

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ  
ESCOLA DE BELAS ARTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO URBANA**

**THAIS CARLINI BAPTISTA PROHMANN**

**MOBILIDADE URBANA E BIOMETANO: UMA RELAÇÃO INEVITÁVEL PARA A  
SUSTENTABILIDADE DAS CIDADES**

**CURITIBA**

**2022**

**THAIS CARLINI BAPTISTA PROHMANN**

**MOBILIDADE URBANA E BIOMETANO: UMA RELAÇÃO INEVITÁVEL PARA A  
SUSTENTABILIDADE DAS CIDADES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana da Escola de Belas Artes da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Gestão Urbana.

Orientador:  
Prof. Dr. Harry Alberto Bollmann

**CURITIBA**

2022

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central  
Pamela Travassos de Freitas – CRB 9/1960

P964m  
2022 Prohmann, Thais Carlini Baptista  
Mobilidade urbana e biometano : uma relação inevitável para a sustentabilidade das cidades / Thais Carlini Baptista Prohmann ; orientador: Harry Alberto Bollmann.– 2022.  
70 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2022  
Bibliografia: f. 60-69

1. Planejamento urbano. 2. Mobilidade urbana. 3. Transporte urbano. 4. Desenvolvimento urbano sustentável. I. Bollmann, Harry Alberto. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Gestão Urbana. III. Título.

CDD 22. ed. – 711.4

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar saúde e forças para enfrentar todos os momentos da minha vida, mesmo nos momentos em que meus medos são maiores que a minha fé.

A toda minha família, em especial meus pais, que sempre fizeram e fazem o possível e impossível para tornar meus sonhos realidade. Não tenho palavras para descrever minha gratidão e meu amor por vocês.

Ao meu marido, amigo, companheiro, pelo apoio concedido em todas as minhas decisões e todos os desafios que surgem a mim, como o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por todo o amor, carinho e cuidado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Harry Alberto Bollmann, por todos os ensinamentos desde a graduação e por desempenhar seu papel orientado pela essência de um incentivador, a qual foi fundamental na minha trajetória acadêmica.

Agradeço ainda a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para elaboração deste trabalho, em especial aos amigos que fiz no PPGTU no decorrer do curso de Mestrado.

## RESUMO

Em diversas partes do mundo, tem-se estudado sobre novas fontes de energia a serem implementadas no transporte público para a redução dos poluentes emitidos pela queima de combustíveis fósseis e os problemas que eles causam, principalmente nos grandes centros urbanos. Nas grandes cidades, a questão do transporte urbano é abordada em relação às suas consequências ambientais locais e globais, e as análises em geral podem ser divididas em dois grandes grupos: as que se preocupam com a otimização dos veículos tornando-os mais eficientes e menos poluentes, e as que se preocupam com as questões de concepção do sistema de transporte e sua infraestrutura de modo a ganhar eficiência pela inteligência incorporada na integração de diversos modais de transporte. Assim, a pesquisa buscou analisar o potencial do uso de biocombustíveis alternativos para mobilidade urbana, tendo em vista a sustentabilidade das cidades. A pesquisa se desenvolveu por meio da abordagem de estudo de caso único com recorte territorial no município de Curitiba. A análise dos resultados permitiu observar que existem inúmeras barreiras em relação à implementação e à aquisição de equipamentos e distribuição do biometano, porém os resultados obtidos também evidenciaram que há um grande potencial de utilização e redução de poluentes emitidos na atmosfera. Algumas sugestões para trabalhos futuros nessa área são apresentadas ao final do artigo.

**Palavras-chave:** Mobilidade Urbana; Biometano; ODS.

## **ABSTRACT**

In different parts of the world, studies have been carried out on new energy sources to be implemented in public transport to reduce pollutants emitted from fossil fuels and the problems they cause, especially in large urban centers. In large cities, the issue of urban transport is addressed in relation to its local and global environmental consequences, and the analyzes in general can be divided into two large groups: those concerned with optimizing vehicles, making them more efficient and less pollutants, and those concerned with issues of designing the transport system and its infrastructure in order to gain efficiency through the intelligence incorporated in the integration of different modes of transport. Thus, the research sought to analyze the potential of using alternative biofuels for urban mobility, considering the sustainability of cities. The study was developed through the approach of a single case study with a territorial cut in the city of Curitiba. The analysis of the results allowed us to observe that there are numerous barriers in relation to the implementation and acquisition of equipment and distribution of biomethane, however, the results obtained also showed that there is a great potential for the use and reduction of pollutants emitted into the atmosphere. Some suggestions for future work in this area are presented at the end of the article.

**Key-words:** Urban mobility; Biomethane; ODS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Poluentes atmosféricos e suas causas. ....	17
Quadro 2 – Padrão de emissão conforme modelo do motor .....	18
Figura 1 – Ônibus a Diesel .....	23
Figura 2 – HibriBus.....	24
Figura 3 - Ônibus Biarticulado .....	25
Figura 4 - Ônibus a Biometano.....	25
Figura 5 – Matriz Elétrica Brasileira.....	26
Figura 6 – Valores Máximos de Emissões de GEE por tipo de fontes de energia ....	33
Figura 7 - A era dos gases energéticos.....	34
Figura 8 – Planta da CS Bioenergia .....	36
Figura 9 – Intensidade de Carbono .....	37
Figura 10 – Matriz SWOT.....	43
Quadro 3 – Emissão de poluentes .....	49
Quadro 4 - Emissão de CO2 .....	50
Quadro 5 – Análise comparativa das alternativas energéticas.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Passageiros pagantes .....	21
Tabela 2 – Frota analisada.....	22
Tabela 3 - Redução de Poluente.....	24
Tabela 4 – Matriz energética.....	27
Tabela 5 – Estações de Tratamento de Esgoto com sua respectiva capacidade de tratamento .....	52
Tabela 6 – Equivalência Energética .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
OMS	Organização Mundial da Saúde
MP	Material Particulado
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
URBS	Urbanização de Curitiba
USP	Universidade de São Paulo
PMC	Prefeitura Municipal de Curitiba

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
3.1	MOBILIDADE URBANA E A SUSTENTABILIDADE DAS CIDADES .....	14
<b>3.1.1</b>	<b>O papel da infraestrutura de transportes na otimização do sistema de mobilidade urbana .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Mobilidade urbana e saúde.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Sistema de Transporte Público de Curitiba .....</b>	<b>20</b>
3.2	MATRIZ ENERGÉTICA E O SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	26
<b>3.2.1</b>	<b>Crise energética e as energias alternativas no transporte público.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Alternativas energéticas .....</b>	<b>30</b>
3.3	PROCESSO DE INSERÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A ADOÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA NO TRANSPORTE PÚBLICO.....	38
<b>4</b>	<b>ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA .....</b>	<b>40</b>
4.1	DELINEAMENTO METODOLÓGICO.....	40
<b>4.1.1</b>	<b>Técnicas de busca da informação .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Técnicas de análise de informação.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
5.1	A CIDADE DE CURITIBA – PLANEJAMENTO URBANO E TRANSPORTE PÚBLICO.....	46
5.2	O TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS EM CURITIBA.....	49
5.3	APLICAÇÃO DA MATRIZ SWOT .....	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos grandes centros urbanos, a questão do transporte é cada vez mais abordada em relação aos seus impactos ambientais, locais e globais. As análises em geral podem ser divididas em dois grandes grupos: as que se preocupam com a otimização dos veículos tornando-os mais eficientes e menos poluentes, e as que se preocupam com as questões de concepção do sistema de transporte e sua infraestrutura de modo a ganhar eficiência pela inteligência incorporada na integração de diversos modais de transporte.

Do ponto de vista veicular, a Universidade de São Paulo (USP, 2018) vem há anos avaliando os efeitos do tráfego veicular na poluição atmosférica das cidades. Segundo Brito *et al.* (2018), na cidade de São Paulo, os veículos movidos a diesel, como caminhões e ônibus, são responsáveis por cerca de metade da concentração de compostos tóxicos na atmosfera, tais como benzeno, tolueno e material particulado, mesmo que esses veículos representem apenas 5% da frota veicular total.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde – OMS (2018), nove entre dez pessoas no mundo regularmente respiram ar com altos níveis de poluentes, resultando em um número preocupante de sete milhões de mortes por ano devido à poluição. Mesmo quando os níveis de concentração dos poluentes se encontram abaixo dos determinados pela legislação, são capazes de provocar efeitos na saúde das pessoas, tais como: internações hospitalares, doenças respiratórias e cardiovasculares, além de outras enfermidades, como o câncer, as malformações congênitas, a restrição do crescimento intrauterino e distúrbios da fertilidade (JASINSKI *et al.*, 2011; BRAGA *et al.*, 2007; POPE *et al.*, 2004).

Uma das alternativas que podem ser levantadas para a diminuição das emissões atmosféricas e conseqüentemente a redução dos problemas ocasionados à saúde pública, como a redução de doenças pulmonares e cardiorrespiratórias, é o uso de fontes de energia alternativas não originadas de combustíveis fósseis, como o biometano derivado do biogás. Essa mudança na matriz energética do transporte público é considerada mais sustentável, uma vez que deriva de fontes renováveis e que utilizam recursos já preexistentes em nível local (COSTA; PRATES, 2005). Com base no relatório divulgado pela Associação Nacional de Transportes Públicos –

ANTP (2016), em parceria com a Volvo, uma das alternativas para transformar um ônibus em 100% sustentável é a substituição do diesel fóssil pelo biometano, porque, além de substituí-lo, evita o lançamento direto do metano originado na decomposição da matéria orgânica de resíduos agropastoris, industriais ou urbanos na atmosfera.

Algumas iniciativas na cidade de Curitiba têm contribuído para a redução dos problemas ocasionados pela poluição do ar, como a inserção de ônibus híbridos, que são capazes de reduzir em até 75% o consumo de diesel e a emissão de poluentes. Atualmente, a capital paranaense apresenta uma frota de 1.026 ônibus, dos quais somente 30 veículos são híbridos, representando 2,4% da frota total da Urbanização de Curitiba (URBS, 2022). Os resultados em redução de poluentes atmosféricos foram apresentados pela ANTP (2016), em que comparou-se o desempenho dos ônibus híbridos de Curitiba com o motor de tecnologia EURO 3 e os ônibus a diesel. Nessa comparação, foi comprovada uma redução de 80% de gases nitrogenados (NOx), 90% de material particulado (MP) e 35% nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

O número de ônibus híbridos tende a crescer, pois a eletromobilidade no setor de transporte público de Curitiba será uma das exigências a partir de 2025, onde foi constatado que 72% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no município estão relacionadas à mobilidade urbana, destacando a importância da modernização do transporte com a utilização de biometano e de veículos híbridos (PREFEITURA DE CURITIBA, 2019).

Desse modo, com base nas características dos índices de poluição do ar nas grandes cidades, e devido à preocupação com a melhoria da qualidade de vida da população, esta dissertação propõe como pergunta de pesquisa: quais são os atributos positivos (oportunidades) e negativos (barreiras) apresentados hoje para o desenvolvimento do uso de biocombustíveis e o processo de inserção de políticas públicas mais sustentáveis no sistema de transporte público de passageiros de Curitiba?

Assim, pretende-se analisar os impactos do uso de uma fonte combustível mais limpa e ecologicamente mais sustentável na qualidade ambiental e de vida da população. Em um recorte empírico, pretende-se estimar, para o município de Curitiba, o potencial de geração de biometano, a demanda energética necessária para

abastecer o sistema de transporte urbano, bem como propor políticas públicas que possam atender essas demandas.

Visto que não se encontrou na literatura recente consultada nenhum estudo dessa natureza disponível para a apreciação em pesquisas realizadas pelas gestões locais anteriores das cidades, voltadas para mobilidade urbana, o que se pretende é trazer maiores esclarecimentos referente ao tema e contribuir para a gestão do município.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial do uso de biometano para o transporte público de passageiros tendo em vista a sustentabilidade da cidade de Curitiba.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) conhecer os problemas ambientais e de saúde provocados pelo uso de combustíveis fósseis como fonte de energia primária no transporte público de passageiros;
- b) comparar as alternativas energéticas para o sistema de transporte público de passageiros com base em sua sustentabilidade;
- c) identificar o potencial de produção e a demanda de biometano em Curitiba como alternativa energética mais sustentável para abastecer o sistema de transporte público de passageiros;
- d) analisar o processo de inserção de políticas públicas do Sistema de Transportes Urbanos em Curitiba por meio da experiência de implantação do edital de eletromobilidade da Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) publicado em 2016.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

As fontes energéticas associadas ao setor de transporte público, principalmente o diesel, são interconectadas a diversos fatores políticos e econômicos locais, nacionais e globais. Sendo assim, na busca de uma estabilidade energética, há fatores que são levados em consideração para aplicação (ou não) de determinada fonte energética: segurança energética (garantia de atendimento da demanda) e a sustentabilidade (renovabilidade inesgotabilidade e a prevenção das mudanças climáticas globais e locais. No entanto, há incertezas acerca do ritmo da transição, devendo ser analisadas, sua disponibilidade, fluxo de abastecimento, cadeia produtiva e a infraestrutura local, por meio da substituição dos combustíveis fósseis por outras fontes energéticas mais sustentáveis e limpas.

#### **3.1 MOBILIDADE URBANA E A SUSTENTABILIDADE DAS CIDADES**

Os próximos capítulos abordarão o papel da infraestrutura de transportes na otimização do sistema de mobilidade urbana, a mobilidade urbana e a saúde. É abordado, no primeiro capítulo, a otimização do setor de mobilidade urbana e os modais utilizados. Já no segundo capítulo, relaciona-se os poluentes atmosféricos emitidos pelo transporte e os problemas de saúde ocasionados pelo atual sistema movido predominantemente por combustíveis fósseis.

##### **3.1.1 O papel da infraestrutura de transportes na otimização do sistema de mobilidade urbana**

Segundo Galbieri (2018), o rápido crescimento e a tendência do estilo de vida da população, com a mudança da área rural para a área urbana, resultaram em novos desafios aos gestores públicos, entre eles a adequação da infraestrutura para suportar o crescimento de serviços urbanos, como transporte, saneamento, segurança, saúde e educação. Observam-se problemas latentes e, dentre eles, a dificuldade de locomoção no espaço urbano tem merecido destaque. Como forma de atenuar os desafios gerados, existe a necessidade de aprimorar o planejamento nas cidades com consequente implantação de políticas públicas que assegurem a qualidade de vida da população numa circunstância cada vez mais longe e abrangente.

Segundo o Art. 4 da Lei Federal 12.587/2012 (BRASIL, 2012), mobilidade urbana é a condição em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano. Em relação aos tipos de combustível utilizados, os modais existentes para o transporte urbano de pessoas podem ser classificados em:

- modais de transporte elétrico: bonde, veículo leve sobre trilhos (VLT), metrô leves, metrô urbano (pesado) e o metrô regional (trem metropolitano);
- modais de transporte utilizando combustíveis fósseis: automóveis, ônibus e motocicletas;
- modais utilizando biocombustíveis: ônibus e carros;
- modais de transporte não motorizado: modalidades que se utilizam do esforço humano ou tração animal.

