



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

VALORAÇÃO ECONÔMICA DOS BENEFÍCIOS DA  
INTRODUÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS NO MUNICÍPIO  
DO RIO DE JANEIRO

**KELLYANNA DA SILVA VASCONCELOS**

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Rio de Janeiro – RJ

Março, 2020

VALORAÇÃO ECONÔMICA DOS BENEFÍCIOS DA INTRODUÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS NO  
MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Kellyanna da Silva Vasconcelos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Examinado por:

---

Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.

---

Prof. Heloisa Teixeira Firmo, D.Sc.

---

Prof. Amaro Olimpio Pereira Junior, D.Sc.

---

Bruno Scola Lopes da Cunha, D.Sc.

---

Alexandre Kotchergenko Batista, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
Março de 2020

Vasconcelos, Kellyanna da Silva

Valoração Econômica dos Benefícios da Introdução de Ônibus Elétricos no município do Rio de Janeiro/ Kellyanna da Silva Vasconcelos – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica – 2020

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Ambiental, 2020

Referências Bibliográficas: p. 48

1. Economia Ambiental.
  2. Valoração Ambiental
  3. Veículos Elétricos
  3. Frota de Ônibus.
  4. Rio de Janeiro.
- I. Lucena, André Frossard Pereira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Luis e Lindalva, por todo o cuidado, incentivo, apoio, confiança, dedicação, orientação e amor. Sem a dedicação e apoio de vocês eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu irmão, Kelliton, pelo apoio, amor, carinho, por sempre ter me inspirado ao estudo e por me mostrar coragem e dedicação a todo momento.

Agradeço ao meu companheiro, Dom, pela parceria, pela companhia, por acreditar em mim e por me incentivar até a última letra desse trabalho.

Agradeço ao meu filho, Bem, por me lembrar do amor a cada momento, por me lembrar que todo esforço é compensado e por me dar coragem para enfrentar os desafios da vida.

Agradeço aos meus padrinhos, Adriana e Carlos, por todo amor, carinho e apoio.

Agradeço a toda a minha família, por me mostrarem o que é uma rede de apoio repleta de amor incondicional.

Agradeço às minhas amigas de infância, Iasmin e Jenifer, pela amizade verdadeira e duradoura e por estarem sempre presente.

Agradeço às mulheres amigas que passaram em toda a minha trajetória universitária enquanto mãe: Claudinha, Tássia, Bianca, Alice, Carol, Karol e Mayella, sem o apoio de vocês eu não teria chegado até aqui.

Agradeço aos professores que me inspiraram durante a faculdade e fizeram dessa trajetória mais enriquecedora.

Agradeço ao Grupo Muda e aos amigos do projeto, Tomé, Lara, Lucas, Michel, Mayná e Inês, por terem me inspirado tanto e transformado a minha trajetória.

Agradeço ao meu orientador André Lucena pela compreensão e flexibilidade na orientação deste trabalho.

Agradeço ao Alexandre Kotchergenko, por ter me ajudado na escolha do tema e me apoiado na contextualização do trabalho.

Agradeço aos colegas de curso pela ajuda mútua e pelas trocas.

Agradeço também a mim mesma, por toda a força de vontade, superação e dedicação para a conclusão deste curso.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheira Ambiental.

**VALORAÇÃO ECONÔMICA DOS BENEFÍCIOS DA INTRODUÇÃO DE ÔNIBUS  
ELÉTRICOS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO**

Kellyanna da Silva Vasconcelos

Março/2020

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Curso: Engenharia Ambiental

**RESUMO**

A redução das emissões atmosféricas é pauta em discussões nacionais e internacionais. A pressão para o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU e dos acordos internacionais de redução de emissões está levando o Brasil a mudanças estruturais rumo à sustentabilidade. À luz da experiência de outros países, algumas cidades brasileiras estão apostando na adoção de um transporte público de emissão zero. O Rio de Janeiro é uma delas. Com o recente Decreto Municipal nº 46.081/2019, a prefeitura instituiu que a partir de 2025 todos os novos contratos com as concessionárias deverão prever veículos de zero emissão. Neste estudo foi feita uma estimativa do custo social e econômico que a poluição atmosférica da frota de ônibus gera para a cidade através de técnicas de valoração ambiental. Além disso, foram feitas estimativas do custo benefício e da viabilidade econômica da eletrificação da frota da cidade ao longo de 10 anos. Os resultados indicam que essa transição é vantajosa tanto do ponto de vista econômico, quanto do socioambiental.

*Palavras-Chave:* Economia Ambiental, Valoração Ambiental, Veículos Elétricos, Ônibus Elétricos, Frota de Ônibus, Rio de Janeiro.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

ECONOMIC VALUATION OF THE BENEFITS OF THE INTRODUCTION OF ELECTRIC  
BUSES IN THE MUNICIPALITY OF RIO DE JANEIRO

Kellyanna da Silva Vasconcelos

March/2020

Advisor: André Frossard Pereira de Lucena

Course: Environmental Engineering

**ABSTRACT**

The reduction of air pollution is a hot topic of national and international discussions. The pressure to achieve the UN Sustainable Development Goals and compliance with international emission reduction agreements is leading Brazil to structural changes towards sustainability. In light of the experience of other countries, some Brazilian cities are betting on the adoption of zero-emission public transport. Rio de Janeiro is one of them. With the recent Municipal Decree No. 46.081 / 2019, the city's government established that, starting in 2025, all new contracts with concessionaires should provide for zero-emission vehicles. In this study, an estimate was made of the social and economic cost that air pollution from the bus fleet generates for the city through environmental valuation techniques. In addition, estimates of the cost-benefit and economic viability of electrifying the city's fleet over 10 years were made. The results indicate that this transition is advantageous both from an economic and from a socio-environmental point of view.

*Keywords:* Environmental Economics, Environmental Valuation, Electric Vehicles, Electric Buses, Electric Bus Fleet, Rio de Janeiro.

# SUMÁRIO

1.	Introdução .....	1
1.1.	Contextualização .....	1
1.2.	Justificativa .....	2
1.3.	Motivação e objetivos .....	4
2.	Valoração econômica ambiental.....	7
2.1.	Externalidade negativa e os custos sociais.....	8
2.2.	Método Indireto da Produtividade Marginal .....	10
3.	Poluição atmosférica .....	13
3.1.	Poluentes atmosféricos.....	13
3.2.	Escalas da poluição atmosférica.....	15
3.3.	Emissões veiculares.....	16
3.4.	Emissões veiculares e seus efeitos.....	18
3.4.1.	Emissões veiculares e o impacto global.....	21
4.	Transporte público municipal .....	23
4.1.	Emissões dos ônibus urbanos na RMRJ.....	24
4.2.	A tecnologia atual.....	25
4.2.1.	Custo de aquisição .....	26
4.3.	Veículo elétrico.....	27
4.4.	A tecnologia proposta .....	29
4.4.1.	Custo de aquisição .....	30
5.	Metodologia .....	31
5.1.	Definição do local da pesquisa .....	31
5.2.	Valoração das externalidades negativas .....	32
5.2.1.	Concentração de MP10 .....	33
5.2.2.	Morbidade evitada.....	35
5.3.	Custos da substituição dos ônibus urbanos no município do rio de janeiro .....	36
5.3.1.	Custo por quilômetro rodado .....	36

5.3.2. Custos com infraestrutura .....	36
5.3.3. Custos com manutenção.....	37
5.4. Viabilidade econômica a longo prazo .....	37
6.    Resultados .....	40
6.1. Concentração de MP10.....	40
6.2. Custo da Poluição: Morbidade evitada .....	40
6.3. Viabilidade econômica a longo prazo .....	41
6.4. Discussão .....	49
7.    Conclusão .....	51
7.1. Limitações do estudo e recomendações para estudos futuros .....	52
Referências Bibliográficas .....	55

## **1. Introdução**

### **1.1. Contextualização**

O setor de transportes é um setor-chave para a gestão energética e será de suma importância no esforço mundial de transição energética para fontes de energia renováveis. Um de seus principais desafios está associado à grande dependência de derivados de petróleo como fonte de energia. Segundo IEA (2015), 93% do consumo energético do setor de transportes se dá na forma de derivados do petróleo e, no Brasil, este consumo representa 73,4% da demanda doméstica (MME, 2019). Esta diferença da matriz energética do setor de transportes no Brasil em relação à matriz mundial é principalmente devido ao elevado uso de etanol, que corresponde a 18,8% do consumo do setor (MME, 2019).

Segundo MME (2019), os resultados do Balanço Energético Nacional (BEN) reafirmam a relevância dos transportes no consumo de energia no país. O setor é o maior usuário de energia final. Sua participação representa 32,7% do consumo, ficando à frente das indústrias, que representam 31,7%. Em 2010, o consumo energético final dos meios de transportes foi de 69 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tEP), dos quais 92% foram consumidos por veículos rodoviários (MME, 2011).

O transporte motorizado baseado na queima de combustíveis fósseis é responsável pela emissão de vários poluentes nocivos à saúde e que degradam o ambiente. Hoje, a poluição do ar é considerada um dos maiores fatores de risco à saúde humana. A exposição à poluição do ar aumenta o risco de uma pessoa contrair doenças como câncer de pulmão, derrame, doenças do coração, doenças respiratórias, obstrução pulmonar crônica, enfisema e bronquite crônica, além de aumentar os riscos de morte prematura (WORLD BANK GROUP, 2016). Atualmente, a exposição à poluição do ar é considerada a terceira maior ameaça à saúde em países em desenvolvimento, atrás de doenças metabólicas e alimentação desbalanceada e à frente de doenças como malária e HIV/AIDS (WORLD BANK GROUP, 2016).

A poluição do ar é especialmente severa em grandes centros urbanos, justamente onde há maior densidade populacional e, portanto, maiores riscos aos altos níveis de exposição. Essas regiões, nas quais há uma combinação de mais pessoas, mais veículos, uso de combustíveis fósseis, construções, gestão imprópria de resíduos, e outros fatores, levam a um alto nível de emissões e uma maior concentração de poluentes na atmosfera, levando a danos à saúde humana (PABST et al., [s.d.]). Na cidade do Rio de Janeiro, o setor de transportes foi responsável por 66% do total das emissões em 2011 (ANDRADE et al, 2014 apud MMA, 2011).

Os veículos pesados (ônibus e caminhões) em grande parte utilizam diesel como combustível e, embora tenha alta durabilidade e maior eficiência energética (FREITAS et al, 2018), o motor de veículos a diesel contribui para elevadas emissões de material particulado (MP) por escapamento e é o mais intensivo na emissão de CO<sub>2</sub> (principal na categoria dos gases de efeito estufa (GEE)) dentre todos os combustíveis (ABBAS, 2014). Estudos realizados por LEPEULE et al. (2012) E KREWSKI et al. (2009), apontam uma forte relação entre mortalidade e a exposição a longo prazo de material particulado fino (MP 2,5), de modo que o MP é responsável pela maioria das complicações de saúde nos dias atuais (MAIA et al, 2017)

O material particulado, principalmente o MP 2,5, é um dos poluentes mais prejudiciais por ser muito fino, seu diâmetro aerodinâmico é inferior a 2,5 micrômetros ou cerca de um trigésimo da largura de um cabelo humano. Devido ao seu pequeno tamanho, essas partículas são capazes de penetrar profundamente nos pulmões. Sua composição química varia, dependendo da fonte. Eles geralmente consistem em compostos de carbono, sulfato e nitrato, mas também podem incluir substâncias tóxicas, como metais pesados. Eles também podem incluir concentrações de poeira soprada pelo vento natural (*WORLD BANK GROUP*, 2016).

## **1.2. Justificativa**

A poluição do ar não é apenas um risco à saúde, mas também um fardo econômico. Uma vez que causa doenças e morte prematura, a poluição do ar reduz a qualidade de vida. Causando perda de produtividade no trabalho e custos hospitalares, também representa perda econômica local e nacional (*WORLD BANK GROUP*, 2016). De acordo com RODRIGUES et al (2015), mantendo o mesmo nível de poluição atmosférica observada em 2011 no Estado de São Paulo, haverá um total de mais de 246 mil óbitos entre 2012 e 2030, cerca de 953 mil internações hospitalares públicas e um gasto público estimado em internações de mais de R\$ 1,6 bilhão. Além da magnitude dos custos, os impactos desproporcionais nos segmentos mais pobres da população tornam a poluição do ar uma ameaça à prosperidade compartilhada e inclusiva. As classes de menor renda têm maior probabilidade de viver e trabalhar em ambientes poluídos, mas são menos capazes de evitar a exposição ou de se auto protegerem (*WORLD BANK GROUP*, 2016).

Ao prejudicar a saúde das pessoas, a poluição pode ter efeito duradouro na produtividade econômica e perpetuar as desigualdades existentes. A exposição pré-natal na primeira infância a metais pesados e outras substâncias tóxicas no ambiente é especialmente prejudicial. As crianças são altamente sensíveis aos efeitos tóxicos, o contato com pequenos traços de

substâncias como chumbo ou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) pode resultar em atrasos cognitivos, entre outros efeitos à saúde (GRANDJEAN E LANDRIGAN 2014; TANG et al. 2014; PETERSON et al. 2015; VISHNEVETSKY et al. 2015).

