

EVELYN TÂNIA CARNIATTO SILVA

**ÔNIBUS ELÉTRICO – CAMINHOS PARA UM TRANSPORTE
SUSTENTÁVEL E MAIS EFICIENTE**

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
OUTUBRO - 2022

EVELYN TÂNIA CARNIATTO SILVA

**ÔNIBUS ELÉTRICO – CAMINHOS PARA UM TRANSPORTE
SUSTENTÁVEL E MAIS EFICIENTE**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura.
Orientador: Dr. Reginaldo Ferreira Santos
Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
OUTUBRO - 2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

CARNIATTO SILVA, EVELYN TÂNIA
Ônibus Elétrico - Caminhos para um transporte sustentável e mais eficiente. / EVELYN TÂNIA CARNIATTO SILVA; orientador Reginaldo Ferreira Santos; coorientador Carlos Eduardo Camargo Nogueira. -- Cascavel, 2022.
80 p.

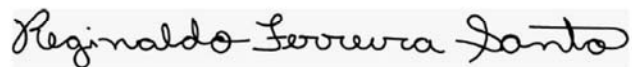
Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2022.

1. Mobilidade. 2. Sustentabilidade. 3. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável. 4. Sistema Energia Solar. I. Ferreira Santos, Reginaldo, orient. II. Camargo Nogueira, Carlos Eduardo, coorient. III. Título.

EVELYN TÂNIA CARNIATTO SILVA

Ônibus Elétrico - Caminhos para um transporte sustentável e mais eficiente.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia na Agroindústria e Agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maritane Prior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Luciene Kazue Tokura

Documento assinado digitalmente



OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR

Data: 01/08/2022 11:25:28-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Oswaldo Hideo Ando Junior
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Cascavel, 28 de julho de 2022

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”.

Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus que esteve trilhando e me mostrando os seus caminhos.

Meu agradecimento mais que especial a minha mãe professora Irene Carniatto, que esteve me auxiliando em todo o mestrado, lendo e corrigindo meus trabalhos e muitas vezes cuidando dos netos.

Ao meu esposo Juan Rodrigo que me apoiou imensamente e aos meus filhos que conseguiram assimilar essa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos, pelo direcionamento que tive para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA) bem como a Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) pela estrutura e suporte técnico para a execução deste trabalho

Aos amigos que caminharam comigo nesta jornada, espero profissionalmente poder contar com cada um de vocês, e que a amizade permaneça pelo resto da vida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Enfim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste estudo.

Muito obrigada.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)..... | 7 |
| Figura 2 – Diagrama Economia Linear e Circular..... | 8 |
| Figura 3 – Diagrama Economia Circular, Cidades Inteligentes e Mobilidade Sustentável..... | 9 |
| Figura 6: Taxa de urbanização da população brasileira (1940-2010). | 13 |
| Figura 8 - Mercado ônibus elétrico na China - HEB, FHEB, BEB..... | 18 |
| Figura 9 - Mercado europeu de ônibus elétrico..... | 22 |
| Figura 10: Evolução mercado para BEBs, HEBs, FCEBs e outros na Europa..... | 23 |
| Figura 11 - Classificação e nomenclatura das tecnologias de ônibus elétrico. | 25 |
| Figura 12 - Principais componentes envolvidos em cada tipologia da tecnologia de ônibus elétrico. | 26 |
| Figura 13 - Configuração HEB série..... | 27 |
| Figura 14 - A) Configuração mecanismo FCEB; B) Distribuição mecanismo FCEB. | 28 |
| Figura 15 - Configuração BEB..... | 29 |
| Figura 17 - Análise WTW para motores ICE, a combustão, tração movida por derivados de petróleo..... | 35 |
| Figura 18 - Análise WTW para motores elétricos BEV, tração movida por energia elétrica..... | 36 |
| Figura 21 - Gráfico análise poço à roda. | 39 |
| Figura 19 - Mapa linhas ônibus para transporte coletivo do município de Cascavel. | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 - Imagem dos corredores exclusivos para ônibus Cascavel. | 44 |
| Figura 21 – Emissão por tipologia de ônibus e tipo de combustível - GEE _{WTW} (gCO ₂ eq/km)..... | 49 |
| Figura 22 – Emissões por cenários para ODS. | 53 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Fabricantes e operadores de ônibus elétrico no Chile..... | 20 |
| Tabela 2: Análise das diferenças entre os três tipos de carregamento. | 34 |
| Tabela 4 - Descrição das linhas tronco para o ano 2019. | 45 |
| Tabela 5 - Quilometragem anual ônibus urbanos Cascavel – Pr. | 45 |
| Tabela 6 - Tipologia do transporte coletivo do município de Cascavel - PR. | 45 |
| Tabela 7 - Emissões GEE_{WTW_ICEB} <i>well-to-wheels</i> (gCO ₂ eq /km) por tipo de ônibus. | 47 |
| Tabela 8 - Emissões GEE_{WTW_ICEB} <i>well-to-wheels</i> (gCO ₂ eq /km) por frota. | 47 |
| Tabela 9 – Emissões GEE_{WTW_BEB} <i>well-to-wheels</i> por frota. | 48 |
| Tabela 10 – Emissões GEE por linha de ônibus do município de Cascavel – PR. | 51 |

CARNIATTO SILVA, Evelyn Tânia. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, outubro de 2022. **ÔNIBUS ELÉTRICO – CAMINHOS PARA UM TRANSPORTE SUSTENTÁVEL E MAIS EFICIENTE**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura - Mestrado. Professor Orientador: Dr. Reginaldo Ferreira Santos.

RESUMO

A necessidade de novas fontes energéticas e novas tecnologias vem aumentando mundialmente pela questão ambiental e a preocupação com as crises globais de energia. O Acordo de Paris sobre o Clima e as decisões da COP21 compeliu os países a explorarem tecnologias e produtos mais sustentáveis, limpos e zero carbono, conceitos reiterados em 2022, na COP26, que ocorreu na Irlanda. Este trabalho tem como principal questão a tendência mundial de mudança no modelo de tração à combustão para elétrico dos veículos, principalmente os modais ônibus, e intenta responder se esta é uma abordagem promissora para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS no cenário brasileiro, contribuindo assim na solução das mudanças climáticas. Neste estudo de caso, foi realizada uma pesquisa quantitativa de campo, na qual, apoiada em bibliografias relevantes, foram explorados os traçados das linhas de ônibus urbano do município de Cascavel – PR, Brasil, suas médias de quilometragem, emissão e eficiência energética em comparação com os ônibus elétricos utilizando o preceito de Poço a Roda ou Well-to-Wheels, foi possível realizar a análise das emissões comparando duas fontes energéticas para geração da energia motriz dos ônibus elétricos, a rede nacional de energia elétrica e um sistema fotovoltaico. Os resultados mostraram redução de 95,98% nas emissões em gCO₂eq/km utilizando energia elétrica da rede nacional, tomando como referência a matriz elétrica brasileira como predominantemente renovável e uma redução de 98,37% nas emissões em gCO₂eq/km, utilizando como fonte um sistema fotovoltaico, confirmando dessa forma, o potencial sustentável desses sistemas.

"Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001"

PALAVRAS-CHAVE: Mobilidade; Sustentabilidade; Sistema fotovoltaico; ODS – *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável*.

CARNIATTO SILVA, Evelyn Tânia. Western Paraná State University (UNIOESTE), October, 2022. **ELECTRIC BUSES – PATHWAYS TO A SUSTAINABLE AND EFFICIENT TRANSPORT**. Graduate Program in Energy Engineering in Agriculture - Master. Professor Orientador: Dr. Reginaldo Ferreira Santos.

ABSTRACT

The need for new energy sources and new technologies has been increasing worldwide due to the environmental issue and the concern with global energy crises. The Paris Climate Agreement, or the United Nations Climate Change Conference Paris 2015 (COP21), decisions compelled countries to explore more sustainable, clean and zero carbon technologies and products, being confirmed in 2021, at Climate Change Conference (COP26), which took place in Ireland. This research tries to answer whether the global main trend in the transport model from combustion to electric traction is a promising approach to achieve the Sustainable Development Goals - SDGs in the Brazilian scenario, which can contribute to the climate change solution. In this case study, a quantitative field research was carried out, in which, supported by relevant bibliographies, some indicators were explored as: urban bus lines in Cascavel city, Paraná, Brazil, their average mileage, emission and energy efficiency when compared to electric buses. The Life Cycle precept, also called Well to Wheels, was used to analyze emissions according to the driving force of buses and their energy sources. The results showed a 95.98% reduction in emissions in gCO₂eq/km using electricity from the national grid, taking as reference the Brazilian electricity matrix as predominantly renewable and a 98.37% reduction in emissions in gCO₂eq/km, using as a source a photovoltaic system. This confirms the sustainable potential of these systems to contribute to the solutions of the planetary climate emergency.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

Keywords: Mobility; Sustainability; Photovoltaic; ODS.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | VI |
| LISTA DE TABELAS | VIII |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Objetivos | 4 |
| 1.1.1. Objetivo geral | 4 |
| 1.1.2. Objetivos específicos..... | 4 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1. Mobilidade Urbana – Visão Geral..... | 6 |
| 2.2. Mobilidade Sustentável | 10 |
| 2.3. Mobilidade e Energia..... | 11 |
| 2.3.1. Caracterização do Transporte e seus Gastos Energéticos | 13 |
| 2.3.2. Mudanças Tecnológicas no Setor de Ônibus Elétrico | 17 |
| 2.3.2.1. Mobilidade na China..... | 18 |
| 2.3.2.2. Mobilidade no Chile – Santiago | 19 |
| 2.3.2.3. Mobilidade na Europa..... | 21 |
| 2.4. Tipologias Ônibus Elétrico..... | 24 |
| 2.4.1. Ônibus Híbrido – HEB | 26 |
| 2.4.2. Ônibus Célula de Combustível – FCEB..... | 27 |
| 2.4.3. Ônibus elétricos à bateria - BEB | 29 |
| 2.4.3.1. Autonomia | 30 |
| 2.4.3.2. Carregamento | 31 |
| 2.5. Análise de Emissões - "Poço a Roda" | 35 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 37 |
| 3.1. Descrição do problema..... | 37 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 3.2. Metodologia..... | 38 |
| 3.3. Estudo de Caso..... | 42 |
| 3.4. Cenários..... | 46 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 47 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 55 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 57 |

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade integra a base estrutural do sistema produtivo e o cotidiano das pessoas, como tal envolve uma série de fatores e processos distintos que, ao mesmo tempo, englobam não apenas o sistema de transportes, mas também a gestão pública desses espaços, interagindo com a forma urbana, as interações espaciais e inclusive dinâmicas demográficas específicas como a estrutura familiar, migração, ciclo vital, entre outras (CRESSWELL, 2006; URRY, 2016).

As cidades atuais são sistemas complexos onde o indivíduo tem que realizar mais deslocamentos e viagens mais longas para suprir suas necessidades diárias (WILHEIM, 2015; SAGARIS; ARORA, 2016). O transporte motorizado surge como um importante instrumento no desenvolvimento urbano das cidades.

Os sistemas de transporte públicos coletivos municipais e metropolitanos representam 59% dos deslocamentos nas cidades com mais de 60 mil habitantes no Brasil, sendo 53% feitos por ônibus e 6% por sistemas metroviários e 14% dos deslocamentos feitos por automóveis e motocicletas, além dos outros modais como aviões e navios (ICS, 2020, NTU, 2019).

O setor de transportes motorizados, segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2022, destaca-se como o maior consumidor da matriz energética do Brasil, sendo que 50% de seu abastecimento tem origem nas fontes não renováveis de energia, derivados do Petróleo (EPE, 2022). O resultado é que o setor de transportes é o primeiro emissor de gases de CO₂ do setor energético brasileiro, representando 48% do total, segundo o Sistema de Estimativa de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2019). Apesar da implantação de programas de redução de emissões, utilizando novas tecnologias, como catalizadores, o grande aumento no número de automóveis dobrou as emissões de 2010 a 2020 (CARVALHO, 2016).

É nesse sentido que a eficiência de recursos de diferentes padrões de assentamento está sujeita a grandes variações com referência a, pelo menos, recursos terrestres do solo (para usos residenciais) e recursos energéticos (para usos de mobilidade), sendo esses recursos naturais bastante escassos. Assim, as tecnologias e estilos de consumo, bem como os modelos de assentamentos e a maneira como as atividades humanas são organizadas no espaço urbano são importantes campos de pesquisa cruciais, haja visto que se constituem como fontes

de preocupação, no que diz respeito ao equilíbrio ecológico (CAMAGNI; GIBELLI; RIGAMONTI, 2002).

Um dos principais desafios globais no século XXI é confrontar-se com os problemas ambientais e mudanças climáticas causados pela forma que planejamos e executamos nossos processo e sistemas energéticos. (KEIRSTEAD; JENNINGS; SIVAKUMAR, 2012).

O acordo de Paris, também chamado de Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima estabeleceu como objetivos, fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima, no contexto do desenvolvimento sustentável e dos esforços de erradicação da pobreza, incluindo:

- (a) Manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e envidar esforços para limitar esse aumento da temperatura a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e os impactos da mudança do clima;
- (b) Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos da mudança do clima e promover a resiliência à mudança do clima e um desenvolvimento de baixa emissão de gases de efeito estufa, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos; e
- (c) Tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento de baixa emissão de gases de efeito estufa e resiliente à mudança do clima (UNDP, 2015).

O sistema de transporte é um dos principais pretendentes a uma abordagem sustentável, abrangendo questões sociais, econômicas e ambientais procurando alcançar acessibilidade, segurança, eficiência, viabilidade econômica, minimizando emissões e outros impactos ambientais (KARJALAINEN; JUHOLA, 2021; SDOUKOPOULOS et al., 2019; KEIRSTEAD; JENNINGS; SIVAKUMAR, 2012). As práticas implantadas estão em desacordo com essas definições, os métodos e políticas utilizados não tem uma forma abrangente do conceito de sustentabilidade (MARSDEN; RYE, 2010). Necessitamos de políticas que desenvolvam uma mudança do paradigma tecnológico vigente e contribua para o equilíbrio do clima da Terra, a melhora da qualidade do ar e da qualidade de vida das pessoas.

Vários países têm se utilizado da estratégia de implantação dos veículos elétricos para reduzir suas emissões de CO₂, segundo a IEA – Internacional Energy Agency (2018), os ônibus elétricos em circulação no mundo chegam a 600.000 unidades, cerca de 12% dos ônibus urbanos, a maioria deles implantados na China, mercado crescente também na Europa ocidental e na Polônia, seguido pelo Norte

Americano e Índia. Os países Sul-Americanos ainda possuem uma baixa participação no mercado de ônibus elétricos, apesar de a cidade de Santiago no Chile abrigar a maior frota de ônibus urbanos elétricos, 10% da sua frota (BLOOMBERGNEF, 2020, LABMOB, 2022).

Com os avanços tecnológicos das baterias, maiores alcances, menores custos e a recuperação de energia (frenagem regenerativa), bem como as estratégias de carregamento, os ônibus elétricos à bateria (BEBs) têm se mostrado como opção estratégica no cenário urbano reduzindo a poluição do ambiente urbano, a poluição sonora e melhorando a eficiência energética, porém seu resultado ambiental está intimamente relacionado com a origem da energia (DU et al., 2019; LAJUNEN; LIPMAN, 2016; ZHOU et al., 2016).

O Brasil apresenta um grande potencial para o mercado das energias renováveis (SILVA; MARCHI NETO; SEIFERT, 2016), no estado do Paraná a energia solar é a segunda em potencial gerador de energia de origem renovável (POD, 2018). A produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos, com a implementação da geração distribuída, tem alcançado forte crescimento, mesmo com maioria ainda de uso residencial (ANEEL, 2019). Ainda, o uso de sistemas fotovoltaicos está intrinsicamente ligado a geração distribuída, porém o uso de sistemas off-grid para abastecimento dos ônibus elétricos tem sido estudado em vários países, pois as baterias dos ônibus poderiam fornecer um banco de armazenamento de energia compensatório através de controles de automação entre o sistema e o BMS das baterias, aliando uso exclusivo de fontes renováveis e eficiência energética (ZHUANG; LIANG, 2021; WORLD BANK, 2020; TRAN et al., 2019;).

A implantação dos veículos elétricos (ônibus) tem sido considerada muito lenta no Brasil, a falta de apoio das políticas governamentais e falta de investimento em infraestrutura tem sido o principal motivo dessa situação (LI et al., 2016), hoje menos de 1% da frota dos ônibus no Brasil são elétricos (LABMOB, 2022), seu número se restringe a poucos exemplares de testes. Existem muitas barreiras ainda para implantação dos ônibus elétricos nos municípios brasileiros, desde leis municipais para compras, fornecedores de insumos, mão de obra especializada e redes de energia impróprias.

Desta forma surge a seguinte hipótese de estudo: A busca por uma mobilidade mais sustentável alcançada pela mudança na matriz energética do transporte coletivo, sendo a utilização de combustíveis renováveis (energia solar) em substituição aos fósseis (diesel), esta pesquisa apresenta um estudo ambiental estratégico de alternativas e cenários para migração do transporte público baseado em combustíveis fósseis para uma alternativa com baixa emissão de carbono, servindo de indicador de desempenho tendo como horizonte as metas do Acordo de Paris COP21 e a COP26, apontando mudanças no que se refere à forma como utilizamos a energia para os ônibus urbanos e como essas mudanças interferem na orientação de ações e investimentos para uma cidade, pautada nos conceitos de sustentabilidade.

Para realização desse estudo, utilizou-se o método de análise Poço à Roda para determinar as estimativas de emissões de carbono equivalente aplicadas para os ônibus elétrico no município de Cascavel no Paraná, Brasil com fonte de energia primária renovável – fotovoltaica e suas emissões, considerando desde a extração de recursos até a propulsão do veículo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Apresentar uma investigação técnica dos parâmetros de emissão numa análise poço a roda para ônibus elétrico, utilizando o sistema energético solar como fonte e possíveis cenários, para migração do transporte público baseado em combustíveis fósseis, para uma alternativa com baixa emissão de carbono, direcionado para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

1.1.2. Objetivos específicos

- Examinar a situação geral do setor de transportes coletivo urbano, suas características e as tendências internacionais das mudanças tecnológicas do setor;
- Apresentar os parâmetros técnicos dos ônibus elétricos;
- Elaborar uma análise comparativa de emissão de CO₂ na substituição dos ônibus diesel pelo ônibus de tração elétrica utilizando o método Poço à Roda;

- Discutir a alteração da fonte de energia motriz dos ônibus elétricos fora da rede de distribuição para alcançar uma mobilidade mais sustentável e tecnológica;
- Discutir a mudança do transporte público baseado em combustíveis fósseis, para uma alternativa com baixa emissão de carbono, direcionado para o alcance das metas do Acordo de Paris COP21 e a COP26 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, orientando futuras mudanças, o planejamento e os investimentos para uma cidade pautada nos conceitos de sustentabilidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mobilidade Urbana – Visão Geral

Nas últimas décadas o esgotamento de recursos, as mudanças climáticas e a internet (indústria 4.0) têm levado os governos e a sociedade a repensarem sua forma como utilizam e concebem seus produtos, bem como a sua relação com o meio. Acordos políticos internacionais, empresas e a academia vêm adotando práticas sustentáveis como pré-requisito para contratos e acordos (SADHUKHAN et al., 2020). Dentro deste novo mercado a sustentabilidade se destaca como pré-requisito para tomada de decisões e vantagens para implementações de políticas públicas. Rashed e Shah (2020) apontam as empresas e startups como stakeholders críticos, capazes de acelerar a implementação de novas tecnologias e processos baseados nas práticas sustentáveis.

As discussões sobre a sustentabilidade têm início na década de 70 por grupos e comissões organizadas principalmente pela Organização das Nações Unidas – ONU, decorrentes da crescente preocupação sobre a forma como o consumo e o desenvolvimento tem afetado a biosfera do planeta. Desta maneira, o conceito de sustentabilidade foi determinado como o “desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas necessidades” (UNDP, 1987).

O desenvolvimento sustentável requer o equilíbrio entre o atendimento das necessidades humanas e a proteção do meio ambiente, buscando equidade ambiental, social e econômica, demandas conhecidas como os três “E” da sustentabilidade (CARVALHO, 2016).

Em 25 de setembro de 2015, a Agenda de Desenvolvimento Sustentável de 2030 foi acordada e adotada pelas Nações Unidas e assinada por vários países, incluindo o Brasil. Essa agenda consiste em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas (Figura 1), uma estratégia interligada para a promoção de práticas e soluções sustentáveis que abordam os principais problemas enfrentados pela nossa sociedade (ONU, 2022).



Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Fonte: ONU - Brasil, 2022.

As diretrizes mundiais como a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, o Acordo de Paris e outros tratados exigem que tanto produtores quanto consumidores devem reduzir seus impactos nas mudanças climáticas e as cidades aparecem como principais fontes de soluções e desafios ambientais no mundo (ONU, 2017). As cidades são a chave no combate aos impactos ambientais e sociais negativos, pois hospedam mais da metade da população mundial e são responsáveis por três quartos do consumo global de energia (BATTY, 2008), resultando em uma cultura de consumo, chamada por alguns autores de economia linear, onde a matéria prima é extraída, consumida e descartada, fazendo uso da energia indiscriminadamente e descartando recursos recuperáveis (SADHUKHAN et al., 2020).