O uso dos modais de transporte produz benefícios para as cidades, reduzindo o tempo de deslocamento, gerando liberdade aos cidadãos realizarem suas demandas, além de aproximar as pessoas, visto que a distância pode ser reduzida conforme o meio de transporte (BERTUCCI, 2011). Para minimizar os problemas causados pela mobilidade urbana, os formadores de políticas públicas das cidades têm buscado novas soluções e investimentos para otimizar os meios de transporte, utilizando métodos tradicionais, como a incorporação de novos modais, implementação de novas infraestruturas e aplicação de novas tecnologias. Algumas vão além, utilizando tecnologia para maior racionalização dos modais; por meio delas, é possível aumentar a eficiência do trânsito, reduzindo o tempo gasto e o custo do deslocamento, conseqüentemente reduzindo a poluição gerada.

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (2014), o setor de transporte foi responsável por 14% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) em 2010, apresentando tendência de crescimento. Quando se foca o uso final de energia, o setor de transporte respondeu por 27% das emissões de GEE no mundo em 2010. As projeções do IPCC apontam que as emissões do transporte podem dobrar até 2050.

Segundo a ANTP (2018), o transporte público de passageiros no Brasil contribuiu com uma parte significativa para esse cenário. Em 2009, aproximadamente 87% das viagens de passageiros feitas por sistemas de transporte público ocorreram

em ônibus movidos a óleo diesel. O desenvolvimento tecnológico e a modernização dos combustíveis e dos veículos estão atrelados à crescente preocupação mundial com o meio ambiente e as constantes atualizações na legislação ambiental de muitos países.

### **3.1.2 Mobilidade urbana e saúde**

A mobilidade urbana está enfrentando pressões crescentes e impactos em virtude de uma série de questões, incluindo padrões climáticos em transformação, crescimento populacional, restrições de capacidade, escassez de capital, tecnologias que aumentam a defasagem das infraestruturas, entre outras. Em razão desses e de outros desafios, e com vistas a evitar os passivos ambientais, as grandes cidades deverão promover mudanças nos aspectos inerentes à mobilidade (MÉLO, 2019).

O aumento da população e a urbanização exigem mudanças significativas nos padrões de mobilidade urbana, e o uso de combustíveis renováveis será fundamental nos próximos anos. O setor de transportes é um grande consumidor de energia no Brasil, responsável por 32,2% do consumo total de energia; os combustíveis fósseis são dominantes nesse setor. O uso de tais fontes renováveis de energia no transporte é particularmente interessante, pois pode servir tanto como estratégia de mitigação das mudanças climáticas como facilitar a transição para a independência fóssil e melhorar qualidade do ar nas cidades e áreas urbanas (FENTON; KANDA, 2016).

Devido ao rápido crescimento urbano e ao uso crescente de veículos individualizados para o deslocamento nas cidades, especialmente nos países em desenvolvimento, o setor de transportes é o que apresenta maior dificuldade na redução do uso de energia, poluentes e emissões de GEEs. Devido a esse motivo, a movimentação dos agentes públicos para a melhoria da qualidade do ar nas grandes cidades tem estreita sinergia com as mudanças climáticas, uma vez que a emissão de gases de efeito estufa e de poluentes está ligada à combustão de combustíveis fósseis. As políticas locais ou nacionais que lidam com um deles têm um impacto consequente sobre o outro (GALBIERI, 2018).

De acordo com o Programa de Assentamento Humano das Nações Unidas, as cidades são os principais contribuintes para as mudanças climáticas, produzindo

cerca de 70% de todo o dióxido de carbono e outros GEEs de usos de energia. As emissões e o consumo de energia são altos nas cidades e deverão crescer até 2050 (ONU-HABITAT, 2021).

Nesse sentido, a frota de veículos brasileira é composta por mais de 45 milhões de veículos leves e cerca de 3,5 milhões de ciclo diesel, principalmente veículos pesados, como ônibus e caminhões, considerando dados de 2012 (MMA, 2019). Desses veículos pesados, cerca de 363 mil são ônibus do ciclo diesel, que por sua vez respondem por cerca de 87% dos ônibus do transporte coletivo (ANTP 2016). Portanto, para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, é necessário que se diminua as dependências do petróleo e conseqüentemente seja realizada uma mudança das fontes primárias de energia para o transporte público.

Dentre os poluentes emitidos, é importante destacar em especial os que vêm causando sérios problemas de saúde (MMA, 2019): o Material Particulado (MP), o Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>), o Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>) e o Monóxido de Carbono (CO). Dapper *et al.* (2016) realizaram uma vasta revisão de literatura, na qual se observou que há associação entre a elevação do MP com o incremento nas internações por asma em crianças e em idosos. O incremento das internações ocorre por doença pulmonar obstrutiva crônica e por doença isquêmica do coração. Observou-se também que altas concentrações NO<sub>2</sub> causam problemas respiratórios. Em relação ao SO<sub>2</sub>, o autor ressaltou que este pode ser facilmente absorvido pelas vias respiratórias superiores, mostrando-se associado aos atendimentos por pneumonia e gripe em idosos. Já o CO é capaz de inibir a troca de oxigênio do sangue com os tecidos vitais, podendo provocar a morte por envenenamento, afetando principalmente o sistema cardiovascular e nervoso, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Poluentes atmosféricos e suas causas.

Autor e ano	Poluentes causadores	Causas	Idade da população
Jasinski <i>et al.</i> , 2011	MP, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> e O <sub>3</sub>	Acréscimo de 10 µg/m <sup>3</sup> de material particulado aumenta o risco de internações em 12%.	0 a 19
Yangi <i>et al.</i> , 2013	MP	Aumentam a mortalidade por câncer.	Todas
Nascimento e Francisco, 2013	MP, O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	Podem causar hipertensão arterial.	Todas
Amâncio e Nascimento, 2014	MP10, SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Conforme as concentrações aumentam, eleva-se o risco de internação em 8% e 19%, verificando que há influência dos poluentes atmosféricos nas internações por asma.	Todas

Pinheiro <i>et al.</i> , 2014	MP10	Ocasionam problemas respiratórios e cardiovasculares.	>60
Lima <i>et al.</i> , 2014	MP10, SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	A exposição da mãe ao material particulado apresenta efeito agudo no nascimento de bebês prematuros.	Recém-nascidos

Fonte: Adaptado de Dapper *et al.*, 2016.

Segundo Bergek e Berggren (2014), a origem de implementação de leis mais restritivas para o controle de emissões de gases tóxicos dos automóveis iniciou-se nos EUA, na década de 1960, resultando na Lei do Ar Limpo dos EUA (US Clean Air Act Amendment – U.S. CAAA) em 1970. Estabeleceu-se, desse modo, metas para reduzir as emissões de CO, HC e NOx em 90% nos anos 1975 e 1976. A Europa, seguindo a mesma ideia, estabeleceu regulamentação similar impondo restrições aos limites de emissões dos automóveis, o nível Euro. Em 1992, foi implementado o primeiro nível Euro I; o Euro 2, em 1996; o Euro 3, em 2000; o Euro 4, em 2005; o Euro 5, em 2009; e o Euro 6, em 2014, conforme apresentado no Quadro 2. Com isso, foi possível reduzir os gases tóxicos dos veículos em 90%.

Quadro 2 – Padrão de emissão conforme modelo do motor

Modelo	Veículo	Tecnologia utilizada
Euro 1 – 1992	automóveis de passageiros e caminhões leves	MPFI e Catalisador
Euro 2 – 1996	automóveis de passageiros	MPFI e Catalisador
Euro 3 – 2000	qualquer veículo	MPFI, catalisador e segundo sensor de oxigênio
Euro 4 – 2005	qualquer veículo	MPFI, catalisador e segundo sensor de oxigênio
Euro 5 – 2009	veículos leves de passageiros e comerciais	MPFI, catalisador, segundo sensor de oxigênio e melhoria do catalisador
Euro 6 – 2014	veículos leves de passageiros e comerciais	MPFI, catalisador, segundo sensor de oxigênio, melhoria do catalisador e Recirculação de Gases da Exaustão (EGR)
Euro 7 – Expectativa 2025	-	-

Fonte: Adaptado de Kousoulidou *et al.*, 2008.

No Brasil, para auxiliar na redução das emissões atmosféricas, foi lançado, em dezembro de 2016, o Programa RenovaBio, que tem o objetivo de fomentar o avanço do setor de biocombustíveis no país até 2030. O programa visa proporcionar recursos

econômicos e financeiros, bem como a sustentabilidade ambiental, estabelecer regras de mercado e investir em novos biocombustíveis (como etanol de segunda geração, biodiesel de óleo vegetal hidrotratado, diesel de cana-de-açúcar, biogás, biometano e bioquerosene). Além disso, busca garantir previsibilidade para a participação competitiva de diversos biocombustíveis da matriz energética brasileira, com ênfase na segurança do abastecimento e reconhecendo a capacidade dos biocombustíveis de promover a descarbonização do mercado de combustíveis (LOCATELLI; VICENTIN, 2019).

A produção de grãos para combustível utiliza recursos naturais em maior quantidade que a produção de óleo diesel de petróleo. Dados do USDA e do USDE (1998) mostram que, para se produzir a quantidade de óleo diesel necessária para gerar a energia para um motor de 1 HP funcionar durante uma hora, é gasto menos de 1 litro de água. Para a produção dessa mesma quantidade de energia a partir do B20, o consumo é de 18 litros de água e, para produzir o B100, são consumidos mais de 85 litros de água. Nutrientes, que não são utilizados na produção de óleo diesel, são usados em larga escala na produção de biodiesel, deixando de serem utilizados para produzir alimentos.

O Biometano é um biocombustível gasoso produzido a partir da decomposição da matéria orgânica (resíduos e ETEs) por ação de bactérias, através de um processo denominado biodigestão anaeróbica. O biometano é obtido após a purificação do biogás, reunindo as propriedades físico-químicas necessárias para ser intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações. Com isso, pode ser comercializado por meio da rede de distribuição de gás canalizado ou como gás comprimido (ANP, 2015).

Outro programa para auxiliar na redução da poluição atmosférica é Curitiba 2035, conforme discutido no subitem 3.2.1; esse programa indica que o consumo de energia deverá crescer na cidade nos próximos anos. Esse acréscimo trará maiores benefícios e facilidades à rotina das cidades, mas promoverá o aumento das emissões de gases de efeito estufa bem acima dos níveis atuais. Buscando respostas a esse contexto, serão ampliados os esforços concentrados em prol da eficiência energética, da diversificação da matriz energética e da minimização do uso de combustíveis

fósseis. Nesse sentido, políticas de descarbonização para os diferentes agentes das cidades devem ganhar força.

### **3.1.3 Sistema de Transporte Público de Curitiba**

O Sistema de Transporte Coletivo de Passageiros de Curitiba teve seu início no ano de 1955 por meio do Decreto 503/55, que deu origem à concessão de transporte para 13 empresas operadoras. A cidade era atendida por 50 ônibus e 80 lotações. Posteriormente, em 1966, após a aprovação do Plano Diretor da cidade, pela Lei 2828/66, foi utilizado como indutor do crescimento ordenado da cidade, promovendo a integração entre as funções e serviços urbanos, aproximando a casa do trabalho, dos equipamentos urbanos e sociais, do comércio, dos serviços e do lazer (URBS, 2022).

O ano de 1970 foi marcado pela criação do Sistema Trinário, contemplando a via estrutural com um corredor exclusivo para ônibus, ladeado por vias de tráfego lento com sentidos opostos; mais duas ruas paralelas de tráfego rápido, também em sentidos opostos. Mais adiante, em 1991, foi aprovado o novo Regulamento do Transporte Coletivo por meio do Decreto 210/1991, em que Curitiba mantém a infraestrutura de transporte da Rede Integrada de Transporte (RIT) à disposição do Sistema de Transporte Coletivo Metropolitano para integrações físicas tarifárias, e o Estado, por meio da COMEC, mantém 13 municípios acessando a RIT (PREFEITURA DE CURITIBA, 2022).

Em relação ao transporte coletivo metropolitano de Curitiba, que até o início de 2015 estava sob a competência da URBS – Urbanização de Curitiba S.A., hoje gerido pela COMEC – Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba, tem sua normativa por meio do Regulamento dos Serviços de Transporte Coletivo Metropolitano de Passageiros na Região Metropolitana de Curitiba, conforme Decreto n. 2009 de julho de 2015, que estabelece em seu Art. 2.º: “Compete ao Estado do Paraná, através de seu Órgão Gestor a delegação, a regulação, o gerenciamento, a operação, o planejamento e a fiscalização do Sistema de Transporte Coletivo Metropolitano de Passageiros”.

A evolução da quantidade de passageiros pagantes no transporte público vem diminuindo, e é possível observar que, desde 2011, o número de passageiros pagantes equivalentes em Curitiba diminuiu em aproximadamente 45%, sendo que em 2011 o número de passageiros pagantes era 25.862.958 e em 2020 é de 14.221.192, conforme ilustrado na Tabela 1 (URBS, 2022).

Tabela 1 – Passageiros pagantes

Data	Passageiros Pagantes Equivalentes	Redução de passageiros
2011	25.862.958	*
2012	25.740.155	- 0,47%
2013	25.201.652	- 2,56%
2014	24.974.556	- 3,44%
2015	18.824.884	- 27,21%
2016	17.655.104	- 31,74%
2017	16.174.214	- 37,46%
2018	15.020.101	- 41,92%
2019	14.743.494	- 42,99%
2020	14.221.192	- 45,01%

Fonte: URBS, 2022.

Segundo Costa *et al.* (2007), a realidade é similar na cidade de Porto Alegre, onde o número de passageiros transportados pelo transporte público tem se reduzido em torno de 5% ao ano. Observa-se, assim, que essa redução não é observada somente na cidade de Curitiba, pois outras cidades brasileiras enfrentam a mesma situação.

Essa redução do número de passageiros transportados revela a fragilização dos sistemas de transporte coletivo em favor de um padrão de mobilidade individual, devido às altas tarifas dos sistemas de ônibus e o crescimento do custo do óleo diesel acima da inflação, entre 2001 e 2015. Já o tempo de deslocamento para o trabalho aumentou em todas as metrópoles e, como consequência, a frota de veículos individuais motorizados (automóveis e motocicletas) cresceu em 331%, de 2001 a 2020 no país (IPEA, 2021).

O sistema de transporte público de Curitiba possui características bem específicas, como a Rede Integrada de Transportes (RIT), que é operada por

empresas privadas e gerenciada pela URBS (2022), contando com linhas urbanas e metropolitanas, chegando a aproximadamente 12 mil viagens por dia e 217.360 km percorridos em dias úteis. Segundo dados disponibilizados pela Prefeitura de Curitiba, em 2022 a RIT do sistema urbano possui uma frota total de 1014 veículos. O sistema metropolitano possui 22 veículos, totalizando 1036 ônibus compondo a RIT, na qual esses são desmembrados nos seguintes modelos: micro, micro especial, comum, comum ee, semi padron, padron, padron dd, padron híbrido, articulado 15m, articulado 20m e biarticulado.

