempo de viagem, alta capacidade de transporte de passageiros, se comparados com outros modos, redução no número de acidentes, nas emissões de poluentes e otimização do sistema de transporte público (CUELLAR *et al.*, 2016).

A procura de substitutos para os combustíveis derivados do petróleo, e também de formas mais eficientes para o uso da energia, tomou impulso com o aumento das preocupações com o meio ambiente, principalmente após a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – Eco-92 – realizada no Rio de Janeiro em 1992 e a Conferência de Kyoto em 1998 (RIBEIRO, 2001).

Nesse contexto, as novas tecnologias, como veículos elétricos (VE), veículos híbridos (PHEV), entre outras, ressurgem como uma alternativa ambientalmente mais adequada para o transporte rodoviário coletivo, principalmente urbano, por serem veículos muito silenciosos e menos emissores locais gases poluentes.

Além disso, a partir do normativo da gestão da qualidade do ar no país, referente ao Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), instituído pela Resolução CONAMA nº 5 de 1989 que pressupõe a implantação do Programa Nacional de Inventários de Fontes Poluidoras do Ar, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) definiu uma metodologia de referência nacional, através de um instrumento, o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2011), para cumprir as demandas desse principal marco de controle da qualidade do ar.

Nesse seguimento, a fim de se ter um diagnóstico geral e ações de controle do Estado de São Paulo (SP), que detém cerca de 40% da frota automotiva do país, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) publica anualmente o

Relatório de Emissões Veiculares, com base na metodologia do Inventário. E essa metodologia também é aplicada em outros locais, como embasamento para a tomada de decisões. Porém, conforme estudos realizados em território nacional (D'AGOSTO; *et al.*, 2014; DREIER *et al.*, 2018; VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019), há diferenças nas emissões de acordo com o cenário no qual se está inserido.

Portanto, fica evidente a necessidade de estudos específicos para a composição do sistema de transporte de cada região. Apesar de alguns estudos terem sido realizados no exterior do país sobre o assunto, ou até mesmo dentro do país, os resultados encontrados não podem ser extrapolados para outros locais, em virtude das peculiaridades de cada caso. Assim, obter informações ambientais é relevante para a formulação de políticas públicas de mobilidade coletiva sustentável nas grandes cidades que resultem em menores impactos ao ser humano e ao ecossistema.

## **1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA**

Mesmo havendo estudos que mostram a comparação entre veículos elétricos e à combustão interna, em relação a emissões de GEE (CAMPBELL *et al.*, 2009; SAITOH *et al.*, 2005), esses estudos levam em conta somente a emissão direta (queima do combustível), além de assumirem que os veículos elétricos emitem significativamente menos poluentes e são altamente eficientes. Esses estudos, entretanto, não consideram um cenário real, que indiquem condições de tráfego, ciclos de condução, condições da via, etc.

Em se tratando de estudos realizados em território nacional, o Inventário Nacional e os Relatórios publicados anualmente pela CETESB também servem de embasamento para a tomada de decisões quanto ao controle da qualidade do ar. Porém, somente as emissões de escapamento, ou seja, da fase de uso da queima do combustível, são consideradas. Ainda há a necessidade da análise do ciclo de vida total dos sistemas de transporte.

Além disso, as preocupações relacionadas aos transportes e a mobilidade sustentável são de especial interesse para o desenvolvimento urbano sustentável, uma vez que os atuais padrões de mobilidade têm refletido em inúmeras deseconomias para as

ciudades, além de afetarem diretamente a qualidade de vida dos cidadãos (RIBEIRO, 2001).

As questões de mobilidade, por sua vez, foram tratadas até o presente momento ainda como uma questão de acesso físico aos meios de transporte, o que pode estar na origem de muitos problemas urbanos hoje detectados. Deste modo, a forma de planejar as cidades e seus sistemas de circulação tem sido revista, resultando em novas estratégias de atuação e na construção de um novo paradigma para a mobilidade urbana (CIDADES, 2006).

Este novo paradigma reconhece que os problemas de mobilidade urbana não se limitam apenas ao acesso a esses meios de transporte. Estes problemas envolvem também questões ambientais, econômicas, sociais e comportamentais mais complexas.

Portanto, faz-se necessário responder a seguinte pergunta: Quanto o sistema de BRT e as tecnologias híbrida e elétrica, para os ônibus, diminuem o seu consumo de energia e emissões de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)?

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral e os objetivos específicos do presente estudo são:

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o impacto da propulsão elétrica nos consumos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> do sistema de transporte público por ônibus, comparando as tecnologias de veículos elétricos e híbridos, com motor à combustão interna, bem como inseridos em um sistema BRT. A partir de um estudo de caso realizado no Distrito Federal, aplicando a metodologia de avaliação desenvolvida no presente trabalho.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, tem-se:

- i. Levantar, experimentalmente, as velocidades dos ônibus nessas rotas, em faixas exclusivas e junto ao trânsito;
- ii. Desenvolver uma metodologia simplificada de cálculo do consumo de combustível, de energia e emissões de CO<sub>2</sub> em função das velocidades levantadas nas rotas, durante a fase do uso do veículo;
- iii. Avaliar, mediante o inventário do ciclo de vida, os consumos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub>, criando cenários de percentual de ganhos energéticos e ambientais de vias exclusivas (sistema BRT) ou junto ao tráfego.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

Considerando o crescimento populacional natural, a taxa de motorização e a dependência por transporte público tende a crescer ainda mais, gerando mais problemas como congestionamentos, poluição do ar e sonora, o aumento de área destinada a estacionamentos, ocorrência de acidentes, entre outros.

Além disso, os problemas de saúde pública advindos de poluentes, representados pelo aumento dos índices de doenças respiratórias, têm sido comprovados por alguns estudos da área médica. As taxas de incidência de doenças associadas aos poluentes atmosféricos, tais como asma e bronquite crônica, atingem com maior intensidade os grupos mais suscetíveis, representados pela faixa etária abaixo de cinco anos e acima de sessenta e cinco anos (SALDIVA, 2007).

De acordo com Chester *et al.* (2010), regiões metropolitanas podem variar até 70% em seu consumo de energia e emissões, dependendo da divisão das modalidades no setor de transportes de passageiros. Embora as regiões possam diferir fortemente em seu balanço de emissões, o estudo de Liu *et al.* (2016) compararam diferentes modos de transporte de passageiros com mais detalhes em relação ao uso e emissões de energia do ciclo de vida (por exemplo, aeronaves, ônibus, carros). Eles descobriram que o ônibus tem o menor uso de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Embora o ônibus tenha o menor impacto, ele ainda emite diretamente no ambiente urbano em que as pessoas vivem. Portanto, as emissões dos ônibus urbanos devem ser reduzidas a alcançar

uma cidade sustentável. Além disso, esse tipo de transporte consome 85% de energia do total consumido em seu ciclo de vida e 86% das emissões totais de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida são consumidas e emitidas na fase de operação/uso do ônibus urbano convencional (LIU *et al.*, 2016).

Devido a isso, muitos estudos buscam analisar o consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>, e como as novas tecnologias podem reduzir esse alto impacto direto. A maioria dos estudos analisaram ônibus urbanos de dois eixos com diferentes tipos de trem de força (HUO *et al.*, 2009; MCKENZIE; DURANGO-COHEN, 2012; RIBAU *et al.*, 2014; XU *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2014). Especialmente, a comparação de ônibus urbanos convencionais e híbridos. Outros analisam como diferentes tipos de combustíveis podem influenciar nesse impacto ambiental, como biodiesel e gás natural (D'AGOSTO *et al.*, 2014; JANSSEN *et al.*, 2010; SHEEHAN *et al.*, 1998).

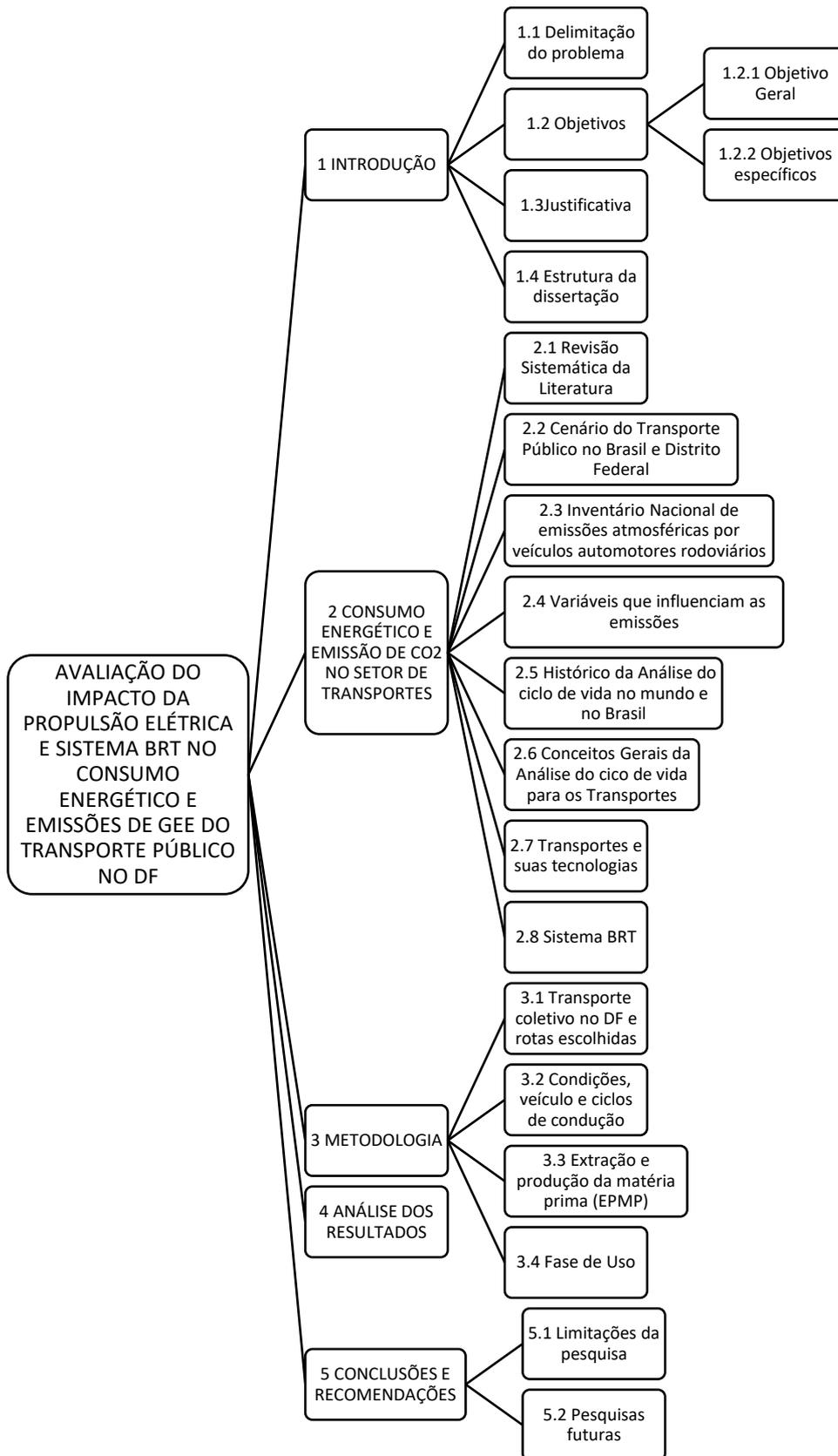
Embora uma extensa pesquisa tenha sido realizada para ônibus urbanos para outros países, o Brasil tem uma matriz energética mais renovável, ou seja, menos poluentes. Por isso, não se pode ter um cálculo universal de emissões para o setor de transportes, pois as emissões de gases poluentes variam de acordo com o sistema no qual está inserido, onde contém características intrínsecas a ele (MA *et al.*, 2012). Nesse sentido, a metodologia aplicada pelo Inventário e os Relatórios da CETESB também deve ser analisada quanto ao seu uso indiscriminado, pois estudos realizados no Brasil mostram que esses valores de emissões de poluentes e consumo de energia são variáveis, de acordo com a região de estudo e com as variáveis da rota selecionada (D'AGOSTO *et al.*, 2014; DREIER *et al.*, 2018; VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019). Além disso, esses Relatórios só consideram as emissões diretas da fase de uso, não sendo analisadas as fases antes e após o uso dos veículos.

Então, para poder concluir pela vantagem do uso dos ônibus elétricos (BEB) e dos ônibus híbridos (HEB), em termos de emissões, em sistemas de transporte público, é preciso investigar como esses veículos se comparam aos veículos por combustão interna em diferentes condições de operação e analisando o seu ciclo de vida de forma completa.

Desta forma, o estudo preenche a lacuna identificada na literatura científica, comparando diferentes tipos de ônibus urbanos em relação ao uso de energia e emissões de CO<sub>2</sub> para a região de Brasília, onde são levados em consideração as condições de tráfego e ciclos de condução para as rotas selecionadas. Portanto, uma avaliação abrangente dos diferentes tipos de ônibus urbanos deve ser feita considerando o mesmo contexto, ao invés de utilizar valores referências ou comparar os resultados de diferentes estudos entre si, pois esses podem diferir significativamente as condições, metodologias e cenários de tráfego utilizados. Em segundo lugar, o estudo também contribui para a ciência dos transportes, fornecendo valores detalhados de uso de energia e estimativas de emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, os dados podem ser muito úteis ao modelar e analisar novas alternativas para o sistema de transporte. Ainda, a avaliação do sistema deverá fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas de mobilidade mais eficiente e mais próxima da sustentabilidade.

#### **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente estudo foi dividido em cinco capítulos com o intuito de sistematizar as ideias e promover o desenvolvimento do tema. No Capítulo 2 são esclarecidos os aspectos voltados ao consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub> do setor de transportes, quais os estudos e autores mais relevantes sobre o tema, análise do ciclo de vida no mundo, Brasil e para o setor de transportes, entendimento dos sistemas de propulsão propostos, e a caracterização do sistema de BRT. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada, além disso, para a fase de uso, desenvolveu-se uma metodologia própria. No Capítulo 4 é apresentada a análise e discussão dos resultados obtidos no estudo. Finalmente, as conclusões, recomendações de trabalhos futuros e considerações finais fecham o Capítulo 5. A Figura 1.2 ilustra a estrutura da dissertação.



**Figura 1.2:** Estrutura da dissertação.

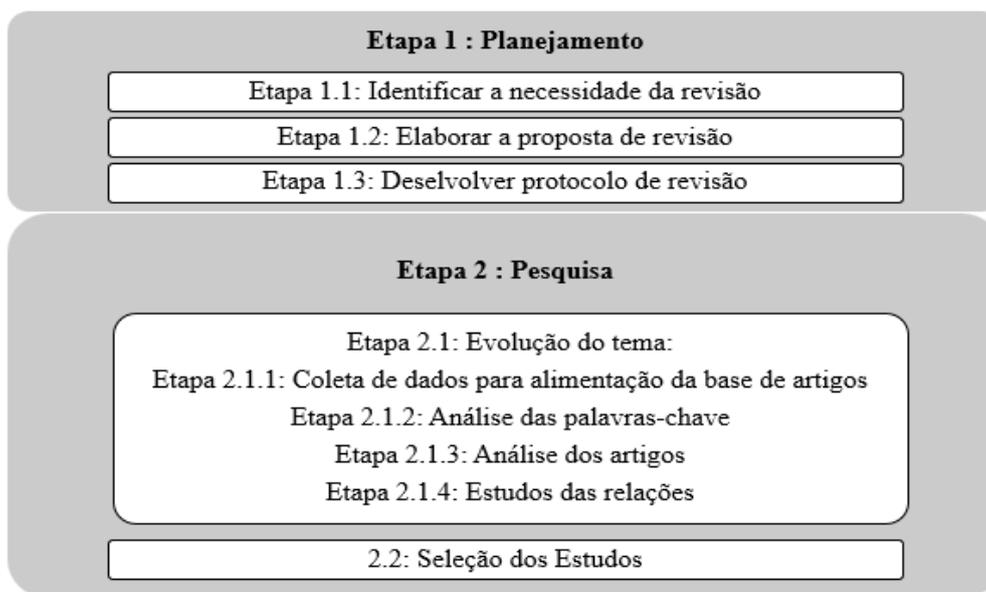
**Fonte:** Elaborada pelo autor.

## **2 CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> NO SETOR DE TRANSPORTES**

Este capítulo, primeiramente, fornece informações sobre a metodologia aplicada de revisão sistemática da literatura acerca dos estudos mais relevantes sobre a temática. A partir desses estudos, a presente dissertação desenvolve sua metodologia. Posteriormente, apresenta-se o cenário brasileiro do transporte público, com o enfoque no sistema de transporte público do Distrito Federal, que é o tema do estudo. Características veiculares que influenciam as emissões de poluentes também foram levantadas. O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a metodologia aplicada a esse estudo. Então, apresenta-se um breve histórico acerca desse assunto e aplica-se esse conceito aos transportes. Como o ICV pode englobar várias etapas de produção, e até mesmo a reciclagem, de um veículo, delimita-se as etapas e os sistemas de propulsão veiculares que esse estudo abrange. A fim de um melhor entendimento desses sistemas de propulsão, os mesmos são caracterizados e exemplificados. São fornecidas informações do sistema de corredores exclusivos, comumente chamados de BRT, definindo quais as características desse sistema e define-se os aspectos do sistema presente no Distrito Federal.

### **2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

A revisão da literatura foi realizada por meio da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com enfoque na Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC), a partir de uma abordagem integradora, proposta por Mariano & Rocha (2017), conforme o elenco de atividades e etapas apresentadas na Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Procedimentos da revisão da literatura.

**Fonte:** Adaptado de Mariano e Rocha (2017).

### 2.1.1 Etapa 1: Planejamento

#### Etapa 1.1: Identificar a necessidade da revisão

De acordo com o capítulo introdutório, um dos pilares da mobilidade sustentável é a questão ambiental. E para se alcançar uma mobilidade urbana sustentável, o setor de transportes implantado não deve apenas se ater às questões de circulação, mas ele deve gerar uma melhora na qualidade de vida dos seus usuários. Assim, a identificação e seleção de estudos que abordem novas tecnologias de transportes são úteis para a formulação de políticas públicas que geram menos impacto no meio em que estão inseridas.

#### Etapa 1.2: Elaborar a proposta de revisão

O objetivo primário da realização da revisão de literatura foi subsidiar a pesquisa na apresentação do estado da arte da avaliação do impacto de novas tecnologias no consumo energético e emissões de gases de efeito estufa gerado por veículos em um sistema de transporte público no Brasil, situando-a no contexto mundial. E, como objetivo secundário, identificar trabalhos que abordem as tecnologias utilizadas e seu método de análise a fim de subsidiar o capítulo 3 dessa dissertação.

Etapa 1.3: Desenvolver protocolo de revisão

As bases *online Web of Science, Scopus, Mendeley e Google Scholar*, foram determinadas como as mais relevantes, então foram usados a fim de desenvolver a revisão da literatura. As palavras-chave foram escolhidas conforme o objetivo da pesquisa, como apresentada na Tabela 2.1.

### 2.1.2 Etapa 2: Pesquisa

Etapa 2.1: Evolução do tema

Para o alcance do objetivo primário foi realizada pesquisa nas bases *online Web of Science, Scopus, Mendeley e Google Scholar*, com as seguintes palavras-chave e combinações, em inglês: *"life cycle" AND "electric vehicle"; "life cycle" AND "electric bus"; "CO<sub>2</sub> emission" AND "electric bus; "life cycle" AND (BRT OR "bus rapid transit")*.

Optou-se pelo uso de palavras-chave em inglês, pois a base de dados da *Web of Science* contempla apenas estudos nesse idioma e na *Scopus* a maior parte dos estudos estão em inglês. Para mapear o comportamento do tema no contexto mundial não foi adotada nenhuma delimitação de horizontes temporais na pesquisa e não foi utilizado nenhum filtro por área/categoria de estudo. Na sequência foram filtrados apenas os estudos registrados com autores/instituições do Brasil.

Etapa 2.1.1: Coleta de dados para alimentação da base artigos

Nessa etapa, no dia 11/04/2019, foram utilizadas as palavras-chave nas bases de dados escolhidas, de acordo com a preferência e análise do autor. Foi elaborada a Tabela 2.1, com o número de publicações, por palavra-chave e base de dados, incluindo o ano do primeiro estudo publicado e o ano com o maior número de estudos publicados. Na coluna de palavras-chave, abaixo de cada uma delas, estão totalizados os dados referentes ao Brasil. Ressalta-se que nas bases *Google Scholar e Mendeley* não é possível filtrar os estudos por país, com isso não foram apresentados os dados referentes ao Brasil nessa base. Além disso, no *Mendeley* não

foi possível identificar o ano do primeiro estudo e nem identificar o ano de maior número de estudos, motivo pelo qual a tabela não contempla a coluna dessa informação na referida base. Lembrando ainda que periodicamente foram feitas análises em todas as bases de dados, tendo assim, artigos atualizados.

**Tabela 2.1: Número de publicações por palavra-chave e base de dados**

| Base de Dados                                               |               |             |                          |                |             |                                 |                |             |               |
|-------------------------------------------------------------|---------------|-------------|--------------------------|----------------|-------------|---------------------------------|----------------|-------------|---------------|
| Palavras-chave                                              | Scopus        |             |                          | Web of Science |             |                                 | Google Scholar |             | Mendeley      |
|                                                             | Nº de estudos | Ano/ início | Ano/ Maior nº de estudos | Nº de estudos  | Ano/ início | Ano/ Maior nº de estudos        | Nº de estudos  | Ano/ início | Nº de estudos |
| <b><i>“life cycle” AND “electric vehicle”</i></b>           | 1.403         | 1978        | 2019                     | 466            | 1992        | 2019                            | 30.300         | 1930        | 635           |
| <b>Brasil</b>                                               | 7             | 2015        | 2017                     | 7              | 2015        | 2017/<br>2018/<br>2019          | -              | -           | -             |
| <b><i>“CO<sub>2</sub> emission” AND “electric bus”</i></b>  | 177           | 1998        | 2019                     | 8              | 2015        | 2017/<br>2018                   | 476            | 1989        | 6             |
| <b>Brasil</b>                                               | 12            | 1998        | 2019                     | -              | -           | -                               | -              | -           | -             |
| <b><i>“life cycle” AND “electric bus”</i></b>               | 75            | 1981        | 2018/<br>2019            | 34             | 2011        | 2018                            | 1.870          | 1970        | 44            |
| <b>Brasil</b>                                               | 1             | 2019        | -                        | -              | -           | -                               | -              | -           | -             |
| <b><i>“life cycle” AND (BRT OR “bus rapid transit”)</i></b> | 25            | 2008        | 2013                     | 20             | 2009        | 2011/<br>2013/<br>2016          | 5.680          | 1975        | 27            |
| <b>Brasil</b>                                               | 2             | 2011        | 2011                     | 4              | 2013        | 2013/<br>2016/<br>2018/<br>2019 | -              | -           | -             |

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

A partir do primeiro conjunto de palavras-chave, *life cycle AND electric vehicle*, foram identificados até 30300 estudos. Verificou-se que havia estudos das áreas de ciências sociais, química, ciências da computação, medicina, entre outros. Os autores de maior relevância são Van Mierlo, J., Messagie, M. e Keoleian, G.A. Assim, notou-se que eles

abrangiam estudos que não eram de interesse desse estudo, ou seja, várias categorias veiculares e de áreas fora do transporte.