Dentro deste contexto de uma crise ambiental mundial, um novo conceito de economia vem ganhando espaço nas discussões mundiais, uma nova maneira de pensar, refletir e analisar a economia que vivemos, o conceito de “Economia Circular”.

Economia circular é o conceito que expressa uma mudança no paradigma de como a sociedade se inter-relaciona com o meio e propõe a prevenção do esgotamento dos recursos, “reutilizando, reciclando e recuperando”, “fechando ciclos” de energia e materiais nos processos de produção, distribuição e consumo. Essa mudança de pensamento, de “mindset”, segundo Kate Raworth (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017) tem sua abrangência mundial (global), levando em

consideração que a humanidade tem uma única “casa” onde todos são corresponsáveis (Figura 2).

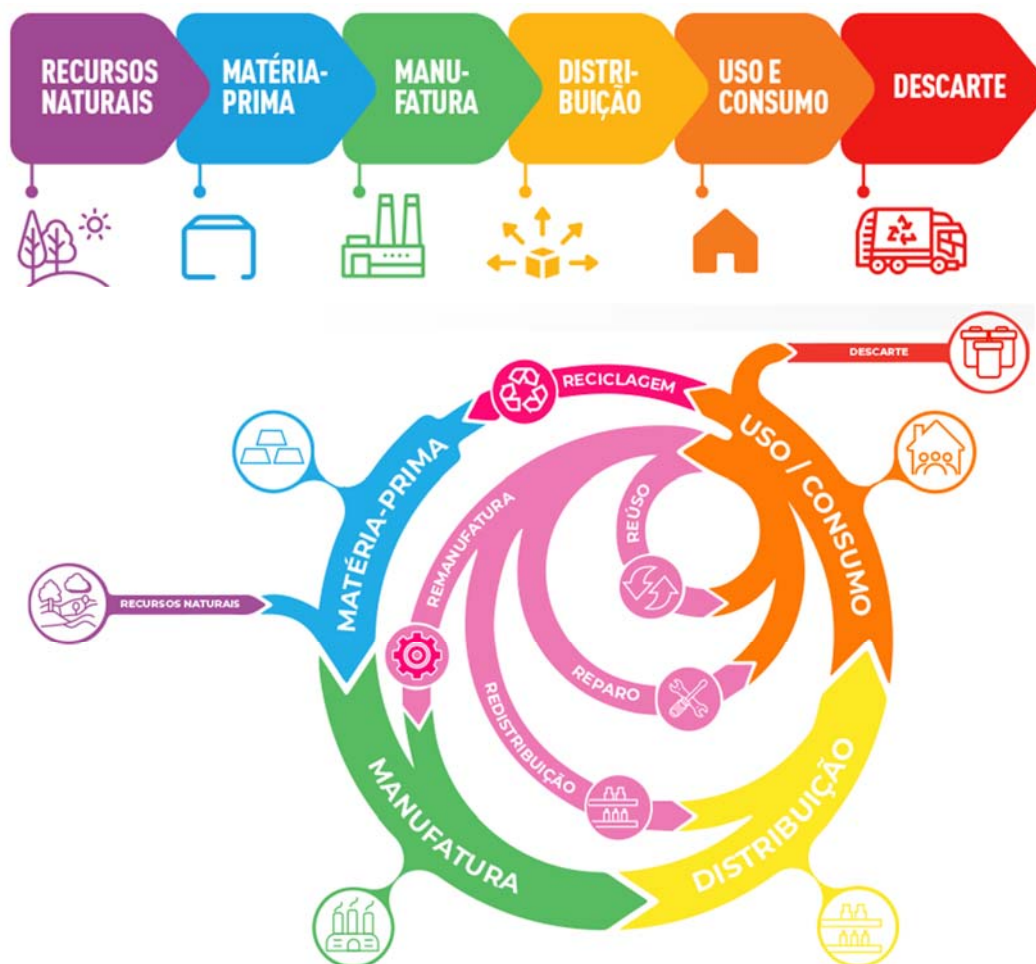


Figura 2 – Diagrama Economia Linear e Circular.

Fonte: Ideia Circular, 2022.

Segundo Kirchherr, Reike e Hekkert (2017), a economia circular possui três níveis de implementação que pode ser micro (empresas e consumidores), meso (distritos industriais) a macro (cidade, região, nação). Em uma economia circular as cidades (nível macro) ou o que a literatura chama também de cidade circular tem como conceito o desenvolvimento sustentável, regenerativo e acessível do sistema urbano, e visa eliminar o conceito de desperdício, o equilíbrio entre o bem-estar de sua população e aumentar a sua resiliência quanto às mudanças climáticas (ONU, 2017; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017), para isto requer uma abordagem global multinível e multiescalar para o desenvolvimento da inovação em políticas, governança, modelos de negócios e sistemas de financiamento que viabilizem sua implantação. Ellen MacArthur Foundation (2017) destacou o papel significativo dos

novos modelos de negócios como um facilitador na transição para a economia circular, ou seja, para atingir tal modelo são necessárias mudanças na forma como a sociedade pensa, legisla, produz e consome.

Embora a discussão sobre os benefícios do modelo de economia circular esteja em discussão há vários anos, foi apenas nos últimos anos que esse modelo tem ganhado força; o comportamento do consumidor (por exemplo, escolha de um serviço em detrimento da posse de um bem) juntamente com o surgimento de novas tecnologias impulsionadas pela internet, mobilidade, rastreamento etc., estão contribuindo para alcançar a economia circular, a sustentabilidade e as metas dos ODS, ancorados na conexão de tecnologias inovadoras e novos modelos de negócios. (DANTAS et al., 2021)

Os avanços recentes das tecnologias digitais têm o poder de apoiar a transição para uma economia circular e o desenvolvimento sustentável ao aumentar radicalmente a virtualização, desmaterialização, transparência e inteligência gerada por ciclos de retroalimentação. A tríplice associação desses conceitos (Figura 3) emprega uma combinação entre coleta de dados, processamento e disseminação de tecnologias para promover qualidade de vida nas cidades que podem incluir, entre outros: serviços públicos, saúde, transporte e entretenimento (GHARAIBEH et al., 2017).

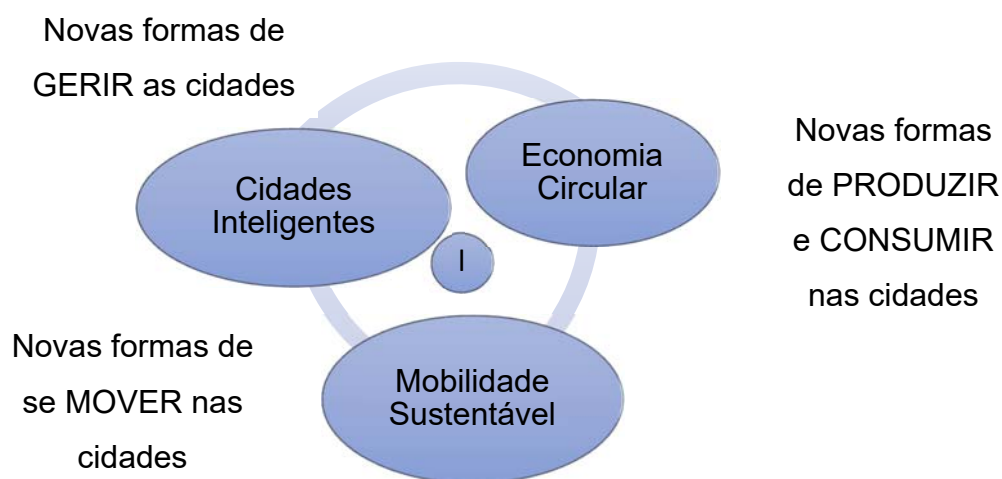


Figura 3 – Diagrama Economia Circular, Cidades Inteligentes e Mobilidade Sustentável.

A Economia Circular (CE) e a mobilidade podem ser associadas na busca de cidades sustentáveis e na contribuição para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), que é um pacto global de chamada às ações e metas para o desenvolvimento sustentável

das nações, contribuindo para o ODS 12 – Consumo e produção responsáveis, ODS 13 – Ação Climática, ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis, baseando-se na ação no domínio do ODS 7 – Energia Limpa e Acessível (LEAL FILHO, et al., 2021).

2.2. Mobilidade Sustentável

O Conceito de mobilidade sustentável tem como base o início das discussões da sustentabilidade na mobilidade urbana. O tema da mobilidade sustentável engloba temas como poluição do ar, acessibilidade, integração de tipologias de transporte, eficiência e eficácia no serviço dentro da esfera dos transportes e como ele se inter-relaciona com o meio ambiente, a sociedade e a economia.

O conceito de sustentabilidade é inserido no planejamento urbano pelo Ministério das Cidades, nos anos 2000, iniciando o debate da mobilidade urbana sustentável. Definindo-o como:

O resultado de um conjunto de políticas de transporte e circulação que visa proporcionar o acesso amplo e democrático ao espaço urbano, através da priorização dos modos não-motorizados e coletivos de transporte, de forma efetiva, que não gere segregações espaciais, socialmente inclusiva e ecologicamente sustentável. Ou seja; baseado nas pessoas e não nos veículos (BRASIL, 2007).

É possível analisarmos a mobilidade urbana sustentável como a procura do equilíbrio entre o atendimento das necessidades humanas e a proteção do meio ambiente, assim ao prever as necessidades humanas subentende que a mobilidade urbana e seus serviços seja disponível e conciliável com as demandas da população atual e futura, sem prejudicar a demanda das gerações futuras (CARVALHO, 2016).

Para uma mobilidade considerada sustentável, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e o Centre for *Sustainable Transportation* (CST), estabeleceu os temas abordados para o desenvolvimento de um sistema de transporte que atendam aos critérios de sustentabilidade: nas dimensões ambiental, social e econômica (Figura 4).

| Dimensão | Características |
|-----------|--|
| Ambiental | Minimiza as atividades que causam problemas de saúde pública e danos ao meio ambiente; Reduz a produção de ruídos; Minimiza o uso do solo; Limita os níveis de emissões e resíduos dentro daqueles que o planeta possa absorver; Utilize recursos renováveis; Potencializa fontes de energia renováveis: e Reutiliza e recicla seus componentes. |
| Social | Provê acesso a bens, recursos e serviços de forma a diminuir as necessidades de viagens; Opera com segurança; Assegura o movimento seguro de pessoas e bens; Promove equidade e justiça entre sociedade e grupos; Promove equidade intragerações. |
| Econômica | Possui tarifa acessível; Opera de forma eficiente para dar suporte à competitividade econômica; Assegura que os usuários paguem o total dos custos sociais e ambientais devido às suas opções pelo modo de transporte. |

Figura 4 - Planejamento da mobilidade urbana sustentável sob três pilares: econômica, social e ambiental.

Fonte: SUMMA, 2004.

Os sistemas de transporte urbano sustentável abordam questões sociais, econômicas e ambientais de maneira equilibrada e promovem acesso, acessibilidade, segurança, equidade, eficiência e viabilidade econômica, ao mesmo tempo em que minimizam suas emissões e outros impactos ambientais (KARJALAINEN; JUHOLA, 2021; SDOUKOPOULOS et al., 2019).

2.3. Mobilidade e Energia

O processo de urbanização no Brasil manteve-se acelerado e apresentou situações de grande diversidade e heterogeneidade no território nacional, nas duas últimas décadas (CARVALHO, 2016). O histórico brasileiro registra que até a década de 1930 o foco estava na agro exportação. Nas décadas de 40 e 50 o Brasil começa a sofrer um acelerado movimento de industrialização e conseqüente urbanização (Figura 5).






| Período | Momento Histórico | Descrição do Período |
|------------------|--|---|
| Até 1930 |  | Foco na agro exportação. |
| A partir de 1940 |  | Ascensão da burguesia, o que influenciou o setor político a investir em infraestrutura nas cidades com o objetivo de aumentar a produção nacional e substituir importações, iniciando a transição da população do meio rural para as cidades, mas ainda de forma lenta. |
| A partir de 1950 |  | Dependência do setor externo para importação de bens de capital e produção de bens duráveis nacionalmente, o que inicia de fato o processo de industrialização e consequente urbanização. |
| A partir de 1950 |  | Financiamento do mercado habitacional pelo Sistema Financeiro de Habitação (SFH) e Banco Nacional de Habitação (BNH) de forma prioritária às classes médias e altas em detrimento a maior parte da população que buscava moradia nas cidades entre os anos 60 e 80, ampliando a desigualdade entre os moradores das cidades, expandindo a pobreza em áreas periféricas e urbanizando os grandes centros e bairros nobres. |
| 1980-1990 |  | Recessão econômica descortinou os problemas criados com o não enfrentamento das questões da função social da propriedade, gerando um período de crise urbana de ordem social e ambiental. |

Figura 5 - Cronologia histórica da urbanização brasileira (1930-1990).

Fonte: Adaptado Maricato (2000).

Políticas públicas de habitação elitizadas provocaram nas cidades bolsões de pobreza e o início da favelização, segregando uma parte dos trabalhadores e pobres em áreas mais afastadas dos centros urbanos. O crescimento populacional do Brasil foi inversamente proporcional em relação à população urbana e rural. Enquanto em 1940 a população urbana era de 31%, em 2010 passou a representar um total de 84% da população brasileira (Figura 6).

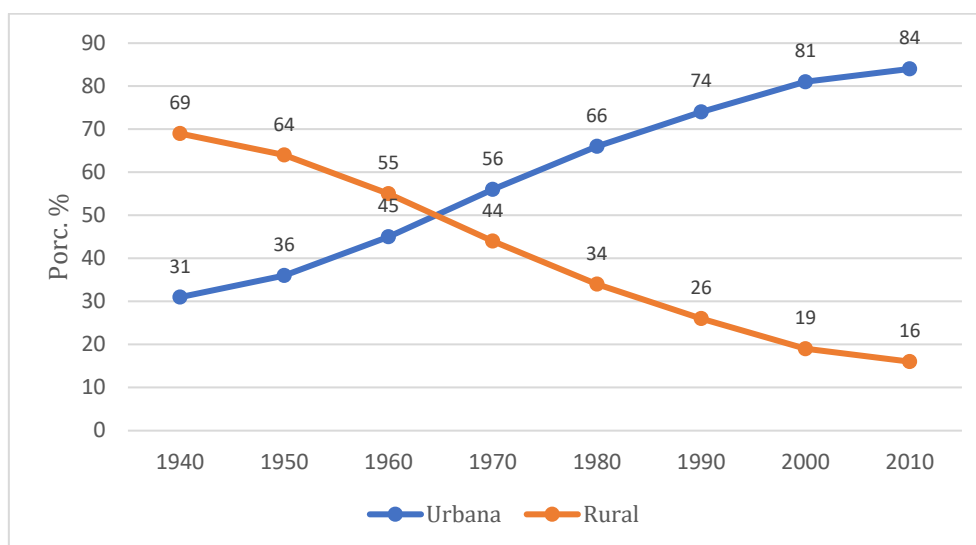


Figura 6: Taxa de urbanização da população brasileira (1940-2010).
Fonte: Adaptado IBGE, 2010.

As médias populacionais e as cidades brasileiras cresceram exponencialmente, juntamente com políticas de industrialização e progresso vinculadas a motorização veicular formataram o tráfego de veículos intenso que temos nas médias e grandes cidades brasileiras. (IBGE, 2010). O alargamento do perímetro urbano intensificou o tráfego nas grandes cidades devido às necessidades de acesso ao trabalho e serviços urbanos, causando diversos problemas de mobilidade nos grandes centros urbanos (GÖSSLING; SCHRÖDER; SPÄTH; FREYTAG, 2016).

O governo federal em busca de soluções para os problemas de mobilidade apresentados nas cidades brasileiras, propôs a Lei de Diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana - Lei no 12.587 (BRASIL, 2012) que vem consolidar a Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável (PNMUS), instituída pelo Ministério das Cidades. Ela traz em seu escopo a preocupação da melhoria das condições de mobilidade e acessibilidade nas cidades, tentando trazer novamente a escala da pessoa, do morador, implementando soluções mais sustentáveis, criativas e até controversas, como os pedágios urbanos, utilização de bicicletas e modais complementares, priorização do transporte público, obras de revitalização, entre outras (BRASIL, 2012).

2.3.1. Caracterização do Transporte e seus Gastos Energéticos

A frota brasileira de veículos tem crescido sistematicamente, em 2019 a frota cresceu 2,5% comparado ao ano de 2018, sendo contabilizadas 45,9 milhões de unidades circulantes, entre automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus. O transporte por motocicletas também obteve um incremento de 0,6% na quantidade de unidades em circulação, registrou-se 13,1 milhões de unidades em vias públicas no mesmo ano (SINDIPEÇAS, 2020).

O modo rodoviário tem experimentado uma alteração em seus padrões, no entanto ainda se constitui como a maior atividade de transporte de passageiros no país, responsável por 92% da atividade, em decorrência da “queda da atividade de

transporte por ônibus, aumento da taxa de motorização e entrada de novos atores (ride-sharing, ride-hailing, etc.)” (NTU, 2019).

O setor de transportes é o maior consumidor mundial de combustíveis derivados de petróleo, sendo responsável por 57% da demanda global de petróleo (CAZZOLA; SCHUITMAKER, 2016). Cerca de 20% do uso final de energia no mundo e 15% das emissões antropogênicas globais originários de atividades de transporte (IEA, 2018). Além disso, em virtude do rápido processo de urbanização, que tende a cobrir 70% da população global até 2050 (ONU, 2019). Esse fator demográfico, em conjunto com a industrialização e o desenvolvimento agrícola, tende a levar à níveis mais altos de uso de energia do setor de transportes (FLÓREZ-ORREGO; SILVA; OLIVEIRA JUNIOR, 2015).

Em 2021, o setor de transportes no Brasil consumiu 85,1 milhões de toneladas de óleo equivalente (Mtep), 32,5% da demanda nacional ofertada de energia, logo o setor de transportes, destaca-se como o maior consumidor da matriz energética do Brasil, com 77% de seu consumo de combustíveis oriundos de fontes não renováveis de energia, derivados do petróleo (EPE, 2022).

O subsetor rodoviário atingiu 94% do consumo total de energia no setor de transportes e tornou-se o maior consumidor de energia por subsetor. Quase metade da energia utilizada no país serve o setor de transportes e vem do óleo diesel (45,1%), seguido pela gasolina (26%) e pelo etanol (17,4%) (EPE, 2022).

Os sistemas de transporte públicos coletivos municipais e metropolitanos representam 28% dos deslocamentos nas cidades com mais de 60 mil habitantes no Brasil, sendo 85,91% feitos por ônibus e 13,06% por sistemas metroviários e 30% dos deslocamentos feitos por automóveis e motocicletas (NTU, 2019) e segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2022, destaca-se como principal consumidor da matriz energética do Brasil, sendo que 77% de seu abastecimento tem origem nas fontes não renováveis de energia, derivados do Petróleo (EPE, 2022). O resultado é que o setor de transportes é o primeiro emissor de gases de CO₂ do setor energético brasileiro, representando 48% do total, segundo o Sistema de Estimativa de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2019). Apesar da implantação de programas de redução de emissões, utilizando novas tecnologias, como catalizadores, o grande aumento no número de automóveis dobrou as emissões de 2010 a 2020 (CARVALHO, 2016).

Segundo SEEG (2019) as emissões totais de CO₂ do setor de energia, provenientes da produção ou do uso de combustíveis, emitiu 413,7 MtCO₂, o que representam 19% do total nacional, 1.388.519.254 de toneladas em 2019, das quais 196,5 MtCO₂ e 47% de toda emissão por energia foram produzidas pelo setor de transportes.

A humanidade sempre priorizou seus sistemas energéticos em função de sua disponibilidade técnica, conforto e viabilidade econômica. Nas últimas décadas tem-se uma crescente preocupação com a sustentabilidade energética e a escassez dos recursos energéticos e seus impactos no ecossistema e como planeja-se os processos, ao longo de toda sua cadeia produtiva e ciclo de vida. Um dos principais desafios no século XXI é a ruptura da dependência dos recursos fósseis pela efetiva incorporação dos recursos energéticos renováveis e de baixa emissão de carbono. Nesse contexto, tem-se um movimento mundial (Agenda 2030) pela busca de um consumo energético e uma matriz energética limpa primando pela sustentabilidade energética, com ações como a busca por alternativas de mobilidade urbana para os grandes centros. Dentre as quais destacam-se os sistemas de transporte público visando promover maior inclusão social, redução nos níveis de poluentes nas cidades e disponibilizar uma opção de mobilidade eficiente e acessível as populações urbanas (KARJALAINEN; JUHOLA, 2021, SDOUKOPOULOS et al., 2019, KEIRSTEAD; JENNINGS; SIVAKUMAR, 2012).

A falta de apoio das políticas governamentais e infraestrutura para os veículos elétricos (ônibus) resultou em uma substituição lenta das frotas no Brasil (LI, 2016), hoje ainda em implantação inicial, os ônibus elétricos representam menos de 1% da frota dos ônibus brasileiro (LABMOB, 2022). Diversas barreiras prejudicam o desenvolvimento desse mercado no Brasil; desde leis municipais para compras, fornecedores de insumos, mão de obra especializada e redes de energia impróprias.