Foram analisados esses ônibus em relação ao tipo de combustível que eles utilizam (Diesel – S10 e Biodiesel – B100) e a frota que possuem, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Frota analisada

Ônibus	Combustível utilizado	Frota operante	km médio mensal (km)	Consumo mensal (litros)	Consumo de combustível (km/L)	Custo mensal (R\$)	Custo por litro (R\$)
Diesel	Diesel	333	2.253.765	811.407	2,7776	3.480.940	4,29
Padron	Diesel	17	101.754	39.333	2,5869	168.742	4,29
Híbrido	Biodiesel	2	15.810	6.111	2,5868	46.285	7,57
Biarticulado	Diesel	112	597.733	529.558	1,1287	2.271.807	4,29
	Biodiesel	24	135.521	120.066	1,1287	909.265	7,57

Fonte: Adaptada da Prefeitura de Curitiba, 2022.

Para calcular o custo por litro do diesel e do biodiesel, foi dividido o custo mensal pelo consumo médio mensal, conforme ilustrado nas equações 1, 2 e 3, em que foi possível obter que o litro do diesel custa R\$ 4,29 reais, conforme ilustrado nas equações 1 e 2, e o litro do biodiesel custa R\$ 7,57 reais, conforme ilustrado nas equações 4 e 5.

Diesel

$$\frac{\text{Custo mensal}}{\text{Consumo Médio Mensal}} = \frac{3.480.940,01}{811.407,93} = 4,29 \quad (\text{eq. 1})$$

## Padron Híbrido – Diesel

$$\frac{\text{Custo mensal}}{\text{Consumo Médio Mensal}} = \frac{168.742,43}{39.333,90} = 4,29 \quad (\text{eq. 2})$$

## Biarticulado – Diesel

$$\frac{\text{Custo mensal}}{\text{Consumo Médio Mensal}} = \frac{2.271.807,01}{529.558,74} = 4,29 \quad (\text{eq. 3})$$

## Padron Híbrido – Biodiesel

$$\frac{\text{Custo mensal}}{\text{Consumo Médio Mensal}} = \frac{46.285,75}{6.111,94} = 7,57 \quad (\text{eq. 4})$$

## Biarticulado – Biodiesel

$$\frac{\text{Custo mensal}}{\text{Consumo Médio Mensal}} = \frac{909.265,64}{120.066,77} = 7,57 \quad (\text{eq. 5})$$

- Diesel (Combustão Interna)

O ônibus AC300, conforme apresentado na Figura 1, é um veículo da marca Volvo, motor D7E a diesel com combustão interna. Os níveis de emissão de poluentes atmosféricos são conforme a regulamentação do CONAMA, padrão EURO III (URBS, 2015).

Figura 1 – Ônibus a Diesel



Fonte: URBS, 2015.

- Padron Híbrido

O ônibus híbrido AC319 (Figura 2) possui um sistema híbrido paralelo que, ao arrancar, é movido pelo motor elétrico e, a partir de 20 km/h, opera com o motor a diesel ou biodiesel. Quando há paradas no trânsito, embarques e semáforos o motor a diesel ou biodiesel é desligado (VOLVO, 2016).

Figura 2 – HibriBus



Fonte: Volvo, 2016.

- Biarticulado

A frota dos ônibus biarticulados (Figura 3) é menos poluente, pois possui motor modelo Euro 5. Os novos biarticulados atendem regulamentações internacionais de controle de poluentes, de acordo com Tabela 3 (VOLVO, 2018):

Tabela 3 - Redução de Poluente dos biarticulados novos

Poluente	Redução
óxido de nitrogênio	até 60%
monóxido de carbono	até 29%
hidrocarbonetos totais	até 23%
material particulado	até 80%

Fonte: Adaptada de Volvo (2018).

Uma das principais melhorias entregues com este modelo, em comparação com a versão anterior (modelo euro III), é a redução da emissão de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos.

Figura 3 - Ônibus Biarticulado



Fonte: Volvo, 2018.

- Biometano

Uma das empresas envolvidas no ramo do biogás como futuro da mobilidade sustentável é a Scania. Em Foz do Iguaçu, de 8 a 12 de novembro de 2020, o veículo exclusivo K280 da Scania com motor a gás esteve à disposição dos passageiros na linha Itaipu Binacional – Parque Nacional do Iguaçu (PNI) (CIBIOGÁS 2022).

Figura 4 - Ônibus a Biometano



Fonte: CIBiogás, 2022.

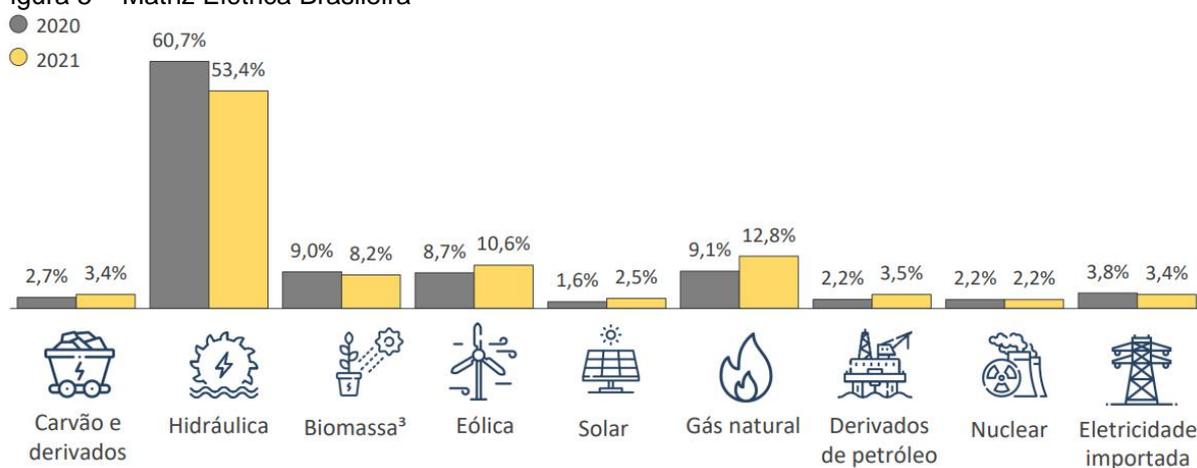
O ônibus transportou 662 pessoas durante a sua estadia na cidade. Utilizando como base o teste realizado com o ônibus modelo (Euro 6), no transporte de funcionários e visitantes da Itaipu Binacional, os 700m<sup>3</sup> de biometano foram utilizados para trafegar cerca de 1.166 quilômetros (CIBIOGÁS, 2022).

### 3.2 MATRIZ ENERGÉTICA E O SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Os transportes em geral constituem-se atualmente na maior fonte de poluição urbana, sendo que o transporte rodoviário a diesel responde por quase totalidade das emissões de material particulado (MP) e de óxidos de nitrogênio (NOx). Dessa maneira, as análises estão relacionadas à melhoria da eficiência energética, bem como à proposição de novas tecnologias para atender e melhorar os efeitos resultantes do sistema de transporte público. Neste capítulo, serão abordadas a crise energética e as energias alternativas no transporte público e as alternativas energéticas.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2022), com base no Relatório Síntese 2021, a matriz elétrica brasileira em 2020 apresentou uma estrutura semelhante à de 2019, com um aumento em quase todas as fontes de energia, exceto hidráulica, biomassa e a eletricidade importada, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: EPE, 2022.

Embora em 2020 tenha sido registrado uma redução de 4,2% da oferta hidráulica, essa queda foi inferior à de 8,3 da oferta total de eletricidade, ampliando a participação da base hidráulica da matriz energética brasileira. No entanto, outras fontes como a solar, a eólica, a geração termoelétrica e a biomassa ganharam representatividade.

Com relação à matriz energética brasileira, o país possui uma oferta interna de 44,8% de energia renovável e 55,2% de energia não renovável. A composição dessas energias está apresentada a seguir na Tabela 4.

Tabela 4 – Matriz energética

Matiz energética	Energia	Percentual disponível
Renováveis	Biomassa de Cana	16,4%
	Hidráulica	11,0%
	Lenha e Carvão Vegetal	8,7%
	Outras renováveis	8,7%
Não Renováveis	Petróleo e derivados	34,4%
	Gás Natural	13,3%
	Carvão Mineral	5,6%
	Urânio	1,3%
	Outras não renováveis	0,6%

Fonte: Adaptada de EPE, 2022.

Enquanto a matriz energética representa o conjunto de fontes de energia disponível para movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade, a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponível apenas para a geração de energia elétrica. Dessa forma, podemos concluir que a matriz elétrica é parte da matriz energética.

### 3.2.1 Crise energética e as energias alternativas no transporte público

Uma das primeiras e principal fonte de energia consumida pela humanidade foi e continua sendo representada pela energia fóssil, desde os períodos geológicos passados a partir de matéria orgânica fossilizada. Esse tipo de energia não renovável está representado atualmente pelo petróleo, carvão mineral e gás natural. Os combustíveis fósseis representam cerca de 80% da energia primária consumida no mundo, e mais de 57% daquela utilizada no setor de transportes (LINDFELDT; WESTERMARK, 2009).

Os combustíveis fósseis enfrentam atualmente uma forte crise devido ao contínuo aumento da demanda e do preço do petróleo, além do imenso prejuízo que causam no meio ambiente, sendo este último um dos fatores mais agravantes, principalmente se tratando do aquecimento global. Acredita-se que esse seja um dos

fatores que contribuem para as mudanças climáticas que o planeta vem enfrentando. Além disso, há manifestação de fortes precedentes, como alteração na intensidade e distribuição das chuvas, elevação do nível dos oceanos e um crescente aumento na frequência e intensidade de fenômenos climáticos extremos (ESCOBAR *et al.*, 2009).

Com base nessa problemática, os governos têm partido em busca de novas fontes de energia que sejam renováveis e ambientalmente limpas. Entre elas, encontram-se os biocombustíveis, que, sendo líquidos, gasosos ou sólidos, são gerados a partir dos mais variados tipos de matéria-prima, como a cana-de-açúcar, plantas oleaginosas, biomassa de florestas e outras fontes de matéria orgânica (POMPELLI *et al.*, 2011).

Eles podem ser utilizados tanto isolados quanto adicionados a combustíveis convencionais. Como exemplos, existem o bioetanol, biodiesel, biometanol, biogás e bio-hidrogênio. O bioetanol, como o biocombustível mais tradicional, é gerado a partir da cana-de-açúcar, milho, trigo e beterraba, enquanto o biodiesel é comumente obtido a partir de sementes de plantas oleaginosas, como soja, canola, algodão, girassol e mamona (DEMIRBAS, 2009).

De forma a adquirir uma maior independência energética e melhorar o desenvolvimento sustentável da cidade, Curitiba lançou o programa Curitiba 2035, projeto publicado para explicitar as diretrizes e ações de curto, médio e longo prazo que nortearão as políticas da capital paranaense nos 20 anos seguintes à divulgação do documento. Esse programa tem o propósito de instrumentalizar as aspirações e o futuro almejado pela sociedade curitibana, bem como de suas interações metropolitanas, no sentido de preparar o município para um crescimento ordenado, um desenvolvimento socioeconômico e sustentável, aproveitando de forma consciente as oportunidades e os investimentos inerentes à cidade, primando pela qualidade de vida e bem-estar da população local (CURITIBA 2035, 2017).

Foram elencadas, no programa, as barreiras para o alcance da visão de futuro, e isso resultou na identificação de três fatores críticos de sucesso, listados a seguir, que englobam as condições impeditivas do sistema atual.

**Gestão:** abrange práticas de gestão no âmbito de Mobilidade e Transporte, com orientação ao planejamento, à execução, ao monitoramento e à avaliação de políticas, programas e atividades relacionados à infraestrutura. Esse fator crítico aborda ações relacionadas à base material que dá suporte à estrutura social e ao desenvolvimento da cidade, englobando o conjunto de atividades, serviços, equipamentos e instalações necessário à concretização da visão temática construída para Mobilidade e Transporte.

**Legislação:** reúne o conjunto de regulamentações para a área de Mobilidade e Transporte estabelecendo condutas e ações aceitáveis ou recusáveis no intuito de assegurar estabilidade governamental e segurança jurídica às relações sociais entre cidadãos, instituições e empresas.

**Políticas Públicas:** abrange o conjunto de políticas desenvolvidas pelo Estado, direta ou indiretamente, com a participação de entes públicos ou privados, que visa assegurar direitos relacionados à área temática de Mobilidade e Transporte.

Esses fatores críticos constituem-se em elementos norteadores para a proposição das ações essenciais ao alcance da visão de futuro da temática Mobilidade e Transporte, Gestão da Infraestrutura e Legislação voltadas às Políticas Públicas.

Segundo Veiga (2016), além da diversidade de substratos e tecnologias exploradas para geração de biogás, tais como captação e tratamento de gás de aterro, biodigestão de resíduos agrícolas, culturas energéticas, lodo de esgoto e outros, uma maior variedade de usos primários e secundários é dada a esse combustível. Em adição às aplicações tradicionais em geração de eletricidade, calor ou cogeração, coexistem, mais modernamente, a injeção em gasodutos e o uso veicular economicamente viabilizados a partir do aprimoramento de técnicas de purificação do biogás, originando o que se convencionou denominar biometano. Porém, este estudo analisará somente os resíduos de aterro, restos de alimento, oriundos da CSBioenergiae das Estações de tratamento de efluentes – ETE.

No Brasil, os combustíveis fósseis representam 76% da energia total de transporte, com o diesel sendo mais consumido (45%), seguido da gasolina (29%) e do etanol (24%). Para auxiliar as cidades a enfrentar os desafios das mudanças

climáticas, deve-se enfatizar o uso crescente do uso de biometano, biogás purificado, cujas emissões de GEE são praticamente nulas, pois o CO<sub>2</sub> produzido pela recuperação do biometano já foi capturado pela matéria orgânica decomposta. O biogás é produzido por digestão anaeróbia, que é um mecanismo de conversão bioquímica de biomassa em combustível útil. O processo envolve a digestão de resíduos humanos, animais e vegetais com organismos anaeróbicos na ausência de oxigênio no digestor; o biogás também pode ser produzido por fermentação anaeróbica em aterro, que é referido como gás de aterro (CHALA *et al.*, 2018).

### **3.2.2 Alternativas energéticas**

O público em geral e a maioria dos formuladores de políticas percebem os veículos elétricos como uma boa alternativa ao transporte baseado em combustíveis fósseis. No entanto, no que diz respeito às emissões ligadas ao uso do veículo, os veículos elétricos são tão verdes quanto a eletricidade que consomem (KALGHATGI, 2018).