Portanto, um novo conjunto de palavras-chave foi definido, *CO<sub>2</sub> emission AND electric bus*. Nesse, até 476 estudos foram encontrados e analisados. Os autores que mais publicaram foram Daisho, Y., Kamiya, Y. e Hirota, T. Porém, os autores de maior relevância são Zhou, B., Cooney, G. e Wang, R. O artigo mais citado foi *Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions* (ZHOU et al., 2016).

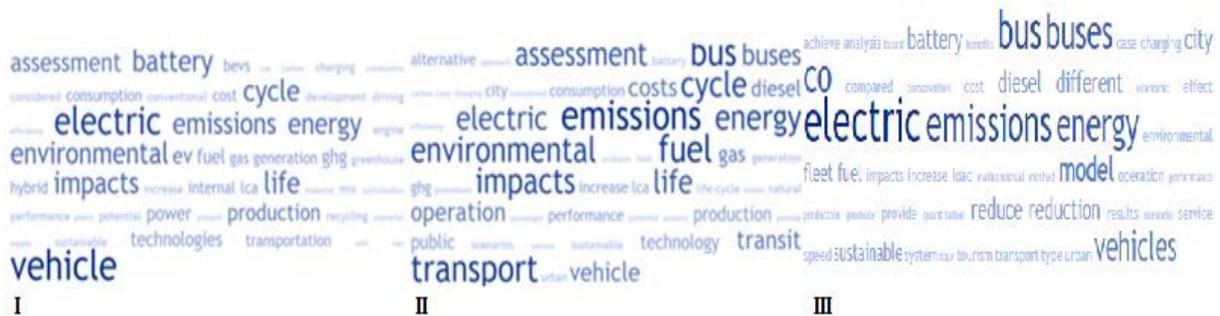
Em seguida, foi determinado que um novo descritor deveria ser buscado, pois ainda era desejado encontrar estudos que contemplassem toda a ACV dos ônibus. Assim, o descritor *"life cycle" AND "electric bus"* foi selecionado. Esse foi o que abrangeu mais estudos relevantes à temática. A partir disso, foram selecionados oito estudos de maior relevância, que deram embasamento para o desenvolvimento da metodologia aqui aplicada, conforme Etapa 2.2 e Quadro 2.2. Nesse descritor, o estudo de maior relevância foi *Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations* (OU et al., 2010).

O descritor *"life cycle" AND (BRT OR "bus rapid transit")* também foi utilizado, a fim de verificar estudos apenas sobre o BRT. Dentro dessa busca, conforme o objetivo do estudo, o único artigo selecionado foi *Life cycle emissions from a bus rapid transit system and comparison with other modes of passenger transportation* (CUELLAR et al., 2016). A partir das buscas, foram necessárias análises das palavras-chave mais encontradas nos estudos selecionados, conforme Etapa 2.1.2, a seguir.

#### Etapa 2.1.2: Análise das palavras-chave

A partir da Tabela 2.1, foi realizada a análise das palavras-chave. Para a análise da frequência de palavras chave foi escolhido o *software online TAGCROWD*, oferecendo a possibilidade de visualizar as palavras-chave mais frequentes identificados na base *online Scopus*, conforme Figura 2.2. Assim, percebe-se que o tamanho da fonte evidencia quando um assunto é mais tratado nos estudos que outro.

A Figura 2.2 traz três imagens, cada uma corresponde a uma combinação de palavras-chave da Tabela 2.1: I) “*life cycle*” AND “*electric vehicle*”; II) “*life cycle*” AND “*electric bus*”; III) “*CO<sub>2</sub> emission*” AND “*electric bus*”. Observa-se que em várias figuras fica evidente a preocupação com fatores ambientais, com o aparecimento das palavras “*environmental*”, “*impacts*” e “*sustainable*”.



**Figura 2.2: Frequência das palavras-chave nos estudos identificados**

### Etapa 2.1.3: Análise dos artigos

No TEMAC, essa etapa é detalhada como uma análise da relevância dos artigos e autores. Neste estudo foram levantados os estudos e autores mais citados. Além disso, foram selecionadas apenas pesquisas que apresentam a análise do consumo energético e emissão de GEE com a inserção de novas tecnologias. A análise dos artigos tem como objetivo, além de destacar estudos relevantes, situar o pesquisador sobre a temática no contexto mundial, além de comparar com o que acontece no país de origem, que neste caso é o Brasil, conforme Quadro 2.1 .

**Quadro 2.1: Países, porcentagem de estudos e autores com maior número de publicações**

| Base de Dados                                                        |        |            |               |              |                |            |            |             |
|----------------------------------------------------------------------|--------|------------|---------------|--------------|----------------|------------|------------|-------------|
| Palavras-chave                                                       | Scopus |            |               |              | Web of Science |            |            |             |
|                                                                      | País   | %/<br>País | Autores       |              | País           | %/<br>País | Autores    |             |
|                                                                      |        |            | Mundo         | Brasil       |                |            | Mundo      | Brasil      |
| <b>"life cycle"<br/>AND<br/>"electric<br/>vehicle"</b>               | EUA    |            | Aricò, A.S.;  | de Souza,    | EUA            |            | Al-Alawi,  |             |
|                                                                      | China  | 27%        | Hawkins,      | L.L.P.;      | China          | 26%        | M.;        | Haberland   |
|                                                                      | Brasil | 20%        | T.R.;         | Orsato,      | Brasil         | 24%        | Zheng, Y.; | , N.T.;     |
|                                                                      |        | 0,5%       | Samaras,      | R.J.; Costa, |                | 1,5%       | Gerssen-   | Choma,      |
|                                                                      |        |            | C.;           | G.; Kulay,   |                |            | Gondelac   | E.F.;       |
|                                                                      |        |            | Thomas,       | L.; Velandia |                |            | h J.;      | de Souza,   |
|                                                                      |        |            | C.E.;         | Vargas, J.E  |                |            | Nordelof,  | L.L.; Carv  |
|                                                                      |        |            | Jansen,       |              |                |            | A.;        | alho, A.L.  |
|                                                                      |        |            | A.N.          |              |                |            | Ma, H.     |             |
| <b>"life cycle"<br/>AND<br/>"electric<br/>bus"</b>                   |        |            |               | Velandia     |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               | Vargas,      |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               | J.E.;        |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               | Falco,       |                |            |            |             |
|                                                                      | China  | 31%        | Ou, X.;       | D.G.;        | EUA            | 34%        | Mahmou     |             |
|                                                                      |        |            | Zhang, X.;    | da Silva     | China          | 24%        | d, M.;     |             |
|                                                                      | EUA    | 24%        | Chang, S.;    | Walter,      |                |            | Zhou, B.;  | -           |
|                                                                      |        |            | Zhou, B.;     | A.C.;        |                |            | Wang,      |             |
|                                                                      | Brasil | 1,3%       | Wu, Y.        | Cavaliere,   | Brasil         | 0%         | R.;        |             |
|                                                                      |        |            |               | C.K.N.;      |                |            | Cooney,    |             |
|                                                                      |        |            |               | Seabra,      |                |            | G.         |             |
|                                                                      |        |            |               | J.E.A.       |                |            |            |             |
| <b>"CO<sub>2</sub><br/>emission"<br/>AND<br/>"electric<br/>bus"</b>  |        |            |               | Nogueira,    |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               | T.;          |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               | Dominutti,   |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               | P.A.;        |                |            |            |             |
|                                                                      | China  | 19%        | Zhou, B.;     | Emiliano,    | China          | 38%        | Zhou, B.;  |             |
|                                                                      |        |            | Wang, R.;     | M.W.;        |                |            | Wang,      |             |
|                                                                      | Japão  | 14%        | Cooney, G.;   | Costa, L.    | EUA            | 25%        | R.J.;      |             |
|                                                                      |        |            | Wu, X.;       |              |                |            |            |             |
|                                                                      | Brasil | 4,8%       | Ma, Y.        |              | Brasil         | 0%         |            |             |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            |            |             |
| <b>"life cycle"<br/>AND (BRT<br/>OR "bus<br/>rapid<br/>transit")</b> |        |            |               |              |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            |            |             |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            |            |             |
|                                                                      | EUA    | 32%        | Chester, M.;  | Gan, M.A.;   | EUA            |            | Chester,   | Dreier, D.; |
|                                                                      |        |            | Venter, C.;   | Piva, E.D.;  | Brasil         | 30%        | M.;        | Silveira,   |
|                                                                      | COL*   | 16%        | Nahlik, M.J.; | Barbosa,     |                |            | Venter,    | S.;         |
|                                                                      |        |            | Meng, F.;     | F.C.         |                |            | C.;        | Gan,        |
|                                                                      | Brasil | 8%         | Liu, G.       |              | China          | 15%        | Nahlik, M. | M.A.;       |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            | J          | Angelo, A.  |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            | Cui, S.;   | C           |
|                                                                      |        |            |               |              |                |            | Meng, F.   |             |

\*COL- Colômbia

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Assim, nota-se a importância da temática para os Estados Unidos e China, principalmente, e a iniciante, ainda, participação e relevância de estudos brasileiros acerca do tema. Porém, os autores brasileiros De Souza, L.L, Dreier, D. e Silveira, S.



outras, as palavras *battery electric vehicles* e *fuel-cell* que são as novas tecnologias adotadas e estudadas. Essa figura indica a prática da estimativa do ciclo de vida dos transportes, por meio de comparações entre as tecnologias disponíveis.

## Etapa 2.2: Seleção dos estudos

Essa etapa buscou identificar estudos nas bases *Scopus* e *Web of Science* sobre a temática, sendo formada por etapas de identificação, seleção, avaliação, extração e síntese de dados dos estudos selecionados. Por ser a etapa da revisão, destina à identificação dos trabalhos, com o objetivo de selecionar também os estudos mais recentes sobre o tema, a última pesquisa nas bases ocorreu em 14/01/2020. Assim, o Quadro 2.2 estabelece os estudos selecionados, define o objetivo, a tecnologia analisada pelo estudo e o seu país. Eles estão listados em ordem crescente e não por importância.

**Quadro 2.2:** Estudos relevantes a temática

| Estudo                                                                                                                                                                          | Objetivo                                                                                                                                                                                                                                                 | Tecnologias analisadas                                                                               | País           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <i>Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses</i> (COONEY et al., 2013).                                                                          | Comparar o ciclo de vida de emissões de ônibus convencionais com os elétricos e híbridos.                                                                                                                                                                | Ônibus convencional movido a diesel e ônibus elétrico.                                               | Estados Unidos |
| <i>Real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of urban public buses in Beijing</i> (ZHANG et al., 2014).                                                          | Melhorar o entendimento dos perfis reais do consumo de combustível e emissões de CO <sub>2</sub> para ônibus urbanos e fornecer apoio científico para norma nacional de economia de combustível da China para ônibus a ser estabelecida no futuro.       | Ônibus movidos a diesel, a gás natural e híbrido-diesel.                                             | China          |
| Alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro: uma análise utilizando Inventário de Ciclo de Vida (ICV) (D'AGOSTO et al., 2014)                   | Aplicar o procedimento de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) proposto por D'Agosto e Ribeiro (2009), para analisar os resultados quanto ao uso de energia total, energia renovável e emissão líquida de CO <sub>2</sub> de seis alternativas energéticas. | Ônibus a diesel, a gás natural comprimidos e biodiesel de soja em diferentes combinações e cenários. | Brasil         |
| <i>A comparative life-cycle energy and emissions analysis for intercity passenger transportation in the U.S. by aviation, intercity bus, and automobile</i> (LIU et al., 2016). | Comparar diferentes modos de transporte de passageiros, de forma mais detalhada no que se diz respeito ao uso de energia no ciclo de vida e emissões.                                                                                                    | Aeronaves, ônibus e automóveis.                                                                      | Estados Unidos |

| Estudo                                                                                                                                                                                                                       | Objetivo                                                                                                                                                                                                       | Tecnologias analisadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | País    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <i>Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment (VAN MIERLO et al., 2017)</i>                                                                                           | Quantificar e comparar o impacto do ciclo de vida com diferentes tecnologias.                                                                                                                                  | Veículos elétricos, biogás, híbridos (plug-in) e GNV, em comparação com o veículo movido a combustível fóssil convencional.                                                                                                                                                                                                                             | Bélgica |
| <i>Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil (DREIER et al., 2018).</i>        | Estimar o uso de energia fóssil e emissões de GEE para a operação de ônibus urbanos, na cidade de Curitiba.                                                                                                    | Ônibus urbanos: com motores convencional, híbrido-elétrico e plug-in híbrido-elétrico, incluindo chassi de dois eixos, articulado e bi-articulado no BRT.                                                                                                                                                                                               | Brasil  |
| <i>Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil (DE SOUZA et al., 2018).</i> | Avaliar e comparar os impactos ambientais dos veículos no contexto brasileiro.                                                                                                                                 | Veículo com motor de combustão interna convencional alimentado a gasolina, veículo com motor de combustão interna convencional movido a etanol hidratado, veículo com motor de combustão interna convencional alimentado por uma mistura de gasolina e etanol hidratado (veículo flex), veículo elétrico híbrido plugável e veículo elétrico a bateria. | Brasil  |
| <i>Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution (VELANDIA VARGAS et al., 2019).</i>                                      | Avaliar qual o impacto ambiental da fabricação de veículos e ônibus elétricos a bateria no sudeste brasileiro.                                                                                                 | Ônibus elétrico, ônibus a combustão interna, veículo a combustão interna e veículo elétrico.                                                                                                                                                                                                                                                            | Brasil  |
| <i>Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel (NORDELÖF et al., 2019)</i>                                                                                              | Este estudo explora os impactos ambientais dos ônibus urbanos no seu ciclo de vida, dependendo do: grau de eletrificação; mix de fornecimento de eletricidade; e os diferentes sistemas de propulsão veicular. | Ônibus elétrico, híbrido, híbrido <i>plug-in</i> e a combustão interna.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Suécia  |

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Portanto, esses são os principais artigos utilizados para dar suporte a essa pesquisa. Lembrando que somente um artigo selecionado está em português, mas é de fundamental importância para o desenvolvimento do presente estudo (D'AGOSTO *et al.*, 2014).

### 2.1.3 Etapa 3: Estudos relevantes em território nacional

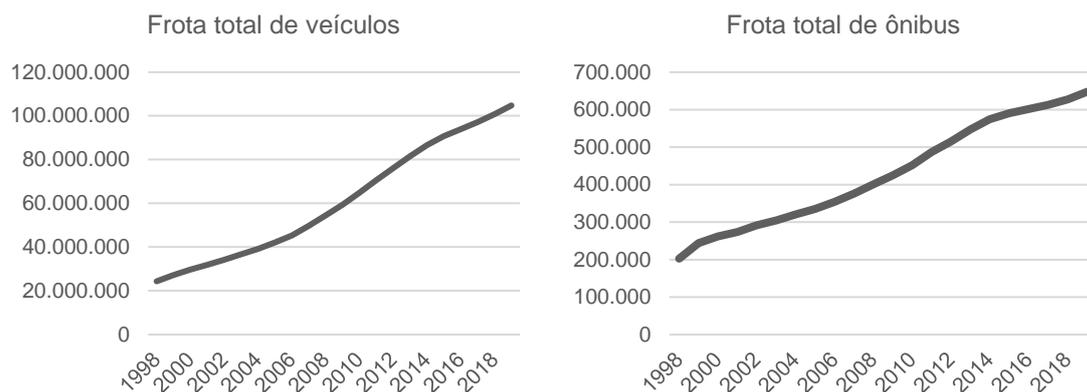
A partir das análises realizadas anteriormente, notou-se a necessidade de levantar documentos que não aparecessem em bases científicas, como a *Scopus* e *WOS*, porém que ainda tivessem grande relevância e embasamento científico.

Assim, foi feita uma busca na base de dados do *Google*. Descritores como “emissões veiculares”, “fator de emissão veicular”, “controle das emissões veiculares” foram utilizados. A partir disso, foram identificados dois Relatórios fundamentais às tomadas de decisão, referente ao controle da poluição atmosférica, dentro do território nacional. Que são eles o Inventário Nacional de Emissões por Veículos Automotores Rodoviários, publicado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), e o Relatório de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo, publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Os seus objetivos e metodologia utilizadas serão descritos no item 2.3.

Após a definição dos estudos relevantes ao desenvolvimento desse estudo, é necessário ter conhecimento sobre o cenário atual dos transportes no país e o seu potencial de impacto. Assim, o item 2.2 o caracteriza.

## 2.2 CENÁRIO DO TRANSPORTE PÚBLICO E SEU IMPACTO NO BRASIL E DISTRITO FEDERAL

Quando uma delimitação político-administrativa atinge um alto nível de desenvolvimento econômico, as suas oportunidades tendem a atrair pessoas e a aumentar o adensamento populacional, gerando demandas cada vez maiores por diversos serviços, dentre eles o de transportes (BALBIM *et al.*, 2016). Então, são necessárias infraestruturas que suportem esse aumento na demanda por meios de locomoção. A Figura 2.4 mostra como foi o crescimento da frota de veículos em geral e de ônibus no Brasil, de 1998 a 2018.



**Figura 2.4:** Crescimento da frota circulante total e de ônibus.  
**Fonte:** Adaptado de DENATRAN (2020)

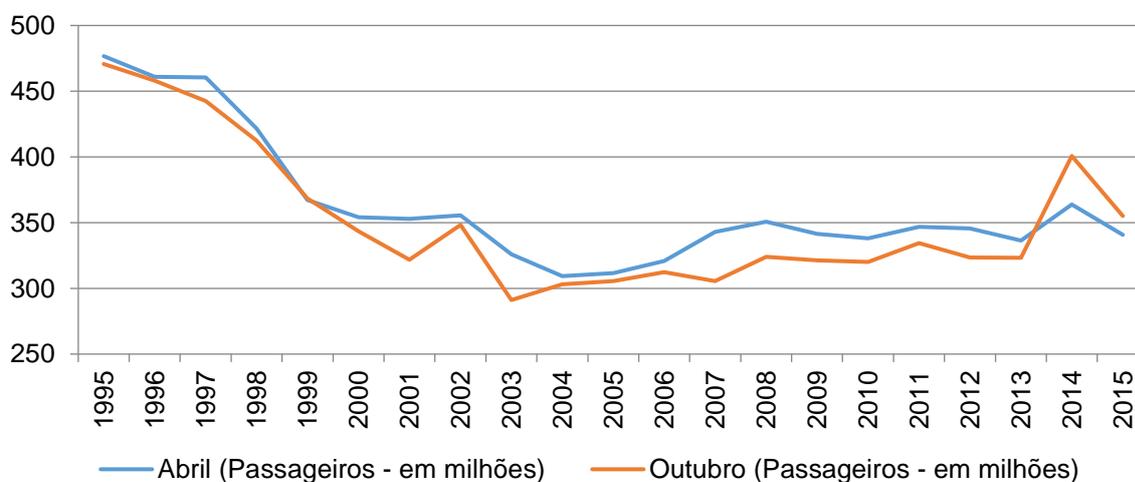
Em consequência do aumento da demanda da frota no país, há o aumento das emissões de poluentes, devido à queima de combustíveis fósseis. Em 2007, as fontes primárias de energia se consistiam em petróleo (36,0%), carvão mineral (27,4%), gás natural (23,0%), acumulando um total de 86,4% como principais fontes de energia primária no mundo (EIA, 2013). Os derivados de petróleo (óleo diesel, gasolina, GLP e querosene) tendem a se manter como os maiores contribuintes para as emissões totais até 2030, sendo responsáveis por cerca de 50% do total de emissões de CO<sub>2</sub> (FBDS, 2009). Em 2015, o setor de transporte respondeu por 49,7% do consumo total de petróleo e em 2014, por 35% do consumo global de energia (IEA, 2018; ORSI et al., 2016). Entre 1970 e 2010, as emissões de GEE do setor de transporte global aumentaram em 250%, uma taxa significativamente maior do que outros setores (IPCC, 2014).

A partir desse cenário de altas emissões, o Brasil é signatário do Protocolo de Kyoto/1977 e membro da Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Em dezembro de 2015, a Vigésima Primeira Conferência das Partes (COP-21) da UNFCCC decidiu adotar o Acordo de Paris, onde o Brasil informou a intenção de reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025 e como contribuição indicativa subsequente, reduzir as emissões de GEE em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030 (MMA, 2017).

Na busca de reduzir as emissões de GEE e minimizar os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis, o país tem adotado medidas como: A

Política Nacional de Mobilidade Urbana, instituída pela Lei nº 12.587/2012 estabelece, em seu artigo 24, a elaboração do Plano Municipal de Mobilidade Urbana, como condição para o acesso a recursos federais destinados à mobilidade urbana. Esta lei tem relação com outras políticas nacionais recentemente aprovadas, com destaque para a Política Nacional de Mudanças Climáticas, instituída por meio da Lei Federal nº 12.187/2009. Esta lei estabelece atribuições complementares entre as três esferas do governo para a redução de emissões de GEE. Estas duas políticas nacionais, por sua vez, estão relacionadas aos esforços necessários para a promoção da melhoria da qualidade do ar, principalmente nos grandes centros urbanos (IEMA, 2014).