A poluição do ar também pode ter efeitos duradouros na produtividade de outras maneiras - por exemplo, pela degradação dos ecossistemas naturais. Os poluentes podem se assentar no ar ou se misturar com a precipitação e serem depositados nas plantas, nos solos ou nos cursos de água. A deposição atmosférica de poluentes acidifica os solos e reduz a diversidade de espécies de plantas e a produtividade de pastagens em locais onde muitas pessoas dependem de meios de subsistência pastorais (CHEN et al. 2013). Os efeitos prejudiciais dos poluentes do ar nos ecossistemas aquáticos incluem a perda de biota sensível ao aumento da acidez das águas superficiais, bem como o crescimento de fitoplâncton e algas, o que contribui para a eutrofização das vias navegáveis, causando zonas mortas e proliferações de algas que prejudicam a pesca, atividades recreativas e turismo (GREAVER et al. 2012)

Uma das formas de reduzir as emissões locais de poluentes e reduzir os impactos da poluição do ar sobre a saúde humana e sobre a economia local é reduzir a dependência do setor de transportes de fontes de combustíveis fósseis e aumentar a eficiência energética (IPCC, 2015; BATISTA, 2019). Dentre as opções, merecem destaque os veículos puramente elétricos a bateria (*Battery Electric Vehicles – BEV*) e os veículos híbridos elétricos *plug-in* (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEVs*). Os veículos puramente elétricos possuem como única fonte de energia a eletricidade proveniente da rede, armazenada eletroquimicamente. Enquanto que, os veículos híbridos plug-in são automóveis híbridos elétricos<sup>1</sup> (*Hybrid Electric Vehicles – HEVs*) que podem também extrair e armazenar energia (BORBA, 2012).

Diversos países já definiram data para o fim da comercialização de veículos movidos à combustível fóssil. Na Noruega e na Holanda, a data limite é 2035 (WESTIN, 2018). Na Áustria e na Índia, 2030 (WESTIN, 2018). Na Inglaterra e na França, 2040 (WESTIN, 2018). Enquanto na Noruega a presença de carros elétricos e híbridos já chega a quase 30% da frota, no Brasil, não passa de 0,2% (WESTIN, 2018). A falta de aderência da tecnologia ocorre pela falta de incentivo e subsídios do governo, o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) incidente sobre um carro elétrico, por exemplo, é de 25%. Sobre um híbrido, 13% enquanto o IPI de um carro popular é de 7%. O veículo a combustão no país chega a custar menos de 30% do preço dos modelos híbridos e elétricos (WESTIN, 2018).

---

<sup>1</sup> Um veículo híbrido possui mais de um motor de propulsão. Os veículos híbridos elétricos são os automóveis, já produzidos mundialmente (em especial nos EUA e Europa), que combinam um motor de combustão interna e um motor elétrico.

Atualmente, a frota de ônibus das cidades brasileiras é abastecida principalmente com o óleo diesel. Em janeiro de 2018, o Decreto Municipal nº 44.210/2018 estabeleceu a utilização de 20% de biodiesel no atual combustível utilizado pelos ônibus urbanos públicos no município do Rio de Janeiro. Em suas considerações, o decreto cita um estudo da OMS – Organização Mundial de Saúde que relaciona as emissões do dióxido de carbono ao aumento da temperatura atmosférica, causando maior incidência de doenças por vetores e cita também o estudo da FETRANSPOR (2011), que afirma que a adição de 20% de Biodiesel ao combustível reduz a emissão de gases tóxicos em 14%, incluindo o monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (MP) (PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2018).

Esse decreto se destaca por dar início na movimentação do poder público em prol da mudança na matriz energética dos veículos da capital do Rio de Janeiro. No ano seguinte, o Decreto Municipal nº 46.081/2019, em seu Artigo 2º, determinou a realização de estudos técnicos operacionais e de modelagem financeira para a substituição da frota de transporte público de passageiros movidos a combustíveis fósseis para veículos com zero emissão. Essas medidas evidenciam a relevância de estudos de análise de custo benefício da substituição da frota de ônibus municipais do Rio de Janeiro.

Em seu Artigo 3º, o decreto determina que, a partir de 1º de janeiro de 2025, qualquer contrato de concessão/permissão para a delegação de serviço de transporte público coletivo de passageiros, realizados por ônibus, somente poderá ser celebrado sob a previsão contratual de utilização de ônibus de emissão zero. Para alcançar a emissão zero na operação do setor de transporte, as tecnologias disponíveis seriam a eletricidade ou o hidrogênio, sendo que veículos movidos a eletricidade estão mais desenvolvidos e aos poucos estão sendo inseridos no mercado nacional.

Vale ressaltar que a eletricidade da rede (ONS) apresenta fator de emissão baixo, mas não zero. No caso brasileiro, a maior parte da geração elétrica é via hidroelétricas, mas somos dependentes de fontes fósseis para equilibrar o sistema e garantir carga em determinados momentos.

### **1.3. Motivação e objetivos**

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é realizar uma análise do custo da poluição do ar na cidade. Com isso, realizar também uma estimativa da viabilidade econômica da

eletrificação da frota do município, o que estaria alinhado às tendências mundiais de transição energética para uma cadeia de energia limpa e menos dependente de combustíveis fósseis. Isso contribuiria para o desenvolvimento da sustentabilidade no Rio de Janeiro, que é um dos principais e maiores do Brasil, e estimularia investimentos no desenvolvimento e na difusão dessa tecnologia, gerando aumento da competitividade frente o consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, o barateamento dos preços.

Para isso, o objetivo central deste trabalho é realizar uma estimativa monetária dos impactos da poluição atmosférica gerada por ônibus urbanos sobre a saúde humana e, com isso, realizar um estudo preliminar de análise custo benefício da substituição da frota de ônibus municipais da cidade do Rio de Janeiro para uma frota de zero emissões, em adequação ao Decreto Municipal nº 46.081/2019 citado anteriormente. Esse objetivo visa prestar auxílio na tomada de decisão do poder público e/ou privado quanto à substituição e escolha da tecnologia adequada para a redução de externalidades geradas pelo transporte público no Brasil.

Os objetivos específicos podem ser listados da seguinte maneira:

- Identificar o custo monetário da poluição atmosférica gerada por ônibus municipais no município do Rio de Janeiro;
- Desenvolver uma análise custo benefício da substituição da frota de ônibus municipais no município do Rio de Janeiro por ônibus 100% elétricos;
- Identificar e analisar os impactos da poluição atmosférica na saúde humana e no meio ambiente;
- Realizar uma análise de viabilidade econômica do investimento em um período de 10 anos;
- Auxiliar na tomada de decisão do poder público e/ou privado para a substituição da frota de ônibus municipais, à luz do Decreto Municipal nº 46.081/2019.

Este documento está estruturado em sete capítulos, incluindo este primeiro de introdução, contextualização e justificativa do trabalho. O segundo, terceiro e quarto capítulos apresentam os referenciais teóricos para a pesquisa, sendo o segundo capítulo sobre teoria econômica, a valoração ambiental, o conceito de externalidade negativa e os métodos de valoração ambientais; o terceiro sobre a poluição atmosférica no setor de transportes e seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente; e o quarto capítulo sobre o transporte público municipal, a tecnologia atual utilizada na cidade do Rio de Janeiro e a tecnologia proposta neste trabalho, assim como as características principais dos veículos elétricos e seus custos de aquisição. No

quinto capítulo, é apresentada a metodologia utilizada neste estudo para obtenção do valor monetário da poluição emitida por ônibus municipais no Rio de Janeiro e da análise custo benefício da substituição da tecnologia. O sexto capítulo contém os resultados da pesquisa e a análise da pesquisa. No sétimo capítulo, é apresentada a conclusão do trabalho e as limitações do estudo e recomendações para estudos futuros. Em seguida, é apresentado o referencial teórico utilizado.

## **2. Valoração econômica ambiental**

Uma das finalidades da valoração econômica ambiental consiste em mensurar monetariamente os efeitos da degradação ambiental sobre o bem-estar-social e sobre a atividade produtiva, chegando, assim, em um valor estimado para os recursos naturais e a degradação ambiental. Para calcular esses valores são aplicadas técnicas de Valoração Econômica de Recursos Ambientais (KNIGHT & YOUNG, 2006) que têm se demonstrado uma ferramenta importante para avaliação de custo-benefício por auxiliar na tomada de decisões políticas públicas (MIRAGLIA & GOUVEIA, 2014).

Segundo a OMS, os altos níveis de poluição do ar, por exemplo, são muitas vezes subproduto de políticas insustentáveis em setores como o de transportes. Nesses casos, a poluição do ar gerada por todo o setor converte-se em custos sociais como perda de bem-estar e saúde humana. Portanto, a redução da poluição também evitaria custos de cuidado com a saúde (MIRAGLIA & GOUVEIA, 2014).

Os impactos da alteração da concentração de elementos na atmosfera sobre a saúde humana podem ser avaliados segundo duas categorias: morbidade e mortalidade. De acordo com EPA (2010), esses desfechos refletem em custos públicos e privados diretos, como a perda de produtividade (dias de trabalho perdidos), restrição em atividades (perda de bem-estar) ou morte prematura e despesas médicas com tratamentos, exames e medicamentos. O cálculo da perda de produtividade é avaliado por meio da variação da produção, do rendimento e do consumo e a estimativa do valor monetário atribuído à redução do risco de morte (MIRAGLIA & GOUVEIA, 2014).

Existem diversos métodos de valoração ambiental, que podem ser classificados em dois grupos. Os métodos que estudam o valor do recurso através das funções de demanda e os que estudam a valoração ambiental através das funções de produção (KNIGHT & YOUNG, 2006). Essas classificações podem ser observadas no Quadro 1 abaixo. No presente trabalho, serão utilizados os métodos que analisam a valoração ambiental pelo lado da oferta (funções de produção) que serão mais especificados na seção 2.2.

*Quadro 1: Classificação dos métodos de valoração econômica*

Grupos	Método de Valoração Econômica	
	Método da Produtividade Marginal	
Métodos de Função de Produção	Mercado de Bens Substitutos	Custo de Reposição Gastos Defensivos ou Custos Evitados Custos de Controle Custo de Oportunidade
Métodos de Função de Demanda	Mercado de Bens Complementares  <b>Método da Valoração Contingente</b>	Preços Hedônicos Custo de Viagem

Fonte: Motta (2006)

Os métodos de função de produção são aplicados quando o recurso ambiental é um insumo ou um substituto de um bem ou serviço privado. Nesse caso, os métodos se baseiam em utilizar os preços de mercado deste bem ou serviço privado para estimar o valor econômico do recurso ambiental. Assim, os benefícios ou custos ambientais das variações de disponibilidade destes recursos podem ser estimados (MOTTA, 1997). É o caso da poluição do ar, por exemplo. A qualidade do ar quando não alterada presta um “serviço” à comunidade mantendo o bem-estar e a saúde humana e ambiental. Quando a qualidade do ar é prejudicada, esse serviço deixa de ser prestado e é convertido em custos sociais como a perda de bem-estar e custos econômicos com gastos hospitalares e perda de produção, por exemplo.

Já os métodos de função de demanda são aqueles que assumem que a variação da disponibilidade do recurso ambiental altera a disposição a pagar ou aceitar dos indivíduos em relação ao bem ou serviço privado. Assim, estes métodos estimam o valor econômico do recurso ambiental a partir do que os indivíduos estariam dispostos a pagar (ou aceitar) para garantir (ou aceitar) a disponibilidade (ou variação) do recurso ambiental (MOTTA, 1997).

## 2.1. Externalidade negativa e os custos sociais

O consequente custo, relacionado à saúde da população, gerado por atividades econômicas não é compensado pelo agente gerador da ação (i.e., indústria, usuários de carros, etc.). Esses custos recaem sobre indivíduos que não estão diretamente envolvidos no benefício econômico gerados

por essas atividades e sobre o governo, com custos para as unidades de saúde pública, por exemplo. Esses custos externos ao agente econômico que provocam uma alteração, positiva ou negativa, no bem-estar de outro agente, sem que a variação seja compensada, são chamados de externalidades (PEARCE et TURNER, 1990).

Portanto, quando a externalidade é negativa, ela representa um custo social. As emissões veiculares, por exemplo, geram custos sociais devido aos seus impactos maléficos sobre a saúde de todos os indivíduos da sociedade, mesmo que não tenham se beneficiado desses meios de transporte (KNIGHT et YOUNG, 2006). A queima dos combustíveis fósseis provoca externalidades adversas sendo destacadas a poluição do ar nos grandes centros urbanos e a emissão de GEE que provocam mudanças climáticas. A poluição do ar provoca danos à saúde, além de provocar outros custos ambientais como perda da biodiversidade, de sistemas ecológicos, do patrimônio cultural e estético.

Entretanto, os custos sociais não são facilmente observáveis. Para calcular as externalidades em forma monetária são necessários estudos de valoração dos recursos naturais que não possuem preço de mercado. Assim sendo, economicamente, os produtores tendem a assumir uma curva de oferta que reflete os seus custos privados de produção, não levando em conta os custos sociais associados à poluição do ar. Dessa forma, quando se estima o custo do transporte público urbano levando em consideração o preço do combustível, dos pneus, óleos e manutenção em geral, esse custo está subestimado, pois não são considerados todos os custos sociais como o aumento de doenças respiratórias, morbidade, gastos hospitalares e mortalidade precoce da população exposta associados às emissões de gases tóxicos (KNIGHT et YOUNG, 2006).

Além de não ser levado em consideração, o custo social da poluição do ar é cumulativo, ou seja, quanto mais se poluir o ar, maior será o custo associado. Com isso, na avaliação econômica da adoção de uma alternativa que reduza tais externalidades, como o uso de um combustível mais limpo, deve ser incorporado o valor do benefício social da poluição evitada. Dentro deste contexto, a transição do ônibus a diesel para o ônibus elétrico, por exemplo, representa um benefício, pois reduz o custo social associado ao setor de transporte uma vez que reduz a emissão de poluentes e, por conseguinte, a concentração atmosférica de gases tóxicos (KNIGHT et YOUNG, 2006).