Segundo Martins e Brito (2020), devemos analisar a matriz energética de cada país para determinar qual fonte energética é mais recomendável, como a Polônia ou a Austrália, onde a maior parte da eletricidade é produzida a partir do carvão, a utilização de veículos elétricos aumentará a contribuição para o efeito de estufa em comparação com o mesmo automóvel a circular na Noruega ou no Brasil, onde a maior parte da eletricidade é produzida a partir de fontes de energia renováveis.

No caso dos EUA, analisando o impacto da poluição por veículos elétricos nos estados de Washington e Oregon, é possível chegar à conclusão de que os veículos elétricos são menos poluentes do que, por exemplo, em Illinois. Não é porque os veículos em cada região são diferentes, mas na região noroeste a energia elétrica é gerada por meio de hidrelétricas e usinas nucleares, enquanto na região de Illinois a energia é gerada principalmente por usinas movidas a carvão (MARTINS; BRITO, 2020).

Segundo Nealer *et al.* (2015), para a produção dos veículos elétricos não existem variações significativas nas emissões em comparação aos de combustão interna, pois ambos são fabricados com os mesmos materiais, tais como aço, ferro,

ligas metálicas, plástico e borracha, em processos similares de montagem e produção. No entanto, a fabricação das baterias resulta em emissões de GEE adicionais que, no caso das de íon-lítio, é estimado em cerca de 15% maior que veículos a gasolina de mesmo porte. A etapa de utilização dos veículos elétricos é a maior responsável pelas emissões de GEE do ciclo de vida, pois esta depende da intensidade de emissões da matriz elétrica de abastecimento. Logo, a substituição de veículos movidos a combustíveis derivados de petróleo por veículos híbridos e elétricos somente representará uma diminuição na emissão de GEE se a geração elétrica utilizar fontes renováveis e/ou de baixo carbono.

Uma das formas de verificar os impactos gerados a partir da produção de bens e serviços são as Análises de Ciclo de Vida – ACV. A norma ISO 14040 (1997) define uma ACV como uma investigação abrangente do uso de todos os insumos relativos a um processo de obtenção de um bem ou serviço e suas consequências em termos de impactos ambientais. A partir da definição de um escopo que estabelece os limites da pesquisa, é realizado um inventário que inclui os recursos naturais, materiais e energéticos utilizados. Posteriormente são definidas e ponderadas categorias de impactos ambientais com base nas quais se dá o resultado da análise.

Sendo assim, observa-se que a principal diferença nas emissões de GEE dos veículos elétricos em relação aos veículos a combustão interna está relacionada à matriz elétrica de abastecimento. Para que ocorra a disseminação dos veículos híbridos e elétricos, também é necessário que exista uma infraestrutura de recarga elétrica adequada, pois é preciso considerar a ausência de infraestrutura de recarga e o custo de implementação e adaptações requerem investimentos significativos em infraestrutura. Por exemplo, em relatório da Agência Internacional de Energia (AIE, 2010) calcula-se um custo médio para construção da rede de recarga na faixa entre US\$ 1.000 a US\$ 2.000 por veículo.

Morgan (2018) relata que para atender as expectativas de implementação de veículos híbridos e elétricos, Índia, China e Europa teriam que investir um montante de US\$ 1,7 trilhão em infraestrutura. Observa-se que uma mudança no transporte é obrigatória, as necessidades de atendimento de emissões de GEEs fazem com que haja a diminuição das dependências das cidades do petróleo, reduzindo as emissões de poluentes atmosféricos e geração de ruído; estima-se que até 2050 o setor de

mobilidade deve ser quase completamente descarbonizado (DE CARVALHO *et al.*, 2020).

O biogás é um combustível gasoso, obtido durante o processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica, cujo conteúdo energético deriva da presença majoritária de metano. Assim, o emprego de processos de purificação, objetivando a remoção de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, resulta na produção de biometano, definido formalmente como o gás que apresenta alta concentração de metano e qualidade suficiente para viabilizar seu uso como combustível alternativo ou para que seja possível sua injeção em redes de distribuição de gás natural (VEIGA, 2016).

A implantação de plantas de biogás, na visão de Ferreira *et al.* (2012), contribui para:

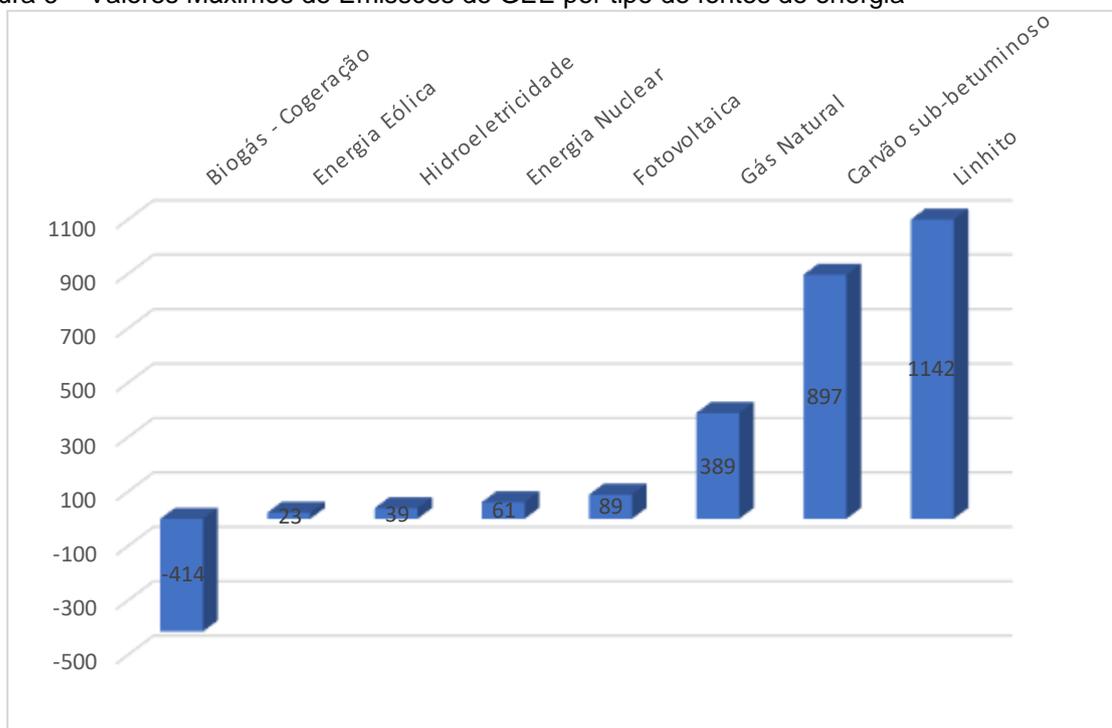
- diminuir a dependência de combustíveis fósseis;
- responder à gestão inadequada de resíduos industriais, agrícolas e domésticos;
- reduzir as emissões de metano.

Segundo Pasqual *et al.* (2018), para auxiliar as cidades a enfrentar os desafios das mudanças climáticas, deve-se enfatizar o uso crescente de biometano e biogás purificado, pois a digestão controlada dos resíduos evita a emissão de metano como GEEs e fornece uma fonte de energia mais limpa, reutilizável e eficiente.

Sob o ponto de vista energético, Veiga (2016) justifica a intensificação do uso dos processos de purificação de biogás verificada na Europa como forma de diminuir as importações de gás natural. A relevância do biogás purificado na matriz energética de muitos países tem se intensificado, uma vez que a tecnologia para sua aplicação é dominada, tanto para a geração de eletricidade e calor, quanto para o uso veicular, além de apresentar infraestrutura. Em uma comparação das emissões de gases do efeito estufa na geração de eletricidade com diversos combustíveis, considerando a técnica de Análise do Ciclo de Vida, uma avaliação do consumo e os impactos em todas as fases do ciclo de vida do produto demonstraram que as emissões de GEE em plantas de cogeração que utilizam biogás como fonte de energia são negativas

(Figura 6), uma vez que além de ser produzido a partir de fontes renováveis, o biogás substitui o uso de combustíveis fósseis.

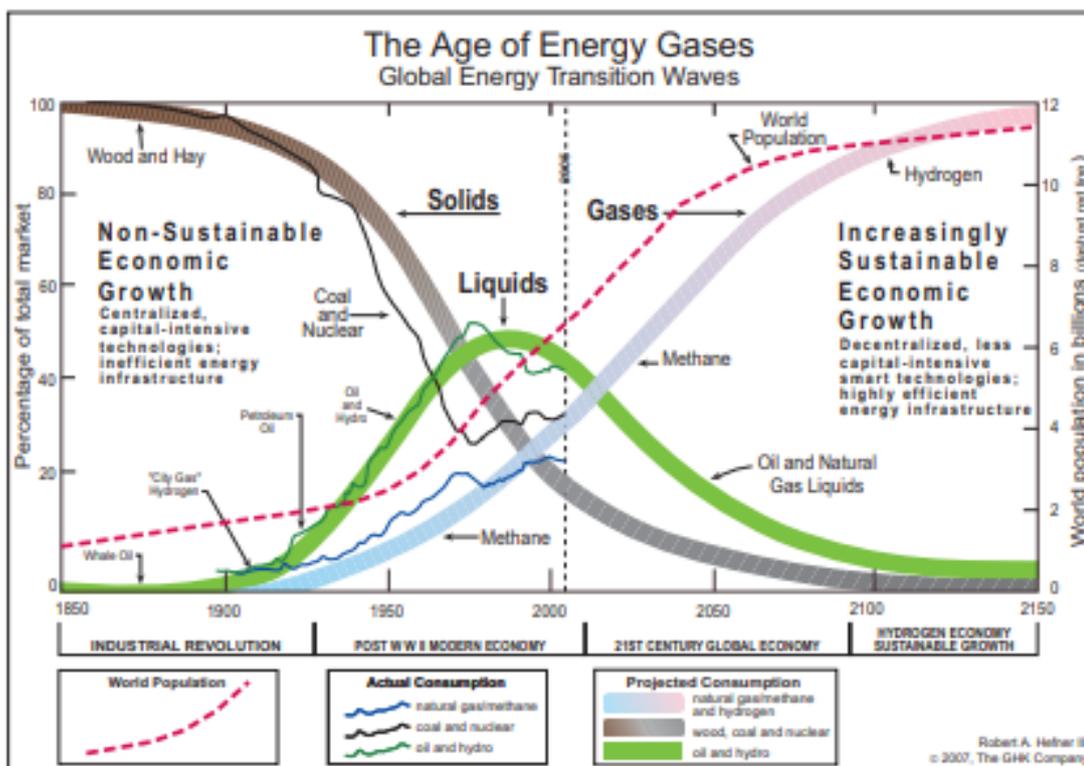
Figura 6 – Valores Máximos de Emissões de GEE por tipo de fontes de energia



Fonte: Adaptada de Poeschl, Ward e Owende, 2010.

Além dos combustíveis derivados da biomassa e dos fósseis, existem as fontes de energias renováveis, como a elétrica e o hidrogênio. Segundo a GHK Company (2007), o hidrogênio, a partir do ano de 2050, será o combustível mais utilizado, conforme ilustrado na Figura 7, devido ao fato de que a combustão produz simplesmente água e oxigênio, podendo ser utilizada diretamente como combustível primário, bem como para a geração de eletricidade.

Figura 7 - A era dos gases energéticos



Fonte: The GHK Company, 2007.

No que diz respeito à era dos gases, indicada na Figura 7, a pesquisa aponta uma descendência em relação aos combustíveis sólidos e líquidos e uma ascendência em relação aos combustíveis gasosos, em especial o hidrogênio e o biometano. Segundo o gráfico, o domínio tecnológico do biometano é um passo importante para o uso do hidrogênio que, próximo ao ano de 2100, atenderá a um percentual de mais de 80% da demanda energética.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos – Abrelpe (2015), metade da população brasileira (44%) concentra-se em municípios que possuem mais de 200 mil habitantes. Em 2014, o Brasil gerou cerca de 219 mil toneladas diárias de RSU e, portanto, cerca de 114 mil t/dia de resíduos orgânicos foram confinados em aterros de resíduos, tornando-os grandes potenciais para a exploração de biogás e consequente fonte alternativa renovável para a geração de energia elétrica e/ou térmica.

O aproveitamento da biomassa dos RSU como fonte energética, além de contribuir para a redução de outros gases lançados na atmosfera, como o sulfeto de hidrogênio, o monóxido de carbono e o hidrogênio, melhora as condições operacionais

e gera receita pela obtenção de créditos de carbono e venda de eletricidade ou de biometano (NASCIMENTO, 2019).

Em relação ao aproveitamento do biogás em ETEs existentes, há amplo espaço para avaliação de investimentos graças à grande quantidade de reatores anaeróbios de fluxo ascendente de alta eficiência (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB) atualmente em operação no Brasil, além da grande quantidade de lodo gerado nos arranjos aeróbios. O estado do Paraná, particularmente, por meio da implantação maciça dos reatores Anaeróbio de Leito Fluidizado – RALF a partir da década de 1980, possui um potencial expressivo a ser explorado (RIETOW, 2022).

O aproveitamento energético do biogás ainda é pouco no Brasil, sendo que a grande maioria dos aterros sanitários e das ETEs apenas coletam e queimam o biogás gerado, sem aproveitamento do seu potencial energético (ZILOTTI, 2012).

Iniciativas como a da empresa CS Bioenergia, em que se associou o lodo de ETE a resíduos orgânicos urbanos para compor a carga dos reatores em um esquema de codigestão, podem elevar significativamente os volumes produzidos de biogás. Porém, esse tipo de tecnologia requer sistemas complexos e dispendiosos para pré-tratamento dos resíduos, em maioria importados.

A CS Bioenergia é uma parceira das empresas Cattalini Bioenergia e da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e realiza um projeto de codigestão em parceria com a estação de tratamento de efluentes (ETE Belém) em Curitiba/PR, conforme apresentado na Figura 8. Seu substrato é composto de 30 a 40% de lodo da ETE e o restante de resíduos orgânicos oriundos de sacolões, CEASA, além de resíduos orgânicos e de *shopping centers* (CS BIO, 2021). O empreendimento possui dois motogeradores de 1,4MW cada, a planta consome 0,6 MW e o restante é vendido conforme Resolução 506/2012 da ANEL (SANEPAR, 2019). Os principais dados do empreendimento são:

- volume dos digestores: dois de 10.000 m<sup>3</sup>;
- capacidade de produção de gás: 26.400 m<sup>3</sup>/dia;
- tipo de digestão: mesofílica e hidrólise separada;
- potência instalada: 2,8 MWe;

- investimento total: € 20 milhões.

Figura 8 – Planta da CS Bioenergia



Fonte: CS Bioenergia, 2021.

Segundo Miki *et al.* (2018), a ETE Franca, localizada no estado de São Paulo, trata atualmente 470 L/s de esgoto, porém possui capacidade de tratamento de até 750 L/s. Sua produção média de biogás está em torno de 3.000 Nm<sup>3</sup>/dia e, após purificação, produz de 1.500 a 1.700 Nm<sup>3</sup>/h de biometano. O sistema de tratamento da estação é composto por seus digestores anaeróbios de lodo.