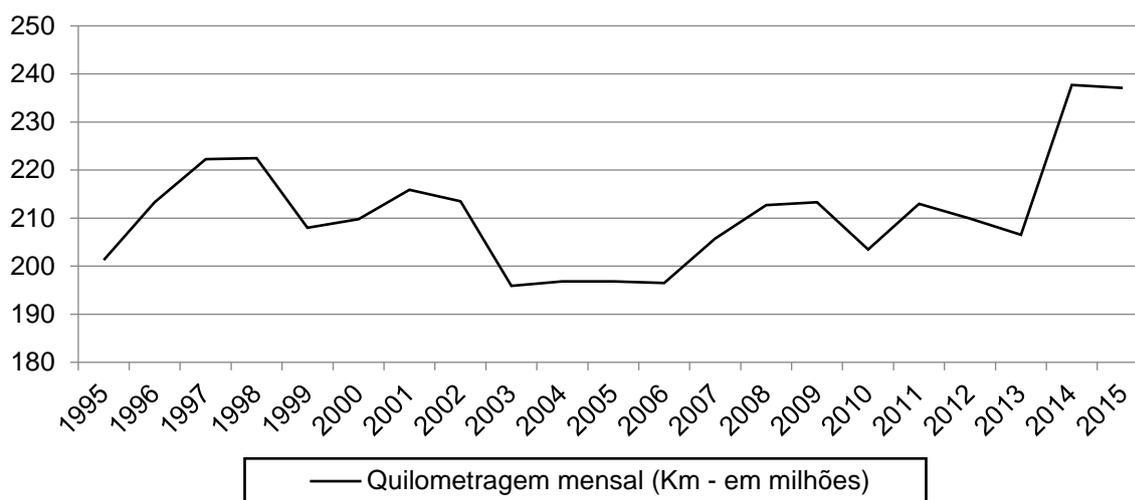
Um dos principais objetivos de um plano de mobilidade urbana consiste em proporcionar meios de deslocamento de pessoas. E complementando a Figura 2.4, que mostra toda a frota circulante do país, contando, principalmente com veículos particulares, a Figura 2.5 mostra a evolução da quantidade de passageiros transportados por mês no sistema de ônibus urbano, no Brasil (1995 – 2015).



**Figura 2.5:** Evolução da quantidade de passageiros transportados por mês no sistema de ônibus urbano - 1995 – 2015.

**Fonte:** CNT (2017).

Mesmo com a redução na quantidade de passageiros transportados ao longo dos anos, houve um aumento da quilometragem percorrida durante o mesmo tempo, ver Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Evolução da quilometragem mensal produzida no sistema de ônibus urbano - 1995 – 2015.

**Fonte:** Adaptado de CNT (2017).

Com o aumento na quilometragem mensal rodada com um menor número de passageiros, há um aumento nas emissões por passageiros/km. Portanto, devido ao menor impacto ambiental, tanto em emissões e impacto sonoro, cidades começaram a adotar sistemas de propulsão que gerassem um menor impacto que o convencional, movido a diesel. Sistemas de transporte com ônibus elétricos e movidos a biodiesel se tornaram comuns em várias cidades brasileiras.

Acerca disso, no dia 17 de março de 2018, a Piracicabana, empresa operante no Distrito Federal, realizou o lançamento do primeiro ônibus 100% elétrico de Brasília, que logo começou a operar na linha 109 (Rododoviária do Plano Piloto à Esplanada dos Ministérios). Segundo a empresa, o ônibus reduz em aproximadamente 46,8 tonelada/ano a emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Além disso, o ônibus traz mais conforto aos passageiros, uma vez que é silencioso devido ao isolamento acústico. No final de agosto do mesmo ano, o segundo ônibus começou a operação na linha 110, que vai da Rodoviária do Plano Piloto até o campus Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília (PIRACICABANA, 2018). O E-bus é um modelo D9W com chassis produzido na fábrica da BYD em Campinas e montado com carroceria Marcopolo Torino. Com os novos veículos da Piracicabana, Brasília é a terceira cidade do Brasil a operar os ônibus totalmente elétricos da BYD, depois de Campinas e Santos (ABVE, 2018). Contudo, ainda é a única empresa que opera com esse tipo de veículo.

Porém, ainda são poucas cidades e regiões brasileiras que apresentam soluções e estudos para a mitigação das emissões veiculares. Em 2011, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) ganhou destaque com a divulgação anual de um Relatório com o diagnóstico geral e as ações de controle do Estado de São Paulo, para as emissões veiculares, a partir da metodologia do Inventário elaborado pelo MMA (2011). Esses Relatórios serão descritos a seguir.

### **2.3 INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS**

A primeira edição do Relatório Final do Inventário Nacional de Emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários foi apresentada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em 2011, com o intuito de subsidiar futuras decisões quanto ao planejamento e implantação de políticas voltadas à melhoria da qualidade ambiental e à mitigação das mudanças climáticas (MMA, 2011). O Inventário é um instrumento que define uma metodologia de referência nacional quanto as emissões atmosféricas veiculares. A partir da metodologia introduzida pelo Inventário, a CETESB passou a elaborar relatórios anuais, “Emissões Veiculares no Estado de São Paulo”, a fim de atualizar, anualmente, dados referentes às emissões veiculares para o Estado de São Paulo (CETESB, 2018). Esses Relatórios contemplam diferentes poluentes e categorias de veículos.

Os poluentes inventariados são: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não metano (NMHC), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), aldeídos totais (RCHO) e material particulado (MP), emissões de gases de efeito estufa, expressa em CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2eq</sub>), que inclui as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

O Quadro 2.3 apresenta as categorias veiculares que estão contempladas nos Relatórios. Os veículos são diferenciados de acordo com a sua categoria, motor e tipo de combustível utilizado.

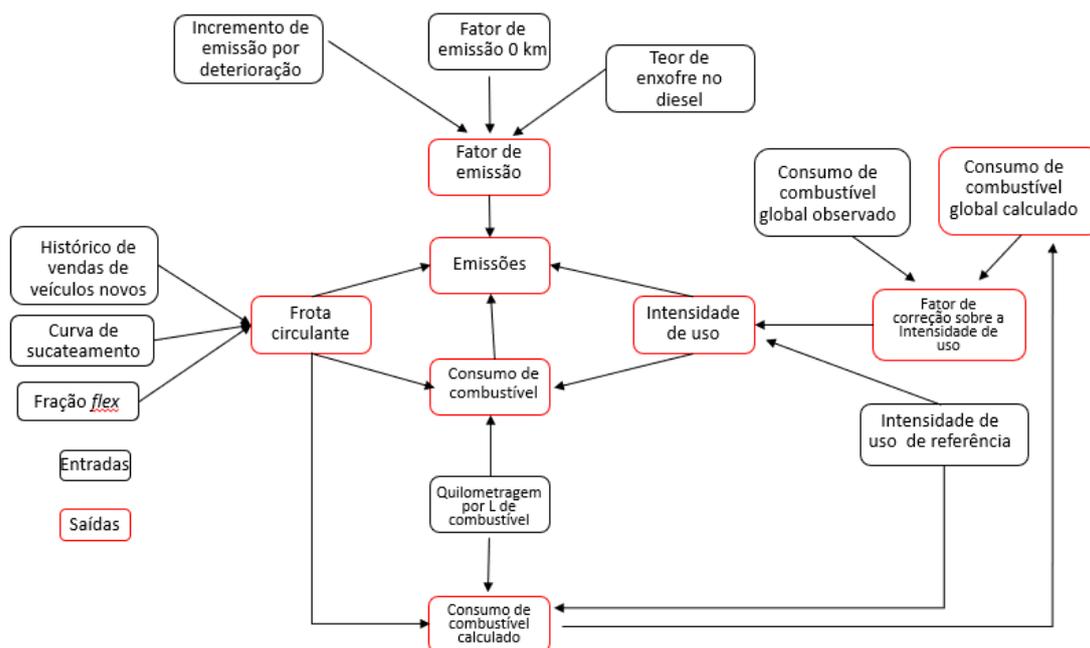
**Quadro 2.3: Categorias veiculares contempladas nos Relatórios**

| Categorias                                    | Motor/ Combustível    |
|-----------------------------------------------|-----------------------|
| Automóveis                                    | Gasolina C            |
|                                               | Otto Etanol hidratado |
|                                               | <i>Flex-fuel</i>      |
| Comerciais leves                              | Gasolina C            |
|                                               | Otto Etanol hidratado |
|                                               | <i>Flex-fuel</i>      |
|                                               | Diesel                |
| Motocicletas                                  | Otto Gasolina C       |
|                                               | <i>Flex-fuel</i>      |
| Caminhões Semileves 3,8t <<6t                 |                       |
| Caminhões Leves (6t <= PBT<10t)               |                       |
| Caminhões Médios (10t <= PBT<15t)             |                       |
| Caminhões Semipesados (15t <= PBT e PBTC<40t) |                       |
| Caminhões Pesados (15t <= PBT e PBTC>40t)     |                       |
| Ônibus urbanos                                |                       |
| Micro-ônibus                                  |                       |
| Ônibus rodoviários                            |                       |

\*PBT- Peso Bruto Total; PBTC- Peso Bruto Total Combinado

**Fonte:** CETESB (2018)

Uma metodologia de estimação das emissões foi definida pelo Inventário, conforme Figura 2.7. Então, para a estimativa das emissões, quatro conjunto de dados são essenciais: frota de veículos em circulação, intensidade de uso, consumo de combustível e os fatores de emissão de poluentes.



**Figura 2.7:** Metodologia adotada para estimar as emissões.

**Fonte:** Adaptado de MMA (2011).

Segundo a Secretaria de Transporte e Mobilidade – SEMOB (2020), a idade média da frota dos ônibus circulantes em Brasília é de 3 anos. Então, para fins desse estudo, os fatores de emissão e consumo de combustível para ônibus urbanos utilizados serão do ano de 2017, conforme Tabela 2.2.

**Tabela 2.2:** Fator de emissão para ônibus urbano, ano 2017.

| Fase/<br>PROCONVE | CO<br>(g/kWh) | HC<br>(g/kWh) | NOx<br>(g/kWh) | MP<br>(g/kWh) | CO <sub>2</sub><br>(g/kWh) | NH <sub>3</sub><br>(ppm) | Consumo de<br>combustível<br>(km/L) |
|-------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| P7                | 0,251         | 0,013         | 1,435          | 0,012         | 713                        | 4,9                      | 2,3                                 |

**Fonte:** CETESB (2018)

Contudo, as emissões de CO<sub>2</sub> apresentadas nos Relatórios são aquelas ocorridas no escapamento, ou seja, emitidas durante o uso dos veículos, produto da queima dos combustíveis. Portanto, as emissões durante todo o ciclo de vida dos combustíveis não são contabilizadas. E essas emissões dependem de algumas características veiculares, de tráfego e de clima, exemplificadas a seguir.

## 2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM AS EMISSÕES VEICULARES

As características de um veículo ou da via em que trafega influenciam na composição das suas emissões. Filizola *et al.*, (2005) identificam as seguintes:

- **Tipo do motor:** veículos do Ciclo Otto (ciclo termodinâmico, que idealiza o funcionamento de motores de combustão interna de ignição por centelha); do Ciclo Diesel (o motor de ignição por compressão a combustão se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão do ar); híbridos (motor a combustão com o motor elétrico) ou elétrico puro;
- **Tipo de combustível:** o uso de diferentes fontes de energia (combustível), como gasolina, diesel, biodiesel, gás natural veicular (GNV) ou eletricidade;
- **Estado de conservação e idade do veículo:** ao longo do tempo o sistema dos veículos vai se desgastando e aumentam os níveis de emissão;
- **Características das vias:** as condições de tráfego, como o traçado geométrico podem influenciar na velocidade média de percurso, o que contribui para a diminuição ou o aumento das emissões por km;
- **Características climáticas:** diferentes condições de altitude, umidade do ar e temperatura alteram o consumo de combustíveis e, por consequência, as composições de emissões.
- **Operação do veículo:** os **ciclos de condução**, identificados como a aceleração e desaceleração do condutor, representados pela variação das velocidades ao longo do tempo em um determinado percurso, têm sido mostradas como um fator determinante para as análises de emissões veiculares.

Assim, diferentes combinações dessas variáveis podem fazer com que o total de emissões varie muito, por isso a necessidade de existirem dados extraídos de cenários reais, pois a adoção de valores padrões pode não ser fiel à realidade. Além disso, a avaliação de todo o ciclo de vida é necessária para a real determinação do

seu impacto no meio. Portanto, o item 2.5 descreve o histórico da ACV no mundo e no Brasil e, em seguida, o item 2.6 detalha como o setor dos transportes se insere nessa avaliação.

## **2.5 HISTÓRICO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NO MUNDO E NO BRASIL**

A conscientização sobre os problemas ambientais começou a se tornar um assunto no cenário mundial a partir do final da década de 1960. Em 1968, foi fundado o Clube de Roma, fundado por políticos, industriais e academia. O Clube de Roma é um grupo de pessoas ilustres que se reúnem para debater um vasto conjunto de assuntos relacionados a política, economia internacional e, sobretudo, ao meio ambiente e o desenvolvimento sustentável. O objetivo desse grupo é o de identificar os principais problemas que determinarão o futuro da humanidade (THE CLUB OF ROME, 2019).

Em 1972, o grupo concretizou sua missão com o lançamento do estudo *The Limits to Growth* foi o primeiro estudo a questionar a viabilidade do crescimento contínuo da pegada ecológica humana, do inglês *footprint*, que refere-se à quantidade de terra e água que seria necessária para sustentar as gerações atuais, tendo em conta todos os recursos materiais e energéticos, gastos por uma determinada população (FERREIRA *et al.*, 2013). O estudo também inovou como o primeiro modelo global encomendado por um órgão independente, em vez de um governo ou a Organização das Nações Unidas (ONU). Nesse estudo há a previsão de cenários em que o mundo atingiria o colapso devido ao desequilíbrio entre o consumo e a oferta de recursos naturais ou se estabilizaria. Neste contexto é que nasce a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A ACV pode ser definida como uma técnica desenvolvida para mensuração dos possíveis impactos ambientais causados como resultado da fabricação e utilização de determinado produto ou serviço. Na abordagem sistêmica da ACV, são levantados os dados em todas as fases do ciclo de vida de determinado produto. O ciclo de vida refere-se a todas as etapas de produção e uso do produto, relativas à extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso, quando for o caso. Ao final, é

possível compreender quais danos ou benefícios da fabricação e uso de um produto específico (IBICT, 2019).

Em 1965, foi realizado nos Estados Unidos o primeiro estudo de ACV, pela Coca-Cola, com o objetivo de identificar qual embalagem para refrigerantes teria as menores emissões e utilizaria menos recursos em sua fabricação. Esse estudo contemplou um inventário das matérias-primas e dos combustíveis utilizados e das cargas ambientais do processo produtivo de cada embalagem e ficou conhecido como *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA) (CURRAN, 2006).

Com o objetivo de desenvolver pesquisas voltadas ao desenvolvimento de uma metodologia padrão de ACV, a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* – SETAC), promoveu o primeiro evento científico sobre o tema em 1989 (GUINÉE, 2001).

Em 2002 o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a SETAC se associaram para lançar a “*Life Cycle Initiative* (LCI)”, traduzindo, a iniciativa para o Ciclo de Vida. Essa iniciativa visou estimular a prática dessa abordagem pelo mundo (IBICT, 2019). Estudos de ACV ainda não são obrigatórios à produção ou comercialização de produtos. Porém, há exemplos de países onde se tornou obrigatória a divulgação de informações que geram impactos ambientais. Na França, com a promulgação da lei Grenelle II, tornou-se obrigatória a divulgação de informações sobre o teor de carbono, o consumo de recursos naturais e os impactos ambientais nas embalagens dos produtos (LEGIFRANCE, 2010).

A rotulagem ambiental do tipo III, normatizada pela ISO 14025:2006, está sendo um critério marcante no comércio internacional e é integralmente baseada na ACV (IBICT, 2019). Uma declaração ambiental do tipo III é criada e registrada no âmbito de um programa, como o Sistema Internacional EPD. Um EPD é um documento que comunica informações transparentes e comparáveis sobre o impacto ambiental do ciclo de vida dos produtos (EPD, 2019).

No Brasil, a ACV teve início na metade dos anos 1990, mais exatamente em 1994, com a implantação de um subcomitê específico ao tema dentro do Grupo de Apoio à

Normalização Ambiental (GAN). Tal grupo se dedicou à análise do desenvolvimento da série de normas ISO 14000 que tratam da gestão ambiental dentro de empresas. Em 1998, foi lançada a primeira publicação didática sobre a metodologia, em português. Trata-se do livro *Análise de Ciclo de Vida Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000*, de autoria do professor José Ribamar Brasil Chehebe (IBICT, 2019).

No ano seguinte é produzido o primeiro resultado de pesquisa científica com aplicação da metodologia da ACV. A pesquisa *Avaliação do Ciclo de Vida de Embalagens para o Mercado Brasileiro* foi realizada pelo Centro de Tecnologia de Embalagem do Instituto de Tecnologia de Alimentos (CETEA/ITAL) (MOURAD *et al.*, 2002).

Em 2001, veio a normatização no Brasil, com o lançamento da norma ABNT NBR ISO 14040: *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura* (ABNT, 2001). Em 2002 a ACV passou a ser tratada institucionalmente no país através da criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV). A ABCV tem por objetivo congrega pessoas físicas e jurídicas que se interessem pelo desenvolvimento e aplicação da técnica Avaliação do Ciclo de Vida. A ABCV busca fomentar a ACV nos diversos setores de interesse como as indústrias e os centros de ensino e pesquisa, além do governo (ABCV, 2019).

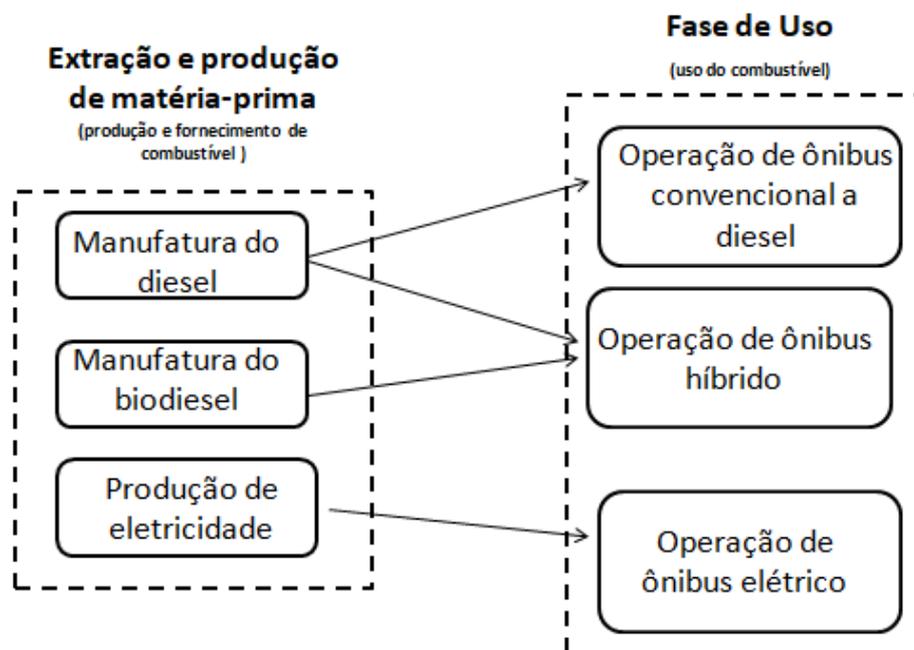
Em 2004, outra instituição bastante reconhecida no Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) define a ACV como ponto estratégico para a Avaliação de Conformidade de produtos, processos, serviços e pessoal. Desta forma, a ACV passa a ser critério crucial para atestar o grau de confiança de um produto ou processo em relação ao seu desempenho ambiental (BLUMENSCHNEIDER; MILLER, 2013).

## **2.6 CONCEITOS GERAIS DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA PARA OS TRANSPORTES**

A Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental (ACV) é usada para comparar os impactos, danos e benefícios de produtos e serviços, levando em consideração todas as emissões associadas, tanto diretas e indiretas (HOOFTMAN *et al.*, 2016). Esse tipo de avaliação permite uma comparação detalhada entre as diferentes tecnologias

disponíveis e a identificação de oportunidades do desenvolvimento tecnológico e melhoria do ciclo de vida no uso do veículo (FARIA *et al.*, 2013). A ACV envolve a compilação de um inventário dos fluxos ambientalmente relevantes associados a todos os processos envolvidos na produção, uso e fim de vida útil de um produto e a conversão desse inventário em impactos de interesse (GUINÉE, 2001; HAWKINS *et al.*, 2013). Uma comparação apropriada de um veículo elétrico (VE) e um veículo a combustão interna (VCI) requer que o limite do sistema seja definido para incluir todas as diferenças relevantes entre as duas alternativas (HAWKINS *et al.*, 2013). A abordagem do sistema de ciclo de vida é importante, porque, por exemplo, a comparação apenas das emissões de escape de um veículo elétrico a bateria com um veículo a combustão interna é enganosa (VAN MIERLO *et al.*, 2017).

Assim, a Figura 2.8 ilustra os limites do sistema do inventário de ciclo de vida que foi utilizado nesse estudo. Assim, o estudo se divide em extração e produção da matéria-prima, onde é analisado a produção e fornecimento do combustível, e fase de uso, que é analisado o uso do combustível. Foram utilizados três tipos de ônibus: convencional, movido a diesel; híbrido, movido a biodiesel (B7); e elétrico.



**Figura 2.8:** Limite do sistema do Inventário do Ciclo de Vida.

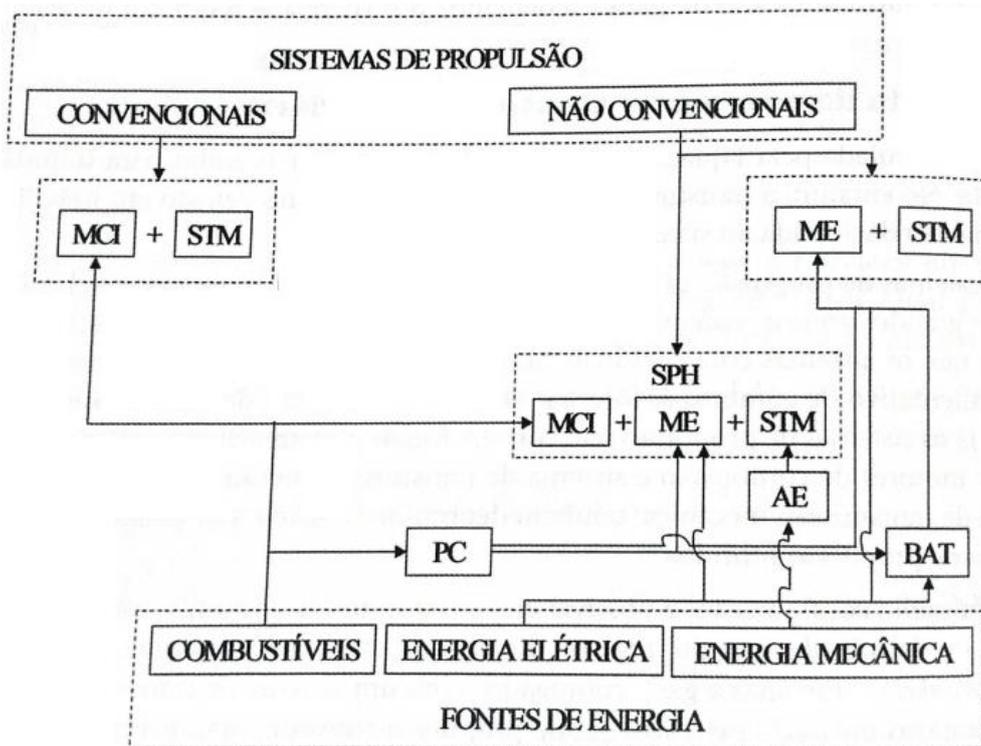
**Fonte:** Adaptado de Cooney *et al.* (2013).