Segundo Silva, Marchi Neto e Seifert (2016), o Brasil se apresenta grande potencial para o mercado das energias renováveis como fonte de abastecimento para esses veículos, dispondo de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica (53,4%), eólica (10,6%), biomassa (8,2%) e solar (2,5%) da oferta interna (Figura 7). Juntas as fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da

soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2022).

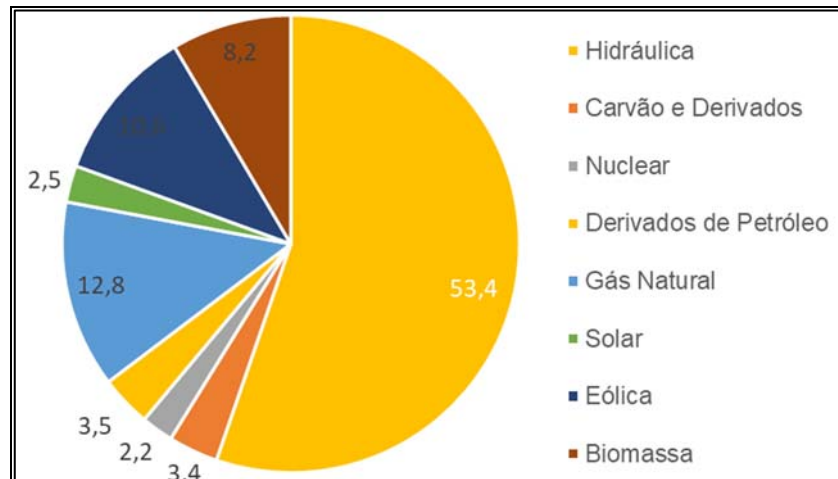


Figura 7 - Matriz elétrica brasileira.

Fonte: EPE, 2022.

Assim, percebe-se que todas as melhorias alcançadas pelo setor de transportes vão impactar favoravelmente a economia energética nacional, bem como mitigar os impactos ambientais produzidos ao longo das diferentes cadeias de abastecimento e uso final dos combustíveis veiculares.

Portanto é importante o estudo de metodologias que avaliem e comparem de forma racional o desempenho das cadeias de produção e uso final do combustível veicular, bem como a priorização das fontes de energia mais ecologicamente corretas (MANZOLLI, 2020).

Neste cenário surgiu a tecnologia dos automóveis híbridos e elétricos, que ao contrário do que muitas pessoas acreditam, não representa uma inovação tecnológica recente. Embora haja certamente avanços tecnológicos importantes nos veículos elétricos atuais, como as baterias de íon de lítio e toda a tecnologia digital presente nos carros modernos, em essência o conceito básico se mantém. Ou seja, não houve mudanças radicais nos motores elétricos de hoje, nem mesmo na utilização da energia cinética gerada pelo movimento do veículo.

2.3.2. Mudanças Tecnológicas no Setor de Ônibus Elétrico

Reafirmando a tendência mundial de eletrificação dos carros elétricos, segundo o relatório Perspectiva Global de EV da Agência Internacional de Energia (IEA, 2022) o número de carros, vans, ônibus e caminhões ultrapassa 10 milhões de unidades globais em 2021, com previsão de 145 milhões em 2030, chegando a aproximadamente 10% do total. Somente no ano de 2021, cerca de 5 milhões de unidades foram vendidos no mundo, em comparação com o ano anterior (2020) houve um aumento de mais de 50% nas vendas. A Europa vem crescendo em aquisições de novos veículos com 5,5 milhões de novos registros. Juntos, a China e a Europa responderam por mais de 85% das vendas globais de carros elétricos em 2021, seguidas pelos Estados Unidos (10%), onde mais que dobraram em relação a 2020, chegando a 630.000 veículos (IEA, 2022).

Os veículos pesados também crescem em número globalmente, segundo a IEA (2022), os ônibus elétricos em circulação no mundo chegam a 670.000 de unidades, cerca de 4% dos ônibus urbanos, a maioria deles implantados na China e os caminhões elétricos 66.000 unidades.

Entre as principais motivações para o crescimento dos veículos elétricos podemos ressaltar as estruturas regulatórias de subsídios, políticas de redução de emissões de CO², políticas de segurança energética diversificando a matriz energética e reduzindo o uso de petróleo, bem como a própria expansão das tecnologias para mobilidade elétrica que acarretaram a redução de custos de baterias e consequentemente redução do valor dos veículos (TUTTLE, 2012; BALDICK, 2012).

Como fonte de “referência”, de conhecimento e inspiração, foram estudados três locais; China, Chile (Santiago) e Europa que proporcionou conhecer melhor procedimentos, técnicas e processos para implantação e operação de ônibus elétricos, assim servindo de exemplo para a adoção de práticas e estratégias já consolidadas nesses mercados aprimorando os processos a fim de gerar resultados mais satisfatórios e evitando erros identificados.

2.3.2.1. Mobilidade na China

A República Popular da China se destaca como o maior mercado de ônibus elétricos circulantes nas suas cidades (IEA, 2022). A China chegou a esse patamar devido a uma série de características exclusivas nas suas indústrias; as fortes políticas governamentais de incentivo e subsídio para os veículos elétricos permitiram o desenvolvimento de novas tecnologias e consolidação deste mercado (DU et al., 2019).

De 2015 a 2021 o mercado de ônibus elétrico na China chegou a aproximadamente 700.000 unidades, com mais de 1000 modelos BEB à venda de 63 empresas diferentes (Du et al., 2019 e IEA, 2022). Assim além de abastecer o mercado interno, a China desponta como maior mercado exportador mundial de ônibus elétricos, aonde dez principais fabricantes chinesas de ônibus elétrico dominam 78% do mercado mundial, Yutong é o maior fabricante com um volume de 22%, a BYD, segue com 14,1%, a Yinlong (7,4%), ZhongTong (5,9%) e CRRC (5,9%) (BLOOMBERGNEF, 2020).

Desta forma a China tem experimentado a alguns anos tecnologias diferentes de ônibus elétrico como os modelos híbridos (HEB), híbridos plug-in (PHEB) e a bateria (BEB), a figura 8 mostra o desenvolvimento do mercado de ônibus elétrico nas cidades chinesas, indicando a consolidação dos ônibus a bateria (BEB) no mercado Chines, dadas as características únicas do sistema de transporte chinês, os ônibus elétricos a bateria (BEBs) vêm se mostrando uma solução para estes itens (DU et al., 2019 e ZHOU et al., 2016).

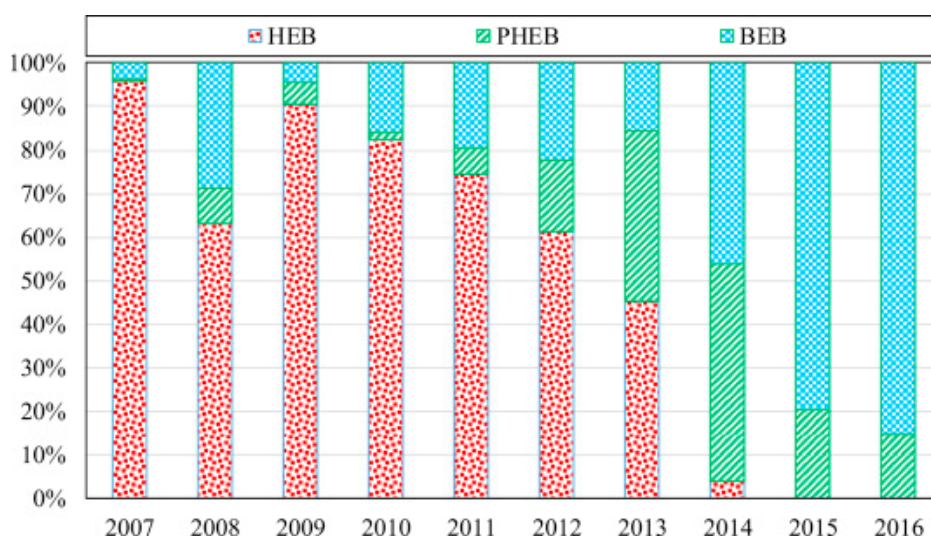


Figura 8 - Mercado ônibus elétrico na China - HEB, FHEB, BEB.

Fonte: Du et al., 2019.

Nos modelos equivalentes de 12 metros existem duas diferenças técnicas significativas para modelos BEBs em seu sistema de armazenamento de energia. Os modelos para longo alcance geralmente adotam carregamentos do tipo garagem; no entanto, para os BEBs de curto alcance, alguns usam carregamento rápido da bateria várias vezes ao dia, e outros ainda utilizam um método de troca de bateria para fornecimento de energia (DU et al., 2019).

O modelo típico para BEBs de longo alcance com carga normal é o K9 BEB da BYD, com um alcance de mais de 400 km a um ciclo de velocidade constante de 40 km/h, conforme testado de acordo com GB / T 18386. A capacidade da bateria instalada para K9 BEB é 324-400 kWh. Para modelos que utilizam baterias de lítio para carregamento rápido tipo BEBs, o alcance é de mais de 150 km, com 50% desses modelos tendo um alcance com mais de 260 km (ZHOU et al., 2016).

2.3.2.2. Mobilidade no Chile – Santiago

Os países Sul-Americanos ainda possuem uma baixa participação no mercado de carros e ônibus elétricos, mas o Chile vem se destacando como a maior frota de ônibus urbanos elétricos fora da China, devido a política de incentivo de descarbonização, com um programa ousado de zero carbono até 2050 ('Programa de Movilidad Cero Emisiones') lançado pelo Ministério do Meio Ambiente (CHILE, 2013).

O Chile tem proposto e incentivado a diversificação de sua matriz energética, que hoje depende 60% de combustíveis fósseis para geração de sua energia e 77% desses combustíveis são importados de outros países, para conseguir a sua "não dependência" energética o Chile está fundamentando esta mudança nas energias renováveis, solar e eólica e apostando nos veículos elétricos, já que 57% dos combustíveis fósseis (gasolina e gásóleo) importados são usados na sua frota de veículos (CHILE, 2019).

O sistema de transporte de ônibus Red Metropolitana de Movilidad (anteriormente chamado de Transantiago até 12 de março de 2019) é composto por 7427 ônibus operados por seis empresas diferentes, inclusive o Metrô de Santiago e ao MetrôTren, aonde todo o sistema de mobilidade é integrado e pode ser utilizado

com um único cartão chamado 'bip!', com diversos pontos de cobrança espalhados na cidade. O sistema de ônibus é usado por cerca de 6,2 milhões de pessoas nas 32 comunidades de Santiago e cobre uma área geográfica de cerca de 680 km² (RED, 2021).

O sistema de transporte público metropolitano está mudando progressivamente o padrão de seus ônibus, desde o ano de 2016 vêm implantando ônibus elétricos e em 2020 conta com 776 ônibus elétricos a bateria, aproximadamente 10% de sua frota de diversas marcas como BYD, Foton, KingLong e Youtong, com mais 991 já licitados para serem entregues (LABMOB, 2022).

Um das principais implementações para a eletro mobilidade que o Chile fez foi o modelo de negócios, onde a concessão pelo serviço de mobilidade urbana foi dividida entre concessão de aquisição da frota, viabilizando contratos de “leasing” ou arrendamentos para aquisição da frota, onde a empresa concessionária responsável pelo fornecimento da frota pode ser diferente da concessionária operadora do sistema (Tabela 1). Outro dado importante deste modelo de negócio é que a nova frota é adquirida como “bens sujeitos a concessão”, ou seja, o Ministério é obrigado a ceder o uso para o próximo operador em conjunto com o contrato de arrendamento, garantindo a permanência do bem no sistema (WORLD BANK, 2020).

Tabela 1 – Fabricantes e operadores de ônibus elétrico no Chile.

| Operador | Financiadora | Fabricante | Frota |
|----------------------------------|--------------|------------|-------|
| Metbus | Enel | BYD | 436 |
| Buses Bule | Engi | Yutong | 75 |
| STP | Engi | Yutong | 25 |
| Redbus | NeoT Capital | King Long | 25 |
| STP | Kaufmann - | Foton | 215 |
| Total frota elétrica em operação | | | 776 |
| Total frota elétrica em teste | | | 7 |
| Total frota elétrica | | | 783 |

Fonte: World Bank, 2020.

Perfazendo os caminhos chineses e priorizando o ônibus elétrico a bateria BEB por causa da questão energética, o Chile prioriza os modelos de longo alcance 12 -13

metros com carregamento lento em garagem com softwares dedicados a gestão das tarifas de eletricidade dinâmicas procurando o menor custo e otimização dos ônibus conectados. Portanto em Santiago os diferentes operadores trabalham com diferentes proporções de número de carregadores por ônibus, com proporções que variam entre 1 carregador para cada 2 ônibus e 1 carregador para cada 4 ônibus, dependendo das diferenças tecnológicas de gestão e de cobrança implantadas. O carregamento rápido (com pantógrafos) foi considerado como um alto custo de infraestrutura, além disso seu alcance atual é suficiente para cobrir as operações diárias (WORLD BANK, 2020).

Diante da experiência chilena foi possível observar algumas características técnicas e de infraestrutura que corroboram com a literatura, e que foram confirmadas na prática, como os custos de manutenção e abastecimento menores, um maior rendimento e conseqüentemente maior eficiência. E a possibilidade de incorporação de tecnologias limpas aos terminais, através de placas solares no terminal El Conquistador da empresa STP, onde seus 215 ônibus são abastecidos com energia renovável.

2.3.2.3. Mobilidade na Europa

A Europa através do Acordo Verde Europeu pretende se tornar o primeiro continente do mundo neutro para o clima até 2050, as emissões do continente Europeu vêm decaindo progressivamente desde início do século XXI e está a caminho de cumprir sua meta de redução em 20% dos gases de efeito estufa até 2020 (UNIÃO EUROPEIA, 2022). O setor de transportes tem grande função na redução de emissões de CO², em 2018 o setor foi responsável por 15% das emissões líquidas, desse 11% são provenientes do transporte rodoviário, incluindo caminhões e ônibus (IEA, 2018). No ano de 2019 as emissões dos gases de efeito Estufa diminuíram em 24% em comparação com os níveis de 1990 na União Europeia, o que representou uma redução de 1.182 milhões de toneladas equivalentes de CO₂. É relevante ressaltar que o ano de 2019 é marcado pelo crescimento exponencial da frota de ônibus elétrico na Europa (IEA, 2018; BLOOMBERGNEF, 2020; CHATROU, 2019), contribuindo de forma eficaz para a redução de emissões, o continente possui hoje cerca de 4.000 ônibus elétricos em funcionamento, incluindo ônibus elétricos a bateria, híbridos plug-in, trólebus IMC e ônibus com células de combustível.

Em 2019, a Holanda foi o país que tem a frota maior da Europa com 726 ônibus elétricos, a França em segundo lugar com 368 e a Inglaterra em terceiro com 322 ônibus elétricos, principalmente graças aos esforços que a Transport for London fez e a colaboração da ADL com a BYD. Do total de 3.025 e-ônibus, 78 e-ônibus estão registrados na Bélgica, enquanto Luxemburgo, que sempre esteve na vanguarda do transporte por ônibus elétricos, tem 84 e-ônibus registrados (Figura 9) (CHATROU, 2019).

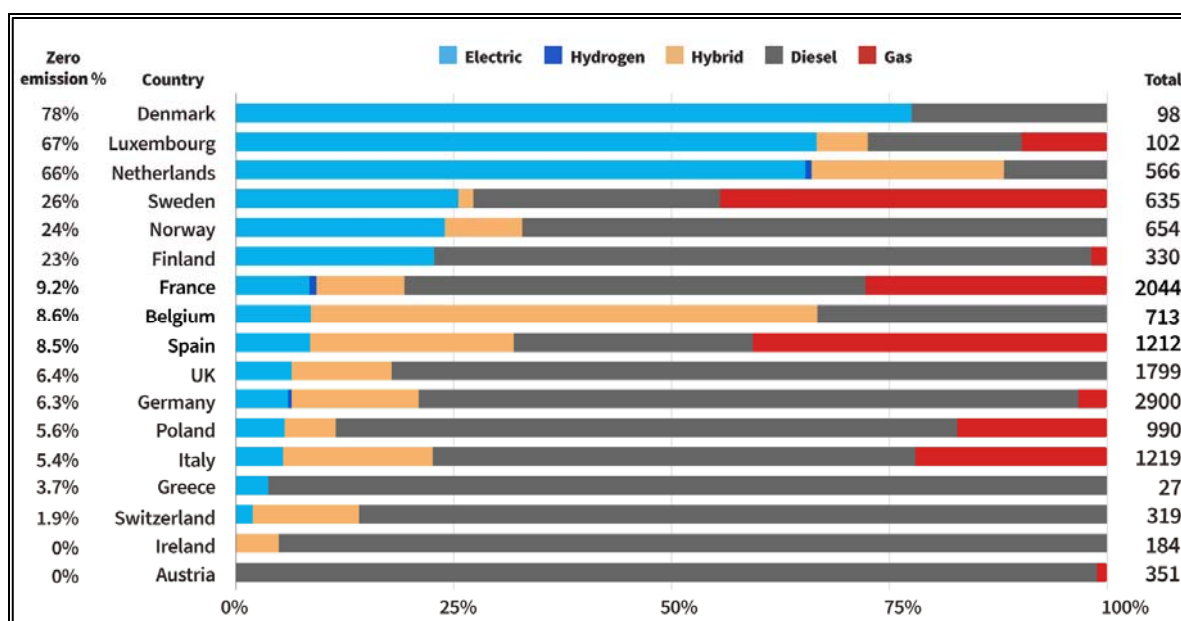


Figura 9 - Mercado europeu de ônibus elétrico.

Fonte: Chatrou, 2019.

Diversos fabricantes de ônibus competem pela liderança do mercado elétrico europeu, a VDL Bus & Coach foi líder de mercado em 2019, com 386 unidades. A fabricante de ônibus chinesa BYD ocupa o segundo lugar com 236 e-ônibus, incluindo o chassi 79 entregue à ADL e o número de registros é 315. Curiosamente, a Volvo - uma das pioneiras do ônibus elétrico - está ficando para trás com 135 registros no quarto lugar, logo atrás do Solaris com 145 e-ônibus cadastrados (CHATROU, 2019).

Segundo CHATROU (2019), os ônibus que mais possuem representação no mercado Europeu são os movidos a gás natural (1.980 unidades), seguido dos ônibus híbridos (1.957 unidades) e elétricos a bateria (1.687 unidades) (Figura 10).

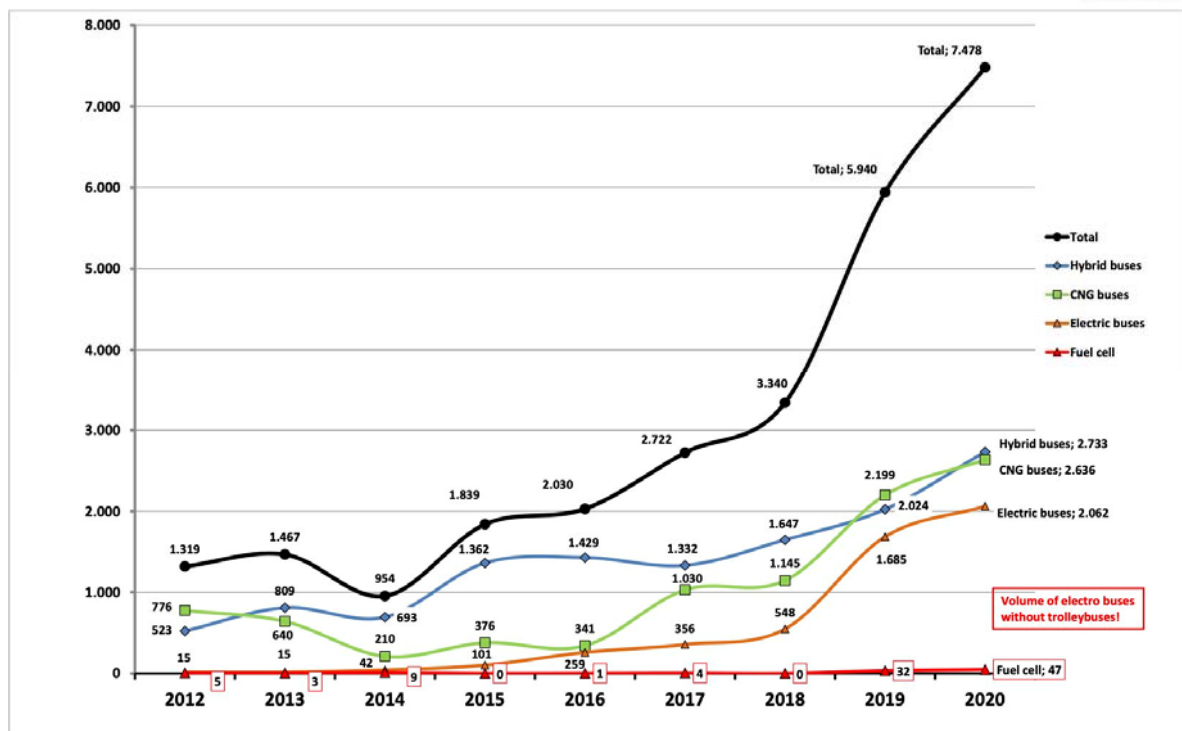


Figura 10: Evolução mercado para BEBs, HEBs, FCEBs e outros na Europa.