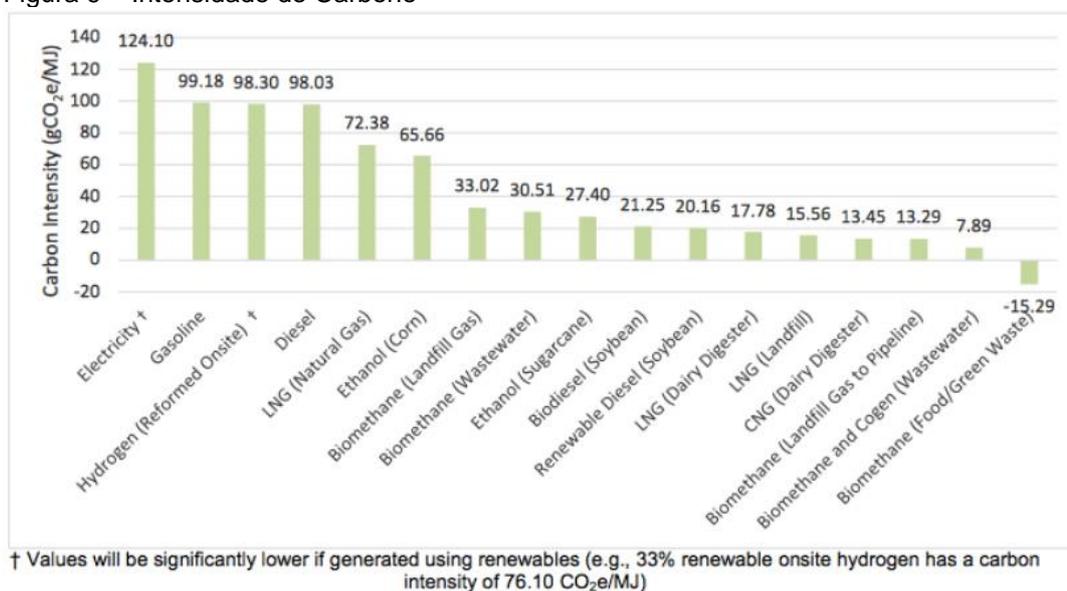
Com a Lei n. 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS), houve um aumento das restrições ao descarte de resíduos sólidos que possam ter aproveitamento energético. Relativamente ao aproveitamento de lodo como biofertilizante, observou-se que esse é um mercado com poucas perspectivas de desenvolvimento num futuro próximo, principalmente devido à necessidade de remoção de conteúdo patogênico para aproveitamento na agricultura.

A implantação do projeto da CS Bioenergia, além da temática do biogás, mostra-se como uma alternativa sustentável para disposição final dos resíduos orgânicos urbanos, todavia, neste momento, com custo bastante elevado. Em função das amplas possibilidades de aplicação do biogás, é importante destacar que o desenvolvimento do biogás como fonte renovável interessa particularmente ao desenvolvimento do Paraná.

O governo do estado elaborou a Lei Estadual Paraná n. 19.500, de 21 de maio de 2018, instituindo a Política Estadual do Biogás, do Biometano e demais produtos derivados da decomposição anaeróbia de matéria orgânica de diversas origens. Essa lei estabelece princípios, regras, obrigações e instrumentos de organização, incentivos, fiscalização e apoio às cadeias produtivas, integradas ou não, visando ao enfrentamento das mudanças climáticas e à promoção do desenvolvimento regional com sustentabilidade ambiental, econômica e social.

Segundo Pasqual (2018), nos últimos anos, novas tecnologias e processos melhoraram a produção de biocombustíveis e ajudaram a mitigar as emissões de carbono. A Figura 9 mostra as estatísticas atuais de intensidade de carbono do biometano fornecidas por diferentes matérias-primas e tecnologias e, comparando com outros combustíveis, é possível verificar que os combustíveis de menor intensidade carbônica são o biometano, de (13 a -15 gCO<sub>2</sub>e/MJ) e a maior intensidade de carbono é a eletricidade, que, depende de sua precedência, seguido da gasolina.

Figura 9 – Intensidade de Carbono



Fonte: Pasqual, 2018.

Gholikandi *et al.* (2014, p. 101) afirmam que, ambientalmente, a produção de biogás é uma das mais benéficas para os resíduos biodegradáveis, pois prevê a “supressão de fontes de energia fóssil, a neutralização de resíduos e a redução das emissões de GEE”.

O Biogás é uma mistura de gases composta principalmente por metano e dióxido de carbono, obtida normalmente através do tratamento de resíduos

domésticos, agropecuários e industriais, por meio de processo de biodegradação anaeróbia. O biometano é um biocombustível oriundo do refino do biogás e possui no mínimo 90% de metano. Sua qualidade é regulamentada por meio da Resolução ANP nº 8/2015 e da Resolução ANP nº 685/2017.

### 3.3 PROCESSO DE INSERÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A ADOÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA NO TRANSPORTE PÚBLICO

De acordo com Gelinski e Seilbel (2008), as políticas públicas são concebidas por meio do processo de formulação, implementação, acompanhamento e avaliação, voltado para as necessidades das ações governamentais que têm o objetivo de deliberar determinadas necessidades públicas. As políticas podem ser sociais (saúde, assistência, habitação, educação, emprego, renda ou previdência), macroeconômicas (fiscal, monetária, cambial, industrial) ou outras (científica e tecnológica, cultural, agrícola, agrária).

O processo essencial para a formulação de Políticas Públicas acontece quando um grupo de formuladores de políticas leva adiante sua visão sobre um problema, mobilizando o grupo maior de indivíduos que compõe a audiência. Desse modo, os problemas são determinados na política para atingir objetivos, mobilizar e possuir o apoio para um lado em um conflito, definir um problema e fazer uma declaração sobre o que está em jogo e quem é afetado e, portanto, definir interesses e a constituir alianças (STONE, 2002).

A política pública orienta os governos sobre uma série de ações e fornece vínculos de responsabilidade mútua entre o governo e seus cidadãos. O processo de política inclui vários aspectos-chave: uma definição do problema a ser abordado, os objetivos que a política deve alcançar e os instrumentos políticos que são usados para resolver o problema e alcançar os objetivos. A política pública é o coração, a alma e a identidade dos governos em todos os lugares, assim os cidadãos soberanos, com o desejo de afetar a política pública, votam nas autoridades (GELINSKI; SEILBEL, 2008).

A análise de políticas descreve a pesquisa que produz informações precisas e úteis para os tomadores de decisão. É importante a realização de uma análise sólida de políticas públicas para alcançar vários objetivos relacionados ao crescimento e desenvolvimento de uma nação e de seus cidadãos (CAPELLA, 2007).

Analisando o modelo institucional, Capella (2007) concentra-se na política como resultado do governo como autoridade decisória final. O modelo enfatiza disposições constitucionais, decisões judiciais e obrigações de direito comum. Estritamente falando, um processo político não se torna política pública até que seja adotado, implementado e aplicado por alguma instituição governamental. As instituições governamentais são cruciais porque, uma vez que uma política é oficialmente adotada, o governo dá legitimidade a essa política aplicando-a por meio de instituições governamentais.

O planejamento urbano é resultante dos objetivos estratégicos das decisões do dia a dia com incentivo ou incerteza resultante dos contextos de cidades influenciadoras, onde os objetivos estratégicos são formulados após análise e validação das percepções sobre tecnologia, vias, impostos e taxas, custos de produção e falta de interesse do consumidor (HRELJA, 2011).

Segundo Fenton e Kanda (2016), o uso fontes renováveis de energia no transporte é particularmente interessante, pois atua como estratégia de mitigação das mudanças climáticas, facilita a transição para a independência fóssil e melhora a qualidade do ar nas cidades e áreas urbanas.

Com relação ao uso dos biocombustíveis, principalmente o biometano, que é o enfoque da pesquisa, o marco importante para o setor foi a regulamentação do biometano. Este combustível é oriundo do processo de biodigestão, e, por meio das Resoluções ANP nº 8/2015 e ANP nº 685/2017, tornou-se possível o intercâmbio do biometano com o gás natural, e permitido o transporte e venda do biometano em todo o Brasil (ANP, AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2020)

## 4 ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA

A presente pesquisa é de natureza acadêmica e baseada em estudo de caso único com recorte territorial no município de Curitiba. Do ponto de vista da obtenção das informações, a busca indireta de informações (revisão literária) e busca direta de informações (análise documental) foram usadas com base em uma revisão narrativa em periódicos nacionais e internacionais. O modelo de pesquisa foi o descritivo, de modo a observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos (variáveis) sobre o tema.

Segundo Kobashi e Santos (2008), a pesquisa acadêmica é aquela que tem por motivação a descoberta de fenômenos empíricos importantes, que incentivam o conhecimento em determinado assunto, seguindo em concordância com o consenso da comunidade de especialistas.

Já o estudo de caso, segundo Gil (2010), é caracterizado pelo conhecimento amplo e detalhado, com o objetivo de explorar situações da vida real. O estudo de caso é único, pois foi focado em um único objeto de pesquisa, a cidade de Curitiba.

Com base nessas informações foi feita uma análise comparativa utilizando-se o instrumental da Matriz SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threads*) de análise e categorização dos dados qualitativos. A Matriz SWOT surgiu em 1960 em discussões na escola de administração, que começaram a focar a compatibilização entre as "Forças" e "Fraquezas" de uma organização, sua competência distintiva, e as "Oportunidades" e "Ameaças" (FAGUNDES, 2010).

### 4.1 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

Algumas das técnicas empregadas em revisões narrativas foram adotadas para a apropriação inicial dos dados utilizados na pesquisa. Seu uso é justificado uma vez que a sistematização assegura que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa sejam capturados, garantindo, assim, que as publicações analisadas apresentem forte aderência ao objeto de pesquisa. Os artigos que foram selecionados correspondem àqueles que contribuíam com as informações necessárias para a caracterização das dimensões legal-institucional e tecnológica.

A abordagem é predominantemente qualitativa, com realização de algumas análises quantitativas desenvolvidas em diferentes etapas, que consistem em realizar um levantamento das informações primordiais para o estudo.

#### **4.1.1 Técnicas de busca da informação**

Foram utilizadas nesta pesquisa duas técnicas: a pesquisa bibliográfica que contempla textos já publicados sobre o tema de estudo e, também, a análise documental, que abrange os dados restritos a documentos de fontes primárias (SANTOS, 2001).

A pesquisa foi realizada no idioma inglês para publicações que tivessem em qualquer um de seus campos, as palavras “biomethane” e “Urban Mobility”, publicadas no período de 2016 até a data da busca, realizada no início de outubro de 2020, conforme apresentado no apêndice A. As palavras-chave pesquisadas refletem o objeto de estudo, que é o biometano (no nível principal) e a mobilidade urbana (em um segundo nível), enquanto o recorte temporal de 5 anos, uma vez que o objetivo da pesquisa é identificar os avanços mais recentes na utilização do biometano. No total, 50 publicações foram recuperadas a partir da base de dados considerada.

Após a primeira seleção, foram realizadas leituras nos títulos e resumos, dos quais foram desconsiderados 22 artigos, pois não apresentavam relevância com o tema de pesquisa. Em seguida, foi realizada a leitura integral dos 28 artigos, dos quais somente 13 apresentaram informações e dados relevantes e foram, portanto, utilizados como fonte de informação no desenvolvimento inicial da pesquisa, conforme ilustrado no quadro a seguir. Dos artigos selecionados, não foi encontrado nenhum artigo voltado para a cidade de Curitiba.

São 13 autorias diferentes, constituídos da seguinte forma: 23,0% de 2016; 15,4% de 2017; 38,5% de 2018; 7,7% de 2019 e 15,4% de 2020. Desses, dois retratam o panorama dos Estados Unidos da América – EUA, quatro do Brasil, três da Europa, um da Malásia, dois de Portugal e um da Turquia. O estudo abrangeu seis países, sendo coletadas as informações relevantes para o estudo em questão e levadas em consideração as características e locais onde foram coletadas as informações.

Ao final da busca, por meio da revisão bibliográfica, identificou-se a necessidade de uma nova busca por assuntos relacionados especificadamente à cidade de Curitiba, tais como:

- Estações de Tratamento de Efluentes – ETE
- População
- Transporte público

A nova coleta de dados foi construída a partir dos seguintes itens:

- a) leitura exploratória dos assuntos relacionados à cidade de Curitiba (com o objetivo de verificar se a obra é de interesse para o trabalho;
- b) leitura seletiva (leitura aprofundada das partes que realmente interessam);
- c) seleção de informações extraídas das fontes em instrumento específico (autores, ano, método, resultados e conclusões).

#### **4.1.2 Técnicas de análise de informação**

A análise da pesquisa pautou-se nas orientações de Bardin (2016). Para a autora, a análise de conteúdo é dividida em três etapas cronológicas:

- pré-análise;
- exploração do material e o tratamento dos resultados;
- inferência e a interpretação.

A etapa de pré-análise tem como objetivo organizar a pesquisa. Nesse estudo, essa etapa foi realizada no *site* da CAPES, selecionando todos os artigos revisados por pares. A partir de uma leitura flutuante, verificou-se quais artigos atendiam a demanda da pesquisa e continham informações relevantes para o tema em questão.

Na etapa de exploração do material, foram lidos os artigos e destacados os trechos relevantes ao estudo. Essa escolha se deu para que fossem identificados outros termos relacionados à temática, como os termos “*road transport*” e “*Renewable energy*”, facilitando, assim, a etapa seguinte: a da classificação dos elementos.

Nessa etapa, foi realizada uma análise qualitativa sistematizada com a finalidade de ordenar e resumir as informações contidas nas fontes, de maneira a possibilitar a aplicação na Matriz SWOT, obtendo assim os possíveis resultados e a análise dos resultados.

Para consolidar a análise, o método SWOT foi selecionado, a fim de identificar e organizar os fatores internos e externos que são favoráveis ou desfavoráveis para alcançar o sucesso na implementação do biometano na mobilidade urbana.

De acordo com Chiavenato e Sapiro (2003), a Matriz SWOT é uma ferramenta estrutural utilizada para cruzar as oportunidades e ameaças externas com seus pontos fortes e fracos. O cruzamento forma uma matriz com quatro células, e para cada célula haverá uma indicação de melhorias ou benefícios desse tipo de método. Esse tipo de avaliação estratégica é uma das ferramentas mais utilizadas na gestão estratégica competitiva, como pode-se observar na Figura 10.

Figura 10 – Matriz SWOT

		Análise Interna	
		Pontos fortes (Strengths)	Pontos fracos (Weaknesses)
Análise Externa	Oportunidades (Opportunities)	<b>SO</b> Tirar o máximo partido dos pontos fortes para aproveitar ao máximo as oportunidades detectadas	<b>WO</b> Desenvolver as estratégias que minimizem os efeitos negativos dos pontos fracos e que em simultâneo aproveitem as oportunidades emergentes
	Ameaças (Threats)	<b>ST</b> Tirar o máximo partido dos pontos fortes para minimizar os efeitos das ameaças detectadas	<b>WT</b> As estratégias a serem desenvolvidas devem minimizar ou ultrapassar os pontos fracos e, tanto quanto possível, fazer face às ameaças

Fonte: Chiavenato & Sapiro, 2003.