Então, não foi considerado o fim da vida dos ônibus, que engloba a reciclagem e o descarte dele, e nem a produção de componentes do ônibus. E para haver um melhor entendimento do funcionamento dos sistemas de propulsão citados, o 2.7 os define, a seguir.

## **2.7 TRANSPORTES E SUAS TECNOLOGIAS**

O sistema de propulsão consiste em componentes para o armazenamento de combustível, queles para obter o combustível para o motor, e potência às rodas, bem como o ecossistema projetado para prevenir ou reduzir as emissões de poluentes (MACLEAN; LAVE, 2003). Os sistemas de propulsão utilizados em veículos rodoviários podem ser classificados em dois grupos: sistemas convencionais e sistemas não convencionais. Hoje, os sistemas convencionais, que são compostos de um motor alternativo de combustão interna (MCI) e um sistema de transmissão mecânico (STM), dominam o mercado (D'AGOSTO, 2015). Já os sistemas não convencionais são divididos em: motores de combustão e STM; motores elétricos (ME) e STM, denominados de propulsão elétrica; e sistemas de propulsão híbridos. Para fins desse estudo, sobre os sistemas não convencionais, só serão detalhados os dois últimos citados.

A Figura 2.9 sintetiza os conceitos dos sistemas de propulsão, além de indicar a origem da energia utilizada em cada sistema.



**Figura 2.9:** Sistemas de propulsão para veículos rodoviários.

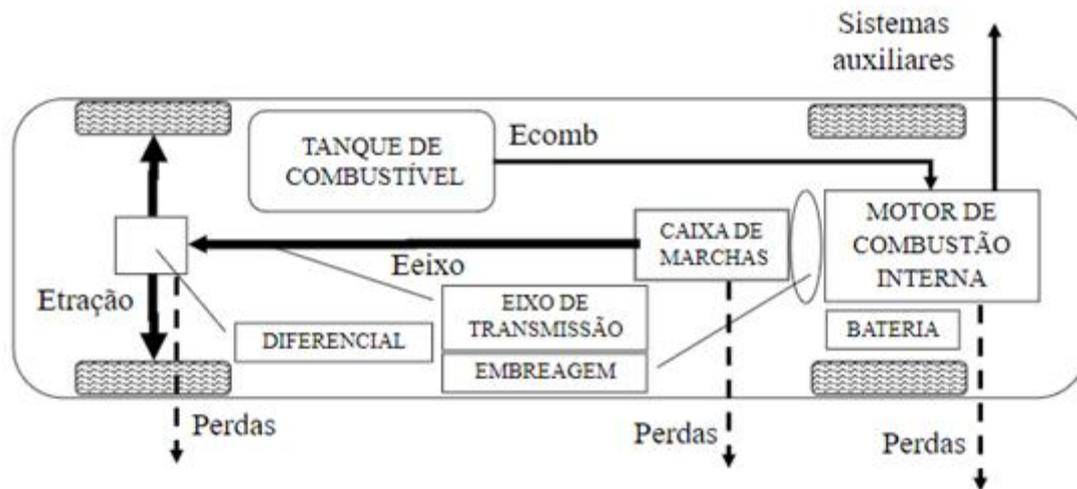
**Fonte:** Adaptado de D’Agosto (2015).

MCI – motor alternativo de combustão interna; STM- sistema de transmissão mecânico; ME – motor elétrico; SPH– sistema de propulsão híbrido; AE- acumulador de energia; BAT- bateria; PC – pilha a combustível.

Nos itens 2.7.1, 2.7.2 e 2.7.3 serão detalhados os funcionamentos dos sistemas de propulsão citados acima.

### 2.7.1 Motor alternativo de combustão interna

O combustível que fica estocado no tanque de combustível é misturado ao ar e queimado no interior dos cilindros do motor. Essa combustão pode ser induzida por centelhamento (ICE), quando a fonte é a gasolina, ou por compressão (ICO), quando a fonte é o óleo diesel. A queima da mistura do combustível com o ar (mistura A/C) aumenta a pressão no cilindro, fazendo com que o pistão se desloque para baixo, rotacionando a manivela. Assim, o MCI converte energia química do combustível em torque e potência, proporcionando o deslocamento do veículo (D’AGOSTO, 2015). A Figura 2.10 ilustra o sistema de propulsão para veículo rodoviário usualmente empregado.



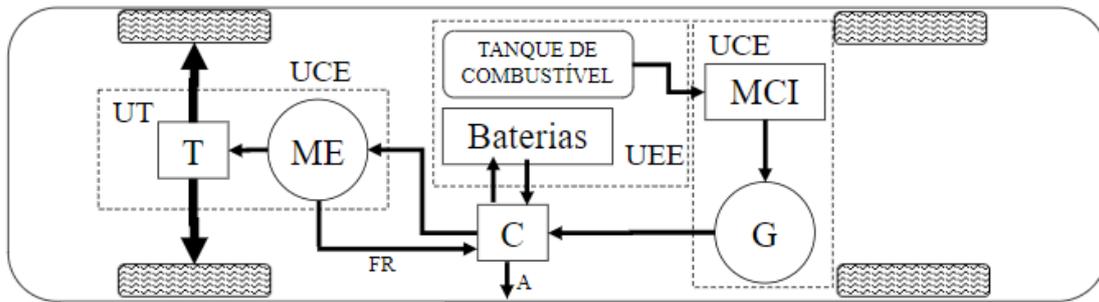
**Figura 2.10:** Sistema de propulsão convencional.

Fonte: (D'AGOSTO, 2015).

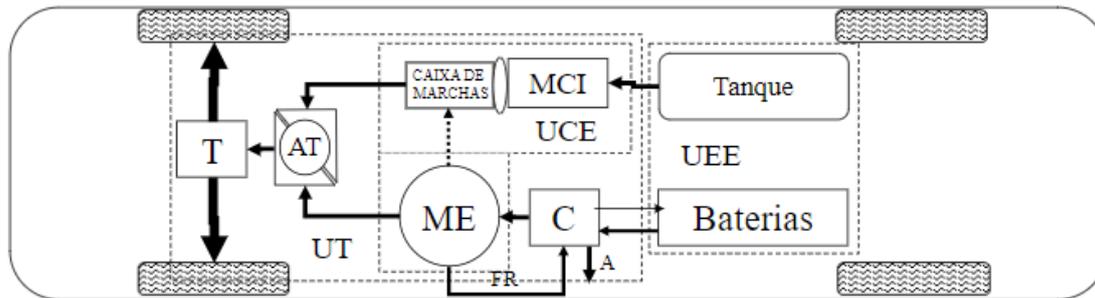
### 2.7.2 Sistema de propulsão Híbrida

Os veículos híbridos combinam o motor de combustão interna com um gerador, uma bateria e um ou mais motores elétricos, ou seja, a combinação de diferentes sistemas de propulsão (D'AGOSTO, 2015; DE CASTRO; FERREIRA, 2010).

Há duas formas básicas de arranjo dos componentes de um sistema híbrido, que resultam em estruturas diferentes dos automóveis: em série ou em paralelo, conforme Figura 2.11 (D'AGOSTO, 2015). Nos sistemas em série, o motor a combustão interna é ligado a um gerador e não diretamente ao trem de acionamento. O motor elétrico é que movimenta as rodas. Já no sistema em paralelo, tanto o motor elétrico quanto o motor a combustão podem movimentar as rodas, conjunta ou independentemente. Há ainda um terceiro sistema que conjuga os dois anteriores, incorporando a possibilidade de recarga da bateria pelo motor a combustão mesmo quando ele estiver tracionando o veículo (DE CASTRO; FERREIRA, 2010).



Híbrido-elétrico em série



Híbrido-elétrico em paralelo

**Figura 2.11:** Configurações do sistema de propulsão híbrido.

**Fonte:** D'Agosto (2015).

T – Transmissão mecânico; AT – acoplador de torque; ME- motor elétrico; C- controlador; MCI- motor a combustão interna; G- gerador; UT- unidade de tração; UEE- unidade de estocagem de energia; UCE- unidade de conversão de energia; FR – freio regenerativo; A- carga dos acessórios.

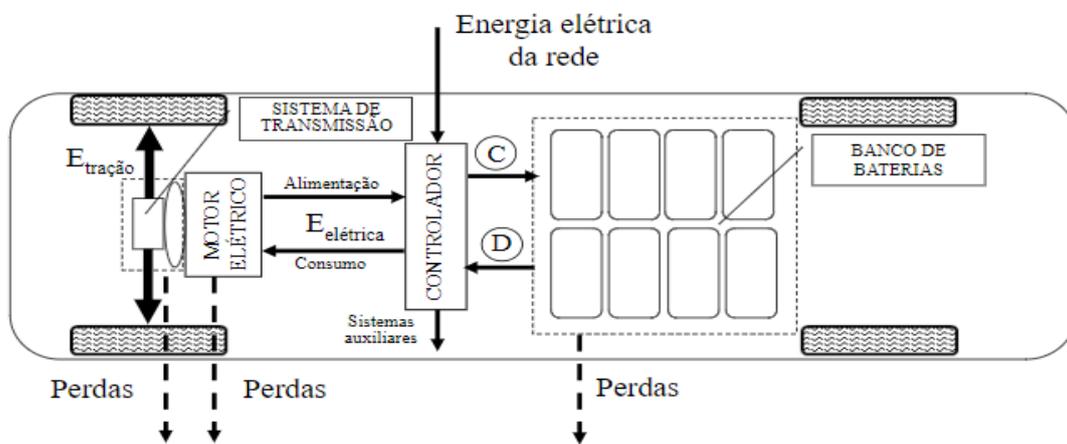
A configuração em paralelo é dominante no caso de veículos leves, como automóveis de passageiros; no caso de ônibus, a configuração dominante é em série.

A Unidade de conversão de energia (UCE) transforma energia química, estocada em forma de combustível ou nas baterias, em mecânica que movimenta o veículo (tração do veículo). Para a configuração em série, uma parte da UCE faz parte da unidade de tração (UT), que gera energia elétrica por meio de um conjunto motor gerador, composto por um MCI e um gerador elétrico (G). Assim, o conjunto é responsável por alimentar o ME, que pode depender de um sistema de transmissão mecânico (T). Nesse caso, a ligação do ME é feito diretamente com a caixa de marchas. As unidades de estocagem de energia (UEE) são classificadas em dois tipos: armazenagem de combustível para a unidade de conversão de energia e armazenagem de energia para uso direto. O controlador (C) é um dispositivo eletrônico que tem por finalidade gerenciar a demanda de potência do motor elétrico, controlando a parcela de energia fornecida pelas baterias, mantendo-as carregadas e permitindo que o grupo motor

gerador funcione em regime constante e a atuação do freio regenerativo (FR). Através do FR é possível aproveitar parte da energia gerada na desaceleração do veículo (D'AGOSTO, 2015).

### 2.7.3 Sistema de propulsão Elétrica

Um veículo elétrico é aquele tracionado por pelo menos um motor elétrico. Enquanto os veículos com motor a combustão interna podem ter um motor elétrico, só nos elétricos é que ele estará direta ou indiretamente ligado à tração do veículo (MACLEAN; LAVE, 2003). A Figura 2.12 mostra a configuração de um típico sistema de propulsão elétrico a bateria, conhecido como veículo elétrico *plug-in*.



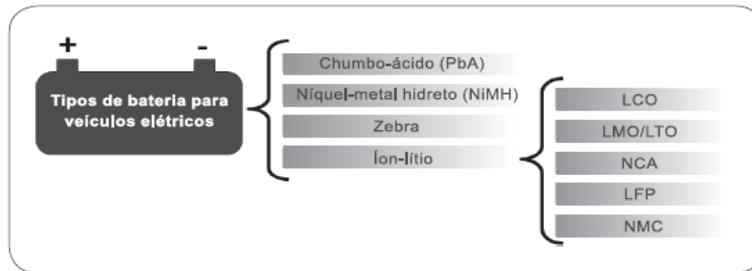
**Figura 2.12: veículo elétrico *plug-in*.**

**Fonte:** D'Agosto (2015)

C- Carga; D- descarga; Eelétrica- energia elétrica; Etração – energia mecânica disponível no eixo de tração.

Existe três maneiras diferentes de um motor receber energia para sua operação: captada através de uma rede aérea, não sendo estocada; através de bancos de bateria; através de uma pilha de combustível, explicado posteriormente.

O desempenho de um veículo depende do tipo de bateria utilizada. A Figura 2.13 mostra os principais tipos de baterias encontrados nos atuais veículos elétricos.



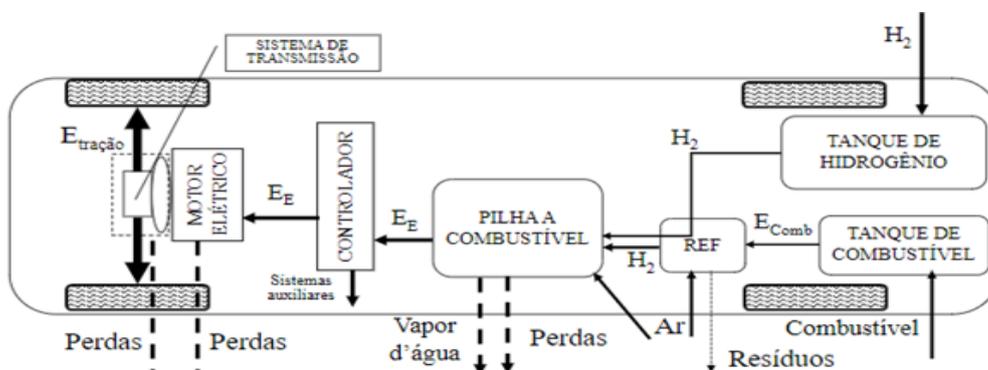
**Figura 2.13:** Diagrama esquemático de tipos selecionados de baterias para veículos elétrico.

**Fonte:** De Castro e Ferreira (2010).

LCO (óxido de lítio-cobalto); LMO/LTO (lítio-manganês spinel); NCA (lítio-níquel-cobalto-alumínio, ou LiNiCoAl); LFP (fosfato de ferro-lítio, ou LiFePO<sub>4</sub>); NMC (lítio-níquel-manganês-cobalto ou LiNiMnCo).

A escolha de uma bateria pode ser diferenciada em sete parâmetros relevantes: a segurança; a vida útil (idade e ciclos de carga e descarga); o desempenho; a capacidade de armazenar energia; a potência; peso; o custo (DE CASTRO; FERREIRA, 2010).

Considerando o fator limitante do uso de veículos elétricos estarem relacionada à estocagem de energia em baterias, as pilhas a combustível (*fuel cells*) tornou-se uma alternativa para converter esse cenário. Segundo D'Agosto (2015), o sistema de alimentação da pilha por duas formas, demonstrada na Figura 2.14, não ocorre na prática, mas decidiu-se ser representada dessa forma. Na primeira, o hidrogênio é armazenado. Na segunda, o combustível, que possui em sua composição grande quantidade de hidrogênio, é armazenado, convertido, posteriormente, em hidrogênio para o uso na pilha.



**Figura 2.14:** Sistema de propulsão elétrica com pilha a combustível.

**Fonte:** D'Agosto (2015).

EE- Energia elétrica; EComb – energia química estocada no combustível; REF – reformatador; Etração – energia mecânica disponível no eixo de tração; H<sub>2</sub> – hidrogênio.

Uma das grandes vantagens do uso de sistemas a propulsão elétrica é sua melhor eficiência global de energia. Enquanto o sistema de propulsão convencional (combustão interna) tem uma eficiência de 10% a 30%, a eficiência da propulsão elétrica é da ordem de 60% para veículos movidos a pilha combustível e podem chegar a 85 % nos sistemas de propulsão elétrica convencional (D'AGOSTO, 2015). Ou seja, no caso dos veículos a combustão interna, de toda energia produzida, somente 30% dela é aproveitada, o resto é transformada em calor, por exemplo.

Por fim, com os limites da ACV e sistemas de propulsão já especificados, fez-se necessário caracterizar o Sistema BRT. Portanto, o item 2.8 o descreve, a seguir.

## **2.8 SISTEMA BRT**

A precariedade de sistemas de transporte público acarreta a geração de profundas desigualdades de acesso à cidade, prejudicando as várias categorias de interações espaciais e, por conseguinte, a própria cidade enquanto condição geral de produção e condição geral de reprodução social. O sistema BRT tem o potencial de mudar esse cenário, pois é um dos mecanismos de custo mais eficientes, promovendo um sistema veloz e de qualidade (SEMOB, 2008). Para ser classificado como um sistema BRT são necessários alguns elementos, que são eles: infraestrutura de qualidade, operações eficientes, tecnologia sofisticada, arranjos institucionais e de negócios eficazes e excelência em marketing e serviço ao usuário. O padrão de qualidade de um sistema BRT é obtido através de pontuações de acordo com as melhores práticas internacionais (ITDP, 2016).

Em 1974, em Curitiba (Brasil), ocorreu o primeiro desenvolvimento em larga escala do conceito BRT. Em seguida, houve o desenvolvimento de alguns sistemas de transporte com esse conceito, como: São Paulo, Brasil (1975); Arlington, EUA (1975); Goiânia, Brasil (1976); Porto Alegre, Brasil (1977); e Pittsburgh, EUA (1977). Porém, somente após a implantação do sistema em Bogotá (Colômbia), foi possível compreender o potencial de alta capacidade de performance de um sistema por ônibus (WRIGHT, 2005). A redução do tempo de viagem, alta capacidade de transporte se comparados com outros sistemas, redução no número de acidentes e

emissões de poluentes (CUELLAR *et al.* 2016). Portanto, várias cidades no mundo passaram a adotar esse sistema devido aos seus benefícios e custos reduzidos.

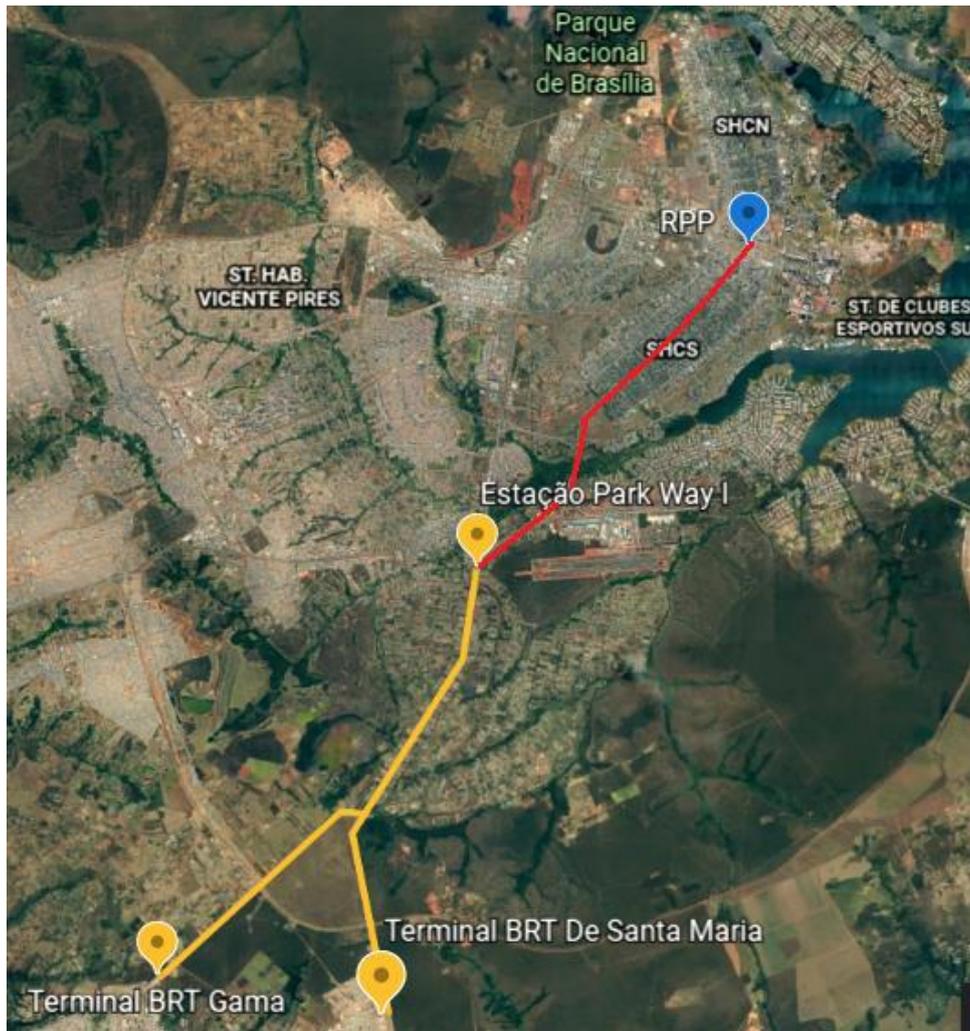
Em abril de 2015, as operações do sistema BRT de Brasília foram iniciadas. O Expresso Sul, corredor de BRT de Brasília, abrange as regiões administrativas do Gama, Santa Maria, Park Way e Plano Piloto. Esse corredor tem 35 quilômetros de extensão de vias segregadas e possui no total 100 veículos, sendo 62 articulados e 38 padron. A Figura 2.15 mostra a infraestrutura presente atualmente.



**Figura 2.15:** Sistema BRT em Brasília - DF.

**Fonte:** BRTBRASIL (2017).

Contudo, a infraestrutura do BRT não possui vias segregadas por todo o seu percurso. Podendo afetar, assim, a sua finalidade de um sistema segregado e de vias rápidas. A Figura 2.16 mostra a extensão do sistema BRT, com terminais de embarque nas regiões do Gama e Santa Maria, com destino da RPP. A linha amarela mostra o trajeto onde as vias são segregadas e com infraestrutura própria de um sistema completo de BRT. A linha vermelha mostra o trajeto onde as vias não são mais segregadas e os veículos públicos se misturam ao tráfego convencional. As vias segregadas iniciam nos Terminais BRT Gama e BRT de Santa Maria e terminam no terminal de transbordo da Estação do Park Way I.