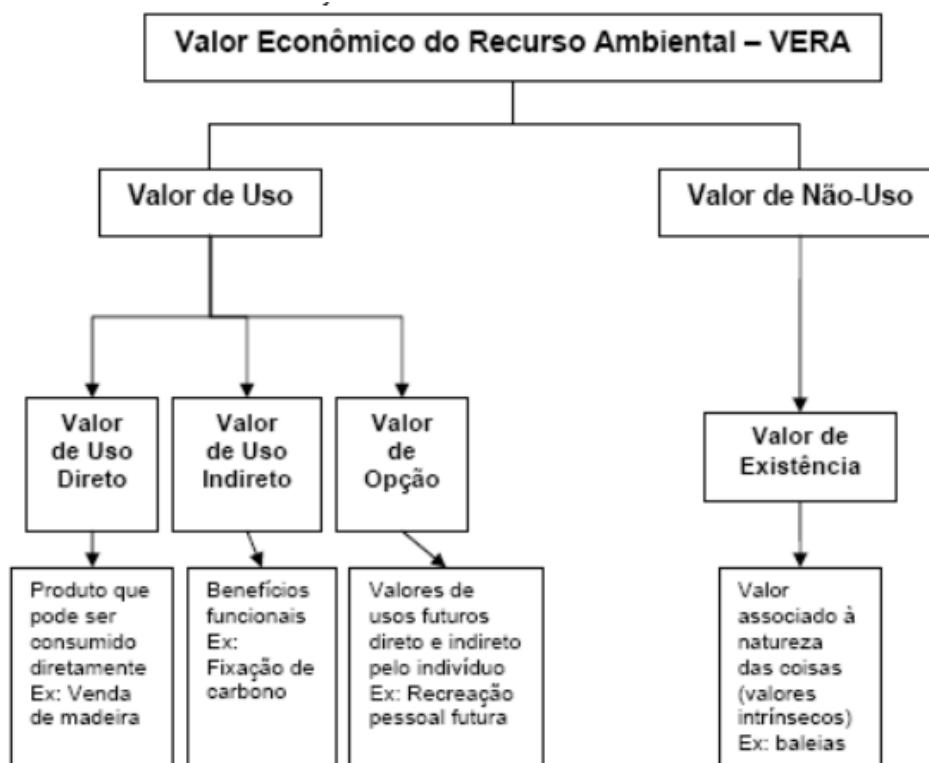
O ganho ambiental local é observado através da qualidade do ar e da redução da morbidade e mortalidade resultadas da poluição do ar nos grandes centros urbanos. Ou seja, diminuindo a concentração local da poluição, a qualidade de vida dos moradores dos grandes centros tende a melhorar. Com isso, para determinar o benefício social associado à redução das emissões

atmosféricas de modo a auxiliar na tomada de decisão governamental, é necessário realizar um estudo para mensurar monetariamente o valor dos recursos naturais e da degradação ambiental. Segundo MOTTA (1997), os métodos de valoração ambiental propõem uma análise de custo benefício, em que valores sociais dos bens e serviços são considerados de forma a refletir variações de bem-estar e não somente seus respectivos valores de mercado.

## 2.2. Método Indireto da Produtividade Marginal

O Método Indireto da Produtividade Marginal é um dos métodos de função de produção. Esse método considera o valor de uso indireto do recurso natural. É considerado valor de uso indireto (VUI) quando o benefício atual do recurso se deriva das funções ecossistêmicas, como por exemplo, a proteção do solo e a estabilidade climática decorrente da preservação das florestas. Abaixo na Figura 1 pode-se observar as diferentes classificações dos valores de um recurso ambiental.

*Figura 1: Classificação dos valores de um recurso ambiental*



Fonte: Seroa da Motta, 1997

Desse modo, dada uma função de produção de um produto qualquer  $P = f(Y, R)$ , onde  $Y$  corresponde aos insumos privados e  $R$  aos recursos ambientais de preço zero, calcula-se a

variação de  $P$  frente a uma variação da quantidade/qualidade do recurso ambiental  $R$  utilizado como insumo para o produzir  $P$  (DA MOTTA, 1997).

DA MOTTA (1997) explica o Método da Produtividade Marginal: utilizando novamente a função de produção  $P=f(Y, R)$ . Considera-se que o valor econômico do recurso ambiental  $R$  é um valor de uso dos bens e serviços ambientais e que para calculá-lo é preciso determinar a correlação de  $R$  em  $f$  e a variação do nível de estoque e de qualidade de  $R$  em razão da produção do próprio  $P$  ou de outra função de produção, por exemplo, de  $T$ . Para isso, estimam-se as funções de dano ambiental (funções dose-resposta - DR), representada como:

$$R = DR(X_1, X_2, \dots, Q)$$

Onde  $X_1, X_2, \dots$  são as variáveis que junto com o nível de estoque ou qualidade  $Q$  do recurso natural afetam a disponibilidade de  $R$ . Assim:

$$dR = dDR/dQ$$

Dessa forma, as funções DRs relacionam a variação do nível de estoque ou qualidade de  $R$ , com o nível de danos físicos ambientais provocados com a produção de  $P$  ou  $T$  para identificar o decréscimo da disponibilidade de  $R$  para a produção de  $P$ .

No exemplo desse estudo, a frota de ônibus municipais ( $T$ ) que emite poluentes na atmosfera aumenta a poluição ( $Q$ ) de modo a reduzir a qualidade do ar ( $R$ ) que, por sua vez, impacta na produtividade de um funcionário de uma empresa do município que ficou internado por complicações respiratórias devido à má qualidade do ar ( $P$ ). A perda da produtividade da empresa ( $P$ ) em função da redução da qualidade do ar ( $R$ ) é determinada através da função dose resposta (DR) da alteração da qualidade do ar pelas emissões dos ônibus municipais ( $T$ ) e pela função de produção ( $P$ ).

Este método possui algumas desvantagens, tais como (KNIGHT et YOUNG, 2006):

- Os métodos indiretos subestimam o valor do recurso ambiental quando os valores de opção e existência são significativos;
- No método de produtividade marginal o valor do recurso enquanto insumo somente reflete as variações na produção de bem ou serviço quando seu uso é direto e indireto;
- O aumento significativo do preço induz a valores equivocados do recurso ambiental enquanto variação do bem-estar, supervvalorizando ou subestimando-o.

Essa técnica também é chamada de “Produção Sacrificada”. Neste estudo, o valor do ar será estimado considerando os efeitos do ar poluído sobre a saúde humana. Dentre eles estão as internações hospitalares e os dias de trabalho perdidos, considerando os efeitos da poluição sobre a morbidade apenas.

Nos gastos com internações hospitalares ou na perda de um dia de trabalho está intrínseco uma produção sacrificada que poderia ser evitada. Esses gastos poderiam ser revertidos em uma atividade produtiva ou no aumento do bem-estar. Ao invés de se perder um dia de trabalho, podia-se estar produzindo. Utilizando-se desse contexto, será mensurado o custo da poluição do ar.

### **3. Poluição atmosférica**

Segundo a Organização Mundial da Saúde, somente em 2012, cerca de 26 mil brasileiros perderam a vida pela má qualidade do ar que respiravam. No mundo, a OMS estimou cerca de sete milhões de mortes no mesmo ano (MIRAGLIA et GOUVEIA, 2014 apud IPCC,2014; EPA, 2013).

A poluição do ar é a introdução de poluentes atmosféricos na atmosfera seja por consequência de atividades humanas ou de fenômenos naturais. É considerado poluente atmosférico qualquer forma de matéria que é dispersa com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos e que possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna ou à flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (CONEMA 70, 2016).

#### **3.1. Poluentes atmosféricos**

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados como sólidos, líquidos e/ou gasosos, de acordo com seu estado de agregação. De acordo com sua composição química, os poluentes podem ser classificados como inorgânicos ou orgânicos (PIRES, 2005). Podem ser classificados também de acordo com sua origem em duas categorias: primários, aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão; e secundários aqueles formados na atmosfera como produtos de alguma reação (CONEMA 70, 2016). E ainda, podem ser classificados de acordo com os seus efeitos em substâncias radioativas, metais pesados, tóxicas, carcinogênicos, mutagênicos, etc. (PIRES, 2005). Os impactos dos poluentes atmosférico serão detalhados mais à frente na seção 3.4

Apesar da existência de fontes de poluição natural, como queimadas e erupções vulcânicas, a ação antrópica transformou a poluição do ar em uma das formas de poluição mais impactantes atualmente. Atua a nível local, gerando diversos malefícios à saúde humana e ao meio ambiente e a nível global, contribuindo com o aquecimento da Terra de forma desproporcional à média histórica de temperatura do planeta. As escalas da poluição do ar serão discutidas de forma mais detalhada na próxima seção deste trabalho (seção 3.2).

Segundo BRETSCHNEIDER & KURFÜRST (1987) apud PIRES (2005), fonte de poluição atmosférica é um conceito amplo que pode ser definido como:

- 1- Um local do qual escapam substâncias poluentes (chaminés, dutos, descargas de ar, etc.);
- 2- Processos e/ou equipamentos de produção (caldeiras, fornos, linhas de produção, câmaras de combustão, etc.);
- 3- Uma área com um conjunto de pontos e/ou processos e equipamentos numa região específica, capazes de liberar matéria ou energia para a atmosfera, tornando-a poluída.

As emissões das fontes naturais ocorrem com frequência diferente das emissões das fontes antropogênicas, porém são emissões bastante significativas (CAVALCANTI, 2003). As várias fontes de poluição do ar podem ser classificadas do seguinte modo:

- Fontes estacionárias – representadas por fontes de poluição não industriais e industriais.
- Fontes móveis - compostas pelos meios de transporte em geral.
- Fontes naturais - são os processos naturais de emissão caracterizados pela atividade de vulcões, do mar, da poeira cósmica, do arraste eólico, etc.

O Quadro 2 abaixo mostra as principais substâncias consideradas poluentes do ar e as suas respectivas fontes de emissão.

*Quadro 2: Relação entre fontes e seus poluentes característicos*

Classificação	Tipo	Poluentes
Fontes Estacionárias	Combustão	Material particulado (MP) Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ) e trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) Monóxido de carbono (CO) Hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> )
	Processo Industrial	Material particulado (fumos, poeiras e névoas) Gases: SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , HCl e Hidrocarbonetos Mercaptans, HF, H <sub>2</sub> S, NO <sub>x</sub>
	Queima de Resíduo Sólido	MP Gases: SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , HCl, NO <sub>x</sub>
	Outros	HC, MP, Óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e óxidos de enxofre
Fontes Móveis	Veículos automotores	MP, CO,
	Aviões e barcos,	Óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio
	Locomotivas, etc.	Ácidos orgânicos, hidrocarbonetos e aldeídos
Fontes Naturais		MP, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO, NO, NO <sub>2</sub> , HC
Reações Químicas na atmosfera		Poluentes secundários: O <sub>3</sub> , aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos, aerossol fotoquímicos, etc.

*Fonte: Cetesb, 2002*

### **3.2. Escalas da poluição atmosférica**

O problema da poluição do ar se desdobra em muitos níveis, cada um com características próprias. Para desbrinchar, podemos estabelecer escalas de poluição do ar. A escala horizontal considera o quanto da superfície terrestre foi afetada. A escala vertical mede o quanto da camada de ar está sendo envolvida. A escala temporal considera o tempo para o problema gerar consequências e o tempo para seu controle. A escala de organização considera as ações necessárias para a resolução do problema (PIRES, 2015 apud BOUBEL et al 1984).

Segundo Pires (2015), considerando as quatro escalas apresentadas, os problemas de poluição atmosférica podem assumir as seguintes dimensões: micro (indoor), local, urbana, regional, continental e global.

- Micro ou Indoor: Limitada a ambientes fechados como interior de locais com atividades industriais. As emissões ficam restritas ao mesmo local da fonte ou apresenta alcance desprezível na atmosfera.
- Local: Neste caso a fonte e a área atingida estão no mesmo campo de visão. Um exemplo seria a via principal de uma cidade com intenso tráfego de veículos com muitas construções em seu entorno. As fontes seriam os automóveis e os receptores, os ocupantes dos prédios adjacentes. A escala horizontal do exemplo seria o trecho da via considerado. A escala vertical seria a altura dos prédios adjacentes e a escala temporal medida em minutos desde que a densidade do tráfego mude por um fator de dois em uma hora. O tempo de controle da poluição seria longo se não houvesse mudança no tráfego, porém se o tráfego for restringido o problema seria resolvido em pouco tempo.
- Urbana: O centro das cidades e seus respectivos subúrbios e zona rural concentram atividades industriais e o tráfego de transportes e consequentemente apresenta maior concentração de poluentes. A concentração de poluentes no subúrbio é afetada diretamente pela cidade, porém possui níveis mais baixos de poluentes. A zona rural possui os menores índices de poluição em relação ao centro urbano. Nessa dimensão urbana, os fenômenos meteorológicos estão intimamente relacionados com os problemas de poluição do ar. Numa área urbana as correntes de ar que circulam realizam o transporte de poluentes por dois mecanismos: as correntes de ar horizontais que transportam a poluição lateralmente, e as correntes de ar verticais que por meio de convecção dispersa a poluição para níveis superiores da atmosfera, e ao mesmo tempo renova o ar limpo. Estes mecanismos são os responsáveis pelo maior ou menor grau de poluição nas áreas.