FONTE: Chatrou, 2019.

Diferentemente do mercado chinês a Europa possui um número mais heterogêneo de modelos de ônibus, podemos observar também que existe um crescimento para todas as categorias em razão da diversidade de países e políticas envolvidas, assim o mercado europeu busca a interoperabilidade de diferentes marcas através da padronização na infraestrutura de carregamento.

As tecnologias de carregamento wireless e o sistema de troca de baterias ou estão em teste ou não tem mercado, ou seja, a preocupação do mercado se concentra em diferentes métodos de carregamento indutivo através de plug-in, conexão ou dispositivos de conexão automatizada. Assim os carregadores plug-in são usados em carregamentos com faixas de potência de 50 a 150kW e para os carregamentos de oportunidade a faixa de potência é de 150 a 600kW, essas faixas de potência não são padronizadas, mas foram estabelecidas pela tecnologia disponível de conversores.

2.4. Tipologias Ônibus Elétrico

A tecnologia dos ônibus híbridos e elétricos, ao contrário do que muitas pessoas acreditam, não representa uma inovação tecnológica recente. Embora haja certamente avanços tecnológicos importantes nos veículos elétricos atuais, como as baterias de íon de lítio e toda a tecnologia digital presente nos carros modernos, em essência o conceito básico se mantém. Ou seja, não houve mudanças radicais nos motores elétricos de hoje, nem mesmo na utilização da energia cinética gerada pelo movimento do veículo.

Com relação aos ônibus elétricos, estes operam em diferentes graus de eletrificação que dependem da configuração do sistema de propulsão (MILES; POTTER, 2014; BAYINDIR; GÖZÜKÜÇÜK; TEKE, 2011). Estes incluem, mas não estão limitados a Ônibus Híbrido – HEB (*Hybrid Electric*), Ônibus Célula de Combustível – FCEB e (*Fuel Cell Electric*) e Ônibus Elétricos à Bateria – BEB (*Battery Electric*) (RIBAU; SILVA; SOUSA, 2014; YONG et al., 2015). Com exceção do híbrido paralelo, todos os sistemas compartilham um conceito central de que a energia de propulsão é derivada de um sistema de tração elétrica. A principal diferença entre essas tecnologias é a fonte de alimentação do motor elétrico (MAHMOUD et al., 2016), como ela é gerada ou armazenada (LAJUNEN; LIPMAN, 2016; MAHMOUD et al, 2016; MRCAGNEY, 2017; MANZOLLI, 2020).

É importante ressaltarmos que a classificação e nomenclatura dos ônibus elétricos levam em conta seus aspectos tecnológicos. Assim, a figura 11 mostra o domínio tecnológico de influência de cada tipologia dos ônibus elétricos. Alguns podem ser continuamente alimentados por fontes externas - por exemplo, um trólebus alimentado por cabos aéreos. Outros podem armazenar a eletricidade a bordo, normalmente em baterias, como o ônibus elétrico à bateria.

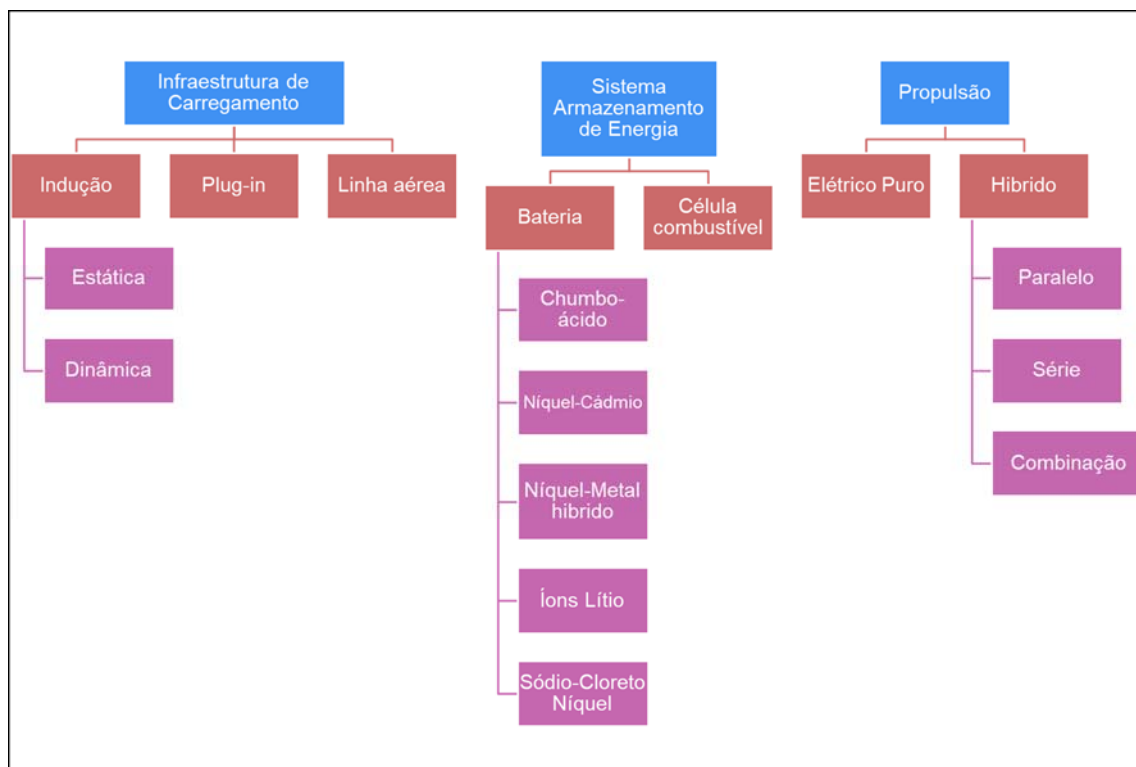


Figura 11 - Classificação e nomenclatura das tecnologias de ônibus elétrico.

Fonte: Benz, 2015.

Os ônibus elétricos são normalmente enquadrados nas seguintes categorias (Figura 12):

HEB - Barramento Elétrico Híbrido: A força de tração desta tecnologia é fornecida por um Motor Elétrico (EM), bem como um motor de combustão interna (ICE). Em alguns casos, o HEB bateria também pode ser carregada usando tecnologia plug-in para permitir a conexão com a rede.

FCEB - Barramento elétrico de célula de combustível: usa células de combustível, normalmente hidrogênio, para gerar eletricidade a bordo durante a operação.

BEB - Barramento Elétrico com bateria Completa (BEB): Este tipo de veículo utiliza a energia armazenada na bateria para fornecer a propulsão do motor elétrico (HANNAN; AZIDIN; MOHAMED, 2014; MAHMOUD et al., 2016).

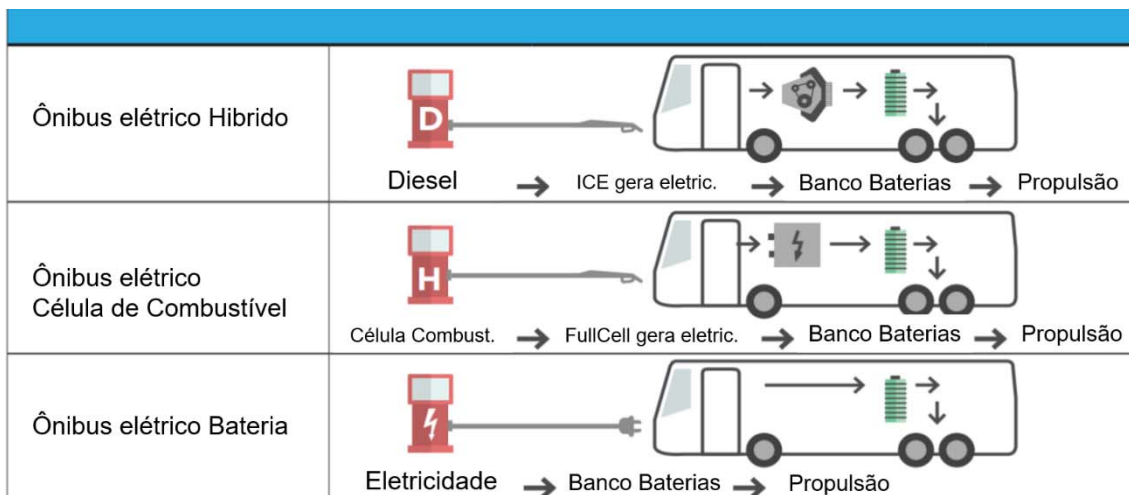


Figura 12 - Principais componentes envolvidos em cada tipologia da tecnologia de ônibus elétrico.

Fonte: MRCagney, 2017.

2.4.1. Ônibus Híbrido – HEB

O funcionamento de um ônibus híbrido combina o motor elétrico (EM) com um motor a combustão interna convencional (ICE), o motor a combustão fornece o torque para o motor elétrico que gera energia elétrica para proporcionar tração as rodas. O trem de força de um híbrido funciona principalmente com combustível, a energia elétrica funciona como unidade adicional que ajuda na economia do consumo de combustível (BENZ, 2015; LAJUNEN; LIPMAN, 2016). Além do motor elétrico e combustão os veículos híbridos ainda possuem um sistema de armazenamento de energia (baterias ou ultra capacitores), um gerador, um sistema de gerenciamento de energia e elementos de acoplamento para emparelhar o sistema elétrico (MRCAGNEY, 2017).

A configuração do barramento híbrido se refere ao grau de hibridação, alta ou baixa, e a produção de energia do EM e do ICE. Os híbridos plug-in PHEB são híbridos em série (figura 13), mais utilizados hoje em dia, permitem que a bateria a bordo seja recarregada de uma fonte externa, dando mais economia ao ônibus e possibilidade de conexão com a rede de energia (MAHMOUD et al., 2016).

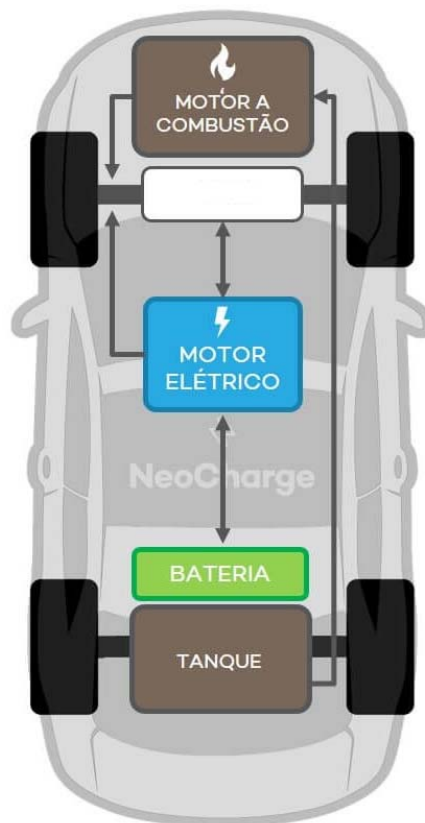


Figura 13 - Configuração HEB série.

Fonte: NeoCharge, 2022.

2.4.2. Ônibus Célula de Combustível – FCEB

São veículo elétrico cuja energia não provém de um dispositivo chamado célula a combustível, as células de combustível geram energia elétrica através de uma reação eletroquímica onde hidrogênio e oxigênio se combinam gerando calor e água para criar eletricidade. Ônibus Célula de Combustível não emite nenhum gás poluente em seu processo de geração de energia. Existem tipos diferentes de células de combustível, mas a seção seguinte discutirá apenas o eletrólito de polímero células de combustível de membrana (PEMFCs), também referidas em alguma literatura como próton células de combustível de membrana de troca, uma vez que são consideradas mais adequadas para uso na propulsão de veículos (AJANOVIC et al., 2012).

No início os FCEBs eram organizados com a célula de combustível conectada diretamente no motor elétrico, atualmente é usada uma configuração híbrida em série, substituindo o ICE por uma célula de combustível. Essa configuração atual resulta na

redução do tamanho da pilha de célula de combustível e assim o seu custo (Figura 14) (MRCAGNEY, 2017).

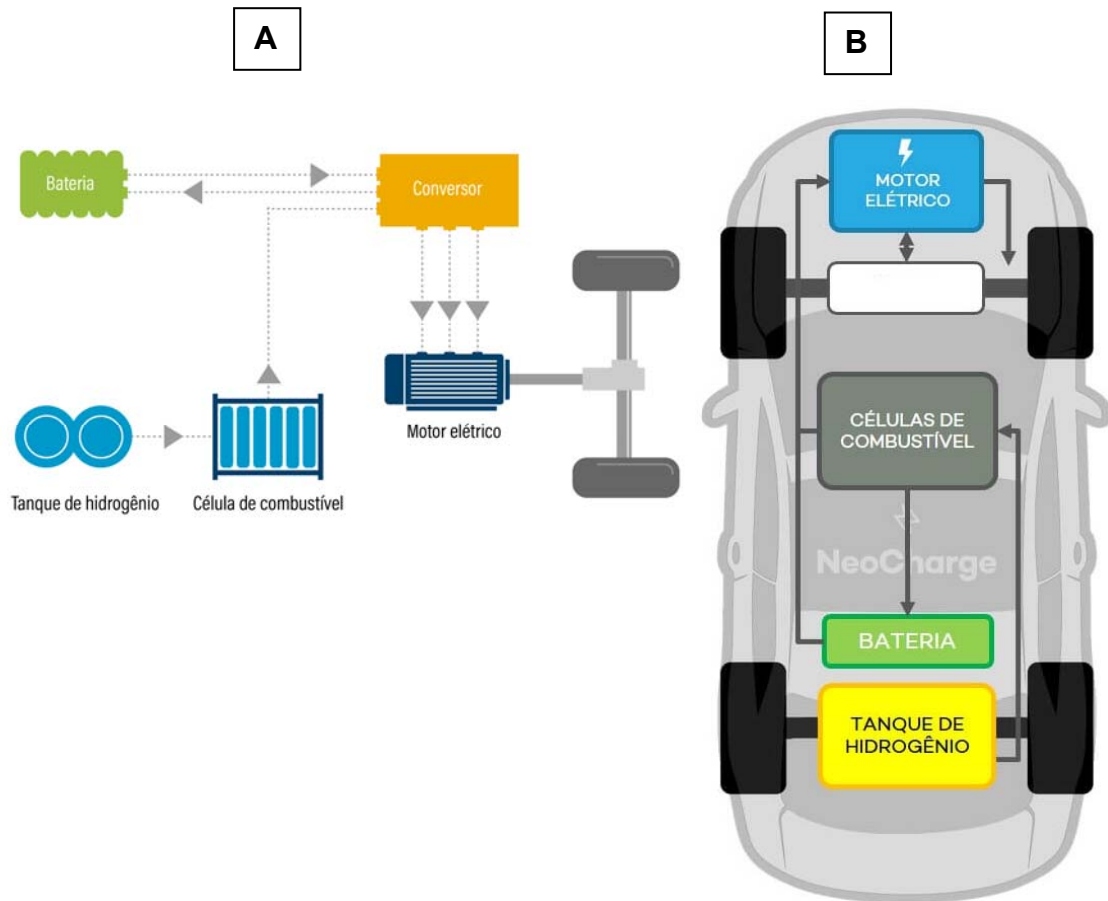


Figura 14 - A) Configuração mecanismo FCEB; B) Distribuição mecanismo FCEB.

Fonte: NeoCharge, 2022.

Dentre as tecnologias para ônibus elétrico o ônibus célula de combustível é o menos expressivo no mercado, isso devido ao seu custo alto, que chega a ser sete vezes maior para aquisição que o ônibus diesel, a tecnologia de gerenciamento de sistema é extremamente sensível ao calor, a níveis de concentração de impurezas na água e hidrogênio, porém essa tecnologia solucionaria problemas comumente encontrada nos ônibus elétricos à bateria, como autonomia e volume de bateria (LOWRY & LARMINIE, 2012).

2.4.3. Ônibus elétricos à bateria - BEB

Os ônibus elétricos à bateria (BEBs) armazenam a energia necessária em um conjunto de baterias (ou ultra capacitores) que alimentam o motor de tração elétrica (Figura 15). A configuração do motor desta tecnologia não inclui nenhuma parte mecânica (POULLIKKAS, 2015; ZIVANOVIC; NIKOLICZV, 2012; OFFER et al., 2010; KUMAR; JAIN, 2014). A energia é transferida para o veículo por meio de sistemas de carregamento elétrico, enquanto a frenagem regenerativa é usada para recuperar a energia cinética durante a viagem.

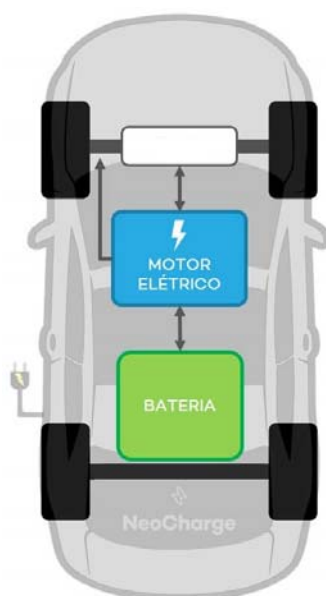


Figura 15 - Configuração BEB.

Fonte: NeoCharge, 2022.

Existem três tipos de baterias comumente usadas em BEBs: fosfato de ferro-lítio, titanato de lítio, e íon-lítio de níquel cobalto manganês (comumente abreviado para NCM Li-ion). A empresa Volvo e a BYD usam baterias de Fosfato de ferro-lítio em seus BEBs; Proterra usa Titanato de lítio; a VDL usa Íons de lítio NCM (THORPE, 2016).

Dentre as vantagens do ônibus elétricos à bateria, podemos ressaltar a eficiência energética muito alta do motor elétrico, o custo operacional reduzido e a não emissão de nenhum gás poluente em seu processo de tração (MAHMOUD et al., 2016), porém no processo de implantação encontramos algumas dificuldades como a

autonomia ou alcance de quilometragem das baterias, diversas estratégias de carregamento tem sido empregadas para absorver esse obstáculo, a relação peso das baterias e capacidade de passageiros do ônibus também representam uma significativa equação a ser transposta e também é imprescindível a análise da rede de energia e infraestrutura de carregamento que os BEBs exigem (MRCAGNEY, 2017).

2.4.3.1. Autonomia

A limitação da autonomia dos ônibus elétricos e das baterias vêm sendo o obstáculo mais significativo para a adoção desses no transporte urbano. A expressão “ansiedade de alcance” sempre repercutiu como uma limitação das características operacionais dos ônibus elétricos. Vários autores tratam da questão da autonomia dos ônibus elétricos e referem-se à inadequação da autonomia para o trajeto de viagem diária. O problema de autonomia é apresentado em sua maioria na categoria dos BEB com carregamento de garagem, com uma média de 250 km com uma única carga (BYD), enquanto o BEB com carregamento de oportunidade tem uma autonomia média de 30-40 km (Proterra) (MAHMOUD, et al, 2016).

A recarga dos BEBs e vida útil das baterias se mal planejadas representam uma dificuldade operacional. Para conseguir estender a autonomia e a vida útil das baterias diversos estudos têm empregado estratégias de carregamento, tanto no tipo de carregamento (noturno ou de oportunidade), bem como o nível de descarga e recarga dessas baterias (MANZOLLI, 2020; ROGGE; WOLLNY; SAUER, 2015).

Segundo Neubauer e Wood (2014) é necessário considerar que a autonomia ainda é sensível a muitos fatores; aceleração e velocidade impactam diretamente na eficiência dos ônibus elétricos - viagens mais rápidas consumirão mais energia da bateria a cada quilômetro percorrido. O uso do ar-condicionado durante a viagem também aumenta consideravelmente as demandas de cargas auxiliares colocadas sobre a bateria. A temperatura da bateria pode afetar a eficiência e a energia disponível. Além disso, a capacidade da bateria de armazenar energia se degrada em resposta a esses e outros fatores ao longo de sua vida útil.

2.4.3.2. Carregamento

O equacionamento entre o peso do veículo e o alcance da bateria também representa um desafio no mercado de BEBs para o transporte público (MAHMOUD et al., 2016; MILES; POTTER, 2014; MANZOLLI, 2020). O alcance do veículo é diretamente proporcional a capacidade da bateria. Porém o aumento da capacidade da bateria resulta em maior preço para o ônibus, diminuindo assim a capacidade de passageiros (devido aos limites máximos de peso dos eixos) (MRCAGNEY, 2017).

Lin et al., 2019; Rogge; Wollny; Sauer, 2015 têm estudado as categorias de carregamento para os BEB; as mais usuais são o carregamento noturno ou de garagem e o carregamento de oportunidade ou parada (MAHMOUD et al., 2016; LI, 2014; LAJUNEN; LIPMAN, 2016), mas ainda existe o carregamento de movimento ou dinâmico (MANZOLLI, 2020).

Devido às variáveis e características dos ônibus urbanos como; distância, trajeto, uso (urbano, suburbano, etc.), número e comprimento dos pontos de ônibus, passageiros, horários de pico, infraestrutura elétrica, tarifas elétricas e assim por diante, não existe uma solução de carregamento padrão para ônibus elétrico (LI, 2014). Estas questões influenciam o tamanho e a vida útil das baterias para BEBs e definem diferentes situações de carregamento (BEEKMAN; HOED, 2016).