**Figura 2.16:** Extensão da via segregada do BRT.

**Fonte:** Adaptado de *Google Earth* (2020).

O percurso todo tem 43 km, sendo apenas 35 km com vias segregadas. Portanto, cerca de 20% de sua extensão são feitas em rotas não segregadas, podendo afetar uma das finalidades do sistema, que é o de ter um menor tempo de percurso. O BRT Sul tem oito estações e três terminais. O *headway*, intervalo entre os veículos, é de 4 minutos na hora-pico e 10 minutos no entropico. A tarifa do sistema é de R\$ 5,50 e atende cerca de 95 mil passageiros diariamente (BRTBRASIL, 2017).

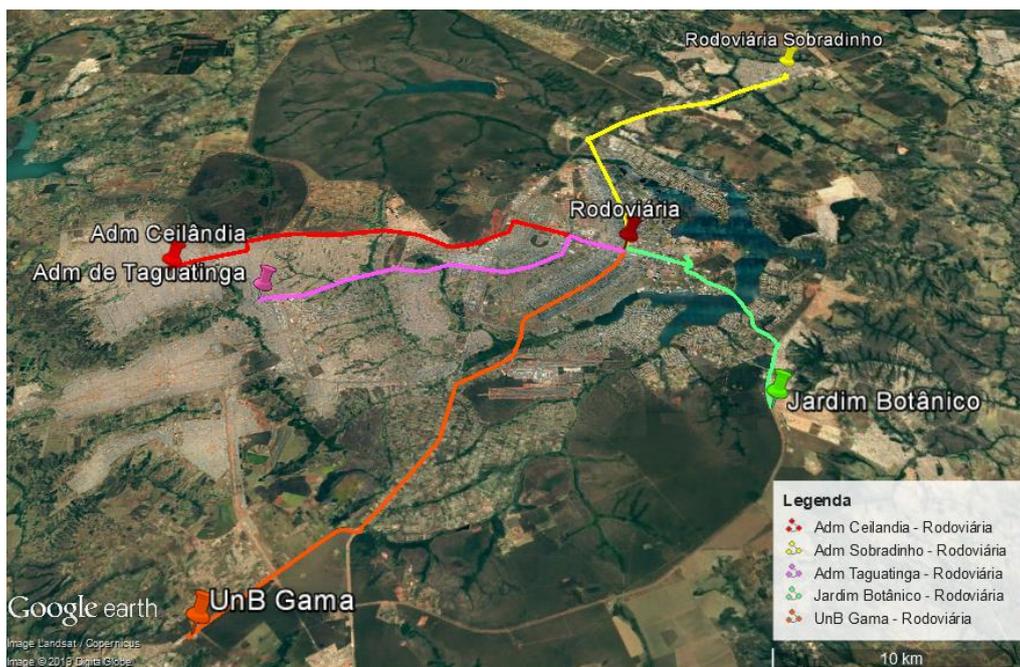
### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo fornece informações sobre a metodologia aplicada para realizar uma análise do ICV com foco específico na operação de ônibus urbanos em Brasília. As quantidades estimadas, métodos e unidades funcionais são introduzidos e explicados. É apresentada uma breve visão geral da infraestrutura de transporte público por ônibus em Brasília. É desenvolvida uma metodologia simplificada e discutida sua robustez e estrutura conceitual. Uma análise é proposta em relação ao impacto das variações entre os ciclos de condução a partir de dados do mundo real nas estimativas de uso de energia, consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. Por fim, é fornecido um resumo das simulações e a economia de combustível, energia e emissões.

#### **3.1 TRANSPORTE COLETIVO NO DF E ROTAS ESCOLHIDAS**

As maiores concentrações de Polos Geradores de Viagens (PGVs) no DF estão no Plano Piloto e em Taguatinga. Por isso, optou-se por adotar a Rodoviária do Plano Piloto (RPP) como destino final de todas as viagens utilizadas nesse estudo. A consolidação e intensificação do uso residencial em regiões como Taguatinga e Ceilândia, com uma alta percentagem populacional e poucas oportunidades de trabalho, fez com que essas duas regiões fossem escolhidas como rotas na Rota Oeste (PDTT/DF, 2019). A região do Gama, Rota Sul, é a 6ª em número populacional do DF. A Rota Norte, Sobradinho, é o eixo mais populoso da região, ficando em 7º lugar na colocação geral de densidade populacional do DF. A Rota Leste é constituída pelas várias unidades de conservação, configuram zonas com potencial de inibição do processo de urbanização, ou pelo menos de direcionamento da ocupação do território. Contudo, o Jardim Botânico é uma importante rota de passagem, de regiões como São Sebastião, por isso foi selecionado para estudo no Eixo Leste (PDTU/DF, 2011).

A Figura 3.1 mostra essas rotas do estudo que foram determinadas de forma a obter-se o ciclo de condução da frota do Distrito Federal-DF. Para tanto, utilizou como referência a separação em regiões proposta pelo PDTU/DF (2011). Todas as rotas possuem a Rodoviária do Plano Piloto (RPP) como ponto de destino.



**Figura 3.1: Rotas escolhidas.**  
**Fonte:** Adaptado de *Google Earth* (2020).

Foram escolhidas rotas nos eixos Norte, Sul, Leste e Oeste. No eixo Oeste foram escolhidas duas rotas devido ao grande adensamento populacional da região. A Tabela 3.1 mostra as características das rotas utilizadas:

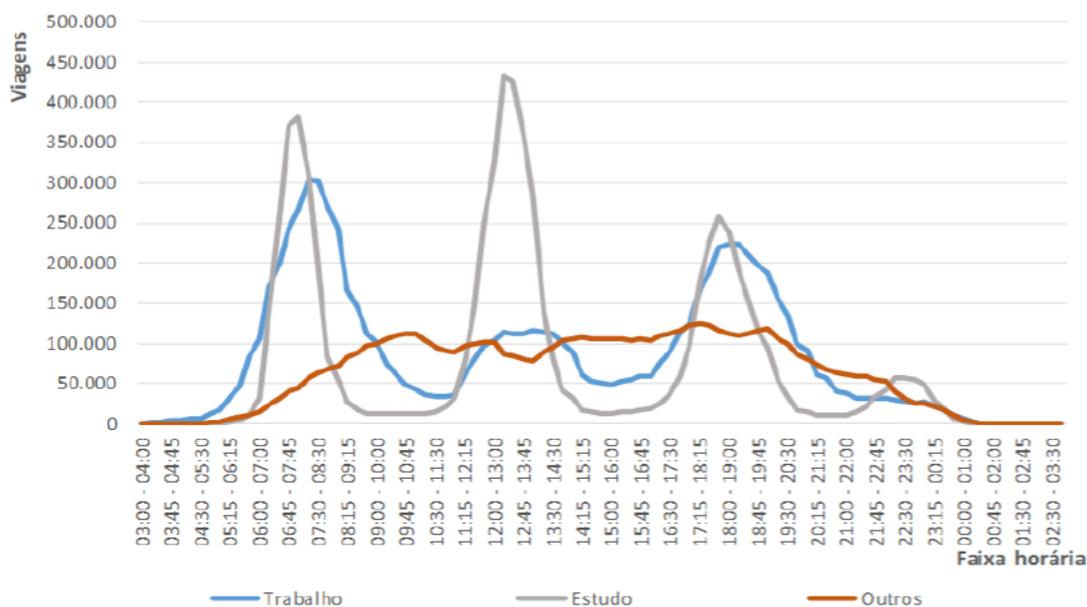
**Tabela 3.1: Características das Rotas Utilizadas**

| ROTAS | CORES      | CARACTERÍSTICAS                            | DISTÂNCIA <sup>[1]</sup> |
|-------|------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| Norte | Amarelo    | Rodoviária de Sobradinho - RPP             | 17,6 km                  |
| Sul   | Alaranjado | Campus Gama/Universidade de Brasília - RPP | 27,5 km                  |
| Leste | Verde      | Região comercial do Jardim Botânico - RPP  | 14,7 km                  |
| Oeste | Vermelho   | Administração da Ceilândia - RPP           | 14,4 km                  |
|       | Rosa       | Administração de Taguatinga - RPP          | 12,4 km                  |

[1] Medido com GPS MAP 60CSx

Ao analisar a distribuição horária das viagens segundo os principais motivos de atração (Figura 3.2), nota-se, no período da manhã, picos mais acentuados entre as 6h00 e 9h00, sendo que o pico das viagens com motivo Estudo ocorre um pouco mais cedo que o das viagens com motivo Trabalho. Por isso, esse intervalo de horário no

pico da manhã foi escolhido para a realização das viagens desenvolvidas nesse estudo. Os cenários serão descritos a seguir.



**Figura 3.2:** Viagens do DF segundo o horário de chegada, para principais motivos de atração.

**Fonte:** PDTT/DF (2019)

Para fins de comparação, esse estudo propõe sete cenários: A, rota de via segregada (BRT) no trecho do Gama; B, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho do Gama; C, rota de via não segregada, fora do horário de pico, no trecho do Gama; D, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho de Ceilândia; E, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho de Sobradinho; F, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho de Taguatinga; G, rota de via não segregada, no horário de pico, no trecho do Jardim Botânico.

### 3.2 CONDIÇÕES, VEÍCULO E CICLOS DE CONDUÇÃO

Para o levantamento experimental das velocidades dos ônibus (ciclo de condução), foram feitas viagens para cada uma das linhas de ônibus que circulam entre os pontos de origem (regiões administrativas de cada rota) e destino (RPP), nos horários de 07h30 e 9h00, caracterizando as velocidades nos horários de pico, e fora do horário de pico, para o cenário C. As velocidades instantâneas, foram medidas com um GPS MAP 60CSx, em frequência de aquisição de 1 Hz. Já que o presente trabalho pretende

comparar os ganhos energéticos em vias não segregadas e sistema BRT (segregadas), foram realizadas as medições de velocidades nas rotas típicas, em ambos cenários: linhas de ônibus em faixas exclusivas e linhas convencionais junto ao tráfego.

A Tabela 3.2 mostra a frota de ônibus disponível no Distrito Federal. Lembrando que não há nenhum tipo de ônibus híbrido em operação, por isso foi necessário a utilização de um veículo-modelo, para fins comparativos.

**Tabela 3.2:** Tipos dos ônibus urbanos analisados.

| Tipo                 | Modelo     |             | Status de operação em Brasília | Capacidade de carregamento (pass)/ Ocupação (pass/veículo) | Combustível  | Peso bruto total (ton) |
|----------------------|------------|-------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------|------------------------|
|                      | Modelo     | Tamanho (m) |                                |                                                            |              |                        |
| ICB <sup>[1,2]</sup> | Dois eixos | 12          | Operante                       | 80/65                                                      | Diesel       | 17                     |
| HEB <sup>[3]</sup>   | Dois eixos | 12          | Não operante                   | 95/61                                                      | B7           | 17                     |
| BEB <sup>[4]</sup>   | Dois eixos | 12          | Operante                       | 85/71                                                      | Eletricidade | 19,5                   |

[1]D'Agosto, Oliveira e Assumpção (2014) ; [2]Dreier et al. (2018); [3] VOLVO (2015); [4] BYD (2020).

Para o ICB, o veículo-modelo adotado é equipado com motor alternativo (4 tempos) de combustão interna de ignição por compressão e sistema de transmissão mecânico, com motor dianteiro, potência máxima entre 200 e 250 hp, suspensão por molas e caixa de marcha mecânica (D'AGOSTO *et al.*, 2014). Para o HEB, o combustível utilizado foi o B7, que é composto por 93% de diesel e 7% de biodiesel. O veículo-modelo emprega, além do motor a combustão interna, um motor elétrico. Isso complementa o convencional trem de força com os seguintes componentes principais: um AT, ME e um sistema *on-board* de armazenamento de energia. Para o BEB, o veículo-modelo foi o D9W, fabricado pela BYD, montadora localizada em Campinas (SP), com grande participação no mercado brasileiro de ônibus elétrico. E a matriz brasileira considerada é caracterizada a partir de 75,18% energia hidrelétrica, 8,46% gás natural, 6,38% biomassa, 3,55% óleo, 2,90% nuclear, 2,56% carvão mineral, e 0,97% outros (ANL, 2016).

Além da caracterização das categorias e configurações de cada veículo, foi necessário descrever cada detalhe considerado nas duas fases da ACV. As fases de extração e produção da matéria-prima, e a fase de uso estão definidas a seguir, nos itens 3.3 e 3.4, respectivamente.

### **3.3 EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA (EPMP)**

As avaliações para veículos rodoviários são comumente feitas considerando o ciclo do combustível, também chamada de extração e produção da matéria-prima (EPMP). Essa etapa consiste na avaliação da produção e fornecimento de combustível. As características de cada tecnologia estudada serão apresentadas a seguir.

#### **3.3.1 Ônibus movidos a Diesel**

Para fins da análise da etapa de EPMP, foram utilizados dados existentes (D'AGOSTO *et al.*, 2014). Devido à falta de acessibilidade a informações, nessa etapa foram utilizados dados da região do município do Rio de Janeiro (MRJ), adaptando-os para Brasília. Assim, admitiu-se que 58% do petróleo vem de jazidas *off shore* situadas no litoral do estado do Rio de Janeiro, e jazidas *on shore* do Oriente Médio fornecem 42% do petróleo processado. O estudo considera que o transporte do petróleo importado foi feito através de navios até o Brasil, o transporte poço-terminal no Oriente Médio, terminal- refinaria e poço-refinaria no Brasil foram feitos através de oleodutos. Após o refino, a distribuição é feita através de caminhões tanque que o distribuem para os postos de abastecimento das garagens de ônibus (D'AGOSTO *et al.*, 2014). Nesse último percurso foi adotado 1137 km, que se refere ao percurso refinaria de Duque de Caxias-Brasília.

#### **3.3.2 Ônibus Híbrido**

Atualmente, não há nenhum ônibus híbrido operante no sistema de transporte público em Brasília. Então, para a realização das análises do ICV nessa etapa, o estudo se baseia em referências (DREIER *et al.*, 2018). O biodiesel B7, mistura de 7% de biodiesel e 93% de diesel, foi o adotado para esse sistema de propulsão. O veículo considerado não é *plug-in*, fazendo o uso somente de bateria.

### 3.3.3 Ônibus Elétricos

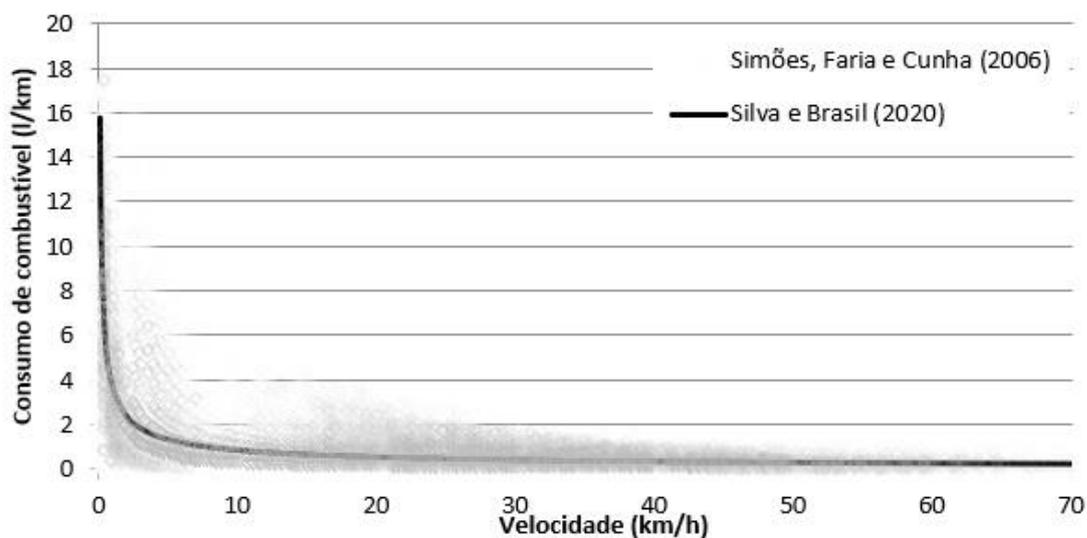
Hoje, no sistema de transporte público de Brasília, somente duas linhas de ônibus operam com ônibus elétrico. Essas linhas começaram a operar a partir de 2018, porém nenhuma dessas linhas operantes se encontram nas rotas selecionadas no estudo. Portanto, para a fase da EPMP, baseou-se em estudos já realizados (CUELLAR *et al.*, 2016; VAN MIERLO *et al.*, 2017; VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019). Segundo Van Mierlo, *et al.* (2017), os veículos elétricos, durante a fase de extração e produção do combustível, emitem 13,6% a mais de GEE que um veículo a combustão interna. Além disso, os autores dizem que os veículos híbridos, movidos a biocombustível, emitem 18 a 20% a menos que os veículos a combustão interna, durante a mesma fase de produção. Assim, os valores referenciados anteriormente, para os ônibus híbridos, se validam (DREIER *et al.*, 2018).

## 3.4 FASE DE USO

Esse item apresenta a fase de uso de combustível ou também chamado de operação. Para fins da análise da fase de uso do combustível foi desenvolvida uma metodologia simplificada determinando o consumo de combustível, consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, a partir das velocidades instantâneas medidas nas rotas. Assim, os subitens, a seguir, demonstram a metodologia desenvolvida.

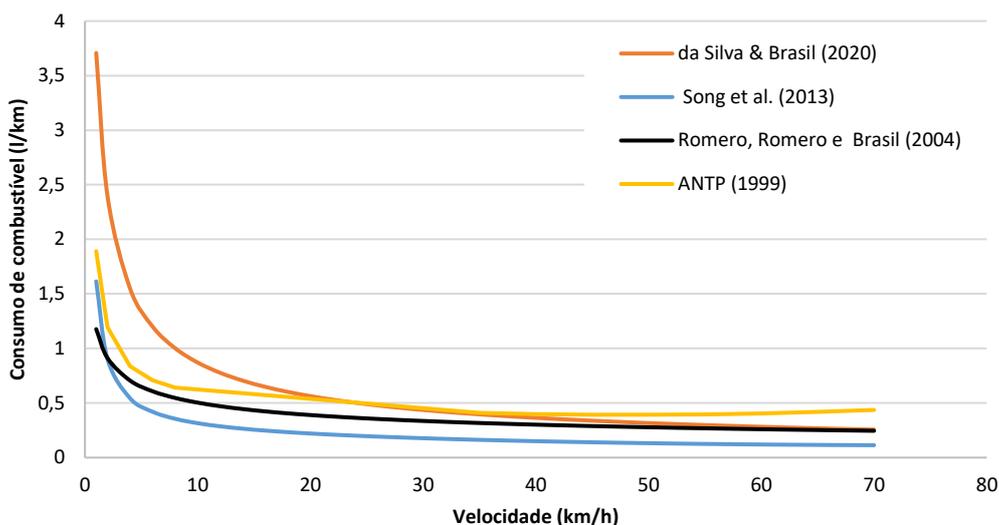
### 3.4.1 Consumo de combustível

O cálculo dos consumos de combustível, para os ICB, foi feito através de dados disponibilizados de um estudo experimental realizado (SIMÕES *et al.*, 2006) em Lisboa, Portugal, com ônibus EURO IV, no período da manhã, nos horários de pico e fora, conforme a Figura 3.3. A linha preta mostra a função de correlação do consumo de combustível e velocidades para os ônibus convencionais proposta nesse estudo (SILVA; BRASIL, 2020).



**Figura 3.3:** Função proposta pelo estudo da correlação do consumo de combustível com a velocidade.

O modelo de regressão aplicado no presente trabalho usou um grande volume de dados disponíveis de estudos experimentais realizados anteriormente e a determinação de correlações matemáticas dos consumos de combustível em função da velocidade instantânea nas vias têm sido uma metodologia também utilizada em diversos estudos, com veículos leves (EL-SHAWARBY *et al.*, 2005; NTZIACHRISTOS *et al.*, 2014; RAKHA *et al.*, 2004), mas também foi usada para ônibus (ZHANG *et al.*, 2014). A Figura 3.4 mostra três estudos que utilizaram as correlações de consumo de combustível de acordo com a velocidade, comparando-os com o presente estudo. A linha amarela representa a função proposta pela ANTP (1999), a linha preta a função de Romero *et al.* (2004), a linha azul a função de Song *et al.* (2013) e a linha alaranjada representa a função proposta por esse estudo (SILVA; BRASIL, 2020).



**Figura 3.4:** Relação entre velocidade e consumo de combustível para o ônibus.

Os valores da função proposta pela ANTP (1999), Romero *et al.* (2004) e Song et al. (2013) são bastante coincidentes para velocidades maiores que 15 km/h mas divergem para velocidades menores. Contudo, estudos experimentais (ANTUNES, 2009; FREY *et al.*, 2007; SIMÕES *et al.*, 2006) com grande volume de dados e em diversas condições de velocidades e acelerações, para a cidade portuguesa de Lisboa, indica que é preciso existir uma correlação mais universal que contemple as velocidades mais elevadas, mas especialmente as velocidades abaixo de 15 km/h.

A linha alaranjada, portanto, é uma função proposta no presente trabalho, que melhor representa a correlação de consumo para todas as condições de velocidades (Eq. 1).

$$\mathbf{Cons_{Bus} = 3,7072 \cdot V^{-0,629}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

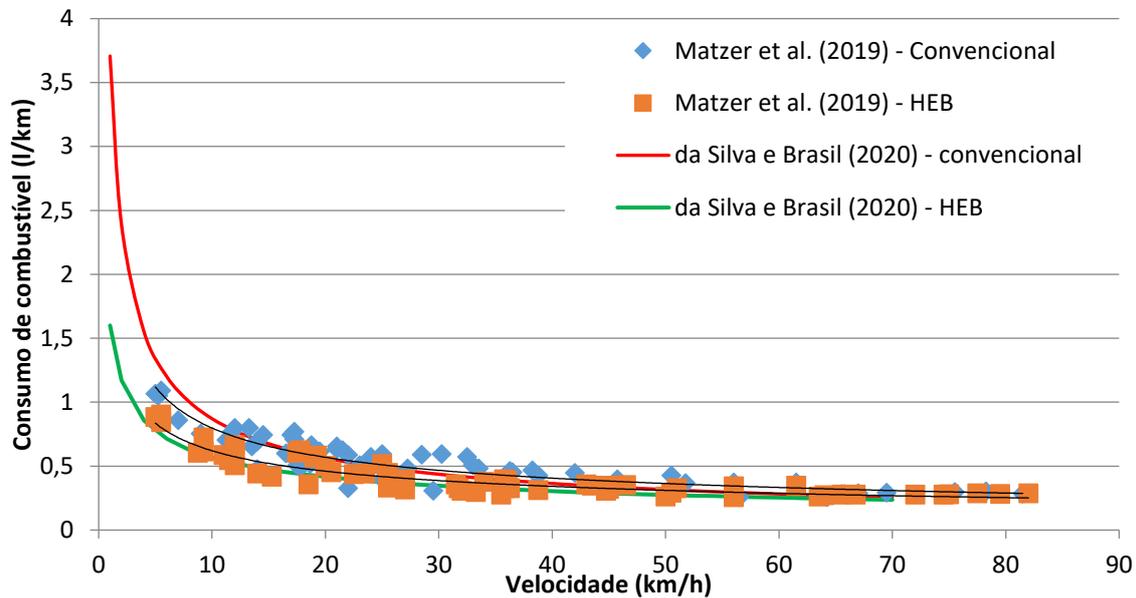
$Cons_{Bus}$  = Consumo de combustível para os ônibus convencionais (l/km);

$V$  = Velocidade do veículo (km/h).