- Regional: A poluição atmosférica é um problema essencialmente urbano, entretanto os poluentes dispersos na atmosfera são transportados para áreas inicialmente não poluídas. Esse transporte de poluentes para áreas não contaminadas ocorre devido às condições meteorológicas descritas acima na dimensão urbana e por fatores geomorfológicos como a topografia. Com isso, ocorre o transporte de poluentes até uma condição de homogeneidade com a diluição de ar poluído com ar não contaminado causando a degradação do ar de áreas ainda não ocupadas.
- Continental: O problema da poluição do ar nesta dimensão remete-se ao transporte de poluentes através das fronteiras internacionais. O carreamento de óxidos de enxofre e de nitrogênio é um exemplo. Esse poluente é transportado para longas distâncias causando precipitação ácida que, entre muitos impactos, causa a diminuição do pH dos corpos d'água e do solo. O problema da deposição ácida envolve um grande número de fontes emissoras que agem sinergicamente num país de modo a contaminar uma extensa massa de ar que então se move para outro país.
- Global: A preocupação nesta dimensão é o transporte de poluentes ao redor do globo terrestre, como acontece com o transporte estratosférico de radionuclídeos dos testes de armas nucleares e o transporte de material particulado das erupções vulcânicas, além do transporte de outros poluentes que podem levar a mudanças significativas na atmosfera, como a redução da camada de ozônio e o aumento do efeito estufa, alterando assim o clima do planeta.

### **3.3. Emissões veiculares**

A emissão de poluentes pelos veículos depende de muitos fatores: O combustível utilizado, o tipo e idade do motor, a regulagem, o estado de manutenção e a velocidade aplicada do veículo influenciam na quantidade de poluentes emitidos. Nos veículos à combustão a relação combustível/ar não é a ideal para proporcionar a queima completa do combustível, de modo que o consumo de oxigênio é menor que o necessário, levando a um aumento no consumo de combustível (veículo desregulado) e em consequência, maior emissão de poluentes e gases inflamáveis (CONEMA 70, 2016).

O processo de combustão incompleta de combustível é responsável pela emissão de Monóxido de Carbono (CO); Hidrocarbonetos (HC); Óxidos de nitrogênio (NOx); Óxidos de enxofre (SOx); Aldeídos ( $C_nH_{2n}O$ ) e Material Particulado (MP) (CONEMA 43, 2012). Para os veículos a diesel, ainda ocorre a formação de fuligem e a tonalidade da fumaça mostra que quanto mais preta for

a fumaça, maior a quantidade de emissão de poluentes associados à combustão incompleta do combustível (CONEMA 70, 2016).

Além de poluir com o motor em funcionamento, o motor desligado também emite poluentes através da evaporação do combustível armazenado pelo suspiro do tanque e pelo sistema de carburação do motor. Esses vapores contêm substâncias poluidoras do ar que são, em parte, lançadas na atmosfera. Entretanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais, essas emissões estão cada vez mais controladas (CONEMA 70, 2016).

Atualmente, o transporte rodoviário é o principal meio de transporte de cargas e de passageiros no país (ABBAS, 2014). Este modal é o mais intensivo no consumo de energia dentre todos do setor de transportes e a sua fonte energética se caracteriza de acordo com o quadro 03 abaixo

*Quadro 3: Fontes energéticas no setor de transporte rodoviário*

Gás Natural	2,3%
Óleo Diesel	50,4%
Gasolina Automotiva	33,6%
Álcool Etílico Anidro	5,7%
Álcool Etílico Hidratado	7,9%
Total	100%

Fonte: MME, 2013.

Os veículos pesados (ônibus e caminhões) em grande parte utilizam diesel como combustível e, como pode-se perceber conforme a quadro 4, além da emissão de MP, é o mais intensivo na emissão de CO2 (principal na categoria dos GEE) dentre todos os combustíveis (ABBAS, 2014).

*Quadro 4: Fatores de emissão de CO2 por tipo de combustível em g/km*

Combustível	CO2
Gasolina A	2,269
Etanol Anidro	1,233
Etanol Hidratado	1,178
GNV	1,999
Diesel	2,671

Fonte: MMA, 2011

Vale ressaltar que as indústrias de ônibus vêm produzindo motores cada vez mais eficientes e com menor índice de emissão de poluentes. O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) é um grande responsável pela implementação de uma frota menos poluente no Brasil. O programa foi instituído pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) em 1986 com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes para veículos leves e

pesados no país (ABBAS, 2014). Hoje está na fase P5 com 91% dos veículos dentro dos padrões estabelecidos

Isso mostra que com o progresso da tecnologia existe uma tendência cada vez maior de redução das emissões de poluentes dos ônibus. Além disso, estas novas tecnologias tendem a incentivar a utilização de alternativas menos poluentes, o que indica a redução das emissões nos próximos anos. Desta forma, conclui-se que a tendência do sistema de transporte rodoviário é de reduzir as emissões conforme o avanço dos sistemas de motorização e substituição dos combustíveis derivados do petróleo para aqueles alternativos renováveis (ABBAS, 2014).

### **3.4. Emissões veiculares e seus efeitos**

O transporte motorizado baseado na queima de combustíveis fósseis é responsável pela emissão de vários poluentes nocivos à saúde e que degradam o ambiente urbano, com destaque para o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados (MP), os óxidos de nitrogênio e os óxidos de enxofre (SOx). O quadro 5 descreve os efeitos nocivos da alta concentração desses poluentes

*Quadro 5: Efeitos nocivos dos principais poluentes veiculares locais*

Poluente	Impacto
CO	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar a morte após determinado período de exposição.
NOx	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do <i>smog</i> fotoquímico e da chuva ácida. É um precursor do O3, que causa vários problemas respiratórios na população.
HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados formam o <i>smog</i> e os compostos cancerígenos. É um precursor do O3.
MP	Pode penetrar na defesa do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte.
SOx	Precursor do O3, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis.

Fonte: IPEA, 2011

Esses efeitos podem ser classificados como agudos e crônicos. Os efeitos agudos têm caráter temporário e reversível e ocorrem em função do aumento da concentração de poluentes. A irritação nas mucosas e tosse são exemplos de efeitos agudos; os efeitos crônicos têm caráter permanente e cumulativo com manifestações em longo prazo, podendo causar intoxicações gradativas aos seres humanos que provocam graves doenças respiratórias além de corrosão de

estruturas e a degradação de materiais de construções e obras de arte (PIRES, 2015 apud CAVALCANTI, 2003).

Os principais impactos no bem-estar humano são os efeitos sobre os sistemas respiratórios, circulatórios e oftalmológicos, sendo o sistema respiratório a principal via de entrada de poluentes, alguns dos quais podem afetar as funções pulmonares. Os efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde humana variam desde uma simples irritação nos olhos até o caso de morte. Em geral, esses efeitos agravam doenças pré-existentes, tornando as pessoas mais suscetíveis às infecções ou ao desenvolvimento de doenças respiratórias crônicas (PIRES 2005 apud WRI,2004).

No presente estudo, o poluente atmosférico de interesse é o material particulado (MP), pois é um dos principais poluentes emitidos por veículos a diesel. Material particulado ou aerossóis são partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar, que possuem dimensões inferiores a 100  $\mu\text{m}$  (RENOUX, 1998 apud MAIA et al, 2017) e são emitidos tanto por fontes naturais (erupções vulcânicas, spray marinho, material biológico e suspensão de partículas do solo) quanto por fontes antrópicas (transporte, mudança do uso e ocupação do solo, geração de energia e atividades industriais) (MAIA et al, 2017).

Os materiais particulados apresentam riscos à saúde pública como o agravamento da asma, bronquite e irritação no trato respiratório, a depender de sua concentração, composição química e tamanho. Os aerossóis podem apresentar partículas de até 2.5 micra (MP 2.5), também chamadas de partículas respiráveis ou partículas finas, e partículas com tamanho aerodinâmico de até 10 micra (MP10), também conhecidas por partículas grossas ou inaláveis (MAIA et al, 2017).

Uma das principais fontes de particulados é a emissão proveniente de veículos a diesel (MONITOAR RIO, 2012). Motores a diesel geram até 100 vezes mais partículas do que motores a gasolina e cerca de 80% das partículas emitidas pela queima do diesel apresentam pequeno tamanho aerodinâmico, sendo menores do que 1  $\mu\text{m}$  (MAIA et al, 2017 apud FRANK, 2015).

O grande problema das partículas finas é que se comportam como gases e podem atingir os alvéolos pulmonares, penetrando na corrente sanguínea onde serão distribuídas para as células e tecidos do corpo (MAIA et al, 2017 apud FRANK, 2015) Por outro lado, as partículas de até 10  $\mu\text{m}$  atingem o trato respiratório superior ficando retidas na garganta, laringe e faringe, enquanto as partículas maiores que 10  $\mu\text{m}$  ficam retidas nos pelos do nariz e oferecem menor risco devido ao seu baixo alcance no organismo (MAIA et al, 2017 apud MONITOAR RIO, 2012).

As partículas finas possuem maior superfície de contato se comparadas com as partículas grossas, assim, a interação com o sistema biológico é maior caso compostos tóxicos como metais pesados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos estejam na superfície dessas partículas, o que representa um grande risco à saúde organismo (MAIA et al, 2017 apud MONITOAR RIO, 2012).

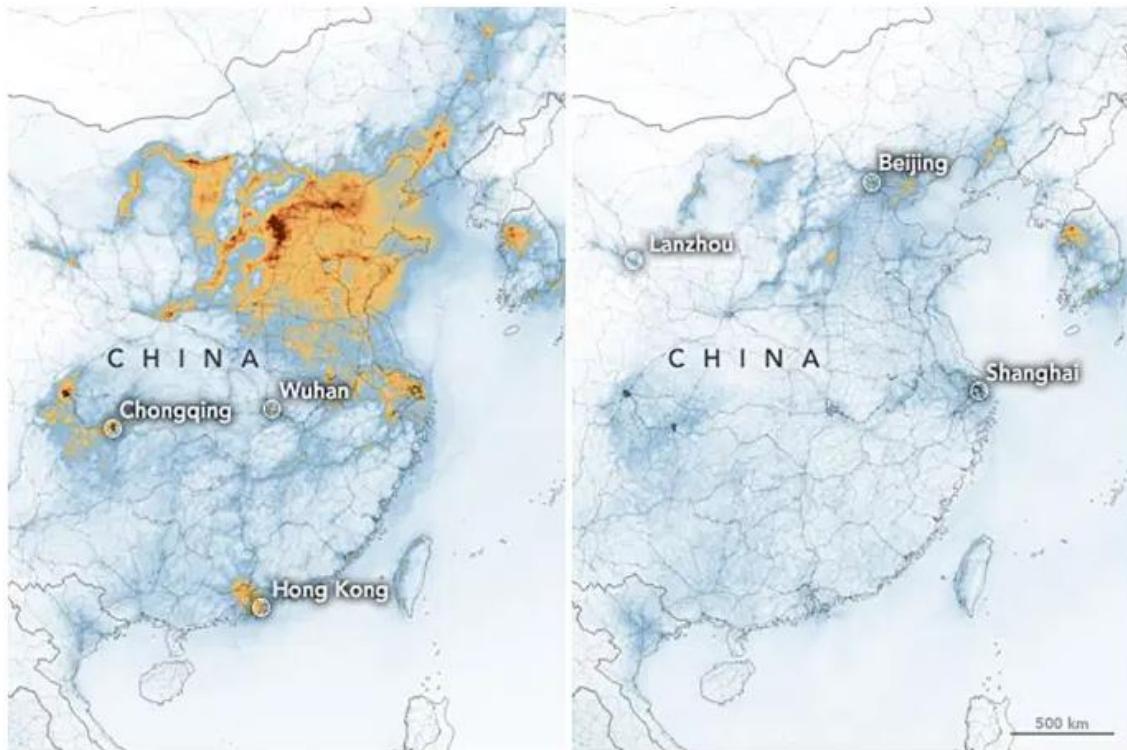
Estudos realizados por LEPEULE et al. (2012) e KREWSKI et al. (2009), apontam uma forte relação entre mortalidade e a exposição a longo prazo de material particulado fino (MP2.5), além disso, dos poluentes atmosféricos existentes, o MP é responsável pela maioria das complicações de saúde nos dias atuais (MAIA et al, 2017 apud FRANK, 2015).

Quanto aos outros poluentes listados na tabela, os óxidos de nitrogênio e de enxofre são aportados na atmosfera a partir de atividades nas termelétricas a carvão e na indústria metalúrgica, no uso de combustíveis fósseis, principalmente o diesel, e na produção de fertilizantes (MAIA et al, 2017).

O dióxido de enxofre, SO<sub>2</sub>, é um gás incolor não inflamável, altamente tóxico que causa danos ao sistema respiratório e é um agravante da asma, além disso, o SO<sub>2</sub> pode causar danos aos olhos como o endurecimento da córnea e deformação da íris. Já o dióxido de nitrogênio, NO<sub>2</sub>, é um gás de coloração marrom que além de atacar o trato respiratório e aumentar a susceptibilidade às gripes e resfriados, também possui papel fundamental na formação do ozônio a nível troposférico na presença de radiação solar e compostos orgânicos voláteis (MAIA et al, 2017).