No modelo de carregamento de garagem ou estático o BEB é carregado enquanto ficará estacionado por um período longo, normalmente durante a noite nas garagens. Neste tipo de carregamento o tempo de recarga é maior, portanto, os custos de infraestrutura são menores quando comparados a outros modelos, pois os carregadores têm potências em uma faixa de 30 – 50kW e os veículos normalmente têm uma autonomia de 300km. A operação nesses tipos de ônibus é bem parecida com os ônibus a diesel por não terem recargas durante o dia. Seus preços são mais altos devido à necessidade de alto nível de capacidade da bateria e assim maior o custo de implantação (MANZOLLI, 2020).

O modelo de carregamento de oportunidade ou estacionário acontece quando o BEB está parado. Porém, o tempo de recarga é bem curto, quando existe a oportunidade de parada do veículo, normalmente nas paradas para embarque e desembarque de passageiros ou na parada final. Logo o carregamento necessita de

potências maiores que variam de 150 a 600kW, levando um tempo de aproximadamente 3 a 10 minutos a recarga. Os custos para infraestrutura de carregamento também são maiores, porém essa estratégia permite que os veículos tenham baterias e custos menores, deixando o ônibus mais leve e mais baratos (MANZOLLI, 2020).

Para o carregamento existem alguns sistemas disponíveis, incluindo; sistemas aéreos, sistemas de plug-in direto e transferência de energia indutiva (MAHMOUD et al., 2016). O sistema plug-in são mais baratos e mais comuns para utilização no carregamento de garagem, pois sua utilização no carregamento de oportunidade acarretaria complicações no carregamento.

O sistema de transferência indutiva carrega o ônibus sem fio, criando um campo magnético entre duas placas indutivas que são embutidos no solo. No sistema indutivo a potência de carregamento é de cerca de 200kW para o sistema Bombardier Primove e 120 kW para o sistema de Conductix Wampfler (ROGGE; WOLLNY; SAUER, 2015). O sistema é eficaz, fácil de usar e requer baixa responsabilidade por parte do motorista, tem um design discreto quando instalado em pontos de ônibus. Porém, no sistema de indução existem perdas. Devido aos pontos de carregamento serem instalados ao longo da rota, a condução torna a autonomia quase ilimitada (BENZ, 2015; CALABRO et al., 2019). Esse método ainda está em fase de desenvolvimento e os custos são muito altos. Porém é uma tecnologia promissora para o futura, pois alguns estudos apontam o potencial de redução do tamanho da bateria que o IPT pode trazer (MANZOLLI, 2020; CALABRO et al., 2019).

Nos sistemas de carregamento aéreo, que utiliza sistema de condutivo, são utilizados dispositivos de acoplamento, por exemplo, pela ABB, Oprid, Schunk ou Proterra (Figura 16). Esse sistema permite uma potência de carregamento alta de até 500 kW, exemplo o sistema Proterra (ROGGE; WOLLNY; SAUER, 2015).


| TECNOLOGIA | FORNECEDOR | SISTEMA | PODER DE CARGA |
|---|--------------------|----------------|------------------------|
| Plug-in  | Diversos | Wall box | 30-150kW |
| Condutor  | Proterra | FastFill | 500 kW |
| | ABB | TOSA | 200kW; 400kW (15 s) |
| Indutivo  | Bombardeiro | Primove | 200 kW |
| | Conductix Wampfler | Carregador IPT | 60-180 kW |

Figura 16 - Exemplos de sistemas de carregamento rápido atuais.

Fonte: Rogge; Wollny; Sauer, 2015.

Os conceitos de carregamento rápido ou lento e carregamento noturno ou de oportunidade, embora relacionados não são os mesmos. O carregamento rápido ou lento está relacionado à potência fornecida para o carregamento – faixas de potência entre 30/50kW são definidos como carregamento lento e entre 150/600kW como carregamento rápido. A definição entre carregamento noturno ou de oportunidade tem como princípio à estratégia de carregamento (MANZOLLI, 2020). A Tabela 2 resume as diferenças entre as três possibilidades de carregamento apresentadas acima.

Tabela 2: Análise das diferenças entre os três tipos de carregamento.

| | Estático | Estacionário | Dinâmico |
|----------------------------|---|---|--|
| Estratégia | À noite carregamento no depósito | Oportunidade de carregamento devido às instalações na rota | Oportunidade de carregamento ao longo das pistas |
| Tipo de Carregador | 30 a 150kW (para ônibus com alto alcance) | 150/300/450 kW (carregamento rápido) | 25/50/150 kW |
| Tecnologia de carregamento | Principalmente plug-in | Principalmente plug-in de pantógrafo | IPT |
| Alcance Típico | 100 – 300 km/dia | 200 – 500 km/dia | 100 – 200 km/dia |
| Tempo de reabastecimento | 3- 8h | 3 – 10 min | 10 – 15 min |
| Custos | 1 Alto custo de bateria 2 Baixos custos de infraestrutura de carregamento 3 Baixos custos de manutenção | 1 Baixo custo de bateria 2 Altos custos de infraestrutura de carregamento 3 Médios custos de manutenção | 1 Baixos custo de bateria 2 Muito altos custos de infraestrutura de carregamento 3 Muito baixos custos de manutenção |

Fonte: Manzolli, 2020.

A forma como a garagem e central de controle dos ônibus são planejadas e geridas deve ser considerada, tanto do ponto de vista da inteligência dos carregadores e sua relação com a central, bem como da capacidade energética necessária para abastecimento e projeções para crescimento da e-mobilidade, já que futuras aprovações de expansão da demanda encareceria e dificultaria o processo de implantação de novos carregadores e a demanda energética normalmente excede qualquer outro tipo de construção. O número de carregadores e a capacidade de potência da garagem de carregamento pode depender da capacidade da rede local, assim o carregamento inteligente pode equilibrar a demanda, intercalando os horários de carregamento dos ônibus (WORLD BANK, 2020).

A interoperabilidade de tecnologia dos ônibus é um assunto relevante quando se fala em planejamento a longo prazo, seja ele AC ou DC nas conexões de seus carregadores os mesmos devem ser analisados quanto a aquisição de novos ônibus, já que não existe um padrão mundial para os mesmos (WORLD BANK, 2020).

Todas as alternativas observadas são passíveis de obter vantagens e desvantagens. Portanto não existe um padrão de carregamento, no entanto a literatura sugere que o carregamento de oportunidade para os BEBs melhora a viabilidade do sistema e pode gerar uma economia no valor de 10-20% no custo total de propriedade (TCO), para rotas mais longas. A vantagem é em função do tamanho da bateria e autonomia, colocando essa estratégia como promissora para o futuro (CALABRO et al., 2019), porém essa tecnologia ainda não está disponível no mercado brasileiro, dependendo de importações o que acarretaria o TCO.

2.5. Análise de Emissões - "Poço a Roda"

A análise ciclo de vida - ACV é constituída da avaliação dos fluxos de materiais e energia utilizados por um sistema de produtos em seu ciclo de vida completo, chamada análise do berço ao túmulo. Esse estudo se concentra na emissão dos gases de efeito estufa e suas aplicações no planejamento urbano, desconsiderando o processo de fabricação do veículo, onde os planejadores e tomadores de decisões podem alcançar resultados superiores para a economia de energia e redução de emissões em seu sistema de transporte por ônibus. Por exemplo, a produção de veículos, a eliminação e a reciclagem de veículos são bastante relacionadas e influenciadas pelas atividades dos fabricantes de veículos.

A análise "poço à roda" (Well to Wheels), como é chamada na literatura, consiste na soma de duas fases; a fase Well-to-Tank (WTT) ou Poço ao Tanque, que é responsável pela produção e fornecimento de combustível ou energia e Tank-to-Wheels (TTW) ou Tanque a Roda, que é responsável pela quantidade de energia utilizada na operação do veículo, ou seja, a energia utilizada na sua propulsão (figura 17 e 18) (DREIER et al., 2018; ZHOU et al., 2016).

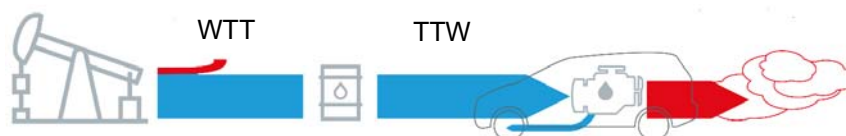


Figura 17 - Análise WTW para motores ICE, a combustão, tração movida por derivados de petróleo.

Fonte: Autor.



Figura 18 - Análise WTW para motores elétricos BEV, tração movida por energia elétrica.

Fonte: Autor.

Este método de análise vem sendo empregada pela comunidade científica para obter resultados associados à cooperação dos veículos elétricos, avaliando a possibilidade de implantação dos ônibus elétricos na malha urbana as frotas, comparando diferentes *powertrains* e combustíveis, estratégias de carregamentos e baterias (CORREA; MUÑOZ; RODRIGUEZ, 2019; VILLANTE; ANATONE; VITA, 2018; ZHOU et al., 2016; SÁNCHEZ et al., 2013; OU; ZHANG; CHANG, 2010). Considerando as emissões para extração de recursos da energia primária até a propulsão dos ônibus. Desta forma esse conjunto de emissões de GEE podem servir de indicadores de desempenho para a troca de moto propulsores em comparação com os motores convencionais de combustão interna a gasolina (YAZDANIE, 2014; DREIER et al., 2018).

Dentro dos limites dos sistemas desta análise destacamos que as emissões liberadas nas fases de manutenção e eliminação dos veículos, que não entram no escopo desta pesquisa, são insignificantes quando comparadas à fase de operação numa perspectiva de ciclo de vida (RIBAU; SILVA; SOUSA, 2014; DREIER et al., 2018). A análise WTW permite que os planejadores das cidades possam compreender a proporção do impacto ambiental das mudanças nos *powertrains* do sistema do transporte.

As métricas e métodos para contabilizar o uso de energia e as emissões de GEE são descritos nas subseções a seguir, juntamente com os parâmetros de entradas usados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição do problema

A substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos puros, no transporte coletivo urbano, pode ser considerada como uma das formas mais indicadas para a redução dos níveis de emissão de poluentes atmosféricos nos sistemas de transportes em centros urbanos? O método mais utilizado para analisar a cadeia processual energética e de emissão de diversos motopropulsores, como ônibus híbrido (PHEB), ônibus célula de combustível (FCEB), ônibus diesel e ônibus elétrico à bateria (BEB), tem sido o método de análise Poço à Roda.

Resultados mais promissores, relacionados à origem da energia, foram contatados para os ônibus elétricos à bateria (ZHOU et al., 2016), com uma tecnologia atual processualmente mais amadurecida e mais acessível que as células de combustível, por exemplo, e com emissões mais baixas que a tecnologia híbrida.

Somente a mudança da força motriz dos ônibus para elétrico não garantem a sustentabilidade dos sistemas de transporte, a discussão sobre a matriz elétrica de abastecimento desses ônibus se faz necessária. A associação entre os ônibus elétricos à bateria e sistemas de geração de energia menos poluentes, como o sistema de geração solar fotovoltaico, pode ser de grande resultado.

A associação da tecnologia ônibus elétrico a fontes sustentáveis e independentes tem tomado maiores proporções nos últimos tempos e se revelado como tendência mundial. Empresas, associações e países têm se dedicado a cumprir as metas de neutralidade de carbono das ODS, no Brasil essa meta vai até 2050, conduta não apenas provocada pelas mudanças climática, mas também impulsionada pelas mudanças ideológicas do iminente mercado de carbono, a alta do petróleo, autonomia energética e a expressiva redução de custo para implantação dessas energias renováveis.

Desta forma empresas e países poderão estabelecer suas próprias metas e regras para inserção neste novo modelo de transações comerciais em prol da sustentabilidade energética, impactando na visão que o cliente ou a população tem de tal produto ou serviço. Os ônibus elétricos ainda possibilitam a vantagem de ser

uma “bateria móvel”, ou seja, dentro das rotas, horários e planos de operação é possível a estocagem e flexibilidade na operação da energia, além da possibilidade da empresa ou país ser um fornecedor também de energia renovável, possibilitando novos mercados e novos modelos de negócios.

Dentro de um modelo de aplicação de ônibus elétrico para o transporte vários fatores influenciam nas tomadas de decisões e devem ser analisados; as rotas dos ônibus, incluindo topografia, pontos de parada e localização das garagens, os horários e os planos de operação dos veículos. Esses dados são necessários para obtenção do modelo técnico, onde serão indicadas as características como quantidade de veículos para a rota especificada, consumo de energia, estratégia de carregamento ou substituição das baterias e localização de estações de carregamento.

3.2. Metodologia

As métricas e dados para contabilizar as emissões dos ônibus, denominado GEE_WTW, são ilustrados no gráfico (figura 21), os parâmetros de entrada usados nos cálculos para os ônibus da frota do município podem ser descritos em dois tipos; dados fontes de energia (combustão ou energética) e seus desdobramentos, como a o biocombustível e a energia solar fotovoltaica e os dados de funcionabilidade do sistema; como rotas, tipologia dos ônibus, número de ônibus, média de quilometragem, peso e rendimento médio, resultando em diferentes dados de emissões, que nos permitirão saber qual a melhor opção para o alcance de neutralização de carbono dos ODS.

Desta forma a literatura acadêmica chama esse processo de análise de emissões “Poço à Roda” ou *well-to-wheels*, que pode ser dividida em emissões “Poço ao Tanque” – onde são calculadas as emissões para extração e/ou produção da energia e emissões “Tanque à Roda” – onde são calculadas as emissões no processo de rodagem do veículo.

Vale ressaltar que neste estudo trabalhou-se com índices de CO₂ com estimativas a partir de dados bibliográficos, aplicados à frota real do município, no entanto, o comportamento in loco pode apresentar diferenças nas emissões.

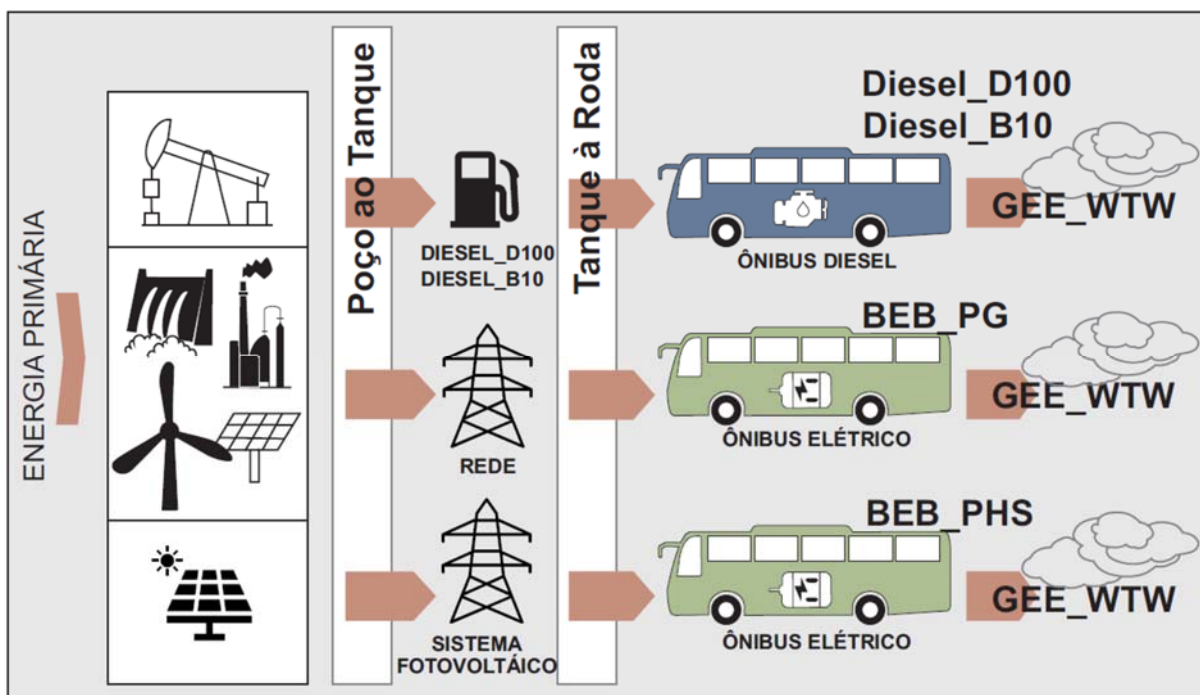


Figura 21 - Gráfico análise poço à roda.

Fonte: Autor.

O processo *well-to-wheels* dos ônibus à combustão - ICEBs consiste em grande parte em dois processos principais. O primeiro processo é a produção do combustível, transporte e armazenamento (Poço ao Tanque), o segundo processo é a queima desse combustível pelo veículo (Tanque a Roda). Assim, as emissões de GEE dos ônibus à combustão do ponto de vista poço-rodas são a soma das emissões de GEE dos processos combinados poço-tanque e tanque-rodas. Isso pode ser calculado usando a Eq. (1) abaixo.

$$GEE_{wtw_ICE} = (GEE_{wtT} + GEE_{TtW}) \times \vec{P} \quad \text{Eq.(1)}$$

Na Eq.(1), os GEE_{wtw_ICE} é o total de gases de efeito estufa que um ônibus à combustão emite do ponto de vista do poço à rodas, medidos em unidades de gCO_{2eq}/km . Os termos GEE_{wtT} e GEE_{TtW} demonstram o total de GEE emitidos nos processos poço-tanque e tanque-rodas, respectivamente, medidos em $gCO_{2eq}/tonkm$. \vec{P} refere-se ao peso total do ônibus, medido em toneladas.

Os fatores de emissão dos ICEs usados, são os dados de emissões equivalentes de CO_2 do JEC Well-To-Wheels report v5, que traz os valores de emissão para motores pesados diesel como ônibus (PRUSSI et al., 2020).

Uma análise do poço à roda para veículos leves foi apresentada por Woo, Choi e Ahn (2017), com dados do relatório JEC Well-To-Wheels report v4 (2014), uma colaboração de pesquisa do JRC (Joint Research Center of European Commission), EUCAR (European Council for Automotive R&D) e CONCAWE (CONservation of CleanAir and Water in Europe).

De acordo com o JEC v5, o valor total das emissões de GEE do poço à roda é de 63,0g CO_{2eq} /tkm (sendo do poço ao tanque: 12,8g CO_{2eq} /tkm, tanque à roda: 50,2g CO_{2eq} /tkm) para diesel convencional e 59,0g CO_{2eq} /tkm (poço ao tanque: 11,8g CO_{2eq} /tkm, tanque à roda: 47,2g CO_{2eq} /tkm) para diesel B10 (PRUSSI et al., 2020), que é o fator utilizado nos ônibus urbanos brasileiros, a partir da lei MPV 647/2014 a Agência Nacional do Petróleo é responsável pela regulação da participação volumétrica do biodiesel no diesel (B10: 90 vol.% diesel, 10 vol.% biodiesel). Usamos esses fatores de emissão para calcular as emissões de GEE para os ônibus à combustão.

O processo de análise dos ônibus elétricos à bateria BEBs também consistem em duas etapas principais. O primeiro consiste na mineração da fonte de energia e transporte para as usinas, o outro é o processo de transmissão dessa energia para o ônibus e o seu uso para a tração do ônibus (ZHOU et al., 2016). Assim, as emissões de GEE do poço à roda de um BEB é a soma das emissões de GEE dos processos do poço à usina e da usina à roda. Isso pode ser calculado usando a Eq. (2) abaixo.

$$GEE_{WtW_BEB} = \left(\sum_e P_i * (GEE_{WtT} + GEE_{TtW}) \right) \times \eta \quad \text{Eq.(2)}$$

Na Eq. 02 GEE_{WtW_BEB} é o total de gases de efeito estufa GEE emitido pela relação de fonte de alimentação e/ou no mix de geração de eletricidade do país, medidos em unidades de gCO_{2eq}/km. Os fatores de emissão GEE_{WtT} e GEE_{TtW} demonstram o total de GEE os processos poço-usina e usina-roda, respectivamente, medidos em gCO_{2eq}/kWh. η refere-se à rendimento da energia do ônibus elétrico, medido em km/kWh.

O fator de emissão GEE_{WtT} (poço à usina) foi extraído de Turconi, Boldrin e Astrup (2013), onde o autor faz uma extensa revisão de 167 estudos envolvendo a avaliação ciclo de vidas e emissões de GEE relacionadas às fontes de energia, conforme a tabela 3. O fator de emissão GEE_{TtW} (usina à roda) para os ônibus elétricos

à bateria não são computadas, já que não produzem nenhuma emissão de poluentes diretamente na sua operação (LAJUNEN E LIPMAN, 2016).

Tabela 3: Emissões de GEE (gCO₂/km) para cada fonte de energia no processo do poço à usina.

| | Mínimo | Médio | Máximo | Média |
|----------------------|--------|-------|--------|--------|
| Carvão | 660 | 960 | 1370 | 942,33 |
| Gás natural | 380 | 490 | 1000 | 533,17 |
| Petróleo | 530 | 779 | 890 | 773,80 |
| Nuclear | 3,1 | 7,3 | 35 | 12,23 |
| Energia hidrelétrica | 2 | 4,9 | 20 | 8,22 |
| Fotovoltaica | 13 | 53 | 190 | 65,05 |
| Vento | 3 | 12 | 41 | 17,63 |

Fonte: Turconi, Boldrin e Astrup (2013).