Para aplicar a Matriz SWOT, foram identificadas as vantagens e desvantagens de cada método de remoção, cedidos pelos próprios autores, os quais foram convertidos em uma tabela, relacionando os pontos fracos com as desvantagens e os pontos fortes com as vantagens do sistema. Com relação às oportunidades, foram

relacionadas as partes internas do sistema de biodigestão e as ameaças relacionando as partes externas, por fim aplicando na matriz.

## 5 RESULTADOS

Na busca pela redução de emissões veiculares (locais e globais) e pela segurança energética, diversos países, como EUA, Europa, Portugal, Turquia e Alemanha, têm buscado estratégias, seja com o aumento da eficiência veicular, com a melhoria das tecnologias existentes ou em casos mais extremos, com a substituição da combustão interna e adoção de novas tecnologias automotivas. Nesse cenário, os veículos elétricos e híbridos assumem o papel de alternativas às tecnologias convencionais (combustão interna) da indústria automotiva. São oportunidades de novos negócios que se colocam em um novo ciclo tecnológico e de mercado, bem como criam ou ampliam cadeias de fornecedores de bens e serviços associados.

Barczak e Duarte (2012) relatam que desde 1970 até 2012 a emissão de CO<sub>2</sub> no setor industrial cresceu 65%. Já no setor de transporte, a emissão aumentou em 120%. Constataram que, mundialmente, 80% da energia utilizada para mobilidade urbana têm origem na queima de combustíveis fósseis, indicando que os padrões de mobilidade urbana contribuem muito para o acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis. Essa preocupação fez com que o setor energético buscasse novas fontes alternativas para gerar energia suficiente e ao mesmo tempo preservar o meio ambiente.

Fischer *et al.* (2007) e Halsnaes *et al.* (2007) ressaltam que a implementação de novos combustíveis e tecnologias mais limpas em conjunto com os avanços na eficiência energética seriam capazes de serem considerados como medidas estruturais de energia, exibindo um potencial de redução de emissões de poluentes atmosféricos nos transportes.

Foi possível identificar, na revisão da literatura realizada nesta pesquisa, que é necessária a combinação de instrumentos para melhorar a mobilidade urbana, que vão desde o aprimoramento tecnológico dos motores até o transporte urbano e o planejamento das cidades, o que pode, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais e melhorar a qualidade e eficiência da mobilidade urbana.

Neste estudo, foram analisados quatro modelos de ônibus, conforme detalhamento no subcapítulo 3.1.2 – Mobilidade urbana e saúde. A seleção foi

realizada por meio dos modelos que estão em operação na cidade de Curitiba, com exceção do ônibus a biometano de que foram utilizados os dados obtidos no seu uso na Itaipu Binacional.

## 5.1 A CIDADE DE CURITIBA – PLANEJAMENTO URBANO E TRANSPORTE PÚBLICO

Um dos objetivos da mobilidade urbana é a redução do congestionamento nas cidades, a diminuição da pegada de carbono e redução do tempo de viagem. Para atender essas demandas, a tecnologia implementada no sistema exerce um papel importante sobre a mobilidade urbana inteligente, trazendo fácil acesso aos gestores públicos e informações em tempo real (LYONS, 2016). As cidades de Curitiba e Rio de Janeiro estão entre as 8 cidades da América Latina que são consideradas *smart cities*.

A cidade de Curitiba é membro de um grupo de cidades chamado C40 (*C40 Cities*). Esse grupo estabeleceu metas ambiciosas para melhorar a qualidade de vida urbana e a proteção do meio ambiente, definindo metas para melhorar a qualidade de vida urbana e a conservação ambiental; um dos objetivos do Acordo de Paris é evitar os avanços das mudanças climáticas. As cidades integrantes do C40 estão cientes do que precisa ser feito para limitar o aquecimento global a 1,5° Celsius e são capazes de alcançar esse futuro seguro para o clima. Dessa forma, é necessário agir imediatamente e contar com a colaboração de outros níveis de governo, empresas, sociedade civil e cidadãos. Curitiba desenvolveu e implementou corredores de transporte público de massa, tornando-se um modelo de cidade sustentável com base em conceitos urbanos que moldaram a paisagem da cidade (KOZIEVITCH *et al.*, 2017).

Com relação ao modelo de transporte, urbanização e respeito ao meio ambiente, a capital paranaense é tida como uma das dez cidades mais inteligentes do planeta. Para que a cidade pudesse ser considerada como sustentável e modelo de planejamento urbano bem-sucedido, a liderança e a adesão ao planejamento de transporte inteligente precisaram ser realizadas. Por isso, seus programas com viés sustentável são apreciados mundo afora (OJO, CURRY, JANOWSKI, 2014; MACKE *et al.*, 2018).

Segundo Ruiz (2015), Curitiba representa a vanguarda do desenvolvimento urbano. Em 1942, apresentou o primeiro plano para a cidade; posteriormente, em 1960, foram iniciados os trabalhos explicitamente em projetos de transporte urbano sustentável. Desde a década de 1970, com a implantação do BRT (Bus Rapid Transit), Curitiba se tornou um modelo para outras cidades ao redor do mundo, principalmente aquelas que não possuem orçamento para construção de metrô. Com a implantação do BRT, a capital paranaense demonstrou a prática de um planejamento linear do uso do solo, ao longo de corredores densos e rápidos onde os ônibus biarticulados contribuem para redução das emissões de carbono e aumentam a mobilidade da população.

O Planejamento urbano integrado, o sistema de transporte público eficaz, a consciência ambiental, as zonas prioritárias para pedestres, a justiça social e o sistema de gestão de resíduos são os projetos de cunho sustentável essencial para os curitibanos. A cidade, além de favorecer a sustentabilidade da região, possibilita maior acessibilidade e segurança para sua população, pois são investidos recursos em infraestrutura, modernização e planejamento (MACKE *et al.*, 2018).

O transporte é um dos setores que vem enfrentando os maiores desafios devido às preocupações ambientais relacionadas ao esgotamento dos combustíveis fósseis, poluição e principalmente no que diz respeito às mudanças climáticas (CLAIRAND *et al.*, 2019).

A carência de orçamento e planejamento, no Brasil, é um grande empecilho nos projetos de *smart city* que as cidades desejam efetivar. É possível definir o BRT como um meio de transporte que une características do trânsito ferroviário (qualidade) e dos ônibus (flexibilidade). Esse sistema, que entrega mobilidade urbana rápida, confortável e barata, foi originalmente introduzido na década de 1970 em Curitiba, sendo depois executado em outras cidades da América Latina, como São Paulo, Quito, Bogotá e Cidade do México, além de outros países no mundo (VÁSQUEZ *et al.*, 2020).

O sistema BRT ganhou popularidade após a implantação bem-sucedida nas vias de ônibus em Curitiba. Por ter um custo relativamente baixo, possuir impactos positivos na redução do tempo de viagem, redução de fatalidades no trânsito e redução de emissões de GEE, em 1991 foi instaurada a Lei do Meio Ambiente Municipal, que foi destaque e referência internacional em políticas de meio ambiente e transporte coletivo.

O sistema de trânsito curitibano possui características que permitem maior agilidade e efetividade nas viagens de ônibus – isso transforma a capital paranaense em exemplo de planejamento da utilização e gestão de sistemas de transporte. Um desses fatores são as canaletas exclusivas para os ônibus, fazendo com que não existam disputas com outros veículos nas vias. Além disso, há agilidade no desembarque, que é feito por múltiplas portas do veículo, ou seja, os usuários conseguem sair dos ônibus sem a necessidade de esperar períodos mais extensos de tempo (ALVES, DIAS, SEIXAS, 2019).

O mundo discute cada vez mais as emissões de GEE realizadas pelo homem nos últimos tempos. Apesar da contínua procura por soluções em mobilidade urbana, há também a preocupação ambiental relacionada à organização do espaço urbano e a um transporte com viés sustentável (BUZATTO *et al.*, 2019).

Outro desafio é a introdução de ônibus híbridos e elétricos nos sistemas de transporte, pois é um processo mais caro em comparação ao dos ônibus tradicionais. Entretanto, existe a necessidade de que o transporte urbano se transforme, por meio de fases fundamentais de mudanças, para a obtenção de soluções de cunho sustentável (LÓPEZ-IBARRA *et al.*, 2019).

Os níveis elevados de GEE lançados na atmosfera estão acelerando o processo de aquecimento global e causando problemas respiratórios e cardiovasculares à saúde humana. Dessa maneira, soluções eficientes relacionadas à mobilidade urbana têm sido prioridade para muitas cidades para atingir objetivos de desenvolvimento sustentável (HARRIS *et al.*, 2020; TARGINO *et al.*, 2020).

Como as internações hospitalares estão relacionadas tanto com a poluição do dia quanto de dias anteriores, é necessário avaliar o risco relativo entre as doenças respiratórias de um dia com a poluição atmosférica de dias anteriores (BAKONYI *et al.*, 2004).

O número de casos de admissões hospitalares em excesso calculadas pelo modelo indica que as internações da população exposta podem ser minimizadas se a concentração dos poluentes for reduzida a partir do nível atual para o nível limiar recomendado pela OMS (AGUIAR, 2015). Porém, é necessário ressaltar que uma concentração abaixo dos padrões recomendados pela OMS não significa que não haverá efeitos adversos à saúde da população, mas indica que os riscos à saúde serão minimizados.

O número de internações na RMC, no período entre 2010 a 2014, foi de 150.946 de problemas circulatórias e 119.296 internações respiratórias. As internações apresentam um comportamento estacional, havendo maiores casos de internações no período de inverno e menor no verão. Essa característica é mais acentuada no caso das doenças respiratórias, e as diferenças das internações foram comparadas com os valores de temperatura e umidade relativa. Observou-se que são inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor a temperatura e a umidade, maiores são as internações (ARDILES, 2016).

Tadano (2007) relata que o Material Particulado (MP<sub>10</sub>) está constituído por uma mistura de partículas sólidas e/ou líquidas suspensas no ar que possuem diâmetro aerodinâmico menor ou igual do que 10 µm. Suas principais fontes de emissão são a queima de biomassa e de combustíveis (especialmente diesel). O MP<sub>10</sub> fica alocado na região superior do nariz, provocando irritação de olhos, nariz e garganta, infecções respiratórias, bronquite e câncer de pulmão.

## 5.2 O TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS EM CURITIBA

Nesse sentido, a viabilização técnica, econômica e ambiental de novas propostas tecnológicas para o uso de combustíveis renováveis e menos poluentes é uma alternativa de gestão do sistema que merece ser considerada, principalmente quando se trata de cidades que pretendem ser inovadoras em termos ambientais.

Uma das formas de incentivar a redução das emissões é a implementação de novos modelos padrão Euro. Conforme ilustrado no Quadro 3, é possível identificar os níveis de redução conforme o modelo.

Quadro 3 – Emissão de poluentes

Modelo	MP (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Redução MP	Redução NOx
Euro 3	5,00	0,10	0,0%	0,0%
Euro 4	4,00	0,02	- 20,0%	- 80,0%
Euro 5	2,00	0,02	- 60,0%	- 80,0%
Euro 6	0,46	0,01	- 90,8%	- 90,0%
Euro 6 – Scania motor a gás	0,23	0,003	- 95,4%	- 97,0%

Fonte: Adaptado de Munhoz e Mendonça, 2020.

Segundo dados disponibilizados pelo PLANCLIMA (2020), 66,6% das fontes de emissão de tCO<sub>2</sub> têm origem do setor de transporte, seguido pelo Setor Energia

Estacionária com 22,6% e, por último, pelo Setor Resíduos com 10,8% das emissões. Atualmente, a frota (operante + reserva) é de 1026 ônibus, e desse total somente 43 ônibus contêm tecnologia menos poluentes que os tradicionais movidos somente a diesel, sendo que 26 veículos não usam combustível fóssil (movidos a Biodiesel), 24 biarticulados, 2 híbridos (elétrico-biodiesel), o que representa 2,6% da frota; há também os ônibus híbridos (elétrico-diesel), com 17 unidades.

No ano de 2020, a cidade de Curitiba consumiu 37.823.943 litros de combustível de Diesel S10 (96,53%) e 1.313.235 litros de Biocombustível (3,47%) (UBRS, 2020).

Para verificar o consumo de biometano em ônibus, foi utilizado o estudo com os dados disponibilizados pelo CI-Biogás e ITAIPU, relacionados a um projeto experimental em parceria com a Scania Brasil. Os testes foram realizados com um ônibus modelo Euro 6, utilizado para transportar funcionários e visitantes da Itaipu Binacional, em que foi possível observar que o consumo foi o mesmo do GNV, porém o custo do gás representa em torno de 20% do custo do combustível fóssil (REIS, 2020).

Segundo dados disponibilizados por Munhoz e Mendonça (2020), o biometano tem redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 85% comparado com o Diesel. Conforme ilustrado no Quadro 4, esses valores são baseados em um ônibus do modelo da Scania de 15 metros para 120 passageiros.

Quadro 4 - Emissão de CO<sub>2</sub>

	Diesel	GNV	Biodiesel	Etanol	Biometano
Volume de CO <sub>2</sub> emitido (gramas/10km)	1341	1032	794	406	204
Emissões de CO <sub>2</sub> por passageiro (gramas/pessoa/km)	9	7	5	3	1
Redução de emissão de poluentes comparado ao diesel	0%	-23%	-41%	-70%	-85%

Fonte: Adaptado de Munhoz e Mendonça, 2020.

Outro fator importante para analisar quando se propõe a alteração de um modal é a evolução da redução da quantidade de passageiros pagantes no transporte público. Conforme ilustrado na Tabela 1, no subcapítulo 3.1.3 – Sistema de Transporte Público de Curitiba, o número de passageiros pagantes equivalentes em Curitiba diminuiu em aproximadamente 45%.

Esse padrão de redução do transporte público revela que os cidadãos de Curitiba estão preferindo o transporte particular ao transporte público, devido aos seguintes fatores já abordados no estudo: alto custo (preço da passagem está similar ao preço do litro do combustível), tempo de deslocamento, conforto, segurança, flexibilidade de horários.

Observou-se que é necessária uma mudança no transporte público de Curitiba e a implementação de novas tecnologias para auxiliar e diminuir o impacto da redução do uso do transporte e os poluentes atmosféricos emitidos. As cidades atualmente são fontes geradoras de poluentes atmosféricos, oriundos das ETEs, aterros sanitários e transportes. Ao otimizar a própria energia gerada pelas cidades, obtém-se uma pegada de carbono negativa, por esse motivo o uso do biometano no transporte público foi estimado.