Na figura a seguir é possível observar os impactos positivos na qualidade do ar com a paralização das atividades econômicas na China durante o momento crítico de contagio do vírus Covid-19 em 2020. O mapa mostra a emissão de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) no território chinês em 2020. O lado esquerdo mostra a concentração de NO<sub>2</sub> no país antes do isolamento social. No direito, há a quantidade de poluentes durante o período de isolamento.

*Figura 2: Concentração de NO<sub>2</sub> na China antes e durante o contagio do Coronavírus*



*Fonte: Revista Super Interessante, 2020.*

Ambos os poluentes (NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>) são constituintes da chuva ácida, causando danos a materiais de construção e acidificando rios e o solo (MONITORAR Rio, 2012). A oxidação dos óxidos de enxofre e nitrogênio a ácido sulfúrico e a ácido nítrico, respectivamente, formam as chamadas partículas secundárias que compõem a fração mais fina do aerossol (MP 2.5) e estão mais associadas às atividades humanas (ALVES, 2005 apud MAIA et. al., 2017).

Sendo assim, além do impacto sobre a saúde humana, os principais efeitos do aumento da concentração de poluentes na atmosfera vão além do nível local, com a deposição ácida, o aumento do efeito estufa e a redução da camada de ozônio que alteram as características naturais da atmosfera terrestre.

### **3.4.1. Emissões veiculares e o impacto global**

Como se viu na seção 3.2 a poluição atmosférica alcança diferentes escalas de impacto. Nesta seção, são detalhados os impactos das escalas continental e global, como chuva ácida, efeito estufa e a diminuição da camada de ozônio.

A deposição ácida ocorre devido à deposição de poluentes de caráter ácido no ecossistema, principalmente o óxido de enxofre e o óxido de nitrogênio. A deposição ácida é a combinação

da deposição seca e úmida, esta última comumente chamada de chuva ácida (PIRES, 2005 apud RIBEIRO et. al., 2000). Na formação da chuva ácida esses óxidos reagem com o vapor d'água presente na atmosfera formando substâncias como ácido sulfúrico, ácido sulfuroso, ácido sulfídrico, ácido nítrico e ácido nitroso entre outros, que serão precipitados junto com as chuvas. A incidência de chuva ácida causa acidificação de sistemas aquáticos, principalmente lagos, do solo e de florestas com consequentes prejuízos para as formas de vida que ali habitam. Deterioração de materiais, estruturas e monumentos históricos pela intensificação da corrosão, entre outros efeitos (PIRES 2005, MEDEIROS, 2003).

O efeito estufa é um fenômeno natural de retenção de calor na atmosfera e exerce um papel fundamental na manutenção da vida na Terra, pois contribui para manter a temperatura média do planeta em torno dos 15ºC, possibilitando as condições ideais para a existência de vida. Esse efeito é um fenômeno no qual a radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre é retida por alguns gases presentes na atmosfera, essa retenção da radiação aquece a temperatura atmosférica a nível global. Os principais gases responsáveis por esse efeito são o gás carbônico (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e os CFCs (IPCC, 2001).

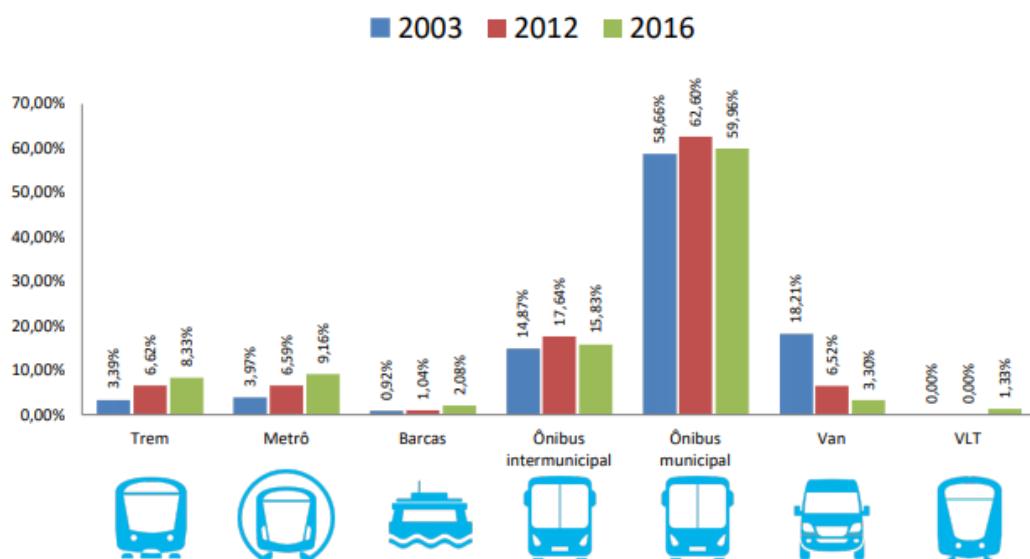
Os processos de queima de combustíveis fósseis e do desmatamento aumentam a concentração desses gases na atmosfera, causando maior retenção das radiações infravermelhas e, consequentemente aumentando ainda mais a temperatura do planeta (PIRES, 2005 apud RIBEIRO et al., 2000). Os principais impactos do aumento do efeito estufa são a elevação do nível do mar, a alteração no suprimento de água doce, as mudanças climáticas e a alteração no processo de desertificação ( PIRES, 2005)

Assim como o efeito estufa, a camada de ozônio é um fenômeno natural que consiste em um filtro que protege o planeta das excessivas radiações ultravioletas do sol. A redução dessa camada protetora ocorre devido à reação de algumas substâncias com o ozônio estratosférico. Os clorofluorcarbonos (CFCs), por exemplo, liberam cloro que reage com o ozônio formando outra molécula e contribuindo para reduzir o ozônio presente na camada protetora. Além do cloro presente nos CFCs, os óxidos de nitrogênio, o gás halon, o metilclorofórmio e o tetracloreto de carbono são outras substâncias capazes de provocar o mesmo efeito (PIRES 2005 apud BOUBEL et al., 1984; MANAHAN, 2000). A diminuição da camada de ozônio permite a passagem das radiações ultravioletas indesejáveis podendo causar na saúde humana aumento da incidência de câncer de pele, doenças oftalmológicas como catarata, além de causar efeitos nocivos aos ecossistemas, fauna e a flora (PIRES, 2005).

#### 4. Transporte público municipal

O principal meio de transporte público no município do Rio de Janeiro atualmente é o ônibus. Cerca de 60% das viagens em transporte público foram feitas através dos ônibus municipais no Rio de Janeiro em 2016.

*Figura 3: Evolução do uso dos principais modais no município do Rio de Janeiro*



Fonte: FETRANSOR, 2016.

O principal propulsor para ônibus na atualidade é o motor a óleo diesel, porém nas últimas décadas novas alternativas estão sendo desenvolvidas. Os principais objetivos dessas novas alternativas são a promoção da sustentabilidade e a redução da emissão de poluentes nocivos ao meio ambiente e a saúde humana. Entretanto, a viabilidade da proposta é sempre levada em conta, pois um equipamento extremamente caro não sai do protótipo. O investimento em transporte público está ligado diretamente ao valor da tarifa e o barateamento do custo operacional pode refletir em tarifas mais acessíveis, o que agregaria não só na redução da poluição, mas também em benefícios sociais.

Nas seções 4.1 e 4.2 iremos descrever os tipos de tecnologias que estão sendo utilizadas como alternativas ao motor a diesel, além de caracterizar a tecnologia utilizada atualmente nos ônibus municipais e a tecnologia proposta como alternativa de substituição, assim como os custos de aquisição associados.

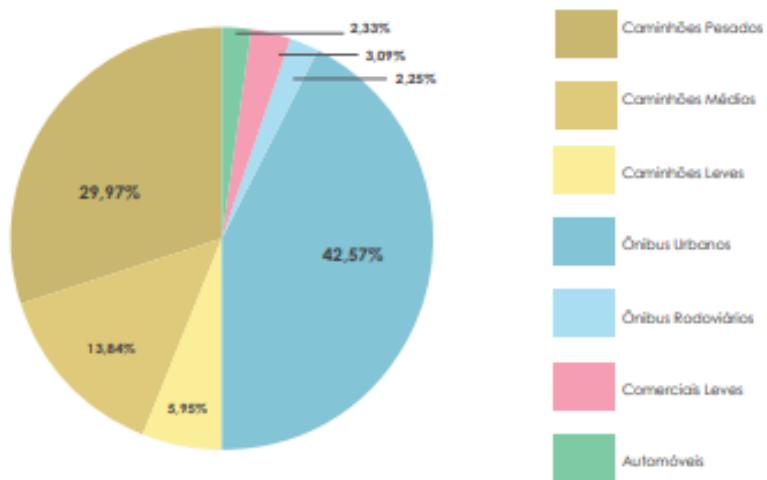
#### 4.1. Emissões dos ônibus urbanos na RMRJ

Segundo o Inventário de Emissões de Fontes Veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro do INEA (2015), os ônibus urbanos apresentam uma baixa 10 a (4 anos), quando comparada com a do Estado de São Paulo (11 anos) e a dos demais estados brasileiros (18 anos).

Isso se deve às políticas adotadas no Rio de Janeiro para concessão da realização do transporte de passageiros no Estado. Estes ônibus já reduziram 83% do material particulado de escapamento (MP escapamento) em relação aos anos 90, quando se iniciou o estabelecimento dos limites de material particulado para ônibus.

O Inventário de Emissões de Fontes Veiculares RMRJ (2015) estimou 373,22 t/ano de emissão de material particulado apenas pelos ônibus urbanos da região. O total estimado de emissões por fontes veiculares ficou em 888,7 t/ano. O que significa que quase 42,57% das emissões estimadas de MP escapamento na região é oriundo dos ônibus urbanos. A categoria caminhões correspondeu a 49,76%, das emissões estimadas, evidenciando os caminhões pesados com 29,97% das emissões. Os veículos do ciclo Diesel, no geral, apresentaram 94,58% de contribuição de emissão de MP escapamento (INEA,2015).

*Figura 4: Contribuição dos tipos de veículos na estimativa de emissão de MP escapamento na RMRJ em 2013*

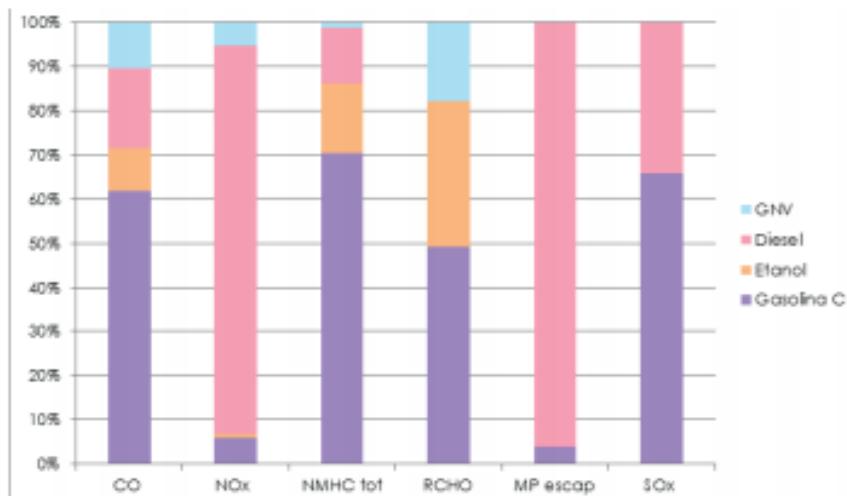


Fonte: INEA, 2015.

As regiões de conglomerado populacional são as que mais sofrem com a poluição atmosférica, pois é onde existem maiores números de veículos circulando. No caso da RMRJ, a capital é a que mais sofre com a degradação da qualidade do ar por concentrar centenas de milhares de

veículos que geram toneladas de poluentes por dia (CONEMA 70, 2016). A contribuição relativa de cada combustível na emissão de poluentes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro pode ser vista na figura 5 abaixo.

*Figura 5: Estimativa da contribuição relativa de cada combustível na emissão de poluentes na RMRJ em 2013*



Fonte: INEA, 2015

As emissões de material particulado são especialmente importantes no monitoramento ambiental dos corredores de ônibus urbanos. Em geral, esses poluentes não se espalham muito pela atmosfera e se concentram nas imediações da via causando degradação do ambiente em sua volta e impactando principalmente pessoas que moram no entorno. Como nesses corredores há uma grande concentração de veículos pesados emitindo fumaça preta, a situação se potencializa, impactando negativamente a qualidade de vida da população residente e com impactos também no mercado imobiliário, já que os imóveis localizados próximos a estradas e avenidas sofrem com grande desvalorização (INEA, 2015).

#### **4.2. A tecnologia atual**

No geral, existem algumas classes de ônibus urbanos, dentre eles os principais são: veículo leve (ônibus básico), veículo pesado (ônibus Padrão) e veículo especial (ônibus articulado). Segundo dados da Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro, o principal veículo circulante

na cidade é o ônibus básico, com uma frota média operante de 6722 veículos. As definições de cada classe são apresentadas no quadro 6, adaptada da norma ABNT NBR 15570:2009.