A somatória do percentual de fontes para produção da Matriz elétrica no Brasil considerou uma matriz elétrica de múltiplas fontes, de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica (53,4%), eólica (10,6%), biomassa (8,2%) e solar (2,5%). As fontes fósseis são carvão e derivados (3,4%), petróleo e derivados (3,5%), nuclear (2,2%) e gás natural (12,8%), que é resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações (EPE, 2022). O uso de energia difere de um país para outro, dependendo do nível de desenvolvimento econômico de cada país, circunstâncias geopolíticas, disponibilidade de recursos, clima, tipo de indústria e outros fatores relevantes (KAMEYAMA & KAWAMOTO, 2016).

Dentre as configurações de combustível existentes analisou-se os perfis que vêm se mostrando como escolha do mercado e que poderiam obter o melhor desempenho ambiental. Outras análises com outras origens de energia como eólica e biomassa tendem a apresentar resultados um pouco maiores (Prussi et al., 2020). É particularmente importante a consideração cuidadosa para combustíveis produzidos a partir de biomassa, onde é essencial a análise dos coprodutos e uso da terra, as culturas para produção de combustível podem ter implicações para a agricultura em todo o mundo.

São poucos os dados de operações reais sobre o rendimento de ônibus elétrico (km/kWh) operando no clima e os modelos de uso brasileiros. Algumas prefeituras como Curitiba, São Paulo e Salvador obtiveram médias em operação de 0,65 a 0,9

km/kWh (EPE, 2020). As empresas montadoras apontam um rendimento entre 1 e 1,25 km/kWh, considerando o menor peso, freios regenerativos e aceleração controlada eletronicamente. Para esse trabalho foi utilizado a média dos índices de rendimento apontados por sistemas já em operação, que seria de 0,8 km/kWh.

3.3. Estudo de Caso

O estudo foi realizado na cidade de Cascavel, situada na região Oeste do Estado do Paraná, que segundo o último censo teria 286.205 habitantes, com estimativa de 336.073 para 2021 (IBGE, 2021) se destacando como o quinto município mais populoso do estado. Uma população majoritariamente urbana pois 94,36% residem na cidade e apenas 5,64% na área rural. Possui área territorial de 2.100,831 km² e densidade demográfica de 136,23 hab/km², segundo as coordenadas geográficas de latitude 24°57'21"S, longitude 53°27'19"W e altitude 781 metros. (IBGE, 2021).

No Brasil o serviço de transporte urbano é de responsabilidade do município, segundo a legislação, cada cidade deve organizar e conceder o serviço público de transporte, de forma direta ou indireta. A prática comum dos municípios é a contratação de concessão por determinado tempo, onde geralmente favorecem ou exigem a opção de menor preço nas tecnologias e especificações pré-determinada pela política pública.

Atualmente o ordenamento do trânsito em Cascavel é de responsabilidade da Autarquia Municipal De Mobilidade, Trânsito e Cidadania denominada TRANSITAR. O trânsito no município é regido através do Plano Diretor de Cascavel (Cascavel, 2017) e leis específicas (Lei nº 6.062 de 2012, Lei Complementar ao Plano Diretor de 2017) (CASCAVEL, 2012; CASCAVEL, 2017), que apresentam diretrizes voltadas à melhoria no transporte, o município vem se adequando à Lei Federal nº12.587/2012 (BRASIL, 2012), para criação do Plano de Mobilidade Urbana do município, previsto na Política Nacional de Mobilidade Urbana, em andamento.

A TRANSITAR também é responsável pelo gerenciamento da concessão do transporte público do município, que hoje é feito basicamente por linhas de ônibus que atuam dentro do perímetro urbano. Esta pesquisa teve colaboração e consenso da Prefeitura Municipal de Cascavel, através da TRANSITAR, nos auxiliando sobre questionamentos e transmitindo os dados de operação do sistema municipal de ônibus urbano. A TRANSITAR possui um banco de dados com periodicidade anual, aonde foi nos repassado as principais informações, quanto a número de ônibus total

e de cada linha, quilometragem por linhas, número de passageiros total, horários e escala de ônibus dos últimos três anos.

O atendimento espacial do sistema de transporte urbano está distribuído em 47 linhas comuns e mais 5 linhas troncais (figura 19), com uma frota de 150 ônibus, as conexões entre as linhas são realizadas em um dos terminais de transferência, conhecidas como Terminais de Transbordo. Cascavel possui cinco Terminais de Transbordo, sendo eles: Terminal Leste, Terminal Oeste, Terminal Nordeste, Terminal Sudoeste e Terminal Sul, ainda possui um ponto de transbordo localizado na região central que liga as Linhas Sul ao Centro (CASCAVEL, 2020a).

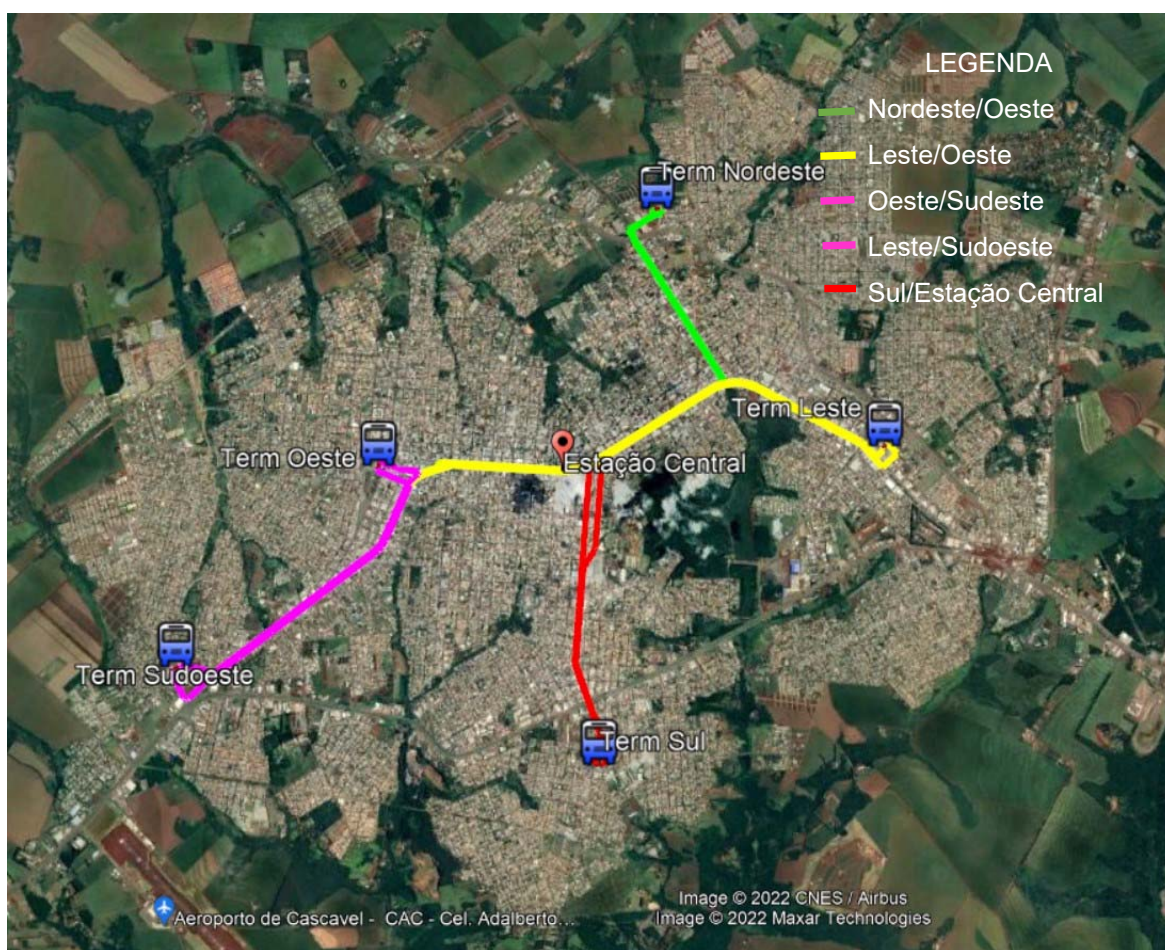


Figura 19 - Mapa linhas ônibus para transporte coletivo do município de Cascavel.

Fonte: CASCAVEL, 2020a.

Os cinco eixos viários principais, denominados Linhas Troncais, definidos pela linha do PDI (Programa de Desenvolvimento Integrado), assim definidos: Leste/Oeste,

Nordeste/Oeste, Oeste/Sudeste, Leste/Sudoeste e Sul/Transbordo Central (CASCAVEL, 2020a).

Estas linhas operam como linhas alimentadoras semiexpressas, seguindo o modelo denominado BRT-Bus Rapid Transit (figura 20), com exceção da Linha Sul/Transbordo Central que ainda não possui o corredor exclusivo, mas que já está em fase de projeto.

As principais características dessas linhas são:

- Operar em corredor exclusivo;
- Reduzido número de paradas;
- Embarque e desembarque no mesmo nível dos veículos, tornando o processo mais rápido;
- Transferência entre rotas sem incidência de custo;
- Possuir espaço para possíveis reestruturações e infraestruturas;
- Percorrer trechos planos.



Figura 20 - Imagem dos corredores exclusivos para ônibus Cascavel.

Fonte: Cascavel, 2020a.

A linha PDI é operada com 30 ônibus Mascarello Granvia, chassi Mercedes OF-1721 L, que possuem o comprimento de 12,5 metros, com capacidade para 37 passageiros sentados e mais uma vaga reservada a cadeirantes com ônibus de 5 portas e 4 portas. Com uma distância média percorrida de 243,28km/dia e rendimento médio de 2,0l/km (tabela 4) (CASCAVEL, 2020b).

Tabela 4 - Descrição das linhas tronco para o ano 2019.

| Descrição | Carros | Percurso (km) | Média Percurso (km/dia) | Tempo Percurso (min) |
|---------------------------|-----------|---------------|-------------------------|----------------------|
| Linha Leste-Oeste | 9 | 14,5 | 233,2 | 45 |
| Linha Nordeste-Oeste | 4 | 15 | 234,4 | 50 |
| Linha Oeste-Sudoeste | 1 | 8,3 | 276,0 | 30 |
| Linha Leste-Sudoeste | 4 | 20,8 | 304,2 | 60 |
| Linha Sul-Estação Central | 6 | 8,5 | 168,8 | 30 |
| Total | 24 | | 243,28 | |

FONTE: Cascavel, 2020b.

As linhas comuns são divididas em 47 linhas operadas com 120 ônibus divididos em ônibus comum, midiônibus e padron, com rendimento médio de 2,85km/l para os ônibus comuns, 2,0km/l para ônibus padron e 3,22km/l para os midiônibus (tabela 3). A média percorrida em 2019 foi de 902.416,00km/mês, já para o ano de 2020 a média caiu cerca de 36,8% devido à pandemia Coronavírus que reduziu a circulação de pessoas pela cidade e a utilização do transporte coletivo chegando a 569.585,00km/mês. Outro índice que demonstra essa queda é a quantidade de passageiros que no ano de 2019 foi de 1.701.377,00 passageiros/mês e no ano de 2020 caiu para 779.074,00 passageiros/mês (CASCAVEL, 2020b).

Na tabela 5 é apresentada a quilometragem média anual percorrida, nota-se que devido a pandemia do Coronavírus houve redução da circulação de pessoas pela cidade e utilização do transporte coletivo (CASCAVEL, 2020b).

Tabela 5 - Quilometragem anual ônibus urbanos Cascavel – Pr.

| ANO | MÉDIA KM | ANO | MÉDIA KM |
|------|---------------|------|---------------|
| 2011 | 9.707.074,00 | 2018 | 10.499.527,00 |
| 2012 | 9.799.864,00 | 2019 | 10.009.028,00 |
| 2015 | 9.828.261,00 | 2020 | 6.713.510,00 |
| 2016 | 10.326.558,00 | 2021 | 6.018.262,64 |
| 2017 | 10.211.827,00 | | |

Fonte: Cascavel, 2020b.

Tabela 6 - Tipologia do transporte coletivo do município de Cascavel - PR.

| Tipo | Modelo | Quantidade |
|------------|--|------------|
| Comum | MPOLO TORINO U (MB OF 1418), MASCA GRANMIDI O (MB OF 1721/59, MB OF 1722M/59), NEOBUS MEGA (VW 15190EOD), MASCA VIAMIDI 17230 O (VW 17230 EOD), MASCA GRANVIA (MB OF 1519) | 89 |
| Midiônibus | MASCA GRANMIDI O (MB OF 1418/52), MPOLO SEN MIDI ON (VW 15190EOD) | 22 |
| Padron | MASCA GRANVIA E O (VW 17230 EOD) | 39 |
| | Total | 150 |

Fonte: Cascavel, 2020b.

3.4. Cenários

Em 2015, foram adotados por 193 países os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) que fazem parte do Protocolo Internacional da Assembleia Geral das Organizações das Nações Unidas (ONU). Os ODS compõem a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e cobrem todas as atividades da sociedade, que vão desde a erradicação da pobreza, água potável e saneamento, consumo e produção responsáveis, ações contra a mudança global do clima até a promoção da paz e de instituições eficazes.

O Brasil como signatário do Acordo de Paris está dentre os países em desenvolvimento que iniciaram políticas que pretendem atender os ODS, como a redução das emissões de GEE. Sua meta de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) na COP 26, foi para uma redução de 43% das emissões de carbono até 2030 e atingir a neutralidade em 2060, intencionando um desenvolvimento em direção a uma sociedade de baixo carbono e resiliente ao clima, assim reduzindo sua vulnerabilidade às mudanças climáticas (UNDP, 2015).

No presente estudo estabeleceu-se três cenários, baseados na NDC de 2015 e reafirmada pelo Brasil em 2021 (UNDP, 2015), com a proposta de observar dentre as opções de tecnologias de combustível e de ônibus disponíveis no mercado é possível atingir as metas de ODS de redução de emissão acordadas. Assim instituiu-se o cenário atual (2022), onde os ônibus da frota são todos movidos por diesel B10, o cenário dois (2030) onde deverá ocorrer uma redução em 43% das emissões e o cenário três (2060) onde deverá atingir a neutralidade de emissões de carbono.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Emissões de GEE de ICEVs

Utilizando os dados dos fatores de emissão de GEE_{WTW_ICE} apresentados no JEC Well-To-Wheels report v5 (Prussi et al., 2020), foram calculadas as emissões de GEE para ônibus à combustão utilizando diesel puro e diesel B10 para a frota de ônibus que circula no município por meio da Eq. (1). Os resultados são apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Emissões GEE_{WTW_ICEB} *well-to-wheels* (gCO₂eq /km) por tipo de ônibus.

| Emissões por tipo de ônibus | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|---|---------------|---|---------------|--|--|
| ICEB Tipologia | Peso (ton) | Fator de Emissão (gCO ₂ eq/tkm) | | GHG _{WTW} (gCO ₂ eq/tkm) | | GHG _{WTW} (gCO ₂ eq/k m) | GHG _{WTW} (gCO ₂ eq/k m) |
| | | Diesel puro | B10 diesel | Diesel puro | B10 diesel | Diesel puro | Diesel B7 |
| | | GEE_{WTT} | GEE_{TTW} | GEE_{WTT} | GE_{TTW} | | |
| Midibus | 14 | 52 | 206 | 51 | 190 | 3,612.00 | 3,374.00 |
| Convencion al | 16 | 52 | 206 | 51 | 190 | 4,128.00 | 3,856.00 |
| Padron | 17 | 52 | 206 | 51 | 190 | 4,386.00 | 4,097.00 |

Tabela 8 - Emissões GEE_{WTW_ICEB} *well-to-wheels* (gCO₂eq /km) por frota.

| Emissões por frota | | | | |
|--------------------|-------|---------------------------|---|-------------------|
| ICEB | Qdade | Quilometragem (km/ano) | GHG _{WTW} _Frota (gCO ₂ eq/ano) | |
| | | | pure diesel | B7 diesel |
| midibus | 22 | 1,762,259 | 6.37E+09 | 5.95E+09 |
| Convenci onal | 89 | 6,151,786 | 2.54E+10 | 2.37E+10 |
| Padron | 39 | 2,893,826 | 1.27E+10 | 1.19E+10 |
| Total | 150 | 10,807,871 | 44,452,172,952.00 | 41,523,153,804.00 |

Desta forma, foi possível verificar a quantidade de GEE em kgCO₂eq/ano gerados pela frota de ônibus urbano no município de Cascavel, que contabilizou 41.523 tonCO₂eq para o diesel B10 em 2019.

Emissões de GEE dos BEBs

A Emissão de GEE dos BEBs foi obtida por meio da Eq. (2), com os dados da tabela 4 e a relação do mix energético para geração de eletricidade da matriz brasileira. Assim, a somatória equivalente da matriz foi o percentual de geração de cada fonte, multiplicado pelo fator de emissão predeterminado na tabela 4, o que resultou no valor de 131,20gCO₂eq/kWh para a emissão de GEE_{WTT_BEB}, considerando a eficiência média dos ônibus elétricos à bateria em kWh/km que estão homologados no mercado brasileiro, (modelos compatíveis com existentes no município).

Da mesma forma foi possível o cálculo de emissão de GEE do poço à usina para uma única fonte. Hoje diversos países, como o Chile, estão utilizando sistemas de produção de energia independentes ou híbridos da rede (WORLD BANK, 2020). Desta forma, seria pertinente saber qual seria a emissão de GEE do poço à usina desta fonte de energia. Assim, 100% de produção de energia por sistema de energia solar, utilizando a Tabela 4, resultou em 53,0 gCO₂eq/KWh. Foi possível então calcular qual foi a emissão da frota convertida para ônibus elétrica, com fonte oriunda da rede ou de um sistema fotovoltaico, apresentados na tabela 9.

As emissões de GEE_{TW} (usina à roda) para os ônibus elétricos à bateria não foram computadas, já que não produzem nenhuma emissão de poluentes diretamente na sua operação (LAJUNEN; LIPMAN, 2016).

Tabela 9 – Emissões GEE_{WTTW_BEB} *well-to-wheels* por frota.

| BEB | Quilometrag em (km/ano) | η (kWh/ km) | ρ_i (gCO ₂ eq/kWh) | | GEE_BEB (gCO ₂ eq) | |
|------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | | | Rede | Sist. Fotovolt. | Rede | Sistema Fotovoltaico |
| Midibus | 1.762,259 | 0.81 | 131,20 | 53 | 187.274.791,64 | 75.653.778,87 |
| Conven cional | 9.045,612 | 1.25 | 131,20 | 53 | 1.483.448.708,36 | 599.271.795,00 |
| Total | 10.807,871 | | | | 1.670.723.500,00 | 674.925.573,87 |

Discussões

Dentro da análise de emissões do poço à roda, onde foi associada a utilização de combustível diesel e biodiesel ao uso da frota de ônibus do município de Cascavel-PR e comparado aos ônibus elétricos; carregados com energia oriunda da rede de distribuição e/ou de uma fonte renovável (sistema fotovoltaico), obtivemos resultado de emissão em gCO₂eq/km numa redução de 98,37% entre o BEB com energia proveniente de um sistema fotovoltaico e o ICEB abastecido com diesel B10 e de 95,98% entre o BEB com energia proveniente da rede de abastecimento de energia para o ICEB abastecido com B10 (figura 21).

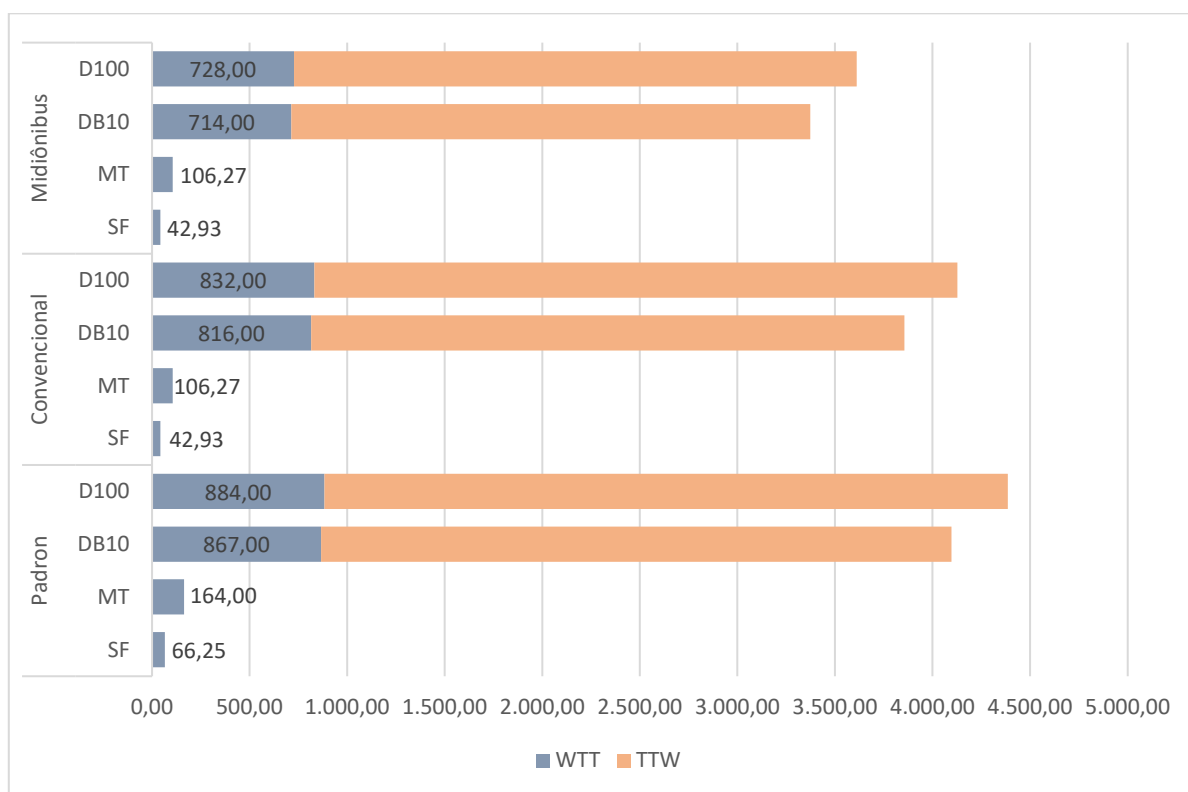


Figura 21 – Emissão por tipologia de ônibus e tipo de combustível - GEE_{WTW} (gCO₂eq/km).