Para estimar a produção de biometano na cidade de Curitiba, foram analisadas somente as estações de tratamento de esgoto e a planta de produção de biometano – CS Bioenergia. Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico da Prefeitura Municipal de Curitiba, elaborado em novembro de 2017, a cidade constava com 1.963.726 habitantes e com uma rede coletora de esgotamento sanitário que atendia 94% da população. O sistema de tratamento do esgotamento sanitário é composto por 5 estações de Tratamento, divididas pela cidade, conforme ilustrado na Tabela 5 (ETE Atuba Sul, ETE Belém, ETE CIC/XISTO, ETE Padilha e a ETE Santa Quitéria).

Para estimar a quantidade de geração de biogás em Curitiba, foram utilizados os dados das ETEs de Curitiba e os dados de produção de biogás da CS Bioenergia (SANEPAR, 2019). Segundo os dados disponibilizados e utilizando as estações de tratamento de esgoto, verificou-se que, com o lodo da ETE e os resíduos orgânicos, a cidade tem um potencial de produção de 50.395 m<sup>3</sup> de biogás por dia.

Tabela 5 – Estações de Tratamento de Esgoto com sua respectiva capacidade de tratamento

NOME DA ETE	SISTEMA DE TRATAMENTO	CAPACIDADE DE TRATAMENTO (l/s)	GERAÇÃO DE BIOGÁS (Nm <sup>3</sup> /dia)
ATUBA SUL	16 módulos RALF <sup>3</sup>	1.680 (l/s)	7.258 <sup>1</sup>
BELÉM	Lodo ativado com aeração <sup>2</sup>	2.200 (l/s)	-
CIC XISTO	7 módulos RALF <sup>3</sup>	490 (l/s)	2.117 <sup>1</sup>
PADILHA	6 módulos RALF <sup>3</sup>	420 (l/s)	1.810 <sup>1</sup>
SANTA QUITÉRIA	6 módulos RALF <sup>3</sup>	420 (l/s)	1.810 <sup>1</sup>
TOTAL ETE	-	5.210 (l/s)	23.995
CS Bio	Digestores – Mesofílica e Hidrólise Separada <sup>4</sup>	20.000 m <sup>3</sup>	26.400
TOTAL	-	-	50.395

Fonte: <sup>1</sup>Bilotta e Ross, 2016; <sup>2</sup>Miki et. al., 2018; <sup>3</sup>Sanepar, 2012 e <sup>4</sup>Sanepar, 2019.

Segundo os dados disponibilizados por Coldebella (2006), o uso do biogás como recurso energético deve-se, principalmente, à concentração do metano (CH<sub>4</sub>), pois este, em condições normais (CPTN) de pressão (1 atm) e temperatura (20°), tem poder calorífico inferior de 9,9 kWh/m<sup>3</sup>. Já o biometano (biogás purificado), em concentrações de metano entre 50% e 80%, apresentará um poder calorífico inferior de 4,95 e 7,92 kWh/m<sup>3</sup>. A equivalência energética do biogás com outras fontes de energia é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Equivalência Energética

Matriz energética	Ferraz e Mariel (1980)	Sganzerla (1983)	Nogueira (1986)	Santos (2000)
Gasolina (L)	0,61	0,613	0,61	0,6
Diesel (L)	0,55	0,553	0,55	0,6
GLP (kg)	0,45	0,454	1,43	-
Eletricidade (kWh)	1,43	1,428	-	6,5

Fonte: Adaptada de Coldebella, 2006.

De modo a converter energeticamente o biogás para diesel foi utilizado o fator de conversão de 0,55 L/m<sup>3</sup> a conforme ilustrado na equação 6:

Conversão de biogás para diesel

$$50.395 \text{ Nm}^3/\text{dia} \times 0,55 \text{ L/m}^3 = 27.717 \text{ L/dia} \quad (\text{eq.6})$$

Sendo assim, a cada 1 m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,55 litros de diesel, utilizando os dados das perspectivas das ETEs e a CS Bioenergia, a cidade tem capacidade de gerar 50.395 m<sup>3</sup> de biogás, o que equivale a 27.717 litros por dia de diesel.

Utilizando como base os dados disponibilizados pela URBS (2021), a cidade de Curitiba consome 37.823.943 litros de diesel por ano, o que equivale a 103.627 litros por dia de diesel. Dispondo de 27.717 litros de diesel, a cidade economizaria um percentual de aproximadamente 28% do gasto com o diesel, com base no valor do diesel que foi calculado na equação 1, valor de R\$ 4,29 litro, a cidade teria uma economia anual de R\$43.400.690,00 reais e 10.116.705 litros de diesel.

Segundo Carvalho (2011), os veículos movidos a diesel emitem mais CO<sub>2</sub> por unidade de volume ou peso de combustível em relação aos demais modais motorizados. Neste estudo, considerou-se um o fator médio de emissão de 2,6 kg de CO<sub>2</sub> para cada litro de diesel queimado na combustão, que somado com o valor médio de 0,5 kg de CO<sub>2</sub> emitidos para produzir e distribuir o combustível, produziu a uma taxa de emissão em torno de 3,2 kg de CO<sub>2</sub> /l de diesel.

Com a alteração parcial da matriz energética para abastecer os ônibus na cidade de Curitiba, haveria a redução de no mínimo 32.373.456 kg de CO<sub>2</sub> que deixariam de ser emitidos na atmosfera.

Um sistema de mobilidade urbana ambientalmente equilibrado para as cidades brasileiras deverá ser o objetivo importante nas discussões do governo, principalmente neste momento em que os países discutem a redução da emissão dos poluentes globais e também as externalidades geradas pelos demais poluentes.

Os veículos a diesel demandam políticas específicas de mitigação da poluição do ar, pois respondem por parte importante dos deslocamentos diários urbanos, e são responsáveis por grande parte das emissões de carbono, nitrogênio e enxofre. Políticas de incentivo à modernização da frota com o uso de tecnologias mais limpas, melhoria do diesel comercializado e inspeções periódicas podem trazer bons resultados nesse segmento.

As políticas públicas adotadas para amenizar os problemas ambientais no trânsito urbano se restringiram ao controle das emissões dos poluentes nos veículos,

em conjunto com a mistura de bicomustíveis aos combustíveis fósseis para reduzir o seu potencial poluidor.

### 5.3 APLICAÇÃO DA MATRIZ SWOT

Por meio dos resultados obtidos e dos estudos realizados com base na revisão bibliográfica, foi possível analisar os principais pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças enfrentados entre esses 4 métodos descritos anteriormente, como pode ser visualizado no Quadro 5.

Com base nessa matriz, foi possível identificar pontos importantes que devem ser analisados antes da formulação de políticas públicas, possibilitando uma análise detalhada sobre as variáveis que influenciam esse processo. Conforme observado, a redução das dependências da matriz energética oriunda do petróleo é uma tendência que devemos observar nos próximos anos; todas as outras matrizes energéticas apresentadas são livres do petróleo.

A questão da mobilidade urbana na última década foi tema corrente, notadamente em razão dos seus efeitos no ambiente urbano. Inovador, o marco legal da Política Urbana, o Estatuto da Cidade, previu o tratamento da temática no corpo da lei, estabelecendo inclusive a obrigatoriedade do desenvolvimento dos Planos Diretores de Transporte Público para municípios brasileiros com população acima de 500 mil habitantes, ainda segundo a ótica do serviço de transporte público, com foco nesse modo motorizado.

Sendo assim, de acordo com Lima Neto e Galindo (2015), os incentivos ao desenvolvimento de planos de mobilidade aderentes às necessidades dos municípios, além da institucionalização e da incorporação do instrumento de planejamento da mobilidade no âmbito da gestão pública municipal, devem ser estimulados e cobrados como critério de análise, de forma a imbuir a municipalidade de um processo de capacitação no setor.

Quadro 5 – Análise comparativa das alternativas energéticas

		Positivo	Negativo
Interno		<p><b>Força</b></p> <p>1) Biodiesel: Potencial em recursos energéticos, diversidade de condições agroecológicas e climáticas.</p> <p>2) Biometano: Estimativas de geração de CH<sub>4</sub> são confiáveis e permitem avaliar a viabilidade econômica dos projetos de aproveitamento energético, fomento da geração distribuída de combustíveis no Brasil, elevando a segurança energética do país e pegada de carbono negativa.</p> <p>3) Elétrico: Durante a utilização, não emite poluentes atmosféricos; possui menor ruído associado ao deslocamento.</p>	<p><b>Fraqueza</b></p> <p>1) Biodiesel: baixa produção, falta de políticas/programas de inclusão social no processo produtivo.</p> <p>2) Biometano: Falta de dados sobre a composição dos efluentes, custo elevado na alteração das infraestruturas disponíveis (captação e abastecimento) para viabilizar o investimento e a falta de políticas/programas de inclusão social no processo produtivo.</p> <p>3) Elétrico: Tempo de carregamento das baterias, custo elevado da aquisição do veículo, autonomia limitada, necessidade de uma infraestrutura especial para realizar o carregamento dos veículos (2).</p>
		<p><b>Oportunidades</b></p> <p>1) Biodiesel: Diversificação da Matriz energética.</p> <p>2) Biometano: Aproveitamento energético local.</p> <p>3) Elétrico: desenvolvimento de um novo segmento de mercado.</p>	<p><b>Ameaça</b></p> <p>1) Biodiesel: Competição com a produção alimentar, impacto negativo de disponibilidade de água e biodiversidade, mudanças climáticas (1).</p> <p>2) Biometano: Falta de planejamento estratégico e modernização dos equipamentos utilizados (ETEs e Aterros Sanitários) e destinação inadequada dos efluentes sanitários e dos resíduos sólidos urbanos.</p> <p>3) Elétrico: incerteza quanto à tecnologia a adotar; modelo de negócio ainda é indefinido; alto investimento em infraestruturas e redes de carregamento; evolução do preço da eletricidade.</p>
Externo			

Fonte: Adaptado de Matavel e Chaves, 2014 e EPE, 2018.

A fim de verificar as principais forças motrizes para que fosse possível analisar as melhores alternativas energéticas além de somente seu grau de poluição, foram selecionados alguns aspectos importantes a serem analisados relacionados às áreas aspectos ambiental, econômico e operacional. Os principais indicadores identificados foram:

- Ambiental: o biometano utiliza a energia já disponível e queimada em *flare*, reduzindo as emissões de GEEs. Por outro lado, o elétrico, durante a sua utilização, não gera poluentes atmosféricos e ruído ambiental, porém, durante a sua fabricação, geração de energia elétrica e disposição final, pode tornar um veículo mais poluente que o movido a diesel. Com relação ao biodiesel, é um combustível menos poluente que o diesel, entretanto há competição com a produção de alimentos e possui um impacto negativo de disponibilidade de água.
- Técnico: para a implementação de cada uma das três alternativas energéticas, são necessárias algumas alterações técnicas, tanto de infraestrutura quanto de distribuição e produção.
- Operacional: sob esse ponto de vista, deve-se levar em conta a distribuição e as formas de abastecimento, visto que cada um utiliza uma forma de abastecimento, produção e comercialização. Nos veículos elétricos, deverá ser analisado o tempo de carregamento das baterias e o consumo diário de energia que cada rota (ônibus) irá necessitar.

O ODS engloba ainda metas como: reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades; proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, aos espaços públicos verdes; apoiar relações econômicas, sociais e ambientais positivas entre áreas urbanas, periurbanas e rurais; e apoiar os países menos desenvolvidos para construções sustentáveis e resilientes (ODM, 2020). O estudo atendeu aos objetivos de desenvolvimento sustentável, nos seguintes aspectos:

- ODS 3 – Saúde e bem-estar: Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo;

- ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis: Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros;
- ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima: Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais.

## 6 CONCLUSÃO

Com a análise do uso de biometano na mobilidade urbana e a comparação com as tecnologias já existentes, foi possível observar que este estudo alcançou os objetivos, conhecendo os problemas ambientais do uso de combustíveis fósseis (diesel), comparando com as alternativas energéticas disponíveis para utilizar no sistema de transporte, identificar o potencial de produção e a demanda de biocombustíveis e analisar o processo de inserção de políticas públicas. Foram apresentadas e descritas as três alternativas energéticas para substituição do diesel, através da Matriz SWOT, com suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças.

Concluiu-se que a utilização do biometano no transporte público é a melhor alternativa para a redução da emissão de GEE, pois é um combustível já presente e inutilizado atualmente. Porém, alterações deverão ser realizadas nos processos para captar e evitar vazamentos do sistema, infraestrutura, com o objetivo de realizar a purificação do gás.

O trabalho mostrou que a tarefa de selecionar o melhor método é muito complexa e depende de inúmeras variáveis controláveis e incontroláveis. Nesse aspecto, é apenas possível saber comparativamente, perante um determinado aspecto, o método de melhor resposta. Assim, a aplicação da matriz SWOT permitiu uma avaliação comparativa das alternativas energéticas apresentadas, mas neste processo não foi possível identificar a significância de cada variável.

Por isso, recomenda-se aprofundar este estudo nas variáveis de custo. Deve-se levar em consideração o risco ambiental da utilização dessas tecnologias e a análise do tipo de substrato e o ambiente no qual esses métodos foram elaborados. Recomenda-se também realizar um estudo comparativo em escala laboratorial com o mesmo substrato e as mesmas condições externas para observar as vantagens e desvantagens de cada método de forma concisa.

Por fim, faz-se necessário a inserção de novas políticas públicas voltadas para a área urbana sustentável, e novos testes pilotos para verificar e analisar de forma concisa as novas tecnologias existentes, visto que algumas matrizes energéticas durante o uso podem ser menos poluentes, como a eletricidade. Entretanto, caso se

utilizem formas de geração de energia de matrizes energéticas não renováveis, esse modal acaba se tornando mais poluente que os movidos a diesel.

Este trabalho gerou alguns questionamentos que podem motivar estudos futuros. O estudo abordou somente as ETEs e o projeto piloto da CS Bioenergia, o que resultou em uma substituição de aproximadamente 32% do diesel. Desse modo, os seguintes questionamentos podem ser estudados em pesquisas futuras: se levasse em consideração os aterros sanitários, quanto iria aumentar na substituição do combustível? Como o estudo não englobou os custos de aquisição de tecnologia para purificação do biogás para o biometano e a logística de distribuição desse biocombustível, qual seria o tempo de retorno do investimento? Além disso, o estudo não contemplou as melhorias da qualidade do ar na cidade, então como poderiam ser diminuídos os casos de internamento e problemas respiratórios?

## REFERÊNCIAS

AESBE. *Sanepar apresenta ETEs sustentáveis em evento sobre Biogás em Foz do Iguaçu (PR)*. 2018. Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento. Disponível em: <https://aesbe.org.br/novo/sanepar-apresenta-etes-sustentaveis-em-evento-sobre-biogas-em-foz-do-iguacu-pr/> . Acesso em: 8 ago. 2021.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). *Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment*. 2010. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/modelling-load-shifting-using-electric-vehicles-in-a-smart-grid-environment>. Acesso em: 4 ago. 2022.