*Quadro 6: Classe dos veículos*

Classe de veículos	Capacidade	Peso bruto total mínimo (t)	Comprimento total máximo (m)
Ônibus Básico	Mínimo de 70 passageiros, sentados e em pé, incluindo área reservada para acomodação de cadeira de rodas ou cão-guia.	16	14,0
Ônibus Padrão	Mínimo de 80 passageiros, sentados e em pé, incluindo área reservada para acomodação de cadeira de rodas ou cão-guia.	16	14,0
Ônibus Articulado	Mínimo de 100 passageiros, sentados e em pé, incluindo área reservada para acomodação de cadeira de rodas ou cão-guia.	26	18,6

*Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15570:2009*

*Figura 6: Ônibus Básico da frota municipal carioca*



*Fonte: Rio Ônibus, 2019*

#### **4.2.1. Custo de aquisição**

Segundo o Diário de Transporte, em reportagem sobre a nova aquisição de 120 ônibus financiados pelo Programa Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano –

REFROTA em novembro de 2019, o valor de uma unidade do veículo à diesel modelo OF 1721 com chassi Mercedes-Benz e capacidade para transportar 46 pessoas sentadas e 23 em pé, saiu por **R\$376.200,00**.

#### **4.3. Veículo elétrico**

Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico, veículos elétricos são atualmente entendidos como veículos automotores que utilizam pelo menos um motor elétrico para acionamento das rodas. O veículo elétrico tem sido cotado como a melhor opção de transporte urbano considerando seu baixo custo de manutenção, alta performance, emissão zero (se for considerada nula a contribuição das usinas térmicas para geração da energia elétrica da rede), alta eficiência energética e baixo ou nulo nível de ruídos. Esta categoria de motores apresenta alto torque em baixas rotações, ou seja, já consegue fornecer força necessária para locomoção mesmo longe de sua rotação nominal, o que torna esses motores excelentes para serem utilizados para a propulsão em trens, metrôs e ônibus (GUENTHER & PADILHA, 2016).

Seu motor funciona com mais de 90% de eficiência, em outras palavras, toda essa porcentagem de energia é convertida em trabalho útil no eixo do motor, superando e muito os 30% de eficiência média dos motores a combustão. Seu motor não funciona a combustão, portanto não gera emissões de poluentes como resíduo e seu motor apresenta apenas uma parte móvel, o rotor, o que gera manutenções muito menos frequentes e, consequentemente, uma vida útil mais longa que os outros motores (GUENTHER & PADILHA, 2016).

De modo simplificado, podem-se classificar os veículos elétricos em duas categorias: híbridos e puros (BNDES, 2010):

Os veículos híbridos são assim chamados por combinarem um motor de combustão interna com um gerador, uma bateria e um ou mais motores elétricos. Sua função é reduzir o gasto de energia associado à ineficiência dos processos mecânicos se comparados aos sistemas eletrônicos (RASKIN E SHAH, 2006 apud BNDES, 2010).

Os veículos puramente elétricos não têm um motor a combustão. São integralmente movidos por energia elétrica, seja provida por baterias, por células de combustível, por placas fotovoltaicas (energia solar) ou ligados à rede elétrica, como os trólebus. Entre esses, a maioria dos lançamentos das grandes montadoras tem se concentrado em veículos movidos a bateria (BNDES, 2010).

Percebe-se uma clara distinção entre os veículos elétricos puros e os híbridos em relação a dois aspectos: a autonomia, que atualmente é maior nos híbridos justamente pela utilização acessória de um motor a combustão, e o peso do conjunto de baterias. Os demais parâmetros são similares para os modelos estudados (BNDES, 2010). Entretanto, os veículos híbridos perdem a característica de emissão e ruído zero e baixo custo de manutenção, pois continuam sendo movidos em parte por combustão.

Os veículos que utilizam a eletricidade não emitem poluentes por escapamento. A poluição do ar gerada por ônibus elétricos se limita à ressuspensão de MP por causa do contato do pneu com o solo e ao processo de geração e transmissão de energia elétrica, que é responsável por algumas emissões.

O ônibus elétrico puro foi escolhido para este estudo por ser a alternativa que vem se destacando no transporte sustentável de passageiros devido as características citadas. Atualmente existem dois fabricantes desse tipo de veículo no país.

Em São Bernardo do Campo a empresa Eletra foi pioneira, lançando um ônibus híbrido no Brasil em 1988. Posteriormente passou a fabricar tróle bus e novos híbridos com tecnologias atualizadas. Em 2013 a Empresa lançou o modelo movido 100% a baterias que é o E-Bus, um articulado com 18m, capacidade para 150 passageiros e autonomia de 200 km. Já em 2016 lançou um novo modelo, este com tamanho de 12,7 m (SOUZA, 2017 apud ELETRA, 2017).

A outra empresa fabricante de ônibus elétricos puros no Brasil é a *Build Your Dreams* (BYD), de origem chinesa que fundou sua fábrica em 2015 na cidade de Campinas, também em São Paulo. A empresa, que entre outros produtos fabrica as próprias baterias, é muito forte no mercado de ônibus elétrico. Presente em diversos países, tem como mercado chefe e referência em seu portfólio de veículos elétricos a cidade de Shenzhen na China. Em 2017, foram concluídas as primeiras unidades fabricadas no Brasil, com possibilidades de utilizar carrocerias de fabricantes nacionais, como a Marcopolo e a Caio (SOUZA, 2017 apud BYD, 2017).

Ambas as fabricantes têm veículos adequados para a operação no transporte urbano, tendo um bom rendimento quando operam no trânsito congestionado ou com grande número de semáforos. Estes veículos contam com frenagem regenerativa, que realiza um carregamento nas baterias sempre que o freio é acionado, essa tecnologia contribui para um maior rendimento da carga das baterias (SOUZA, 2017 apud BYD, et al., ELETRA, 2017). Testes realizados pela empresa NETZ em São Paulo atestam a autonomia de cerca de 300 km para carga média e 280 km para carga cheia (ANTP, 2016).

#### **4.4. A tecnologia proposta**

A tecnologia proposta para esse estudo será o *E-bus* 100% elétrico da empresa BYD modelo D9W. O veículo conta com um chassi BYD e carroceria nacional Caio. A capacidade total é de 80 passageiros, ou seja, aumentaria a capacidade de carga por veículo comparado à tecnologia atual.

*Figura 7: E-bus BYD D9W*



*Fonte: Diário do Transporte, 2018.*

Os veículos possuem ar condicionado, internet Wi-Fi, ligações USB. Com capacidade para transportar 29 pessoas sentadas e 51 em pé, incluindo espaço para cadeirante, os ônibus são movidos a bateria de ferro-lítio, com autonomia de 250 quilômetros. O ônibus conta com o sistema de frenagem regenerativa que recupera e armazena a energia despendida do freio na bateria através do inversor. Além disso, o veículo pode receber recargas rápidas de 15 minutos, podendo ser realizadas em paradas finais nos terminais da linha em que opera, estas recargas são suficientes para elevar de 30% a 60% a capacidade das baterias (BYD, 2019; Diário de Transporte, 2019).

Vale ressaltar que esta autonomia é mais do que suficiente para circular, pois, em um dia útil, a média diária da quilometragem percorrida pela frota carioca é de 233 km por veículo, conforme mostra a tabela a seguir:

*Tabela 1: Caracterização da frota municipal do Rio de Janeiro em 2018*

Mês	Nº Linhas	Frota *	Viagens/Veículo	PMM ***	Km diário/veículo	Consumo frota (l)**	L/km	Idade frota
jan./18	606	7854	172	6865	228.84	20,415,995	0.38	5.06
fev./18	606	7192	156	6412	213.75	20,996,671	0.39	4.85
mar./18	606	7011	181	7407	246.89	18,912,377	0.39	4.83
abr./18	606	6927	158	6482	216.06	19,877,449	0.41	4.85
mai./18	606	6732	168	6798	226.62	18,619,956	0.38	4.9
jun./18	606	6525	167	6744	224.80	16,416,220	0.41	4.81
jul./18	606	6326	193	7753	258.44	17,358,512	0.36	4.85
ago./18	606	6310	188	7583	252.76	17,468,884	0.37	4.81
set./18	606	6465	168	6757	225.23	17,810,268	0.38	4.96
out./18	606	6475	179	7257	241.89	16,709,901	0.39	4.94
nov./18	606	6461	168	6839	227.97	18,258,263	0.4	4.97
dez./18	606	6384	172	7024	234.13	17,570,995	0.41	5.02
<b>MÉDIA ANUAL</b>	<b>606</b>	<b>6722</b>	<b>172</b>	<b>6993.42</b>	<b>233.11</b>	<b>18,367,958</b>	<b>0.39</b>	<b>4.90</b>
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>2,071</b>	<b>83,921</b>	-	<b>220,415,491</b>	-	-

Fonte: Fetranspor (2019)

\* média da frota operante

\*\*L diesel consumido Diesel+Arla32

\*\*\*Percorso Médio Mensal - Expressa a média mensal percorrida por cada ônibus da frota

#### 4.4.1. Custo de aquisição

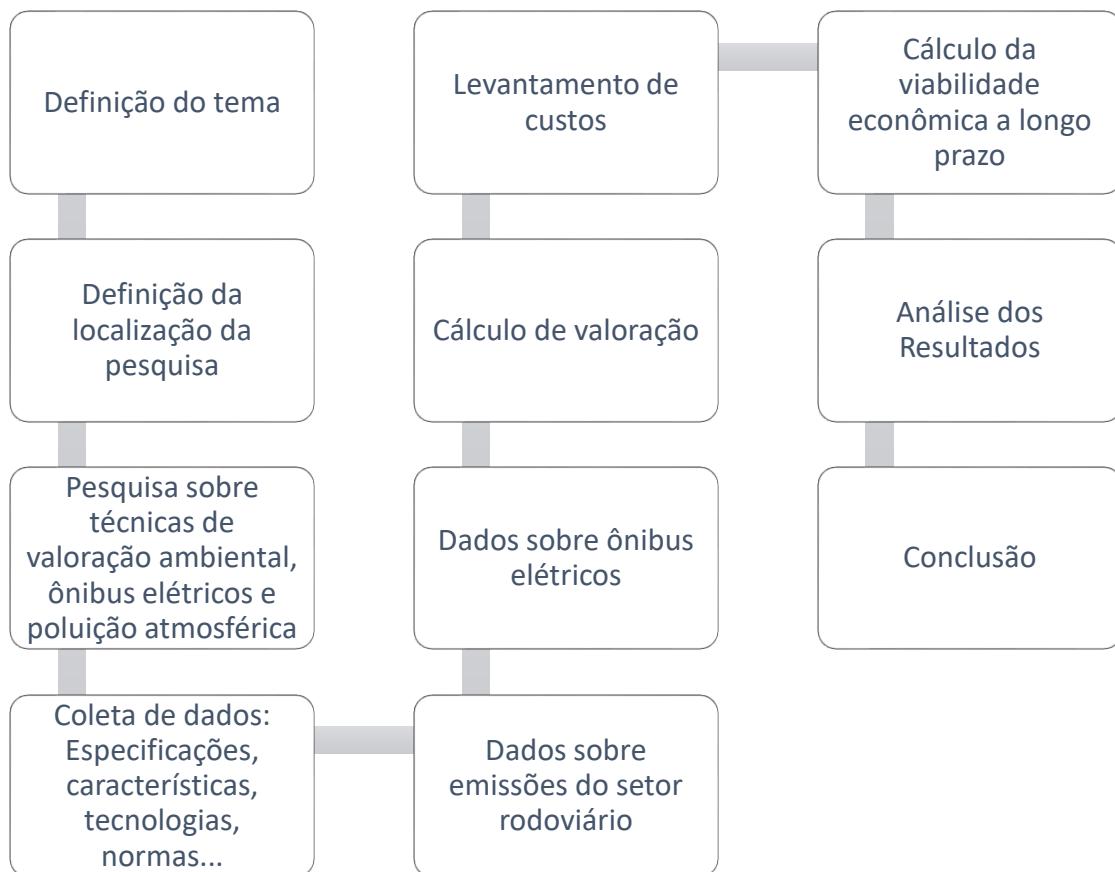
De acordo o Diário de Transportes, o preço de comercialização dos ônibus 100% elétricos da empresa BYD que foram adquiridos recentemente em escala pelo governo Chileno chegam a custar U\$ 330 mil, com o dólar comercial a R\$4,26, seria um investimento de aproximadamente **R\$ 1,4 milhões** por veículo, podendo variar dependendo da configuração que o ônibus tiver. Estes preços, porém, devem cair com o avanço tecnológico e desenvolvimento de novas baterias.

## 5. Metodología

A metodologia utilizada neste estudo é descrita através de um fluxograma, onde são apresentadas as etapas seguidas para a coleta de dados teóricos e medições operacionais.

O fluxograma da figura 8 apresenta as etapas do estudo teórico e da coleta de dados operacionais para a elaboração do estudo de valoração proposto.

*Figura 8: Fluxograma das atividades realizadas*



## **5.1. Definição do local da pesquisa**

O município do Rio de Janeiro tem população estimada de 6.688.927 habitantes em 2018, de acordo com dados do IBGE. Segundo o Plano Municipal Urbano Sustentável da Cidade do Rio de Janeiro (PMUS-RIO, 2015), os modos coletivos são responsáveis por 47,33% das viagens dos residentes do Rio de Janeiro, sendo que o ônibus é responsável por 37,10% das viagens e constitui o modo de transporte mais utilizado pelos cariocas.

O sistema de ônibus municipal da cidade do Rio de Janeiro é o principal modo de transporte da cidade por atender o maior volume de passageiros, estimado em 3,66 milhões/dia (quantidade

média no período de dezembro/2013 a novembro/2014). É operado com 43 empresas que estão agrupadas em 4 Consórcios (Internorte, Intersul, Transcarioca e Santa Cruz) cada qual responsável por uma região. De acordo com dados disponibilizados pela Fetranspor (2019) e expostos na tabela 1 da seção 4.3, os consórcios, juntos, são responsáveis por 606 linhas de ônibus e constituem uma frota operacional de 6722 veículos com idade média de 4,9 anos e rodam, em média, 46,935,617 km por ano ou, por veículo, 233,11 km por dia. As linhas possuem uma extensão média de 46,72 km nas duas direções (PMUS-RIO, 2015).