Ao considerarmos as emissões totais (Poço a Roda) GEE_{WTW} percebemos que elas são altamente dependentes da matéria-prima ou fonte utilizadas para conversão da energia, seja ela diesel ou eletricidade. Embora os ônibus elétricos estejam sendo apresentados como revolução tecnológica no setor de transporte, no que se refere as

emissões, pois sua emissão na rodagem é zero, o seu sucesso está diretamente direcionado a sua fonte. Portanto, países ou sistemas que possuem fontes de energia elétrica predominantes de fontes renováveis e limpas têm resultados superiores em termo de emissões de GEE. No Brasil vêm crescendo nos últimos anos a produção de energia por sistemas independentes, chamados de micro, mini e as usinas de energia solar. Essa possibilidade de gerar sua própria energia, mais barata e mais limpa tem atraído muitas empresas e governos a implantarem esses sistemas. A produção de energia solar não é um processo estável por definição, por isso podemos apontar um futuro estudo para implantação desse sistema, verificando a possibilidade e viabilidade para um sistema on-grid, off-grid ou híbrido. Desta forma, o resultado líquido das emissões é específico do sistema implantado, do país e do tempo.

As cidades são a chave no combate aos impactos ambientais e sociais negativos, pois hospedam mais da metade da população mundial e são responsáveis por três quartos do consumo global de energia, resultando em uma cultura de consumo. A pesquisa nos mostrou que a implantação de ônibus elétricos para o transporte público das cidades, entre elas Cascavel, corroboram para um planejamento de baixa emissão de carbono confirmando as diretrizes mundiais, como a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, o Acordo de Paris e outros tratados exigem que tanto produtores quanto consumidores devem reduzir seus impactos nas mudanças climáticas e desafios ambientais.

O planejamento de reestruturação e mudança no transporte público para o município de Cascavel deve passar por uma valorização do mesmo aliando o atual comportamento do consumidor (por exemplo, escolha de um serviço em detrimento da posse de um bem) juntamente com o surgimento de tecnologias impulsionadas pela internet, rastreamento etc., que vêm representando grandes aliados para um novo modelo de economia e negócios, que se inter-relacionam ao meio ambiente, se propõe à prevenção do esgotamento dos recursos e reposicione o transporte público de forma a criar uma nova cultura de utilização desse modal. Isso é possível, como foi visto em outros países como Chile, quem vem criando uma cultura de valorização do transporte público aliando bom serviço e tecnologia.

No desenvolvimento sustentável o uso de energia e as emissões de GEE devem estar associadas, tanto à produção da energia quanto a tecnologia do uso dos veículos, portanto, o gestor público só será capaz de decidir por uma política

adequada de transporte público se considerar todo o caminho e o impacto geral das escolhas da energia e tipologia dos veículos pode representar uma excelente estratégia para o alcance das metas dos ODS e a Política de Neutralização de Gases de Efeito Estufa, nos municípios. Dentro das metas estabelecidas pela Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) na COP 26, foi para uma redução de 43% das emissões de carbono até 2030 e atingir a neutralidade em 2060, assim estabelecemos três cenários; o cenário atual (2022), onde os ônibus da frota são todos movidos por diesel B10 resultando na emissão de 41.523,15 tonCO₂eq/ano, o cenário dois (2030) onde deverá ocorrer uma redução em 43% das emissões e atingir 23.668,20 tonCO₂eq/ano e o cenário três (2060) atingindo a neutralidade de emissões de carbono.

Considerando os fatores de emissão, as rotas e suas respectivas médias de quilometragem, tipologias e número de ônibus foi possível prever quanto da frota de ônibus pode ser alterada para ônibus elétrico à bateria, reduzindo as emissões estabelecidos nos três cenários de análise baseados nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim, como demonstrado na tabela 8 foi previsto a alteração de 58 ônibus (33 modelos Padron e 25 modelos Comum) ou 38% da frota dos ônibus à combustão para ônibus elétrico, com aplicação de um sistema fotovoltaico para produção de energia, para alcançar o resultado recomendado de redução de 43% das emissões até 2030 e 100% das emissões até 2050, ou seja, 150 ônibus.

Tabela 10 – Emissões GEE por linha de ônibus do município de Cascavel – PR.

| Nome Linha | Modelo Ônibus | Média km/ano | Diesel B10 (gCO ₂ eq/ano) | Eletrico BEB (gCO ₂ eq/ano) | |
|----------------------|------------------|-----------------|---|---|---------------|
| | | | | Rede | PHS |
| Leste Oeste | Padron | 725,915.00 | 2,974,073,755.00 | 119.047.519,30 | 48,091,868.75 |
| Nordeste Oeste | Padron | 406,800.00 | 1,666,659,600.00 | 66.713.776,20 | 26,950,500.00 |
| Nordeste Sudoeste | Padron | 337,344.40 | 1,383,100,006.80 | 55.323.300,89 | 22,349,066.50 |
| Leste Sudoeste | Padron | 501,029.90 | 2,052,719,500.30 | 82.167.150,00 | 33,193,230.88 |
| Oeste Sudoeste | Padron | 187,307.00 | 767,396,779.00 | 30.717.692,43 | 12,409,088.75 |

Tabela 10 – Continuação...

| Nome Linha | Modelo Ônibus | Média km/ano | Diesel B10 (gCO ₂ eq/ano) | Elétrico BEB (gCO ₂ eq/ano) | |
|---|------------------|-----------------|---|---|----------------|
| | | | | Rede | PHS |
| Coopavel Pioneira | Padron | 291,088.90 | 1,192,591,223.30 | 47.737.560,79 | 19,284,639.63 |
| Floresta | Comum | 341,492.30 | 1,316,794,308.80 | 56.003.541,98 | 22,623,864.88 |
| Rivieira | Comum | 309,951.60 | 1,195,173,369.60 | 50.830.977,57 | 20,534,293.50 |
| Interlagos | Comum | 137,985.50 | 532,072,088.00 | 22.629.139,05 | 9,141,539.38 |
| Santa Cruz | Comum | 209,314.70 | 807,117,483.20 | 34.326.878,20 | 13,867,098.88 |
| Santos Dumont | Comum | 211,205.00 | 814,406,480.00 | 34.636.880,78 | 13,992,331.25 |
| Guaruja | Comum | 160,166.40 | 617,601,638.40 | 26.266.729,02 | 10,611,024.00 |
| Santa Felicidade | Comum | 300,794.00 | 1,159,861,664.00 | 49.329.163,22 | 19,927,602.50 |
| Presidente | Comum | 190,003.80 | 732,654,652.80 | 31.159.958,19 | 12,587,751.75 |
| Cascavel Velho | Comum | 205,047.20 | 790,662,003.20 | 33.627.023,13 | 13,584,377.00 |
| Morumbi | Comum | 93.852,13 | 361.893.826,13 | 15.391.421,38 | 6.217.703,83 |
| Total 16 Linhas (gCO ₂ eq/a no) | | 4.609.297,83 | 18.363.778.378,53 | 755.908.712,12 | 305.365.981,46 |
| (TonCO ₂ eq /ano) | | | 18.363,78 | 755,91 | 305,37 |

Fonte: Autor.

No cenário da frota atual (2020) foram analisadas as emissões sob o escopo poço à roda, onde foram considerados; o caminho de produção do combustível B10 e a queima do mesmo, para esse cenário, as emissões foram de 41.523,15 tonCO₂eq/ano. No cenário 2 (2030) para a redução de 43% das emissões da frota municipal sob a condição da troca de 39% da frota ou 59 ônibus ICEB_B10 para ônibus elétrico com sistema de produção de energia fotovoltaica BEB_PHS, a emissão passará a ser de 23.464,74 tonCO₂eq/ano. No cenário 3 (2060) a redução de emissões de CO₂ deverá atingir a neutralidade, adotando a troca de 100% da frota ônibus à combustão ICEB_B10 por ônibus elétrico com sistema de produção de energia fotovoltaica BEB_PHS, a emissão passará a 674,93 tonCO₂eq/ano, com uma redução de 98,37%, mas não atingindo a neutralidade (figura 22).

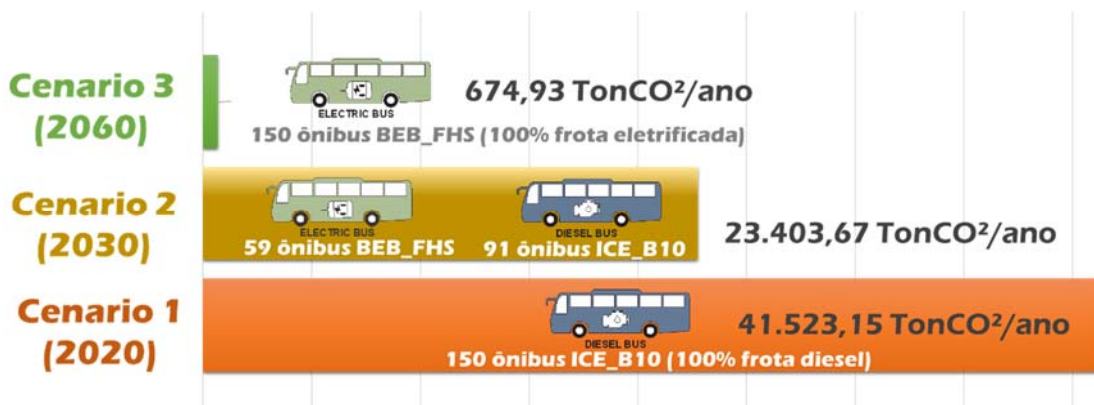


Figura 22 – Emissões por cenários para ODS.

Fonte: Autor.

A partir desta análise foi possível afirmar que a eletrificação da frota de ônibus para o município de Cascavel é uma alternativa viável para que se alcance a meta estabelecida pelas ODS, sendo importante garantir o acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável, adequando o transporte público ao ODS 7 – Energia Acessível e Limpa, onde o sistema de energia solar fornecerá energia renovável para abastecimentos dos ônibus, à meta ODS 11 – cidades e comunidades sustentáveis ressignificando os transportes através de uma tecnologia limpa em carbono e a meta ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima, reduzindo as emissões de carbono e atendendo à Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

Podemos observar que a partir da análise poço à roda constatou-se que com o cenário 3 (2060) não será possível atingir a neutralidade de carbono apenas com a troca da combinação combustível e motorização, apesar de representar o melhor desempenho ambiental. Diante dos resultados, seria necessária a associação de outros métodos de descarbonização, que não estão no escopo desta pesquisa, como o plantio de árvores para as emissões restantes.

Novos estudos são importantes para apresentar o grande potencial para energia renováveis e importante exportador no mercado de ônibus, principalmente para a América Latina, mas o Brasil ainda demonstra pouca disposição e incentivo para a substituição da tecnologia diesel pela elétrica nos ônibus urbanos, resultando em uma posição de atraso em relação a outros países, as políticas públicas para implantação, quanto em tecnologia disponível no mercado, tanto para montagem dos veículos.

A questão das baterias para os ônibus elétricos ainda é um gargalo tecnológico e ambiental, são poucos e ainda pontuais os estudos de análise de ciclo de vida e seus impactos ambientais. Porém, aponta-se como prognóstico a utilização das baterias que não são mais adequadas para a mobilidade elétrica, sendo restauradas

para uma possível segunda vida (figura 24). A capacidade residual da bateria normalmente varia entre 70 e 80% da capacidade inicial, que poderia ser usada em outras aplicações antes da reciclagem. Ainda, segundo Bobba et. al. (2018) um mapeamento realizado no mercado europeu de atividades industriais, projetos de desenvolvimento e pesquisa utilizando segunda vida para baterias de Lítio, apontam como principal aplicação a integração da rede de energia renovável e a capacidade de reserva de energia.

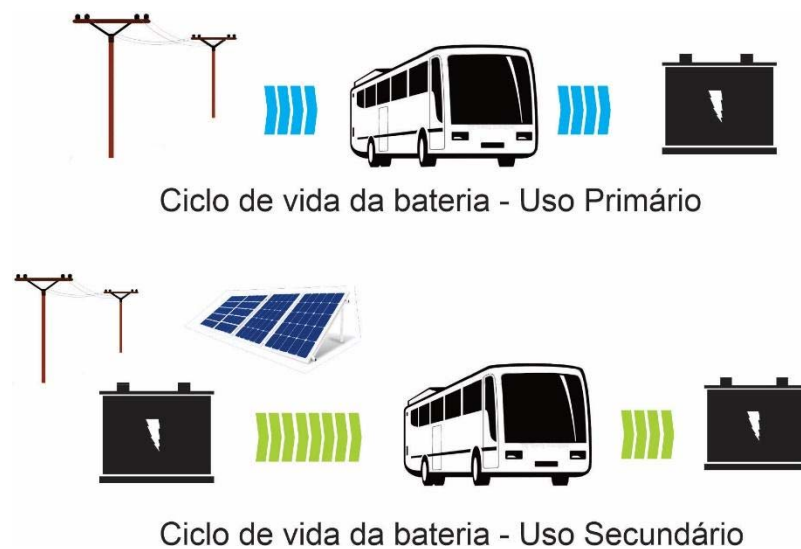


Figura 24 – Representação esquemática dos fluxos de energia do sistema.

Também destacamos o efeito benéfico da sinergia na reutilização das baterias em seu final de ciclo de vida nos veículos elétricos para armazenamento estacionário de energia, reduzindo o preço da eletricidade e a prevenção das perdas e estabilização da rede elétrica, podendo operar como um backup, armazenando energia de períodos de geração com menores impactos, e utilizando-a em períodos em que a produção de energia seria menor ou mais caras (por exemplo, carregar a bateria à noite, quando a contribuição das fontes renováveis é geralmente menor e abastecê-la durante o dia, quando a contribuição das usinas de energia fóssil é maior (figura 24), cooperando para uma mobilidade circular e a ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) - baseando-se na ação no domínio do ODS 7 (Energia Limpa e Acessível).

5. Conclusões

Os ônibus elétricos à bateria apresentam maior desempenho ambiental que os ônibus à combustão, no que tange às emissões de carbono, reduzindo em 95,98% das emissões de carbono da frota do município ao utilizar a energia de origem da rede de distribuição e 98,37% utilizando a energia de um sistema fotovoltaico. A diferença de 2,39% entre a energia de origem da rede de distribuição e a energia de origem de um sistema fotovoltaico foi resultante da matriz elétrica brasileira ser predominantemente renovável, com destaque para a fonte hidrelétrica. No que tange aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável a energia de origem da rede de distribuição seria suficiente para atingir o cenário 2 (2030), contando com uma troca mais acelerada no número de ônibus, porém nenhuma das duas alternativas de origem da energia atinge a neutralidade de carbono esperado para o cenário 3 (2060), apenas com a troca da frota de ônibus à combustão para ônibus elétrico à bateria, sendo ainda necessária outras formas de neutralização do carbono.

A mobilidade urbana, através de seus ônibus urbanos, tem grande participação nas emissões dos gases de efeito estufa nos municípios, países como o Brasil, onde a matriz elétrica é predominantemente renovável, somente a substituição da frota dos ônibus à diesel por ônibus elétrico representa cerca de 95% de redução das emissões no ciclo de vida. O emprego de fontes renováveis para o abastecimento das frotas de ônibus vem se apresentando como o caminho na busca pela mobilidade sustentável e os sistemas de produção de energia solar mais viável por questões de preço, disponibilidade do recurso energético e facilidade de instalação.

Mesmo a geração de energia solar apresentar uma característica de instabilidade na sua geração, a aplicação dos ônibus elétricos pode servir de back-up do sistema, que inicialmente pode estar ligado a rede de distribuição para suprir esta necessidade, mas com a troca das baterias dos ônibus esse back-up passa a ser feito pelas baterias já utilizadas, desta forma a mobilidade passa a ser mais sustentável e tecnológica, comparada a mobilidade à combustão de origem fóssil empregada hoje.

Dentro da análise deste estudo podemos apontar um modelo ideal para a mobilidade dos ônibus no município de Cascavel, num cenário de transição seria necessária a troca de 39% da frota ou 59 ônibus para ônibus elétrico à bateria até 2030, concomitante a isso de suma importância que o município faça um

planejamento energético de longo prazo (10 a 30 anos) antes da implantação da frota de ônibus elétrico à bateria. Também é necessário que o município estabeleça leis que permitam novos modelos de negócios dentro da concessão, onde possa permitir diferentes concessões para aquisição, gestão da frota e gestão energética. Ressaltamos também que neste primeiro cenário, até 2030, que é um período de transição, deve se buscar a melhoria dos serviços gerando integração tecnológica da frota, alinhando as necessidades dos usuários e as tecnologias de gestão de tráfego para ressignificar o sistema, permitindo que a mudança ocorra no sistema como um todo e não somente na tecnologia de tração dos ônibus.

Num segundo cenário, de 2030 a 2060, toda a frota ou 150 ônibus devem ser trocados por ônibus elétrico a bateria. Nesta fase de implantação já é possível estabelecer o quanto de energia será necessária para o sistema completo e quanto das baterias de segundo uso, de origem dos ônibus elétricos, já podem ser reutilizadas no sistema, caracterizando assim um ciclo energético completo renovável na mobilidade dos ônibus urbanos do município, com tecnologias verdes sendo usado tanto para a geração quanto para o armazenamento de energia.

Esse modelo de implantação no município permitirá uma mobilidade sustentável que incentive a Economia circular, bem como a e-mobilidade, conceitos relevantes para atingir os Objetivo de Desenvolvimento Sustentável – ODS 13 (Ação Climática) e a meta de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) na COP 26 (2021), atingindo a neutralidade de carbono até 2060, como também contribuir para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), pois o plano de implantação do sistema estabelece padrões de produção e de consumo sustentáveis, principalmente no que se refere a energia e reutilização das baterias no próprio sistema, reduzindo recursos com a reutilização e reciclagem. O ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) também é cumprido neste modelo de implantação, a origem de energia elétrica brasileira já atenderia o preceito de energia limpa, mas a implantação de um sistema de energia solar consolida a origem limpa da energia e o acesso a mesma. Desta forma o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) é atendido, melhorando acesso à cidade por meio de sistemas de mobilidade urbana mais sustentáveis, inclusivos, eficientes e justos, priorizando o transporte público de massa e o transporte ativo.

6. REFERÊNCIAS

- AJANOVIC, A.; GLATT, A.; HAAS, R.. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. **Energy**, [S.L.], v. 235, p. 121340, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>.
- AYMERIC, Girard; FRANÇOIS, Simon. Case study for Chile: the electric vehicle penetration in chile. **Electric Vehicles: Prospects and Challenges**, [S.L.], p. 245-285, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803021-9.00007-0>.
- ANEEL - National Electric Energy Agency. **Consumer units with distributed generation – Power BI with compiled information and map**. 2019. URL <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojOGVlYjExZmEtYmFiZi00YmNiLTg5NzctMWU5ZDBjZDliNTgyliwidCI6IjNhZml3M2EwLWU1M2YtNGY5NC1hN2Y1LTliNmZkMmU0MTgzZCJ9>
- BAYINDIR, Kamil Çağatay; GÖZÜKÜÇÜK, Mehmet Ali; TEKE, Ahmet. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 52, n. 2, p. 1305-1313, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.028>.
- BATTY, Michael. The Size, Scale, and Shape of Cities. **Science**, [S.L.], v. 319, n. 5864, p. 769-771, 8 fev. 2008. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1151419>.
- BENZ, Michael. **Techview Report: electric buses**. Electric Buses. 2015. FRAUNHOFER MOEZ. Disponível em: https://www.imw.fraunhofer.de/content/dam/moez/de/documents/Working_Paper/Working_Paper_Electric_Buses.pdf. Acesso em: 01 jan. 2021.
- BEEKMAN, R.; HOED, R. van den, "Operational demands as determining factor for electric bus charging infrastructure," **6th Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2016)**, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2016.0963.
- BYD. **Chassi ônibus Elétrico: d9w. D9W**. 2022. Disponível em: <https://www.byd.com.br/chassi-byd-d9w-20-410/>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- BLOOMBERGNEF. **Electric Vehicle: outlook 2019**. OUTLOOK 2019. 2020. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/?sf122680186=1>. Acesso em: 01 jan. 2021.
- BOBBA S., PODIAS A., DI PERSIO F., MESSAGIE M., TECCHIO P., CUSENZA MA, EYNARD U., MATHIEUX F., PFRANG A.; Avaliação de sustentabilidade da aplicação de baterias automotivas no Second Life (SASLAB): **JRC Exploratory Research (2016-2017): Relatório técnico final: agosto de 2018**; EUR 29321 PT, Serviço das Publicações da União Europeia, Luxemburgo, 2018, ISBN 978-92-79-92835-2; doi:10.2760/53624, JRC112543

BRASIL. Ministério das Cidades, 2007. **PLANMOB: Construindo a cidade sustentável – caderno de referências para elaboração de plano de mobilidade urbana**. Brasília: Ministério das Cidades.