AGUIAR, L. S. *Estudo da relação da qualidade do ar e variáveis meteorológicas na ocorrência de morbidade respiratória e circulatória na região metropolitana de São Paulo*. 2015. 105f. Tese de mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

ALVES, M.; DIAS, R. C.; SEIXAS, P. C. Smart Cities no Brasil e em Portugal: o estado da arte. *Urbe, Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 11, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS (ABRELPE). *Panorama de Resíduos Sólidos, Brasil*. São Paulo: ABRELPE, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). *Impactos ambientais da substituição dos ônibus urbanos por veículos menos poluentes*. 2016. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/6/21/vv-antp-substituicao-de-bus-final-2016-06-13-1.pdf>. Acesso em: 20 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). *Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público*. 2018. Disponível em: <http://files.antp.org.br/simob/simob-metodologia-v11.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). Resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015. Estabelece a especificação do biometano. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 fevereiro. 2015. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br> >. Acesso em: 26 agosto 2022.

ARDILES, Leda Gabriela *et al.* *Risco à saúde atribuído à poluição do ar e variáveis meteorológicas na região metropolitana de Curitiba*. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. 4. ed. Lisboa: Edições 70, 2010.

BARCZAK, R.; DUARTE, F. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. *Urbe*, n. 4, v. 1, jun. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/ZXSBgxC6QxMwtB7rhHDtLkC/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 4 ago. 2022.

BERGEK, A.; BERGGREN, C. The impact of environmental policy instruments on innovation: a review of energy and automotive industry studies. *Ecological Economics*, v. 106, p. 112-123, 2014.

BERTUCCI, J. O. Os Benefícios do Transporte Coletivo. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, IPEA, n. 5, jun. 2011. Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/13444070/52089038/name/os+benefOloC3%ADcios+do+transporte+co+le+tivo.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2020.

BEM PARANÁ. *Com ampliação, Estação de Tratamento de Esgoto Belém, em Curitiba, se torna a maior do Paraná*. 2022. Disponível em: <https://www.bemparana.com.br/noticia/com-ampliacao-estacao-de-tratamento-de-esgoto-belem-em-curitiba-se-torna-a-maior-do-parana#.Yuv753bMLIV>. Acesso em: 4 ago. 2022.

BRAGA, A., *et al.* Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. *Cad. Saúde Pública*; n.

23, 570-8, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.org/scielo.php?pid=S0102311X2007001600017&script=sci.arttext&tlng=en>. Acesso em: 2 de set. 2019.

BRASIL. *Lei n. 12.587, de 3 de janeiro de 2012*. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm). Acesso em: 10 de abril de 2021.

BRITO, J., *et al.* Disentangling vehicular emission impact on urban air pollution using ethanol as a tracer. *Sci Rep*, 8, 10679, 2018. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29138-7>. Acesso em: 4 ago. 2022.

BUZATTO, H. K. *et al.* Transporte público elétrico em Curitiba: é possível? *Revista dos Transportes Públicos-ANTP*, ano 42, 3. quadrimestre, 2019.

CAPELLA, A. C. N. Perspectivas teóricas sobre o processo de formulação de políticas públicas. *Políticas públicas no Brasil. Fiocruz*, 1, p. 87-124, Rio de Janeiro, 2007.

CARVALHO, F. M. *et al.* *Perspectivas de produção de combustíveis marítimos de emissão neutra de carbono no Brasil*. 2020. Disponível em: [https://icongresso.ibp.itarget.com.br/arquivos/trabalhos\\_completos/ibp/3/final.IBP0079\\_20\\_19072020\\_205537.pdf](https://icongresso.ibp.itarget.com.br/arquivos/trabalhos_completos/ibp/3/final.IBP0079_20_19072020_205537.pdf). Acesso em: 4 mar. de 2021.

CHIAVENATO, I.; SAPIRO, A. *Planejamento Estratégico Fundamentos e Aplicações*. 6. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

CIBIOGÁS. *Como o biogás melhora os impactos da mobilidade urbana?* 2022. Disponível em: [https://cibiogas.org/blog-post/como-o-biogas-melhora-os-impactos-da-mobilidade-urbana/#:~:text=Em%20Foz%20do%20Igua%C3%A7u%2C%20do,Nacional%20do%20Igua%C3%A7u%20\(PNI\)](https://cibiogas.org/blog-post/como-o-biogas-melhora-os-impactos-da-mobilidade-urbana/#:~:text=Em%20Foz%20do%20Igua%C3%A7u%2C%20do,Nacional%20do%20Igua%C3%A7u%20(PNI).). Acesso em: 4 ago. 2022.

CLAIRND, J. M. *et al.* Electric vehicles for public transportation in power systems: A review of methodologies. *Energies*, v.12, n. 3114, p. 1-22, 2019.

COSTA, J. C. *et al.* Gestão da inovação em serviços e relacionamento estratégico no transporte público. *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa*, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2007.

COSTA, R. C., PRATES C. P. T. *O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado.* 2005.

Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/2/BS%2021%20O%20papel%20das%20fontes%20renov%C3%A1veis\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/2/BS%2021%20O%20papel%20das%20fontes%20renov%C3%A1veis_P.pdf).

Acesso em: 28 de out. 2019.

CSBIO. *Bioenergia.* 2021. Disponível em: <http://csbioenergia.com.br/bioenergia/>.

Acesso em: 4 ago. 2022.

CURITIBA 2035. 2017. Disponível em: [https://multimidia.gazetadopovo.com.br/media/docs/1525694332\\_curtiba-2035-publicacao-final.pdf](https://multimidia.gazetadopovo.com.br/media/docs/1525694332_curtiba-2035-publicacao-final.pdf). Acesso em: 4 ago. 2022.

DE CARVALHO, C. H. R. *Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros.* Texto para Discussão, 2011.

DEMIRBAS, A. Green energy and technology. *Chapter*, n. 3, p. 87-101, 2009.

DE SOUZA TADANO, Y. *Simulação da Dispersão dos Poluentes Atmosféricos para Aplicação em Análise de Impacto.* 2022. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/296865250>. Acesso em: 4 ago. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Eletromobilidade e Biocombustíveis.* 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Eletromobilidade%20e%20Biocombustiveis.pdf>.

Acesso em: 4 ago. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional.* 2022.

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 4 ago. 2022.

ESCOBAR, J. C. *et al.* Biofuels: environment, technology and food security. *Renewable and sustainable energy reviews*, n. 13, v. 6-7, p. 1275-1287, 2009.

FENTON, P., & KANDA, W. Barriers to the diffusion of renewable energy: studies of biogas for transport in two European cities. *Journal of environmental planning and management*, n. 60, v. 4, p. 725-742, 2017.

GELINSKI, C. R. O. G.; SEIBEL, E. J. Formulação de políticas públicas: questões metodológicas relevantes. *Revista de Ciências Humanas*, n. 42, v. 1, p. 227-240, 2008.

GHOLIKANDI, G. B.; JAMSHIDI, S.; HAZRATI, H. Optimization of Anaerobic Baffled Reactor (ABR) Using Artificial Neural Network in Municipal Wastewater Treatment. *Environmental Engineering and Management Journal*, n. 13, p. 95-104, 2014.

GIL, A. C. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HALSNAES, K. *et al.* Climate change 2007: framing issues. *In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate change 2007: mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2007.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). *Substituição do transporte público pelo individual fragiliza mobilidade e cria urbanização excludente*. 2021. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&id=38325](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=38325). Acesso em: 15 jun. 2022.

JASINSKI, R.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F. Poluição atmosférica e internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças e adolescentes em Cubatão, São Paulo, Brasil, entre 1997 e 2004. *Cadernos de Saúde Pública*, n. 27, p. 2242-2252, 2011. Disponível em: [https://www.scielo.org/scielo.php?pid=S0102311X2011001100017&script=sci\\_arttext&tlng=en](https://www.scielo.org/scielo.php?pid=S0102311X2011001100017&script=sci_arttext&tlng=en). Acesso em: 30 ago. 2019.

KALGHATGI, G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy*, v. 225, p. 965-974, 1 set. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918307955>.

Acesso em: 4 ago. 2022.

KOBASHI, N. Y.; SANTOS, R. N. M. Arqueologia do trabalho imaterial: uma aplicação bibliométrica à análise de dissertações e teses. 2008. *Encontros Bibli: Revista eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da informação*, n. 13, v. 1, p. 106-115, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/1518-2924.2008v13nesp1p106>. Acesso em: 10 jul. 2021.

KOUSOULIDOU, M. *et al.* Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments. *Atmospheric Environment*, n. 32, v. 42, p. 7465-7475, 2008.

LYONS, G. Getting smart about urban mobility – Aligning the paradigms of smart and sustainable. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, n. 115, p. 4–14, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.001>. Acesso em: 4 ago. 2022.

LOCATELLI, S. A. D.; VICENTIN, I. C. O planejamento estratégico municipal para uma cidade inteligente sob a ótica do Curitiba 2035 e o Ranking Connected Smart Cities. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, n. 3, v. 8, p. 497-522, 2019.

LÓPEZ-IBARRA, A. *et al.* Battery aging conscious intelligent energy management strategy for hybrid electric buses. *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2019.

MACKE, J. *et al.* Smart City and Quality of Life: citizens' perception in a Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 2018.

MÉLO, I. S. *Adaptação aos impactos das mudanças climáticas: uma reflexão com base no plano diretor 2018 da cidade do Recife, Pernambuco, Brasil*. 2019. Disponível

em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/73>. Acesso em: 3 mar. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Poluentes Atmosféricos*. 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos.html>. Acesso em: 2 nov. 2019.

MORGAN, J. P. *Energy Outlook 2018: Pascal's Wager*. Annual Energy Paper. 2018. Disponível em: <https://www.jpmorgan.com/jpmpdf/1320745265852.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2021.

NASCIMENTO, M. C. B. *et al.* Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, n. 24, p. 143-155, 2019.

NEALER, R.; REICHMUTH, D.; ANAIR, D. *Cleaner cars from cradle to grave*. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.4583.3680>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Habitat. Dia do Habitat promove cidades verdes como saídas para crise climática. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/150289-dia-do-habitat-promove-cidades-verdes-como-saidas-para-crise-climatica>. Acesso em: 4 ago. 2022.

OJO; CURRY; JANOWSKI. *Designed Next Generation Smart City Initiatives – Harnessing Findings and Lessons from Study of ten Smart City Programs*. In: 22nd European Conference on Information Systems (ECIS 2014). 2014.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). *Nove em cada dez pessoas em todo o mundo respiram ar poluído*. 2018. Disponível em: [https://www.paho.org/bra/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5654:nove-em-cada-dez-pessoas-em-todo-o-mundo-respiram-arpoluido&Itemid=839](https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5654:nove-em-cada-dez-pessoas-em-todo-o-mundo-respiram-arpoluido&Itemid=839). Acesso em: 16 out. 2019.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). *Transporte e mudanças climáticas 2014: mitigação de das Alterações Climáticas*. Contribuição do grupo de trabalho para o quinto relatório de avaliação do sistema intergovernamental painel sobre mudanças climáticas. 2014. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

PANCLIMA. 2020. Disponível em: <https://mid.curitiba.pr.gov.br/2020/00306556.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2022.

ODM Brasil. Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. Disponível em: <http://www.odmbrasil.gov.br/os-objetivos-de-desenvolvimento-do-milenio>. Acesso em: 05 de set. 2022.

POESCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 7, v. 14, p. 1782-1797, set. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110001218>. Acesso em: 4 ago. 2022.

POMPELLI, M. F. Crise energética mundial e o papel do Brasil na problemática de biocombustíveis. *Agronomía Colombiana*, n. 29, v. 2, p. 423-433, 2011.

POPE III, C. A. *et al.* Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, 109:71-7, 2004. Disponível em: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>. Acesso em: 2 de set. 2019.

PREFEITURA DE CURITIBA. *Curitiba testa primeiro ônibus híbrido elétrico de segunda geração da América Latina*. 2019. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/curitiba-testa-primeiro-onibus-hibrido-eletrico-de-segunda-geracao-da-america-latina/40103>. Acesso em: 2 jan. 2021.

RIETOW, J. C. *et al.* Aproveitamento do biogás produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo para a secagem térmica de lodos de estações de tratamento de esgoto. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, n. 27, p. 347-356, 2022.

RUIZ, T. C. D. *A dinâmica evolutiva da competitividade do destino turístico*. Curitiba. 354 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SANTOS, A. R. *Metodologia científica: a construção do conhecimento*. 4. ed. Rio de Janeiro: DP&A, 2001. Disponível em: <http://www2.uefs.br/dla/graduando/n67/n67.13-18.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

STONE, D. *Policy Paradox: The Art of Political Decision Making*, 2002.

TARGINO, A. C. *et al.* Bus commuter exposure and the impact of switching from diesel to biodiesel for routes of complex urban geometry. *Environmental Pollution*, v. 263, p. 1-11. 2020.

THE GHK COMPANY. 2007. *The Age of Energy Gases*. Disponível em: <http://enerpedia.net/images/2/21/Marketshare1850.pdf>. Acesso em: 2 out. 2019.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). *Poluição do ar*. 2018. Disponível em: <https://jornal.usp.br/tag/poluicao-do-ar/?amp>. Acesso em: 20 set. 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles. 1998. 47p.

URBANIZAÇÃO DE CURITIBA (URBS). *Sustentabilidade*. 2022. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/sustentabilidade#medicao>. Acesso: 25 ago. 2021.

URBANIZAÇÃO DE CURITIBA (URBS). *URBS em números*. 2020. Disponível em: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/institucional/urbs-em-numeros>. Acesso: 25 ago. 2021.

VÁSQUEZ, C. *et al.* Conglomerates of bus rapid transit in Latin American countries. Intelligent Computing, Information and Control System (ICICCS). *Advances in Intelligent Systems and Computing*, v. 1039, 2020.

VOLVO. *Curitiba recebe primeiro ônibus elétrico híbrido da Volvo*. 2016. Disponível em: <https://www.volvogroup.com/br/news-and-media/news/2016/jun/news152014.html>. Acesso em: 4 ago. 2022.

ZILOTTI, H. A. R. Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica. (2012). *Magister Scientiae Thesis*, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/83533KcytbXmpwrmTsHzCYJ/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 20 jun. 2022.

## APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CHALA, G. T.; ABD AZIZ, A. R.; HAGOS, F. Y. Natural Gas Engine Technologies: Challenges and Energy Sustainability Issue. 2018. *Energies*, n. 11, p. 2934, 2018.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, n. 86, v. 30, p. 83-97, 2016.

FENTON, P.; KANDA, W. Barriers to the diffusion of renewable energy: studies of biogas for transport in two European cities. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 60, p. 725-742, 2017.

GALBIERI, R. *et al.* Bus fleet emissions: new strategies for mitigation by adopting natural gas. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang*, n. 23, v. 7, p. 1039-62, 12 out. 2018.

MARTINS, J.; BRITO, F. P. Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. *Energies*, n. 13, p. 4086, 2020.

PASQUAL, J. *et al.* Assessment of collective production of biomethane from livestock waste for urban transportation mobility in Brazil and the United States. *Energies*, n. 11, p. 997, 2018.

VEIGA, A. P. B. *Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano produzido a partir de gás de aterro no Brasil.* 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.