Além dos consórcios, o município conta com o sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) que começou a operar na cidade do Rio de Janeiro em 2012 para otimizar o transporte coletivo por ônibus. Destinam-se quatro pistas exclusivas para os ônibus BRT, dois em cada sentido, com um total de 150 quilômetros e 165 estações. São 22 linhas de serviço regular, 6 de serviço noturno funcionando e uma frota de 411 veículos em operação, de acordo com a Secretaria Municipal de Transportes (SMTR).

Considerando que a capital concentra maior fluxo de transporte de pessoas, pois reúne os principais hospitais, escolas, serviços e locais de trabalho e que, dados sobre transporte e caracterização da frota de ônibus estão mais disponíveis, o local de pesquisa definido foi o município do Rio de Janeiro.

## **5.2. Valoração das externalidades negativas**

A perda de qualidade de vida representada pelo aumento da morbidade depende, entre outras coisas, da concentração de poluentes na atmosfera. Nesta seção, será descrita a metodologia para estimar monetariamente os impactos da poluição atmosférica gerada pelos ônibus urbanos no município do Rio de Janeiro. Considerando que o principal e mais relevante poluente emitido pelos ônibus é o material particulado (MP10), esse foi o poluente escolhido para estimar os efeitos da poluição sobre a saúde humana.

Além do cálculo do custo anual com a concentração do poluente na atmosfera, será estimado alguns custos associados à substituição de toda a frota de ônibus do município por uma frota elétrica em um período de 10 anos. Para essa estimativa de viabilidade econômica à longo prazo será calculado o Valor Presente Líquido (VPL) com uma taxa de desconto de 8% segundo recomendação da EPE (2018). Os detalhes serão discutidos nas seções a seguir.

### **5.2.1. Concentração de MP10**

Para se estimar o dano social e econômico gerado devido a elevada concentração de MP10, é necessário estimar o quanto da concentração deste poluente é oriundo dos ônibus urbanos.

A concentração de MP10 na atmosfera é feita pela soma da concentração de MP10 emitido por escapamento e de MP10 emitido por ressuspensão. Entretanto, considerando que nesse estudo estamos comparando as emissões entre uma frota de ônibus elétrica e uma a diesel e que de acordo com o inventário do MMA (2013), o cálculo do fator de emissão de MP10 em ressuspensão não depende do combustível utilizado pelo veículo, então para os cálculos da concentração de MP10 deste estudo consideraremos apenas as concentrações causadas pelas emissões de escapamento, pois a emissão do MP10 por ressuspensão não será evitada.

Para o cálculo da concentração de MP10 na cidade do Rio de Janeiro foram utilizados os dados descritos na seção 3.4.3., que foram baseados no Inventário de Emissões de Fontes Veiculares da RMRJ, publicado pelo INEA em 2016, onde estão disponíveis cálculos de emissões feitos pela metodologia *bottom up*, que foca no conhecimento das emissões de forma pontual (a partir do somatório das fontes em um local) e pela metodologia *top down* que foca no conhecimento das emissões da região de forma geral (com estimativas para toda a cidade). Para esse estudo foram considerados os dados do método *top down*, pois é mais alinhado com o objetivo do trabalho.

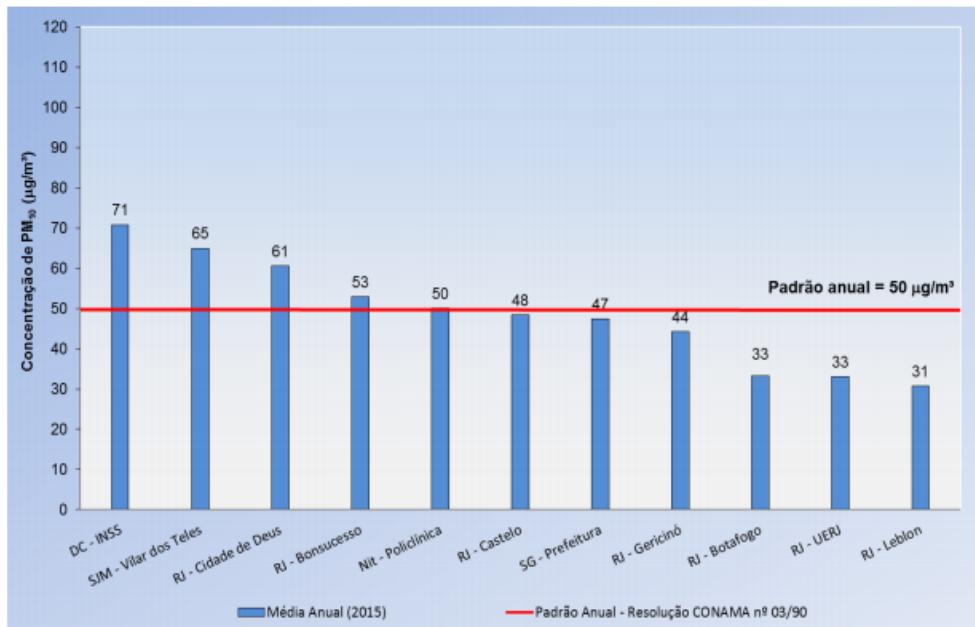
Segundo os cálculos do inventário citado acima, pelo método *top down* os ônibus urbanos são responsáveis pela emissão de 42,57% das emissões de MP10 de escapamento, o que corresponde a emissão de 373,22 t/ano do poluente na RMRJ. Como uma aproximação, consideramos que os dados da RMRJ se aplicam para a cidade do Rio de Janeiro na mesma proporção.

Nas figuras 9 e 10 abaixo com dados do Relatório de Qualidade do Ar na RMRJ publicado pelo INEA em 2016, pode-se observar as concentrações médias anuais de MP10 nas estações automáticas e semiautomáticas distribuídas na RMRJ. Para obter uma estimativa da concentração média de MP10 na cidade do Rio de Janeiro, é feita uma média aritmética de todas as estações localizadas dentro da cidade de acordo com a Equação 1 abaixo levando em consideração as concentrações das estações que são localizadas dentro do município (as iniciam com “RJ-”):

*Equação 1*

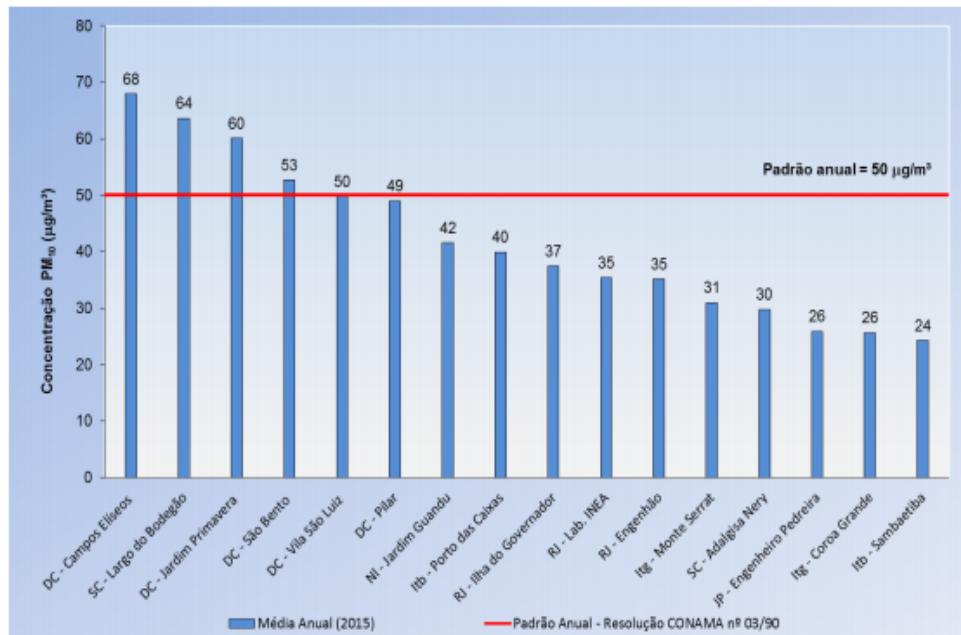
$$[MP10] = \frac{\sum [MP10 \text{ nas estações dentro da cidade do RJ}]}{N^{\circ} \text{ estações dentro da cidade do RJ}}$$

*Figura 9: Concentrações médias anuais de MP10 nas estações semiautomáticas da RMRJ para o ano de 2015*



Fonte: INEA, 2016

*Figura 10: Concentrações médias anuais de MP10 nas estações automáticas da RMRJ para o ano de 2015*



Fonte: INEA, 2016

Para encontrar a concentração de MP10 que é responsável pelos ônibus urbanos será utilizada uma relação entre emissões e concentração. A relação entre concentração e emissão é complexa e em si mesma exige um trabalho de pesquisa. Como uma simplificação tal como Knight et Young (2006), neste trabalho será assumida uma correlação linear e proporcional entre

as variáveis emissão e concentração. Ou seja, a concentração de MP<sub>10</sub> vai reduzir na mesma proporção que a emissão do poluente.

### **5.2.2. Morbidade evitada**

Para estimar qual seria o impacto na morbidade caso a poluição do ar pelo MP<sub>10</sub> fosse reduzida usamos a metodologia desenvolvida pelo Banco Mundial por Lvovsky (2000), sintetizada pela Equação 2 abaixo:

*Equação 2*

$$\Delta S = b * \Delta C * P$$

Em que  $\Delta S$  é o impacto na saúde,  $b$  é a função dose-resposta,  $\Delta C$  é a variação na concentração do poluente MP<sub>10</sub> e  $P$  é a população exposta a tal concentração.

#### **Internações por problemas do Aparelho Respiratório**

Conforme LVOVSKY (2000), o parâmetro  $b$  é igual a 0,000012, significando o quanto das internações hospitalares é devido a concentração de MP<sub>10</sub>. Essa relação exprime que para cada 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de concentração, ocorrem 0,000012 internações por problema respiratório.

#### **Dias de trabalho perdidos**

Dias de trabalho perdidos são aqueles em que as pessoas não puderam comparecer aos seus postos de trabalho por problemas relacionados à poluição excessiva. Os problemas variam desde indisposições até internações por problemas cardiovasculares ou do aparelho respiratório. Ao irem aos consultórios médicos ou ao serem internadas, as pessoas sacrificam dias de trabalho que poderiam gerar rendimentos. Isso representa um custo à sociedade, que deixa de gerar uma produção por problemas de saúde associados à poluição do ar. A metodologia desenvolvida pelo Banco Mundial, por LVOVSKY (2000), permite estimar quanto que esses dias perdidos são decorrentes da concentração elevada de MP<sub>10</sub>. Para tanto é aplicada a mesma fórmula da seção anterior, mas com o parâmetro  $b$  igual a 0,0575.

Multiplicando o número de dias perdidos pelo custo médio de um dia de trabalho perdido podemos encontrar o impacto no custo dos dias perdidos. Para calcular o custo médio de um dia de trabalho perdido foi considerado o dado do PIB per capita da cidade do Rio de Janeiro. De acordo com o IBGE, em 2017 o PIB per capita do município ficou em R\$51.776,18, o que equivale a uma produção de R\$4314,68 por mês per capita. Dividindo esse valor por 30, chega-se a rendimento médio diário de R\$143,82.

### **5.3. Custos da substituição dos ônibus urbanos no município do rio de janeiro**

Os custos das tecnologias de ônibus a diesel ou elétrica à bateria são estabelecidos por custos fixos de aquisição e de infraestrutura de recarga; e variáveis de manutenção e de uso de combustível.

Como apresentado na seção 4.3.1, o preço de cada veículo seria aproximadamente **R\$1,400,000,00**. Esse valor é aproximadamente quatro vezes maior que o preço de um ônibus urbano básico com motor a diesel, de acordo com os valores apresentados na seção 4.1.1.

Para calcular o custo da substituição da frota, consideramos a frota de 6722 veículos, de acordo com o exposto na seção 4.3 e os preços comentados acima.

#### **5.3.1. Custo por quilômetro rodado**

Com o foco em se realizar um estudo correto e bem definido, calculamos os custos por quilômetro rodado de ambas as tecnologias.

Para isso, foi considerado a média de consumo de 0,39 l/km da frota do município do Rio de Janeiro conforme disponibilizado pela Fetranspor (2019) e o custo de 3,894 R\$/l de diesel, conforme informado pela ANP (2019). Já para o cálculo do custo por km do veículo elétrico consideramos o consumo de 1.12 kwh/km conforme calculado por GUENTHER & PADILHA (2016) e o custo de R\$ 0,89 por kwh de eletricidade cobrado pela empresa Light no município considerando a potência do carregador de 50 kW e 4 horas de duração da recarga, conforme recomendado pelo simulador de avaliação de viabilidade de ônibus elétricos urbanos municipais da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019).

A média de quilômetros percorridos anualmente por toda a frota de ônibus é de 564.102.975, segundo Fetranspor (2019).

#### **5.3.2. Custos com infraestrutura**

Para que ocorra a disseminação dos veículos híbridos plug-in e elétricos é necessário que exista uma infraestrutura de recarga elétrica adequada. Tais 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 (EPE, 2018)

Neste estudo, para manter uma linha conservadora, utilizaremos o valor de US\$ 2.000 por veículo para estimar o custo com a infraestrutura para a penetração dos veículos. Utilizando a uma cotação de R\$ 4,26, o custo fica em torno de R\$ 8.520 por veículo substituído.