BRASIL. **Lei Federal Nº 12.587/2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acesso em: mar. 2021.

BRASIL. **Lei Federal Nº 12.187/2009. Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: mar. 2022.

CALABRO, A.; COHEN, B.; DAGA, A.; MILLER, J.; MCMAHON, F. "Performance of 200-kW Inductive Charging System for Range Extension of Electric Transit Buses," 2019 **IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)**, 2019, pp. 1-5, Doi: 10.1109/ITEC.2019.8790490.

CAMAGNI, R., M.C. GIBELLI, and P. RIGAMONTI. I costi collettivi della città dispersa. **Florence: Alinea**. 2002. Disponível em: <https://re.public.polimi.it/handle/11311/557028#.YQXapo5KhPY>. Acesso em junho 2021.

CARVALHO, C. H. R. **Mobilidade Urbana Sustentável: Conceitos, Tendências e Reflexões**. Brasília: Ipea, 2016. (Texto para Discussão, n. 2194).

CASCAVEL, Prefeitura Municipal de. Transitar: Dados da Autarquia Municipal de Mobilidade, trânsito e cidadania. Departamento de Gestão de Transporte. Divisão de Transporte. Distâncias percorridas pelo sistema de transporte público municipal. 2019.

CASCAVEL, Prefeitura Municipal de. Transitar: Dados da Autarquia Municipal de Mobilidade, trânsito e cidadania. Departamento de Gestão de Transporte. Divisão de Transporte. Mapa rotas transporte público. 2020a.

CASCAVEL, Prefeitura Municipal de. Transitar: Dados da Autarquia Municipal de Mobilidade, trânsito e cidadania. Departamento de Gestão de Transporte. Divisão de Transporte. Frota do transporte coletivo urbano municipal. 2020b.

CASCAVEL. **Lei 6.062/2012. Plano municipal viário e de transportes de Cascavel**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-cascavel-pr#:~:text=ALTERA%20%20PLANO%20DIRETOR%20DE,%2F2001%20%2D%20ESTATUTO%20DA%20CIDADE>. Acesso em: mar. 2022.

CASCAVEL. **Lei 91/2017. Plano Diretor de Cascavel**. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/pr/c/cascavel/lei-ordinaria/2012/607/6062/lei-ordinaria-n-6062-2012-aprova-o-plano-municipal-viario-e-de-transportes-de-cascavel>. Acesso em: mar. 2021.

CAZZOLA, Pierpaolo; SCHUITMAKER, Renske. International Maritime Organization agrees to first long-term plan to curb emissions. Global ev outlook 2016. [s.l.]: **IEA, 2016**. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/international-maritime->

[organization-agrees-to-first-long-term-plan-to-curb-emissions](#). Acesso em: 14 abr. 2020.

CHATROU - CME Solutions. **Record year 2019. The big leap forward of e-bus market in Western Europe**. 2019. **Sustainable Bus Magazine**. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/news/record-year-2019-the-big-leap-forward-of-e-bus-market-in-western-europe/>. Acesso em: 01 jan. 2021.

CHILE. Comisión Nacional de Energía. Ministerio de Energía (org.). **Anuario Estadístico de Energía**. 2019. Disponível em: <https://www.cne.cl/nuestros-servicios/reportes/informacion-y-estadisticas/>. Acesso em: 22 out. 2021.

CHILE. Ministério de Transportes e Telecomunicações MTT (org). **Política Nacional de Transportes: conectando Chile**. 2013. Disponível em: <https://www.mtt.gob.cl/wp-content/uploads/2013/05/documento-politica.pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.

COSTA, M. S. **Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável**. 2008. Tese de Doutorado. São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

CORREA, G.; MUÑOZ, P.M.; RODRIGUEZ, C.R.. A comparative energy and environmental analysis of a diesel, hybrid, hydrogen and electric urban bus. **Energy**, [S.L.], v. 187, p. 115906, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.115906>.

CRESSWELL, T. **On the move: mobility in the modern western world**. New York: Routledge, (2006).

DANTAS, T.e.T.; DE-SOUZA, E.D.; DESTRO, I.R.; HAMMES, G.; RODRIGUEZ, C.M.T.; SOARES, S.R.. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, [S.L.], v. 26, p. 213-227, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>.

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**, [S.L.], v. 58, p. 122-138, jan. 2018. Elsevier BV. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.015>.

DU, Jiuyu; LI, Feiqiang; LI, Jianqiu; WU, Xiaogang; SONG, Ziyou; ZOU, Yunfei; OUYANG, Minggao. Evaluating the technological evolution of battery electric buses: china as a case. **Energy**, [S.L.], v. 176, p. 309-319, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.084>.

ELETRA. **12M E-BUS Elétrico Puro Low Entry**: mbb/marcopolo. MBB/MARCOPOLO. 2022. Disponível em: <https://www.eletrabus.com.br/eletrico-puro/eletrico-puro-solar-low-entry-12m-ufsc/>. Acesso em: 20 jun. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Cities-in-the-CE_An-Initial-Exploration.pdf**. 2017. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/link/6geje0hxj9n1-2aoa77/@/preview/1?o>. Acesso em: 08 nov. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisas Energéticas. **Balanco energético nacional 2021**. Ano base 2020. 2021 Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: Mar 2020.

EPE. Empresa de Pesquisas Energéticas. **Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil**. 2020. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-480/topico-527/NT%20SEE-SDB%20-%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20T%C3%A9cnico-Econ%C3%B4mica%20de%20%C3%94nibus%20El%C3%A9trico%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: Jan 2022.

FLÓREZ-ORREGO, Daniel; SILVA, Julio A.M.; OLIVEIRA JUNIOR, Silvio de. Exergy and environmental comparison of the end use of vehicle fuels: the brazilian case. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 100, p. 220-231, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.074>.

GHARAIBEH, A., SALAHUDDIN, M. A., HUSSINI, S. J., KHREISHAH, A., KHALIL, I., GUIZANI, M., & AL-FUQAHA, A. (2017). Smart Cities: A Survey on Data Management, Security, and Enabling Technologies. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, 19(4), 2456-2501. [8003273]. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2736886>

GÖSSLING, Stefan; SCHRÖDER, Marcel; SPÄTH, Philipp; FREYTAG, Tim. Urban Space Distribution and Sustainable Transport. **Transport Reviews**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 659-679, 16 fev. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2016.1147101>.

GOMIDE, A. A. **Transporte urbano e inclusão social: elemento para políticas públicas**. Brasília: Ipea, 2003. (Texto para Discussão, n. 0960).

HANNAN, M.A.; AZIDIN, F.A.; MOHAMED, A. Hybrid electric vehicles and their challenges: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 29, p. 135-150, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.097>.

HUO, Hong; WANG, Michael; BLOYD, Cary; PUTSCHE, Vicky. Life-Cycle Assessment of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Soybean-Derived Biodiesel and Renewable Fuels. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 43, n. 3, p. 750-756, 23 dez. 2008. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es8011436>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Cidades e Estados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/cascavel.html> >. Acesso em 07 mar. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas do Censo Demográfico 2010 - Urbanização. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv64529_cap6.pdf.

IDEIA CIRCULAR (org.). **O que é economia circular**. 2022. Disponível em: <https://www.ideiacircular.com/economia-circular/>. Acesso em: 29 jun. 2022.

IEA. **Data and Statistics**. 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/data-andstatistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>. Acesso em: 16/01/2021.

IEA. **Global EV Outlook 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-andstatistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>. Acesso em: 16/01/2021.

KAMEYAMA, Yasuko; KAWAMOTO, Akinori. Four intermediate goals: a methodology for evaluation of climate mitigation policy packages. **Climate Policy**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 210-220, 8 dez. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14693062.2016.1258632>.

KEIRSTEAD, James; JENNINGS, Mark; SIVAKUMAR, Aruna. A review of urban energy system models: approaches, challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 3847-3866, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>.

KARJALAINEN, Linda E.; JUHOLA, Sirkku. Urban transportation sustainability assessments: a systematic review of literature. **Transport Reviews**, [S.L.], v. 41, n. 5, p. 659-684, 4 fev. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2021.1879309>.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 127, p. 221-232, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.

KUMAR, Lalit; JAIN, Shailendra. Electric propulsion system for electric vehicular technology: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 29, p. 924-940, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.014>.

LABMOB (Brasil). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ (comp.). E-BUSRADAR: ônibus elétricos América Latina. Ônibus Elétricos América Latina. 2022. Disponível em: <https://www.ebusradar.org/>. Acesso em: 30 maio 2022.

LAJUNEN, Antti; LIPMAN, Timothy. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. **Energy**, [S.L.], v. 106, p. 329-342, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.075>.

LEAL FILHO, Walter; ABUBAKAR, Ismaila Rimi; KOTTER, Richard; GRINDSTED, Thomas Skou; BALOGUN, Abdul-Lateef; SALVIA, Amanda Lange; AINA, Yusuf A.; WOLF, Franziska. Framing Electric Mobility for Urban Sustainability in a Circular Economy Context: an overview of the literature. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 14, p. 7786, 12 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13147786>.

LI, Jing-Quan. Battery-electric transit bus developments and operations: a review. **International Journal of Sustainable Transportation**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 157-169, 12 ago. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15568318.2013.872737>.

LI, Liang; ZHANG, Yuanbo; YANG, Chao; YAN, Bingjie; MARTINEZ, C. Marina. Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 111, p. 299-314, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.077>.

LIN, Yuping; ZHANG, Kai; SHEN, Zuo-Jun Max; YE, Bin; MIAO, Lixin. Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S.L.], v. 107, p. 423-443, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>.

LOWRY, J., LARMINIE, J. Electric vehicle technology explained. Hoboken, N.J.: Wiley. 2012. <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=FwXcCmT1OQUC&oi=fnd&pg=PR13&dq=+LOWRY%3B+LARMINIE,+2012+full+cell+buses&ots=q2PJeYq5jE&sig=Y10F3-sGOjrXqxsosNIJS0yBVjc#v=onepage&q=LOWRY%3B%20LARMINIE%2C%202012%20full%20cell%20buses&f=false>.

MARSDEN, GREG; RYE, TOM. The governance of transport and climate change. **Journal of Transport Geography**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 669-678, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.09.014>.

MAGAGNIN, R. C. **Um Sistema de suporte à decisão na Internet para o planejamento da mobilidade urbana**. 2008. Tese de doutorado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MAHMOUD, Moataz; GARNETT, Ryan; FERGUSON, Mark; KANAROGLOU, Pavlos. Electric buses: a review of alternative powertrains. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 62, p. 673-684, set. 2016. Elsevier BV.

MANZOLLI, Jônatas Augusto. **Decision Support for Planning a Bus Rapid Transit Charging Infrastructure**. 2020. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energy For Sustainability, Department Of Mechanical Engineering, University Of Coimbra, Coimbra, 2020.

MARICATO, E. **Urbanismo na periferia do mundo globalizado: metrópoles brasileiras**. São Paulo em perspectiva, São Paulo, 2000, v. 14, p. 21-33.

MEIRA, L. H. **Políticas de Mobilidade Sustentável no Brasil: Barreiras e Desafios**. 2013. 253 f. Tese (Doutorado) – Curso de Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

MILES, John; POTTER, Stephen. Developing a viable electric bus service: the Milton Keynes demonstration project. **Research In Transportation Economics**, [S.L.], v. 48, p. 357-363, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.063>.

MRCAGNEY. **Electric Bus Technology**: transport research report. TRANSPORT RESEARCH REPORT. 2017. FINAL REPORT. Disponível em: <https://www.mrcagney.com/case-studies/research/electric-bus-technology-transport-research-report/>. Acesso em: 01 jan. 2021.

NEOCHARGE. Tipos de veículos elétricos. 2022. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 16 Jun 2022.

NEUBAUER, J.; WOOD, E. The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility. **J. Power Sources**, 257 (2014), pp. 12-20.

NOBRE, G.C.; TAVARES, E. Scientific literature analysis on big data and internet of things applications on circular economy: a bibliometric study. **Scientometrics**, [S.L.], v. 111, n. 1, p. 463-492, 7 fev 2017. Springer Science and Business Media LLC. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11192-017-2281-6>

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. **ANUÁRIO - 2019**. Disponível em: <https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637375719747836003.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2021.

NURHADI, Lisiana; BORÉN, Sven; NY, Henrik. A Sensitivity Analysis of Total Cost of Ownership for Electric Public Bus Transport Systems in Swedish Medium Sized Cities. **Transportation Research Procedia**, [S.L.], v. 3, p. 818-827, 2014. Elsevier BV.

OFFER, G.J.; HOWEY, D.; CONTESTABILE, M.; CLAGUE, R.; BRANDON, N.P.. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. **Energy Policy**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 24-29, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040>.

ONU (Brasil). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ONU. **Nova Agenda Urbana. HABITAT III**. 2017. Disponível em: <https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Portuguese-Brazil.pdf>. Acesso em: 12 Jun. 2022.

ONU. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. 2019. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>. Acesso em: 01 fev. 2021.

ONU. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. United Nations, A/RES/70/1, Agenda items 15 and 116, 1–35, 2015.

OU, Xunmin; ZHANG, Xiliang; CHANG, Shiyan. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. **Energy Policy**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 406-418, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.031>.

PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T. **Tempo de deslocamento casa-trabalho no Brasil (1992-2009): diferenças entre regiões metropolitanas, níveis de renda e sexo**. Brasília: Ipea, 2013. (Texto para Discussão, n. 1813).

PROGRAMA OESTE EM DESENVOLVIMENTO (POD). **Planejamento energético da região Oeste do Paraná – relatório final**. 2018. Disponível em <<http://oestedesenvolvimento.com.br/>>. Acesso em 26/09/2021.

POULLIKKAS, Andreas. Sustainable options for electric vehicle technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 41, p. 1277-1287, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.016>.

PRUSSI, M., YUGO, M., DE PRADA, L., PADELLA, M. AND EDWARDS, R., **JEC Well-To-Wheels report v5**, EUR 30284 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-20109-0 (online), doi:10.2760/100379 (online), JRC121213.

RASHED, Abdulkarim Hasan; SHAH, Afzal. The role of private sector in the implementation of sustainable development goals. **Environment, Development and Sustainability**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 2931-2948, 15 abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-020-00718-w>.

RAWORTH, Kate. **Economia Donuts**. Trad. George Schlesinger. Rio de Janeiro: Zahar 2019.

RED (Chile). **RED Metropolitana de Movilidad**. 2021. Disponível em: <https://www.red.cl/>. Acesso em: 22 out. 2021.

RIBAU, João P.; SILVA, Carla M.; SOUSA, João M.C.. Efficiency, cost and life cycle CO2 optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. **Applied Energy**, [S.L.], v. 129, p. 320-335, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.015>.

ROGGE, Matthias; WOLLNY, Sebastian; SAUER, Dirk. Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. **Energies**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 4587-4606, 21 maio 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en8054587>.

SADHUKHAN, Jhuma; DUGMORE, Tom I. J.; MATHARU, Avtar; MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias; ABURTO, Jorge; RAHMAN, Pattanathu K. S. M.; LYNCH, Jim. Perspectives on “Game Changer” Global Challenges for Sustainable 21st Century: plant-based diet, unavoidable food waste biorefining, and circular economy. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1976, 5 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12051976>.

SÁNCHEZ, Juan Antonio García; MARTÍNEZ, José María López; MARTÍN, Julio Lumbreras; HOLGADO, María Nuria Flores; MORALES, Hansel Aguilar. Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System. **Energy Conversion and Management**, [S.L.], v. 74, p. 332-343, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.023>.

SAGARIS, Lake; ARORA, Anvita. Evaluating how cycle-bus integration could contribute to “sustainable” transport. **Research In Transportation Economics**, [S.L.],

v. 59, p. 218-227, nov. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2016.05.008>.

SDOUKOPOULOS, Alexandros; PITSIAVA-LATINOPOULOU, Magda; BASBAS, Socrates; PAPAIOANNOU, Panagiotis. Measuring progress towards transport sustainability through indicators: analysis and metrics of the main indicator initiatives. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 67, p. 316-333, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.020>.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Emissões por Atividade Econômica**. 2019. Disponível em: http://plataforma.seeg.eco.br/economic_activity. Acesso em: Fev. 2021.

SILVA, Rodrigo Corrêa da; MARCHI NETO, Ismael de; SEIFERT, Stephan Silva. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 59, p. 328-341, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.001>.

SINDIPEÇAS – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Relatório de Frota Circulante**. 2020. Disponível em: <https://www.sindipecas.org.br/area-atuacao/?co=s&a=frota-circulante>. Acesso em: 01 jan. 2021.

SUMMA. **Operationalising Sustainable Transport and Mobility: The system Diagram and Indicators**. Sustainable Mobility, Policy Measures and Assessment. 2004. Deliverable 3. Work Package 2. Final. Version 1.1. European Commission.

TRAN, V.T., ISLAM, M.R., MUTTAQI, K.M., SUTANTO, D. An Efficient Energy Management Approach for a Solar-Powered EV Battery Charging Facility to Support Distribution Grids. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S.L.], v. 55, n. 6, p. 6517-6526, nov. 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi:<http://dx.doi.org/10.1109/tia.2019.2940923>.

THEIN, SABA; CHANG, YOON SEOK. Decision making model for lifecycle assessment of lithium-ion battery for electric vehicle – A case study for smart electric bus project in Korea. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 249, p. 142-147, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.078>.

THORPE, F. (2016, November). Global battery electric bus market. Presented at the **Zero Emission Bus Conference**, London, UK. Retrieved from http://www.cte.tv/wp-content/uploads/2016/12/5_Thorpe.pdf

TUTTLE, David P.; BALDICK, Ross. The Evolution of Plug-In Electric Vehicle-Grid Interactions. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 500-505, mar. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tsg.2011.2168430>.

TURCONI, Roberto; BOLDRIN, Alessio; ASTRUP, Thomas. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 28, p. 555-565, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>.

UNDP. United Nations Development Programme. Acordo de Paris. 2015. Disponível em: <https://www.undp.org › dam › brazil › docs › ODS>.

UNDP. United Nations Development Programme. Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Nosso Futuro Comum, 4 de agosto de 1987. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>

UNIÃO EUROPEIA. COMISSÃO EUROPEIA. **Greenhouse gas emission statistics - emission inventories**: greenhouse gas emissions in the eu down by 24 % between 1990 and 2019. Greenhouse gas emissions in the EU down by 24 % between 1990 and 2019. 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics_-_emission_inventories#Trends_in_greenhouse_gas_emissions. Acesso em: 25 out. 2021.

URRY, John. *Mobilities: new perspectives on transport and society*. Routledge, 2016.

VILLANTE, Carlo; ANATONE, Michele; VITA, Angelo de. On WTW and TTW Specific Energy Consumption and CO2 Emissions of Conventional, Series Hybrid and Fully Electric Buses. **Sae International Journal of Alternative Powertrains**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 5-26, 17 abr. 2018. SAE International. <http://dx.doi.org/10.4271/08-07-01-0001>.

WILHEIM, Jorge. CIDADES PARA TEMPOS NOVOS: Urbanismo e Planejamento no século XXI. 2015. Disponível em: http://www.jorgewilheim.com.br/app/webroot/files/uploads/ckfinder/files/JorgeWilheim_CidadeParaTemposNovos.pdf. Acesso em Mar. 2021.

WOO, Jongroul; CHOI, Hyunhong; AHN, Joongha. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: a global perspective. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S.L.], v. 51, p. 340-350, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.005>.

WORLD BANK (org.). **Latin America Clean Bus in LAC**: lessons from Chile's experience with e-mobility. **World Bank**. Washington Dc, p. 01-112. 11 set. 2020. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34435?show=full>. Acesso em: 01 jul. 2021.

YAZDANIE, Mashael; NOEMBRINI, Fabrizio; DOSSETTO, Lionel; BOULOUGHOS, Konstantinos. A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 249, p. 333-348, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.043>.

YONG, Jia Ying; RAMACHANDARAMURTHY, Vigna K.; TAN, Kang Miao; MITHULANANTHAN, N.. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 49, p. 365-385, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130>.

ZIVANOVIC, Z.; NIKOLIC, Z. The application of electric drive technologies in city buses. In: Stevic Z editor. **New generation of electric vehicles**; 2012.

ZHOU, Boya; WU, Ye; ZHOU, Bin; WANG, Renjie; KE, Wenwei; ZHANG, Shaojun; HAO, Jiming. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. **Energy**, [S.L.], v. 96, p. 603-613, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>.

ZHUANG, Peng; LIANG, Hao. Stochastic Energy Management of Electric Bus Charging Stations with Renewable Energy Integration and B2G Capabilities. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 1206-1216, abr. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tste.2020.3039758>.