Essa correlação, apresentada acima, serviu como função para a determinação dos consumos de combustível dos ônibus convencionais.

Para o cálculo do consumo de combustível dos híbridos (HEB), foram levantados dados do estudo de Matzer *et al.* (2019). Esse estudo utilizou-se de dados comparativos de ônibus EURO IV convencionais a diesel (ICB) e HEB. Análogo ao

feito para o ônibus convencional, propõe-se uma nova função para esses veículos híbridos, ver Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Consumo de combustível para ônibus convencional e híbrido.

Assim, a Eq. 2 determina o consumo de combustível para os ônibus híbridos.

$$Cons_{HEB} = 1,6 \cdot V^{-0,45} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$Cons_{HEB}$  = Consumo de combustível para ônibus híbridos (l/km);

$V$  = Velocidade do veículo (km/h).

### 3.4.2 Emissões de CO<sub>2</sub>

A mesma metodologia aplicada acima, para determinação de funções de correlação para o consumo de combustíveis, foi repetida para as emissões de CO<sub>2</sub>. Anteriormente, na estimativa do consumo de combustível foi possível perceber uma correlação entre Song *et al.* (2013) e o presente estudo. Song *et al.* (2013) estabelece as emissões de CO<sub>2</sub> através da Eq. 3.

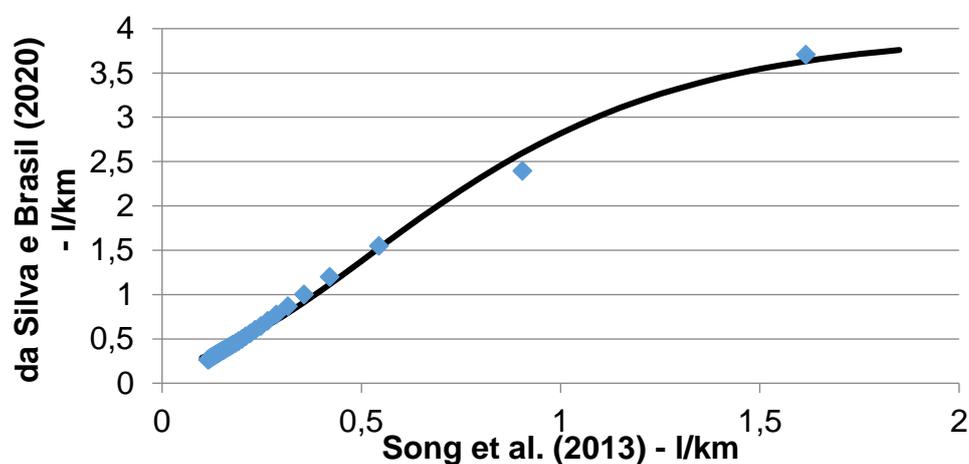
$$E_{CO_2} = 10 \times (16,9 + (1,19 \times 100 \times V^{-1}) - (2,5 \times 0,1 \times V) + (1,72 \times 0,001 \times V^2)) \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$E_{CO_2}$  = Massa de poluente (g/km);

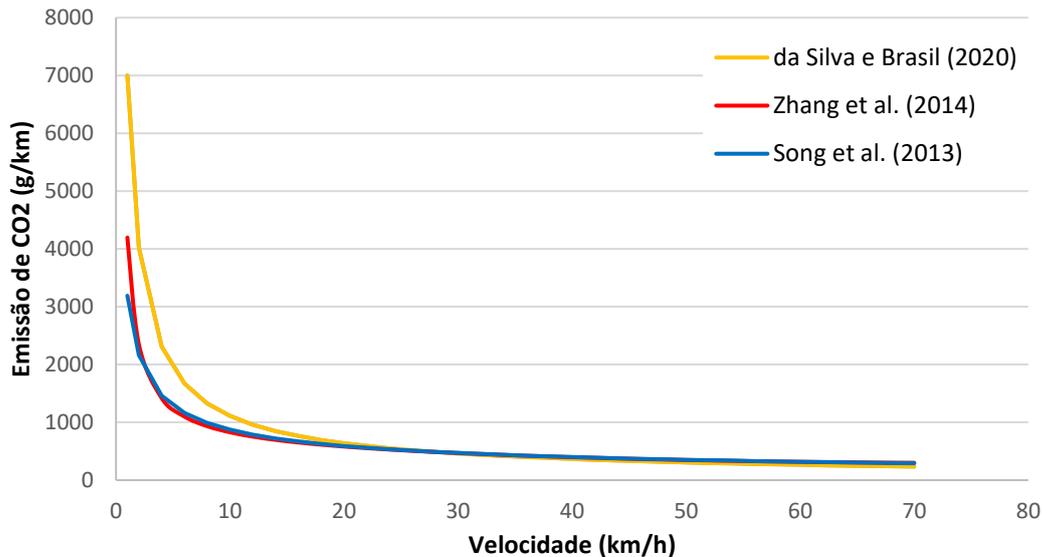
$V$  = Velocidade do veículo (km/h).

Inicialmente, antes de propor uma nova função de emissão de  $CO_2$ , houve o cuidado de manter a simetria obtida entre as funções de correlação de consumo entre de Song *et al.* (2013) e o presente trabalho. Posteriormente, estendeu-se a mesma simetria para uma função de emissão de  $CO_2$ . Assim, a função entre os valores de Song *et al.* (2013) e esse estudo pode ser vista na Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Correlação entre estudos.

O coeficiente de determinação,  $R^2$ , é de 0,9969, mostrando uma grande aderência à equação proposta por esse estudo. Aplicando a função que traduz os valores de Song *et al.* (2013) nos valores do presente trabalho, obteve-se a correlação das emissões de  $CO_2$  em função da velocidade instantânea, conforme a Figura 3.7. Para fins comparativos, também utilizou-se da análise de semelhança com outros estudos existentes (SONG *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2014).



**Figura 3.7:** Correlação entre velocidade e emissão de CO<sub>2</sub>

Assim como para a Figura 3.4 , para velocidades menores que 15 km/h, as equações propostas por Song *et al.* (2013) e Zhang *et al.* (2014) resultam em valores ligeiramente menores que aquelas propostas no presente estudo. Portanto, a Eq. 4 aplica-se para as emissões de CO<sub>2</sub>, em função das velocidades instantâneas, para os ICB.

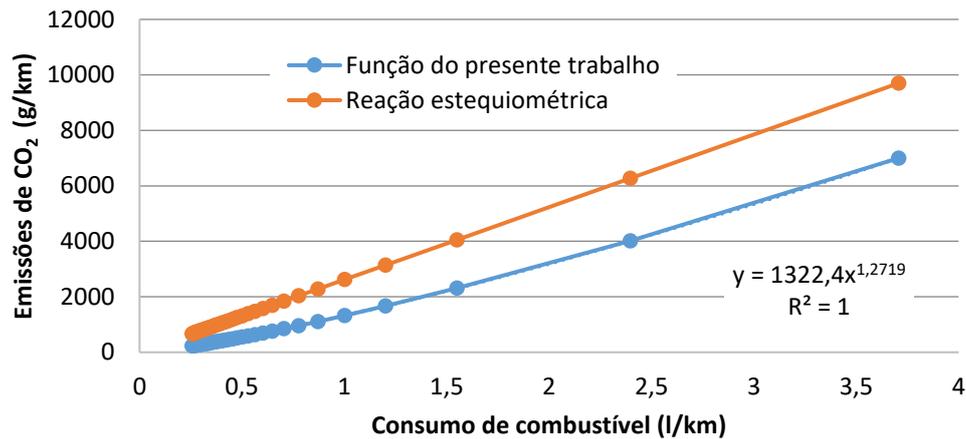
$$E_{CO_2} = 7000 \times V^{-0,8} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$E_{CO_2}$  = Massa de poluente para ônibus convencionais (g/km);

V = Velocidade do veículo (km/h).

Para calibrar a função de emissão de CO<sub>2</sub>, tanto para o veículo convencional (ICB), quanto para o veículo híbrido (HEB) foi feita uma avaliação dos valores de emissão de CO<sub>2</sub> em função do consumo de combustível, e compará-los com os mesmos valores caso a reação do Diesel fosse uma reação estequiométrica, ver Figura 3.8.



**Figura 3.8:** Correlação do consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> para ônibus.

Portanto, observa-se que determinar as emissões de CO<sub>2</sub>, assumindo uma reação estequiométrica, superestima as emissões. A estequiometria baseia-se na lei da conservação das massas. Assim, a Eq. 5 determina a função para as emissões de CO<sub>2</sub> para os HEB.

$$E_{CO2HEB} = 1322,4 \times Cons_{Bus}^{1,2719} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

$E_{CO2HEB}$  = Massa de poluente para ônibus híbridos (g/km);

$Cons_{Bus}$  = Consumo de combustível (l/km).

### 3.4.3 Consumo energético

Para se estimar o consumo energético do ICB e HEB foram utilizados o consumo de combustível, a densidade do diesel, 0,84 kg/l, e o seu poder calorífico inferior, 10100 Kcal/Kg, conforme Eq. 6 (ANP, 2018).

$$E = Cons_{Bus} \times \rho_{diesel} \times PCI \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

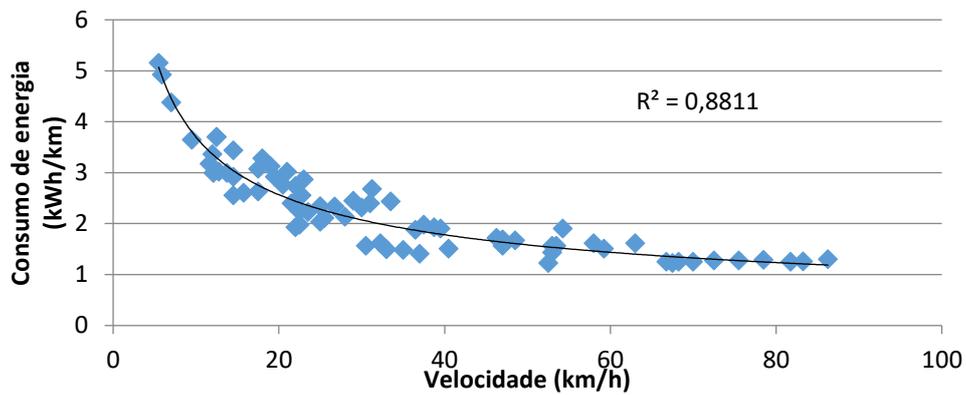
E = Energia consumida (kWh/km);

$Cons_{Bus}$  = Consumo de combustível (l/km);

$\rho_{diesel}$  = Densidade do diesel (kg/l);

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/kg).

Para determinar o consumo de energia do BEB foram utilizados dados do estudo de Matzer et al. (2019). A Figura mostra o consumo de energia específica para um BEB com 50% da capacidade de carga e uma massa bruta do veículo (GVM) de mais de 18 toneladas, ver Figura 3.9.



**Figura 3.9:** Correlação entre a velocidade e consumo energético para os ônibus elétricos.

**Fonte:** Matzer et al. (2019).

Portanto, o consumo de energia é dado em função da velocidade instantânea do ônibus, e se dá conforme a Eq. 6, a seguir.

$$E_{BEB} = 12,457 \times V^{-0,527} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$E_{BEB}$  = Energia consumida pelo ônibus elétrico (kWh/km);

$V$  = velocidade do veículo (km/h).

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo fornece informações dos resultados da metodologia aplicada da realização do ICV com foco específico na operação de ônibus urbanos em Brasília. Os resultados estimados também são apresentados através de gráfico para sua melhor visualização.

### 4.1 RELATÓRIO DA CETESB (2018) APLICADOS AOS CENÁRIOS DO PRESENTE ESTUDO

Primeiramente, os fatores de emissão do Relatório da CETESB foram aplicados aos cenários descritos por esse estudo, comparando os resultados com estudos existentes, para os ônibus a combustão interna (D'AGOSTO *et al.*, 2014; DREIER *et al.*, 2018), conforme Tabela 4.1. Isso foi feito para determinar a aplicabilidade da metodologia do Inventário a todo e qualquer cenário. Lembrando que foram comparados somente as emissões para a fase de uso, que é a única contemplada nos Relatórios.

**Tabela 4.1:** Fatores de emissão da CETESB aplicado e em comparação com outros estudos.

| Estudo    | D'Agosto <i>et al.</i> (2014) | Dreier <i>et al.</i> (2018) | CETESB (2018) aplicados aos cenários do presente estudo |
|-----------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|
| Cenário A | 985,5 gCO <sub>2</sub> /km    | 980,0 gCO <sub>2</sub> /km  | 2081,2 gCO <sub>2</sub> /km                             |
| Cenário B |                               | 950,0 gCO <sub>2</sub> /km  | 2473,2 gCO <sub>2</sub> /km                             |
| Cenário C |                               | 1270,0 gCO <sub>2</sub> /km | 1994,2 gCO <sub>2</sub> /km                             |
| Cenário D |                               | 1260,0 gCO <sub>2</sub> /km | 2597,0 gCO <sub>2</sub> /km                             |
| Cenário E |                               | 1210,0 gCO <sub>2</sub> /km | 2415,0 gCO <sub>2</sub> /km                             |
| Cenário F |                               | 1205,0 gCO <sub>2</sub> /km | 2772,0 gCO <sub>2</sub> /km                             |
| Cenário G |                               | 1300,0 gCO <sub>2</sub> /km | 2609,0 gCO <sub>2</sub> /km                             |

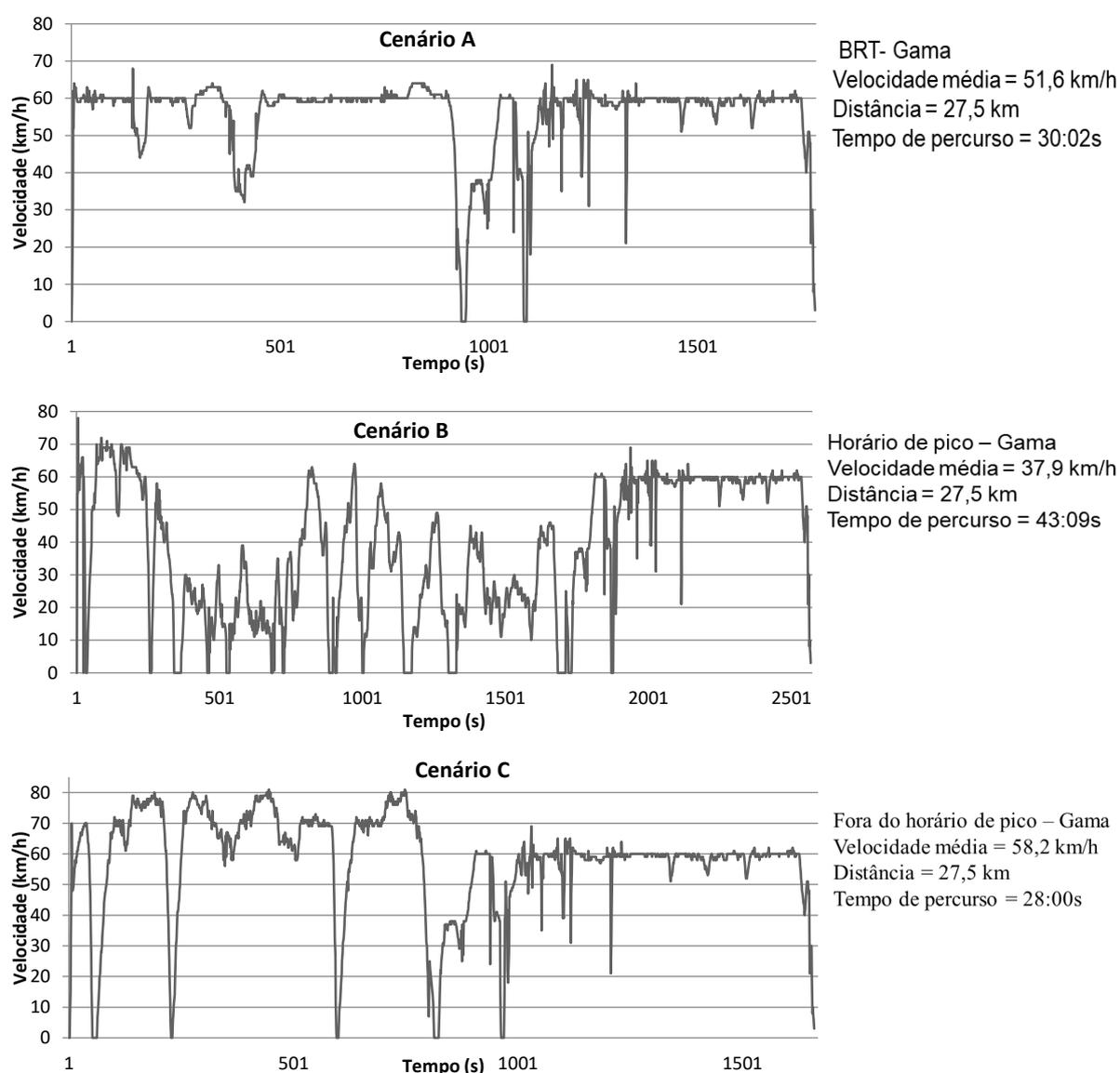
**Fonte:** Adaptado de D'Agosto *et al.* (2014) e Dreier *et al.* (2018).

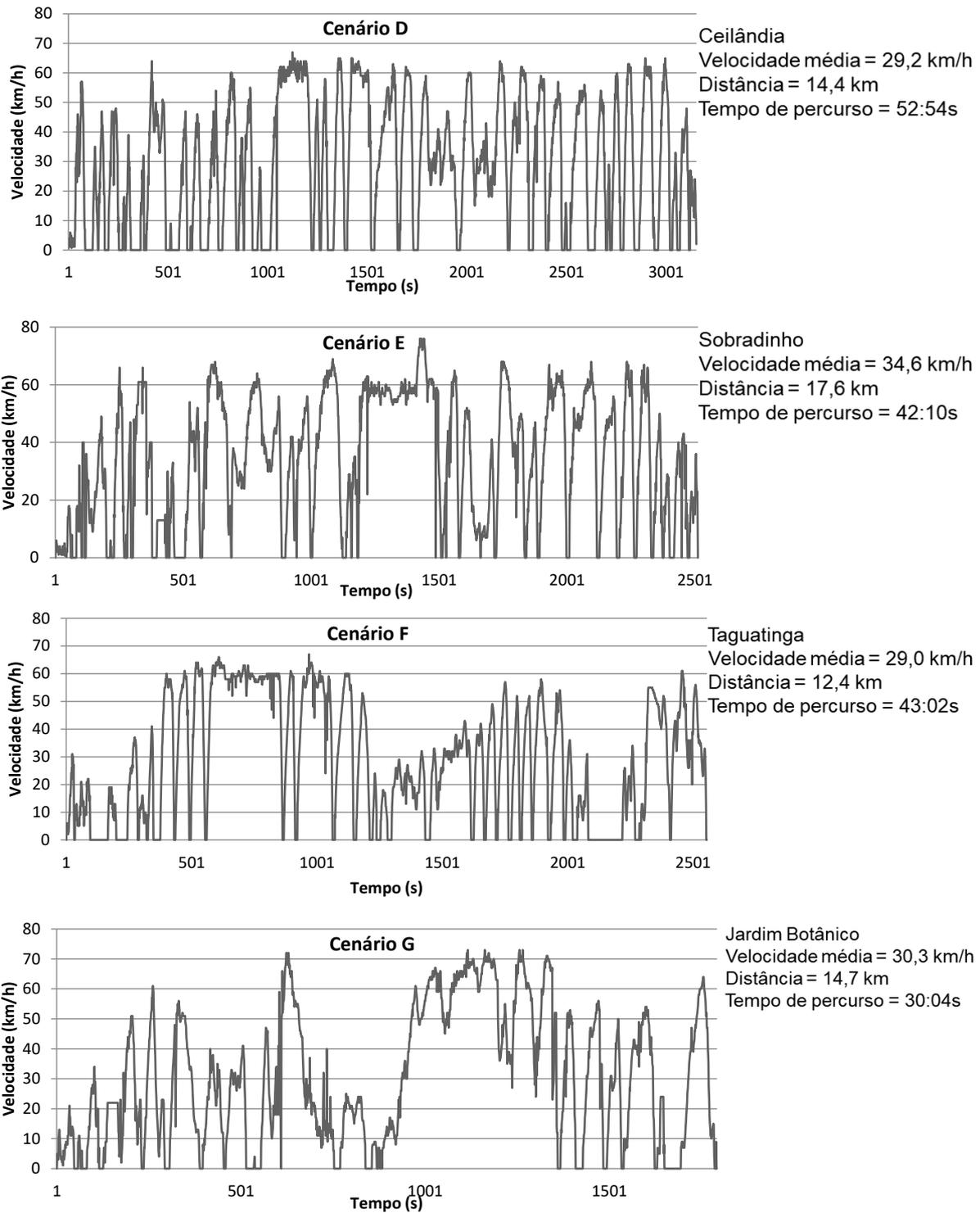
Vale lembrar que, os cenários descritos por D'Agosto *et al.* (2014) e Dreier *et al.* (2018) tem suas características próprias e estão descritas nos respectivos estudos. Portanto, nota-se que ao aplicar o fator de emissão da CETESB (2018) ao presente estudo, houve uma superestimação nos valores. Portanto, conclui-se que estudos específicos para cada região devem ser desenvolvidos. Assim, justifica-se a aplicação da metodologia aqui desenvolvida, para a fase de uso.

Assim, a partir da delimitação das rotas de análise fundamentado no Capítulo 3, dos dados pertinentes à cidade de Brasília, foi necessário percorrer as rotas com um GPS para a determinação das velocidades instantâneas, segundo a segundo, em cada uma delas.

## 4.2 CICLO DE CONDUÇÃO

Desse modo, o GPS registrou o desempenho do ônibus nas rotas selecionadas, conforme Figura 4.1.





**Figura 4.1:** Velocidades instantâneas.  
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Inicialmente, observa-se, devido a caracterização das velocidades segundo a segundo, a diferença entre o cenário que tem um sistema BRT, com vias segregadas e regularidade de ônibus, e o cenário convencional, junto ao tráfego, o cenário A (BRT), se caracteriza com velocidades mais elevadas, com vias expressas e sem

paradas. Nesse cenário, observa-se também a diferença entre o seu trecho com vias segregadas e o trecho onde essa estrutura não existe. O percurso por vias segregadas mostra-se com velocidades constantes e elevadas, no seu percurso com vias não segregadas, as velocidades são alteradas regularmente, com períodos com altas velocidades e outros com velocidades baixas.

Os cenários A, B e C são da mesma rota, porém com características de horário e sistema diferentes. Os três cenários estão localizados na região administrativa do Gama. Assim, observa-se que, não há diferenças significantes entre os cenários A e C. O cenário C se caracteriza por uma via não segregada, mas as velocidades foram determinadas em um horário fora do pico, na parte da manhã. O limite de velocidade de todas as vias aqui estudadas tem como é de 80 km/h. Assim, o cenário C mostra-se com as velocidades mais elevadas, pois com o número de reduzido de veículos na rota, não possui congestionamentos nos horários fora do pico.

No início dos trechos E, F e G, que são eles Sobradinho, Taguatinga e Jardim Botânico, respectivamente, observa-se que as velocidades são baixas, atingindo o máximo de 40 km/h, caracterizando os percursos mais congestionados desses trechos. Nesses percursos iniciais são identificados por estarem dentro de áreas com habitações ao redor. E no horário de pico há muitos deslocamentos em direção a RPP.

Para determinar com exatidão os valores da velocidade média, distância e tempo gasto em cada percurso, tem-se a Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Velocidade média dos cenários analisados.

| Cenário   | Velocidade média (km/h) | Distância (km) | Tempo de percurso |
|-----------|-------------------------|----------------|-------------------|
| Cenário A | 51,6                    | 27,5           | 30:02             |
| Cenário B | 37,9                    | 27,5           | 43:09             |
| Cenário C | 58,2                    | 27,5           | 28:00             |
| Cenário D | 29,2                    | 14,4           | 52:54             |
| Cenário E | 34,6                    | 17,6           | 42:10             |
| Cenário F | 29,0                    | 12,4           | 43:02             |
| Cenário G | 30,3                    | 14,7           | 30:04             |

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Assim, observa-se que o trecho mais extenso são os cenários A, B e C, trecho Gama-RPP. O trecho com o maior tempo gasto é o cenário D, trecho Ceilândia. O cenário com a menor velocidade média foi o F, referente a região administrativa de Taguatinga, com uma velocidade de 29,0 km/h, mostrando-se como o cenário mais congestionado de todos.

### 4.3 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A partir das velocidades instantâneas determinadas para cada cenário, foi possível determinar o consumo de combustível dos ônibus convencionais e híbridos para cada cenário, ver Tabela 4.3. Lembrando que para os veículos elétricos esse cálculo não se aplica, pois o método de cálculo leva em conta combustíveis dados em litros, então veículos impulsionados por eletricidade não se aplicam.

**Tabela 4.3:** Resultados do consumo de combustível para os ônibus convencionais e híbrido.

|           | Consumo de Combustível (L/km) |      |                      |
|-----------|-------------------------------|------|----------------------|
|           | ICB                           | HEB  | Gap <sup>1</sup> (%) |
| Cenário A | 0,29                          | 0,26 | -11,2                |
| Cenário B | 0,35                          | 0,29 | -16,1                |
| Cenário C | 0,28                          | 0,25 | -10,3                |
| Cenário D | 0,37                          | 0,30 | -17,2                |
| Cenário E | 0,34                          | 0,29 | -15,6                |
| Cenário F | 0,39                          | 0,32 | -18,8                |
| Cenário G | 0,37                          | 0,30 | -17,7                |

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados mostram que o cenário F, referente a Taguatinga, tem os consumos de combustível mais elevados e com a implantação do ônibus híbrido, esse consumo pode ser reduzido em até 18,8%. Também se faz referência a influência da velocidade média no consumo de combustível, pois os dois cenários com as menores velocidades, F e D, com 29,0 km/h e 29,2 km/h, respectivamente, consomem mais combustível. Concluindo que para velocidades médias mais baixas, ou seja, trechos mais congestionados, os consumos de combustível são elevados.

#### 4.4 CONSUMO ENERGÉTICO

Em relação ao consumo de energia, tem-se a Tabela 4.4. A fase de extração e produção de matéria-prima (EPMP) para os convencionais (D'AGOSTO *et al.*, 2014), híbridos (DREIER *et al.*, 2018) e elétricos (VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019) foram baseadas na literatura. Lembrando que esse estudo só considera a extração, produção e uso dos combustíveis utilizados. Em nenhuma fase são consideradas produções de componentes dos ônibus. Para a Fase de Uso utilizou-se a metodologia desenvolvida por esse estudo.

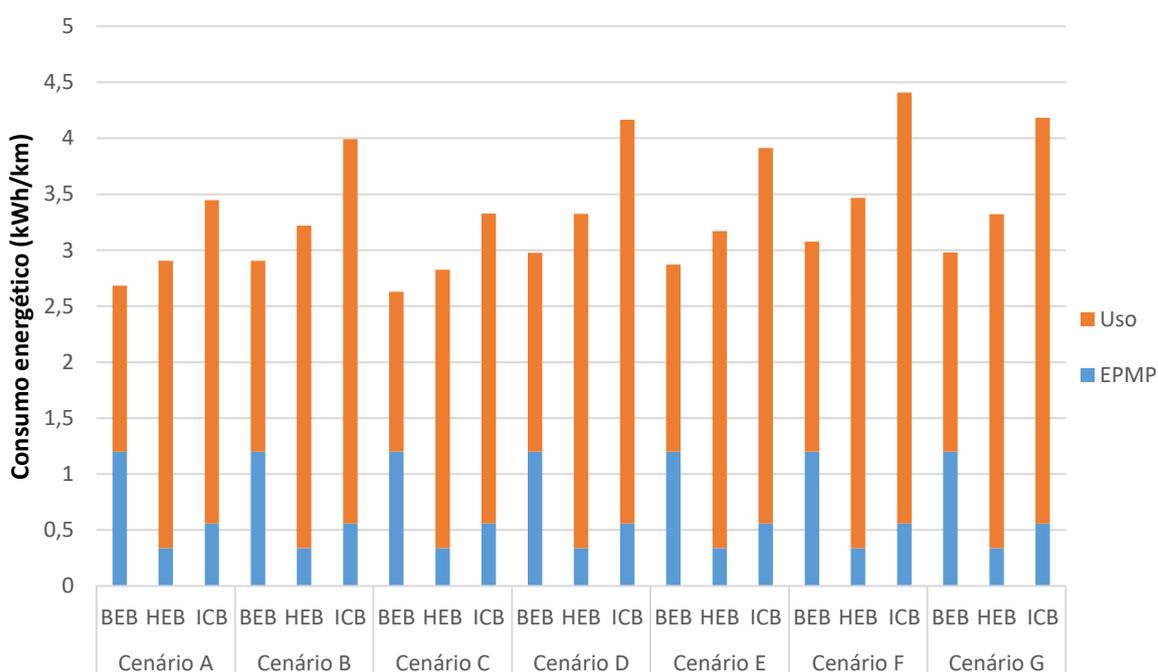
**Tabela 4.4:** Consumo energético para os ICB, HEB e BEB, nos cenários analisados.

|           | Energia (kWh/km) |       |       |       |       |       |      |       |       |                      |       |                      |
|-----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------------------|-------|----------------------|
|           | ICB              |       |       | HEB   |       |       | BEB  |       |       | Gap <sup>1</sup> (%) |       | Gap <sup>2</sup> (%) |
|           | EPMP             | Uso   | TOTAL | EPMP  | Uso   | TOTAL | EPMP | Uso   | TOTAL | HEB                  | BEB   |                      |
| Cenário A | 0,558            | 2,891 | 3,4   | 0,340 | 2,566 | 2,9   | 1,2  | 1,483 | 2,7   | -15,7                | -22,2 | -7,7                 |
| Cenário B | 0,558            | 3,435 | 4,0   | 0,340 | 2,881 | 3,2   | 1,2  | 1,705 | 2,9   | -19,4                | -27,3 | -9,8                 |
| Cenário C | 0,558            | 2,770 | 3,3   | 0,340 | 2,485 | 2,8   | 1,2  | 1,430 | 2,6   | -15,1                | -21,0 | -6,9                 |
| Cenário D | 0,558            | 3,607 | 4,2   | 0,340 | 2,986 | 3,3   | 1,2  | 1,778 | 3,0   | -20,1                | -28,5 | -10,5                |
| Cenário E | 0,558            | 3,354 | 3,9   | 0,340 | 2,832 | 3,2   | 1,2  | 1,671 | 2,9   | -18,9                | -26,6 | -9,5                 |
| Cenário F | 0,558            | 3,850 | 4,4   | 0,340 | 3,127 | 3,5   | 1,2  | 1,877 | 3,1   | -21,4                | -30,2 | -11,2                |
| Cenário G | 0,558            | 3,624 | 4,2   | 0,340 | 2,982 | 3,3   | 1,2  | 1,779 | 3,0   | -20,6                | -28,8 | -10,3                |

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Foram descritos os consumos energéticos em cada fase e para cada tecnologia analisada. Com base na Tabela 4.4 é possível observar que, o cenário F tem os valores mais elevados de consumo de energia. O Gap<sup>1</sup> é referente ao percentual de variação daquelas variáveis (HEB e BEB) comparada com os ICB. O Gap<sup>2</sup> é referente ao percentual de variação da variável BEB comparada com os HEB. Assim, nota-se que o cenário F também tem o maior potencial de economia de energia com a inserção de BEB, com uma redução de 30,2%, e HEB, com a redução de 21,4%. O Cenário C mostrou-se com o menor percentual de redução com a introdução de ônibus elétrico e híbrido. Porém, ainda assim é possível minimizar o consumo de energia. Essa redução atinge um percentual de 15,7%, para os híbridos, e 22,2% para os elétricos.

Adicionalmente, observa-se que entre as tecnologias analisadas, o HEB tem o menor consumo energético durante a fase EPMP, por ser um biocombustível consome 39% a menos, em relação ao ICB, durante essa fase. Enquanto, o BEB consome 53,5% a mais, em relação ao ICB, durante essa mesma fase. Mesmo o BEB tendo um consumo inicial alto, a análise de toda a sua cadeia produtiva permite concluir que ele ainda é a tecnologia que consome menos energia. A Figura 4.2 mostra visualmente como são os consumos energéticos em cada fase produtiva para as tecnologias e cenários analisados.

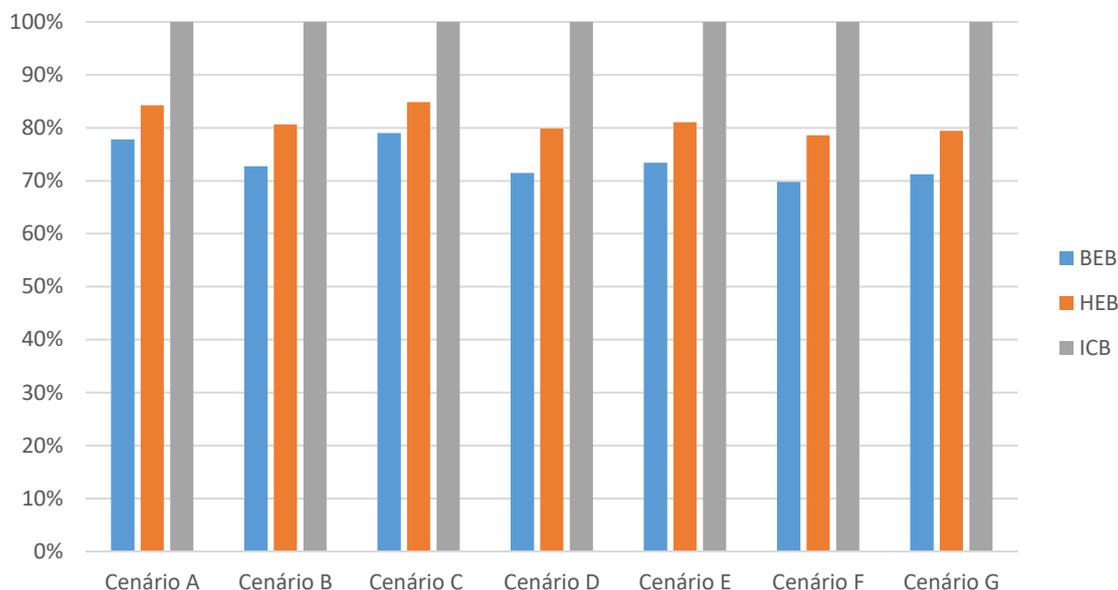


**Figura 4.2:** Valores correspondentes a cada etapa produtiva em relação aos valores totais de consumo de energia.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Assim, nota-se que a fase de uso é, majoritariamente, responsável pelo total de energia consumida em toda o ciclo de vida dos ônibus. E que para os ônibus convencionais, esse consumo de energia, durante a fase de uso, é ainda mais elevado e pode chegar a 85,5% do total. Enquanto, para os ônibus elétricos, a fase EPMP pode ser muito mais significativa, atingindo um percentual de 46,2% da energia consumida no total do seu ciclo de vida.

Adicionalmente, a Figura 4.3 mostra o percentual de economia no consumo de energia com a implantação de ônibus elétrico e híbrido. Os valores têm como referência os consumo energéticos dos ônibus convencionais.



**Figura 4.3:** Variação do consumo de energia.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Assim, nota-se, mais visualmente, na Figura 4.3, que o cenário F tem a maior percentual de economia com a introdução de um sistema composto por ônibus elétricos e híbridos. É possível observar, ainda, que não há muita diferença entre os percentuais do sistema BRT, Cenário A, e o Cenário C. Ambos percorrem o mesmo trecho, porém o cenário C não possui vias segregadas e foi percorrido fora do horário de pico. Assim, conclui-se que, em uma possível renovação de frota, as rotas que não são segregadas devem ser prioritárias. O BRT deve também receber uma frota mais renovável, porém não prioritariamente.

#### 4.5 EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>

Análogo ao apresentado para o consumo de energia, tem-se a Tabela 4.5, demonstrando os valores encontrados para as emissões de CO<sub>2</sub>, diferenciados nas tecnologias e os cenários estudados.

**Tabela 4.5:** Emissões de CO<sub>2</sub> para os ICB, HEB e BEB, nos cenários analisados.

|           | Emissões de CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /km) |       |       |      |       |       |       |           |       |           |
|-----------|----------------------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-----------|-------|-----------|
|           | ICB                                                |       |       | HEB  |       |       | BEB   | Gap 1 (%) |       | Gap 2 (%) |
|           | EPMP                                               | Uso   | TOTAL | EPMP | Uso   | TOTAL | TOTAL | HEB       | BEB   | (%)       |
| Cenário A | 124,7                                              | 277,9 | 402,6 | 99,7 | 238,4 | 338,2 | 141,6 | -16,0     | -64,8 | -58,1     |
| Cenário B | 124,7                                              | 351,0 | 475,7 | 99,7 | 278,1 | 377,9 | 141,6 | -20,6     | -70,2 | -62,5     |
| Cenário C | 124,7                                              | 264,0 | 388,7 | 99,7 | 229,2 | 329,0 | 141,6 | -15,4     | -63,6 | -56,9     |
| Cenário D | 124,7                                              | 372,9 | 497,5 | 99,7 | 290,9 | 390,6 | 141,6 | -21,5     | -71,5 | -63,7     |
| Cenário E | 124,7                                              | 340,8 | 465,5 | 99,7 | 272,2 | 371,9 | 141,6 | -20,1     | -69,6 | -61,9     |
| Cenário F | 124,7                                              | 405,6 | 530,3 | 99,7 | 308,6 | 408,3 | 141,6 | -23,0     | -73,3 | -65,3     |
| Cenário G | 124,7                                              | 378,4 | 503,1 | 99,7 | 291,6 | 391,3 | 141,6 | -22,2     | -71,8 | -63,8     |

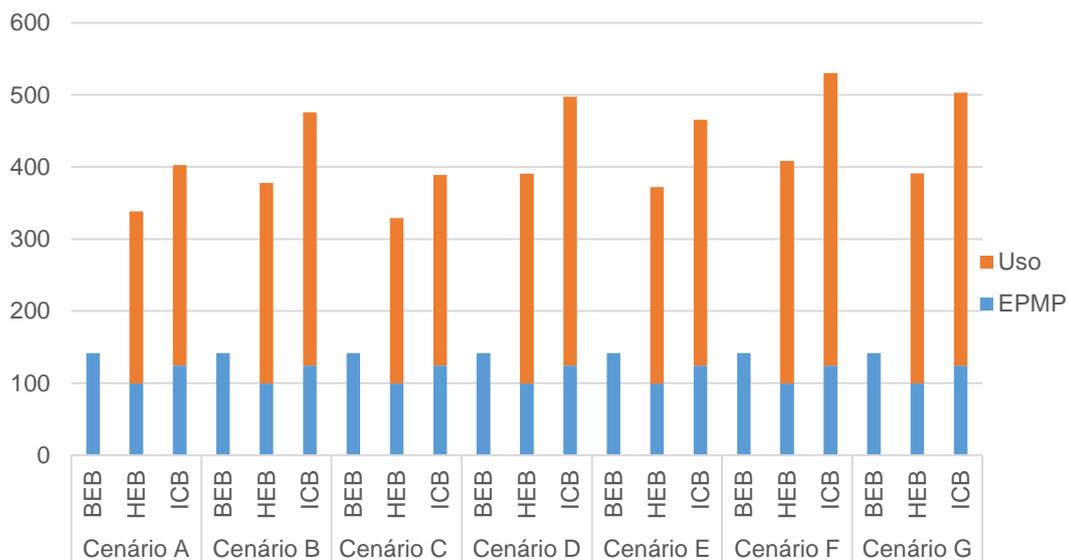
**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Com base na Tabela 4.5, nota-se que, igualmente as análises anteriores de consumo de energia e de combustível, o cenário F tem os valores mais elevados. Para esse cenário, são emitidos 530,3 gCO<sub>2</sub>/km, para os convencionais, 408,3 gCO<sub>2</sub>/km, para os híbridos, e 141,6 gCO<sub>2</sub>/km, para os elétricos. O percentual de economia caso haja uma introdução de BEB é de 73,3% e de HEB é de 23%, em relação aos movidos a diesel.

Para o trecho Gama-RPP, o BRT emite 402,6 gCO<sub>2</sub>/km, para os ICB, 338,2 gCO<sub>2</sub>/km, para os HEB, e 141,6 gCO<sub>2</sub>/km, para os BEB. Enquanto, o mesmo trecho em horário de pico emite 475,7 gCO<sub>2</sub>/km, 377,9 gCO<sub>2</sub>/km e 141,6 gCO<sub>2</sub>/km, para os ICB, HEB e BEB, respectivamente. E para o horário fora do pico, as emissões são 388,7 gCO<sub>2</sub>/km, 329 gCO<sub>2</sub>/km e 141,6 gCO<sub>2</sub>/km, nessa ordem. Portanto, o Cenário B, no horário de pico, emite 20% a mais, em relação ao BRT. Enquanto, o cenário C, fora do horário de pico, emite 3,4% a menos que o BRT.

Os cenários D e G também se aproximaram dos valores emitidos pelo Cenário F, o mais emissor. Então, conclui-se que os cenários que mais emitem e necessitariam, primeiramente, de uma intervenção e inserção de ônibus com energia mais limpa, são os de Ceilândia, Taguatinga e Jardim Botânico.

Além disso, necessita-se ter uma melhor análise da influência de cada fase de produção nas emissões totais. Assim, a Figura 4.4 mostra os valores correspondentes das emissões referentes a cada etapa produtiva em relação aos valores totais.

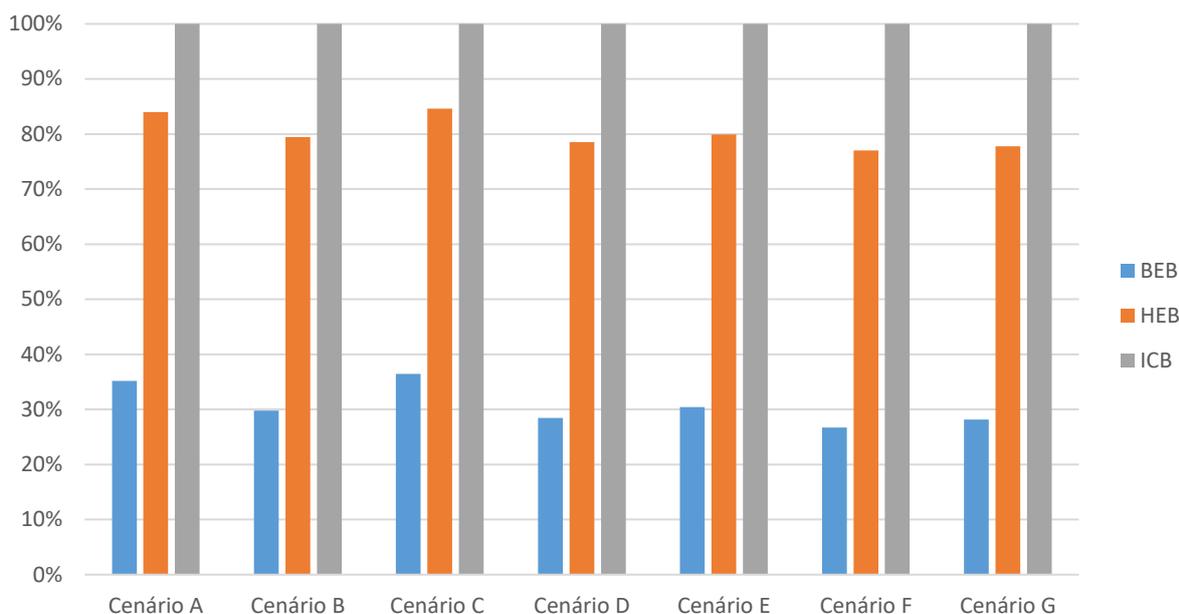


**Figura 4.4:** Valores correspondentes a cada etapa produtiva em relação aos valores totais de emissões de CO<sub>2</sub>.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Para os ônibus convencionais, nota-se um maior impacto da fase de uso em toda o seu ciclo de vida. As emissões durante a fase de uso correspondem até 76,5%, para o cenário mais crítico, ou seja, o mais emissor, que é o cenário F. Para os ônibus híbridos, o mesmo acontece, a fase de uso corresponde em até 75,6% do total. Para os ônibus elétricos, as emissões só são geradas durante a fase de EPMP.

Ainda, a Figura 4.5 apresenta o percentual de economia nas emissões de CO<sub>2</sub> com a implantação de ônibus elétrico e híbrido. Os valores têm como referência os consumo energéticos dos ônibus convencionais.



**Figura 4.5:** Variação das emissões de CO<sub>2</sub>.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados relativos as emissões de CO<sub>2</sub> mostram resultados de maior grandeza, comparando-os com a economia de energia. O cenário mais favorável mostra que, com a inserção de ônibus elétricos, a redução pode chegar em até 73,3%, ou um mínimo de 63,6%. Para os híbridos, essa redução pode atingir valores entre 15,4% a 23%.

Embora os valores para o Cenário F tenham sido os mais danosos ao meio, com uma possível inserção das tecnologias analisadas nessa rota, o seu potencial de redução de emissão é o maior entre todos os outros cenários, seguidos dos Cenários D e G. Contudo, o sistema BRT, não se mostrou como sendo uma melhor alternativa para a inclusão dos ônibus elétricos e híbridos. Portanto, para futuras melhorias no sistema existente, esses corredores segregados deveriam renovar sua frota com menos prioridade que as vias não segregadas. Contudo, para qualquer cenário, os ônibus elétricos ainda são as melhores alternativas de redução nas emissões de CO<sub>2</sub>.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Historicamente, os ônibus de transporte público recebem substancial atenção, no que diz respeito às emissões urbanas. Uma abordagem de ciclo de vida em sistemas de transportes público possibilita um melhor entendimento da energia e combustível consumidos e das emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao sistema, observado em toda sua cadeia produtiva, e não apenas na operação do sistema, como é tradicionalmente feito. O melhor entendimento do sistema como um todo pode contribuir para a identificação dos aspectos mais relevantes às emissões, os quais podem gerar mais esforços de redução nas emissões de GEE. Além disso, comparar cenários de uma região permite definir a priorização na tomada de decisão. Como a comunidade internacional reconhece a importância da redução das emissões de CO<sub>2</sub>, tendo já vários países assumido compromissos nesse sentido, as pesquisas de ciclo de vida assumem grande importância, por permitir uma visão mais completa do problema.

Esse estudo concentrou-se no sistema de transporte público por ônibus de Brasília, DF. Foram propostas funções matemáticas simples e uma metodologia para direta estimativa dos consumos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> de ônibus urbanos, para a sua fase de uso, para veículos com propulsão convencional, híbrida e elétrica, comprando-os em situações de sistema BRT, sem vias segregadas, com ou sem trânsito.

Os resultados também foram comparados caso fossem adotados valores de referência do Relatório da CETESB. Foi verificado que esses valores seriam superestimados. Mostrando, assim, a necessidade de estudos específicos para cada região e analisando as características intrínsecas a ela.

Além disso, os resultados da simulação mostram claramente que a eficiência energética do ônibus urbano pode ser significativamente melhorada por hibridização e eletrificação. Essa melhoria depende fortemente do grau de eletrificação, portanto, quanta energia elétrica pode ser usada para a operação do sistema. Os BEB e HEB apresentaram menor consumo de combustível, menor emissões e consumo energético, sendo o primeiro o mais benéfico.

Com a introdução de veículos elétricos, houve uma redução de até 30,2% no consumo de energia, e 46,3% nas emissões de CO<sub>2</sub>. Para os híbridos, é possível reduzir em até 18,8% no consumo de combustível, 24,4% no consumo de energia e 23% nas emissões de CO<sub>2</sub>.

A Fase de Uso influencia em 76,5% das emissões totais para os ônibus convencionais. Para os híbridos, é responsável por 75,6%. Para os elétricos, esse cenário muda, pois não há emissões durante essa fase. Para o consumo de energia, os valores são ainda maiores. A Fase de Uso é responsável por 87,3%, para o ICB, 90,2%, para o HEB, e 61% do consumo total de energia, para os BEB.

Além disso, para todos os casos foi possível observar que o ciclo de condução e o fato da rota ser segregada ou não, influenciam substancialmente nos valores dos consumos, para os horários de pico. Contudo, o sistema BRT, não se mostrou como sendo uma melhor alternativa para a inclusão dos ônibus elétricos e híbridos, pois foi o cenário com um dos menores ganhos quanto a redução nos consumos energéticos e emissões. Contudo, para qualquer cenário, os ônibus elétricos ainda são as melhores alternativas de redução nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Os três Cenários mais críticos foram Taguatinga, Ceilândia e Jardim Botânico, nessa ordem. Então, essas três rotas devem ser priorizadas se, futuramente, houver uma renovação na frota, incluindo ônibus elétricos e híbridos.

Os resultados positivos dos veículos elétricos e híbridos na dimensão ambiental sustentam a necessidade de políticas de incentivo ao uso dessa tecnologia no sentido de contribuir para uma redução dos impactos ambientais, relacionados a emissões de gases de efeito estufa, no setor de transportes. No caso do transporte público de passageiros, os ônibus elétricos, menos poluentes e com menor custo de manutenção, podem ser uma alternativa de transporte eficiente para cidades mais limpas.

Com o intuito de validar os resultados obtidos pelo estudo, os valores encontrados foram colocados em perspectiva com outros estudos de ciclo de vida observando-se o mesmo perfil de participação de cada fase e coerência de valores, embora não

possa haver, rigorosamente, uma comparação, uma vez que cada estudo segue uma metodologia e escopo diferente.

## **5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Por ser um trabalho pioneiro quanto ao ciclo de vida do sistema de transporte público em Brasília, não há, no país, incentivos ou ações facilitadoras para a realização das pesquisas. Por ser dependente da integração entre universidade – concessionária – governo, notou-se que essa parceria não acontece ou acontece pouco. Portanto, faz-se necessária uma integração entre os três setores citados, para que ambientes favoráveis a pesquisa sejam criados. Assim, novos estudos a respeito do ciclo de vida dos transportes pudessem ser realizados. Com isso, haveria um maior entendimento a respeito do assunto e, conseqüentemente, um maior empenho em ações que possam reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, houve também limitações na obtenção de dados reais na fase de extração e produção da matéria-prima para região de Brasília, sendo utilizados dados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

## **5.2 PESQUISA FUTURAS**

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Análise econômica de investimentos para a troca da frota, analisando a fundo se há a possibilidade de se ter um cenário de sustentabilidade no sistema de transportes do DF;
- Novos cenários devem ser propostos, com rotas e características diferentes às selecionadas;
- Novos estudos poderiam incluir outras fases não contempladas por esse, como a reciclabilidade e o fim de vida;
- Outros gases de efeito estufa poderiam ser incluídos, como NO<sub>x</sub>, material particulado, entre outros;

- Utilizar também a análise de fatores comportamentais que contribuem para as emissões de CO<sub>2</sub>;
- Em Brasília, há projetos de expansão do sistema de transporte público, como a inclusão de veículos leves sobre trilhos (VLT). Assim a análise sobre qual é o potencial de emissões evitada com implantação desses sistemas poderiam ser incluídos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC.V. **Quem somos?** Disponível em: <[http://www.abcvbrasil.org.br/?p=texto.php&c=quem\\_somos](http://www.abcvbrasil.org.br/?p=texto.php&c=quem_somos)>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- ABVE. **Ônibus elétrico da BYD já roda em Brasília com carroceria Marcopolo.**
- ANL. **The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation (GREET) model (model version 2016 v1.3. 0.13100; database version: 13098).** Disponível em: <<https://greet.es.anl.gov/>>. Acesso em: 8 jan. 2020.
- ANP. **Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/anuario-2019-fatores-de-conversao.pdf>>.
- ANTP. **Redução das Deseconomias Urbanas Com a Melhoria do Transporte Público. Revista dos Transportes Públicos,** 1999.
- ANTUNES, G. N. **Energy and environmental monitoring of alternative fuel vehicles.** [s.l.] Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2009.
- BALBIM, R.; KRAUSE, C.; LINKE, C. C. **Cidade e Movimento: Mobilidades e Interações no Desenvolvimento Urbano.** [s.l: s.n.].
- BLUMENSCHHEIN, R.; MILLER, K. **Análise do Ciclo de vida: conceitos e função.** [s.l: s.n.].
- BRTBRASIL. **BRT Brasil.** Disponível em: <<http://www.brtbrasil.org.br/index.php/brt-brasil/cidades-com-sistema-brt/menubrasilia#.XjNIjGhKjIU>>. Acesso em: 6 jan. 2020.
- BYD. **Chassi de ônibus D9W.** Disponível em: <[http://www.byd.ind.br/wp-content/uploads/2018/10/0618bc\\_c59801766fc14d68b19c73a6beedff44.pdf](http://www.byd.ind.br/wp-content/uploads/2018/10/0618bc_c59801766fc14d68b19c73a6beedff44.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2020.
- CAMAGNI, R.; CAPELLO, R.; NIJKAMP, P. Towards sustainable city policy: An economy-environment technology nexus. **Ecological Economics,** 1998.
- CAMPBELL, J. E.; LOBELL, D. B.; FIELD, C. B. Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol. **Science,** 2009.
- CETESB. **Relatórios de Emissões Veiculares no Estado São Paulo.** São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>>.
- CHESTER, M. V.; HORVATH, A.; MADANAT, S. Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions. **Atmospheric Environment,** 2010.
- CIDADES, Ministério DAS. **Curso Gestão Integrada da Mobilidade Urbana, Brasília.** Disponível em: <[http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2010/01/40 - Gestao Integrada mobilidade urbana\\_MCidades.pdf](http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2010/01/40 - Gestao Integrada mobilidade urbana_MCidades.pdf)>. Acesso em: 10 maio. 2019.
- CNT. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas consolidadas.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Rodoviario/1-5-1-/Transporte-publico-urbano>>.
- COONEY, G.; HAWKINS, T. R.; MARRIOTT, J. Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses. **Journal of Industrial Ecology,** 2013.

- COSTA, M. DA S. Um índice de mobilidade urbana sustentável. **[Tese de Doutorado]**, 2008.
- CUELLAR, Y.; BUITRAGO-TELLO, R.; BELALCAZAR-CERON, L. C. Life cycle emissions from a bus rapid transit system and comparison with other modes of passenger transportation. **CTyF - Ciencia, Tecnologia y Futuro**, 2016.
- CURRAN, M. A. A Brief History of Life-Cycle Assessment. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**, 2006.
- D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- D'AGOSTO, M. D. A.; OLIVEIRA, C. M.; ASSUMPÇÃO, F. D. C. Alternativas energéticas para o transporte público urbano no Rio de Janeiro: uma análise utilizando Inventário de Ciclo de Vida (ICV). **TRANSPORTES**, 2014.
- D'AGOSTO, M. DE A.; RIBEIRO, S. K. **Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009.
- DE CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. **Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidade**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1764>>.
- DE SOUZA, L. L. P.; LORA, E.E.S.; PALACIO, J.C.E.; ROCHA, M.H.; RENÓ, M.L.G.; VENTURINI, O.J. Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 2018.
- DENATRAN. **Estatísticas - Frota de Veículos - DENATRAN**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8552-estatísticas-frota-de-veículos-denatran.html>>.
- DREIER, D.; SILVEIRA, S; KHATIWADA, D; FONSECA, K.V.O.; NIEWEGLOWSKI, R.; SCHEPANSKI, R. Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2018.
- EL-SHAWARBY, I.; AHN, K.; RAKHA, H. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2005.
- EPD. **The International EPD System**. Disponível em: <<https://www.environdec.com/>>. Acesso em: 28 maio. 2019.
- EPE. **Balço Energético Nacional 2017: Ano Base 2016, Relatório Síntese**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- FARIA, R.; MARQUES, P.; MOURA, P.; FREIRE, F.; DELGADO, J.; DE ALMEIDA, A.T. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013.
- FERNANDES, V. A.; D'AGOSTO, M.A.; OLIVEIRA, C.M.; ASSUMPÇÃO, F.C.; DEVEZA, A.C.P. Eco-driving: uma ferramenta para aprimorar a sustentabilidade do transporte de resíduos urbanos. **Revista Transportes**, 2015.
- FILIZOLA, I. M.; YAMASHITA, Y.; VERAS, C. A. G. **Valores referenciais do nível de**

**emissão de gases de veículos automotores leves do ciclo Otto.** XIX Congresso ANPET, 2005

FREY, H. C.; ROUPHAIL, N.M.; ZHAI, H.; FARIAS, T.L.; GONÇALVES, G.A. Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 4, p. 281–291, 2007.

GUINÉE, J. **Handbook on life cycle assessment - Operational guide to the ISO standards** *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001.

HAWKINS, T. R.; SINGH, B.; MAJEAU-BETTEZ, G.; STRØMMAN, A.H. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. **Journal of Industrial Ecology**, 2013.

HENSHER, D. A. Sustainable public transport systems: Moving towards a value for money and network-based approach and away from blind commitment. **Transport Policy**, 2007.

HOOFTMAN, N.; OLIVEIRA, L.; MESSAGIE, M.; COOSEMANS, T.; VAN MIERLO, J. Environmental analysis of petrol, diesel and electric passenger cars in a Belgian urban setting. **Energies**, 2016.

HUERTAS, D. M. O papel do transporte rodoviário de carga em uberlândia, epicentro logístico do setor atacadista-distribuidor. **Sociedade e Natureza**, v. 26, n. 3, p. 445–458, 2014.

HUO, H.; WU, Y.; WANG, M. Total versus urban: Well-to-wheels assessment of criteria pollutant emissions from various vehicle/fuel systems. **Atmospheric Environment**, 2009.

IBICT. **Histórico da ACV**. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

IEA. **Tracking Clean Energy Progress 2013** *Technology*. [s.l.: s.n.].

IEA. **Key World Energy Statistics 2018**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2018>>.

IPCC. **AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)>.

ITDP. **Padrão de Qualidade BRT**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.itdp.org/library/standards-and-guides/the-bus-rapid-transit-standard/>>.

JANSSEN, R.; RUTZ, D.; HOFER, A.; MOREIRA, J.; SANTOS, S.; COELHO, S.; VELAZQUEZ, S. Bioethanol as sustainable bus transport fuel in Brazil and Europe. **18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, France**, n. May, p. 3–7, 2010.

LEGIFRANCE. **LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement - Article 228**. Disponível em: <<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434>>. Acesso em: 14 maio. 2019.

LIMA, M. F. **Externalidades do Transporte e a mobilidade urbana do Distrito Federal**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2014.

LIU, H.; XU, Y.A.S.; STOCKWELL, N.; RODGERS, M.O.; GUENSLER, R. A comparative life-cycle energy and emissions analysis for intercity passenger transportation in the U.S. by aviation, intercity bus, and automobile. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2016.

MA, H.; BALTHASAR, F.; TAIT, N.; RIERA-PALOU, X.; HARRISON, A. A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. **Energy Policy**, 2012.

MACLEAN, H. L.; LAVE, L. B. **Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies** *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003.

MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. **AEDEM International Conference**, 2017.

MATZER, C. ;WELLER, K.; DIPPOLD, M.; LIPP, S.; RÖCK, M.; REXEIS, M.; HAUSERGER, S. **Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1**. [s.l: s.n.].

MCKENZIE, E. C.; DURANGO-COHEN, P. L. Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2012.

MMA. **Compromisso pela Qualidade do Ar e Saúde Ambiental**. Brasília/ DF: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_arquivos/compromisso2\\_163.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/compromisso2_163.pdf)>.

MMA. **1º Inventário Nacional de Emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários foi apresentada pelo Ministério do Meio Ambiente**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf)>.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E.; VILHENA, A. **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações**. Campinas: [s.n.]. Disponível em: <[http://cetea.ital.sp.gov.br/arquivos/ACV\\_Principios e aplicacoes\\_2002.pdf](http://cetea.ital.sp.gov.br/arquivos/ACV_Principios_e_aplicacoes_2002.pdf)>.

NORDELÖF, A.; ROMARE, M.; TIVANDER, J. Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2019.

NTZIACHRISTOS, L.; MELLIOS, G.; TSOKOLIS, D.; KELLER, M.; HAUSBERGER, S. LIGTERINK, N. E.; DILARA, P. In-use vs. type-approval fuel consumption of current passenger cars in Europe. **Energy Policy**, 2014.

ORSI, F. ; MURATORI, M.; ROCCO, M.; COLOMBO, E.; RIZZONI, G. A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. **Applied Energy**, 2016.

OU, X.; ZHANG, X.; CHANG, S. Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. **Energy Policy**, 2010.

PDTT/DF. **Plano de Desenvolvimento do Transporte Público sobre Trilhos do Distrito Federal – PDTT/DF – Relatório Final**. Brasília/ DF: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.metro.df.gov.br/?page\\_id=40044](http://www.metro.df.gov.br/?page_id=40044)>.

PDTU/DF. **PDTU/DF – Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do DF e entorno**. Brasília/ DF: [s.n.].

PIRACICABANA. **Empresa comemora 5 anos no DF – Saiba o que mudou em 2018.** Disponível em:

<<http://www.piracicabanadf.com.br/index.php/2018/10/23/empresa-comemora-5-anos-no-df/>>. Acesso em: 8 jan. 2020.

RAKHA, H.; AHN, K.; TRANI, A. Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2004.

RIBAU, J. P.; SILVA, C. M.; SOUSA, J. M. C. Efficiency, cost and life cycle CO2 optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. **Applied Energy**, 2014.

RIBEIRO, S. K. **Transporte sustentável: alternativas para ônibus urbanos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

ROMERO, S. M. A.; ROMERO, R. R. DA; BRASIL, A. C. DE M. Influência do congestionamento e modo de condução, nas velocidades, consumos e emissões de um ônibus urbano. **TRANSPORTES**, v. 12, n. 2, jul. 2004.

SAITOH, T. S.; YAMADA, N.; ANDO, D.; KURATA, K. A grand design of future electric vehicle to reduce urban warming and CO 2 emissions in urban area. **Renewable Energy**, 2005.

SALDIVA, P. H. **Emissões de Poluentes Atmosféricos por Fontes Móveis e Estimativa dos Efeitos em Saúde na RMSP – cenário atual e projeções**. [s.l: s.n.].

SECRETARIA NACIONAL DE TRANSPORTE E DA MOBILIDADE URBANA. Manual de BRT Bus Rapid Transit. **Guia de Planejamento**, 2008.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg/>>.

SEMOB. **Notícias**. Disponível em: <<http://www.dftrans.df.gov.br/>>. Acesso em: 29 jan. 2020.

SHEEHAN, J.; CAMOBRECO, V.; DUFFIELD, J.; GRABOSKI, M.; SHAPOURI, H. Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus A Joint Study Sponsored by. **National Renewable Energy Laboratory US Department of Energy US Department of Agriculture**, 1998.

SILVA, C. P.; BRASIL, A. C. M. Avaliação do potencial de economia de energia e redução de emissões CO2 em um sistema de transporte público. **Revista Estudos e Pesquisas em Administração**, v. 4, n. 1, p. 124–141, 2020.

SILVEIRA, L. **Determinação de um Índice da Situação do Transporte como Elemento de Suporte ao Planejamento de Transporte com base em Método Semiótico para Determinação de Indicadores Sintéticos [Distrito Federal]** Brasília/ DF Programa de Pós-Graduação em Transportes. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. ENC/FT/UnB., , 2012.

SIMÕES, A. .; FARIAS, T. L.; CUNHA, F. J. **GISFROT II - Impact of an Integrated Drivers Training and Monitorization Scheme on Fleet Performance: a Case Study of Rodoviaria de Lisboa, SA**. Proceedings of European Transport Conference 2006. **Anais...AET Papers Repository**, 2006

SONG, Y. Y.; YAO, E.J.; ZUO, T.; LANG, Z.F. Emissions and fuel consumption modeling for evaluating environmental effectiveness of ITS strategies. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, 2013.

TEIXEIRA FERREIRA, D.; STAUDT, M.; FREITAS, N.M.; RAPOSO, E.O; FREITAS, N.M.S. Consumo e Sustentabilidade: uma abordagem a Pegada Ecológica no Ensino de Ciências Consumption and Sustainability: an approach the Ecological Footprint in science education. **Ix Enpec**, 2013.

THE CLUB OF ROME. **History**. Disponível em: <<https://www.clubofrome.org/about-us/history/>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

VAN MIERLO, J.; MESSAGIE, M.; RANGARAJU, S. **Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment**. Transportation Research Procedia. **Anais...2017**

VELANDIA VARGAS, J. E.; FALCO, D.G.; DA SILVA WALTER, A.; CAVALIERO, C.K.N; SEABRA, J.E.A. Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2019.

VOLVO. **Volvo 7900 Hybrid. Original language: German**. Disponível em: <<https://www.volvobuses.de/content/dam/volvo/volvo-buses/markets/germany/Brochure-Volvo-7900-Electric-Hybrid-DE-2016.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

WRI BRASIL. **BRT - Bus Rapid Transit**. Disponível em: <<http://wricidades.org/BRT>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

WRIGHT, L. **Bus Rapid Transit**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A\\_Sourcebook/SB3\\_Transit-Walking-and-Cycling/GIZ\\_SUTP\\_SB3b\\_Bus-Rapid-Transit\\_EN.pdf](https://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB3_Transit-Walking-and-Cycling/GIZ_SUTP_SB3b_Bus-Rapid-Transit_EN.pdf)>.

XU, Y.; GBOLOGAH, F.; LEE, D.Y.; LIU, H.; RODGERS, M.O.; GUENSLER, R.L. Assessment of alternative fuel and powertrain transit bus options using real-world operations data: Life-cycle fuel and emissions modeling. **Applied Energy**, 2015.

ZHANG, S.; WU, Y.; LIU, H.; HUANG, R.; YANG, L.; LI, Z.; FU, L.; HAO, J. Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses in Beijing. **Applied Energy**, 2014.

ZHOU, B.; WU, Y.; ZHOU, B.; WANG, R.; KE, W.; ZHANG, S.; HAO, J. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. **Energy**, 2016.