### **5.3.3. Custos com manutenção**

Segundo GUENTHER & PADILHA (2016), ônibus a combustão devem realizar trocas de óleo/filtros periodicamente, além da substituição de alguns componentes como bombas de combustível, velas, entre outros. Para os veículos elétricos, as únicas recomendações de manutenção durante seus 20 anos de vida útil são a lubrificação dos mancais a cada 3.500 horas de operação e troca dos mesmos a cada 20.000 horas de uso. Isso significa que a manutenção do veículo elétrico apresenta um valor bem mais baixo se comparado a outro à combustão.

Para essa estimativa, foram utilizados dados recomendados pelo simulador de avaliação de viabilidade de ônibus elétricos urbanos municipais da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019). Segundo EPE (2019), o custo por quilômetro da manutenção de um ônibus a diesel é de R\$ 0,77 e de um ônibus elétrico, de R\$ 0,58.

## **5.4. Viabilidade econômica a longo prazo**

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada para estimar preliminarmente a viabilidade econômica de se realizar a substituição dos veículos à combustão.

Como exigência da prefeitura, as concessionárias do Rio de Janeiro devem manter uma vida média da sua frota de 5 anos, porém, como ainda não há legislação para os veículos elétricos, utilizaremos um ciclo de vida de 10 anos, sendo esta a vida útil das baterias de íon-lítio de acordo com relatório do BNDES (2010) e também baseando-se no fato de que os veículos elétricos possuem um ciclo de vida maior que os veículos a diesel e nunca ultrapassarão limites de emissão de poluentes, por mais rigorosa que sejam as normas do PROCONVE.

GUENTHER & PADILHA (2016) exemplificaram a alta durabilidade dos veículos elétricos com a prefeitura de São Paulo que já chegou a considerar uma vida útil mínima de 25 anos para ônibus movidos à eletricidade. Segundo eles, é evidente que após muitos anos de operação os veículos perdem boa parte de sua eficiência e acabam não sendo mais economicamente tão vantajosos em relação ao diesel, porém podemos entender que é perfeitamente viável considerar uma vida útil de 10 anos nesse caso.

Fizemos uma análise considerando dois cenários: O custo total da substituição da frota nos 5 primeiros anos, considerando uma taxa de substituição de 20% da frota ao ano. E o custo total dessa substituição nos 5 anos seguintes.

Por meio da circular 01/2015, o BNDES anunciou regras para financiamento de ônibus híbridos e elétricos, oferecendo taxas de financiamento, prazos e carência mais vantajosos se comparados aos veículos a combustão, conforme o quadro 7 a seguir:

*Quadro 7: Condições de financiamento do BNDES para veículos elétricos e a combustão*

	Ônibus Diesel	Ônibus Elétrico
Taxa de juros ao ano	10%	7%
Prazo de pagamento	72 meses	120 meses
Carência	6 meses	48 meses

Fonte: BNDES (2015)

Utilizaremos em nossos cálculos as condições de financiamento segundo os dados acima. Após o cálculo da prestação mensal através da função PGTO no *Excel* e do somatório total após todo o período de pagamento, o valor presente de cada veículo será calculado considerando a taxa de desconto de 8% ano (EPE, 2018)

A Função PGTO (pagamento) é usada para calcularmos o valor de um pagamento parcelado, retornando o valor da parcela a ser paga

Estrutura da função PGTO:

$$= PGTO(TAXA; NPER; VP; VF)$$

Onde:

TAXA: Taxa cobrada por um período para o pagamento parcelado de uma dívida ou de um investimento.

NPER – Número de parcelas: Quantidade de parcelas para pagar um valor financiado ou para atingir a um valor acumulado no futuro.

VP – Valor presente: Valor em dinheiro envolvido no presente. Pode ser o valor total da dívida ou o valor de entrada em um investimento.

VF – Valor Futuro: Valor a ser atingido no final de todos os pagamentos.

Neste caso, o valor futuro não é aplicável e, portanto, não foi preenchido.

Para o cálculo da estimativa de custos com a fonte energética a longo prazo, foi utilizado o custo anual com cada veículo, segundo dados da seção 5.3.1, e aplicado uma taxa de ajuste anual de 8,23% no preço de diesel e de 7,85% no preço da eletricidade, segundo SOUZA (2017). O custo durante os cinco anos somado aos ajustes anuais resulta no custo total com combustível e eletricidade.

O custo da poluição foi ajustado anualmente considerando a taxa de desconto de 8% ano da EPE (2018), assim como o custo com manutenção, que foi calculado considerando a substituição de 20% da frota ao ano. Já o custo com infraestrutura foi mantido constante (sem taxa de desconto) e também foi calculado considerando a quantidade de veículos inseridos na frota ao ano.

Portanto, para comparar o custo total do investimento nos dois cenários, vamos somar os custos de aquisição, custos com combustível e energia elétrica, custos evitados com poluição (internações hospitalares e dias de trabalho perdidos), custos com manutenção e custos com infraestrutura. Para o cálculo do Valor Presente ao longo de todo o período considerado foi utilizada a taxa de 8% da EPE (2018). Os resultados são expostos na seção 6.3.

## 6. Resultados

### 6.1. Concentração de MP10

Segundo a Equação 1 e os dados apresentados na seção 5.2.1, temos que:

$$[MP10] = \frac{61 + 53 + 48 + 44 + 33 + 33 + 31 + 37 + 35 + 35}{10} = \frac{41\mu g}{m^3}$$

Assim, se a concentração do poluente na cidade do Rio de Janeiro é de aproximadamente  $41\mu g/m^3$  e, se os ônibus urbanos emitem 42,57% das emissões totais de MP10 da região, considerando uma relação linear e proporcional entre as variáveis emissão e concentração, então estes são responsáveis por uma concentração de  $17,45\mu g/m^3$ . Logo, a eletrificação da frota reduziria a concentração de MP10 na atmosfera em  $17,45\mu g/m^3$ .

### 6.2. Custo da Poluição: Morbidade evitada

Utilizando a Equação 2, podemos calcular a quantidade de internações por problemas do aparelho respiratório causadas pelas emissões dos ônibus urbanos.

- Equação 2:

$$\Delta S = b * \Delta C * P$$

Em que  $\Delta S$  é o impacto na saúde,  $b$  é a função dose-resposta,  $\Delta C$  é a variação na concentração do poluente MP10 e  $P$  é a população exposta a tal concentração.

Utilizando o parâmetro  $b$  é igual a 0,000012 significando o quanto das internações hospitalares é devido a concentração de MP10. A variação na concentração já foi calculada anteriormente e é igual a  $17,45\mu g/m^3$ . Por fim, a população exposta é a da cidade do Rio de Janeiro equivalente a, aproximadamente, 6.688.927 (IBGE, 2019).

Segundo essa metodologia, é possível chegar ao resultado de **1401 internações ( $\Delta S$ )**. Multiplicando esse número de internações pelo custo médio de cada internação de R\$ 1222,12 (DATASUS, 2019), chega-se ao custo médio de **R\$1.711.776,20**.

Tabela 2: Impacto nas Internações Hospitalares na cidade do Rio de Janeiro

Redução na Concentração		
17,45		
Redução nas Internações	Custo por internação	Custo ao ano
1401	R\$ 1222,12	R\$ 1.711.776,20

Fonte: Elaboração própria a partir de DATASUS (2019) e Seroa da Motta et al (2000)

Para estimar quantos dias de trabalho perdidos são decorrentes da concentração elevada de MP10 utilizamos a mesma Equação 2, mas com o parâmetro b igual a 0,0575.

Seguindo a metodologia de LVOVSKY (2000) descrita na seção 5.2.3, é possível chegar ao resultado de **6.711.502 dias de trabalho perdido ( $\Delta S$ )**.

Na tabela abaixo segue o custo estimado de dias perdidos dada uma concentração de  $17,45\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para calcular o custo associado à redução nos dias perdidos, basta multiplicar 6.711.502 dias vezes o custo de R\$143,82 de um dia de trabalho perdido, chegando a um montante de **R\$965,248,236,12** ao ano.

*Tabela 3: Impacto no custo dos dias perdidos no município do Rio de Janeiro*

Concentração		
17,45		
Dias perdidos	Custo por dia perdido	Custo ao ano
6.711.502	R\$143,82	R\$ 965.248.236,14

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE (2017) e Seroa da Motta *et al* (2000)

Portanto, levando em consideração apenas esses dois impactos na morbidade: Internações por doenças do aparelho respiratório e dias de atividade perdidos, estima-se um custo da ordem de **R\$ 1 bilhão** ao ano com as morbididades.

### 6.3. Viabilidade econômica a longo prazo

- Custo de aquisição

Para o cálculo do custo total de aquisição dos veículos consideramos os valores da tabela abaixo:

*Tabela 4: Custo de aquisição dos ônibus*

Veículo	Básico Diesel	E-Bus BYD
Custo de aquisição	R\$376, 200,00	R\$1,400, 000,00

Fonte: Elaboração própria com os dados coletados

Através da função PGTO do Excel, calculamos o custo total de aquisição de cada veículo com as condições de financiamento oferecidas pelo BNDES, conforme seção 5.4. Consideramos também que, no caso da renovação da frota, os veículos antigos seriam vendidos, deduzindo, assim, do valor da entrada do financiamento e, consequentemente, do custo de aquisição. Para isso, consideramos que o valor da venda dos veículos antigos seria 30% do valor de um veículo

novo a diesel, segundo a tabela 4. O custo final de cada veículo financiado, considerando as taxas de financiamento e o abatimento da venda dos veículos usados, pode ser observado na tabela 5 abaixo.

*Tabela 5: Custo final a valor presente de aquisição de cada veículo financiado*

<b>Veículo</b>	Básico Diesel	E-Bus BYD
<b>Custo de aquisição</b>	R\$266,682.28	R\$783,308.70

*Fonte: Elaboração própria*

O custo de aquisição dos ônibus a cada ano pode ser observado na tabela 6 abaixo:

*Tabela 6: Custo total a valor presente de aquisição dos ônibus*

Ano	Nº veículos elétricos	Custo de aquisição veículos elétricos	Nº veículos a diesel	Custo de aquisição veículos a diesel
2021	1344.4	R\$ 1,053,080,214.22	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2022	1344.4	R\$ 1,053,080,214.22	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2023	1344.4	R\$ 1,053,080,214.22	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2024	1344.4	R\$ 1,053,080,214.22	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2025	1344.4	R\$ 1,053,080,214.22	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2026	0	R\$ 0.00	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2027	0	R\$ 0.00	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2028	0	R\$ 0.00	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2029	0	R\$ 0.00	1344.4	R\$ 358,527,660.45
2030	0	R\$ 0.00	1344.4	R\$ 358,527,660.45
<b>Total anos 1 a 6</b>	<b>6722</b>	<b>R\$ 5,265,401,071.10</b>	<b>6722</b>	<b>R\$ 1,792,638,302.24</b>
<b>Total anos 6 a 10</b>	<b>0</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>6722</b>	<b>R\$ 1,792,638,302.24</b>
<b>Total 10 anos</b>	<b>6722</b>	<b>R\$ 5,265,401,071.10</b>	<b>13444</b>	<b>R\$ 3,585,276,604.49</b>

*Fonte: Elaboração própria*

- Custos com energia

Considerando os dados da seção 5.3.1, os custos com combustível e eletricidade podem ser vistos na tabela abaixo:

*Tabela 7: Custo por quilômetro rodado das diferentes tecnologias*

Veículo à combustão			Veículo elétrico		
Média (l/km)	Custo do diesel (R\$/l)	Custo/km (R\$)	Média (kwh/km)	Custo de eletricidade R\$/kwh	Custo/km (R\$)
0.39	3.894	1.51866	1.12	0.89000	0.9968

*Fonte: Elaboração própria baseado em Guenther & Padilha (2016)*

Considerando os dados da seção 5.3.1 e da tabela acima, chegamos a uma comparação entre o custo anual de cada tecnologia considerando as características da frota operante no município em questão:

Tabela 8: Custo anual por veículo com energia

Tecnologia	Custo por km	Km/ano	Custo por ano
Veículo à combustão	R\$1.52	83,921	R\$127,447.47
Veículo elétrico	R\$1.00		R\$83,652.45
Diferença	R\$0.52	-	R\$43,795.01

Considerando os dados da tabela 8 acima e os dados de ajuste anual nos preços, apresentados na seção 5.4, trazidos a valor real (desconsiderando a inflação), podemos calcular o custo total com combustível e energia elétrica para cada um desses modelos de ônibus ao longo do período analisado. Os resultados são mostrados na tabela abaixo:

Tabela 9: Custo do combustível e da energia elétrica para a circulação da frota em 5 anos

Ano	Aumento real do preço da eletricidade ao ano	Eletricidade	Aumento real do preço do diesel ao ano	Diesel
2021	1.9%	R\$ 114,587,295.81	2.2%	R\$ 175,144,339.82
2022	1.9%	R\$ 116,752,384.06	2.2%	R\$ 179,032,759.27
2023	1.9%	R\$ 118,958,380.92	2.2%	R\$ 183,007,506.40
2024	1.9%	R\$ 121,206,059.36	2.2%	R\$ 187,070,497.80
2025	1.9%	R\$ 123,496,206.91	2.2%	R\$ 191,223,692.61
2026	1.9%	R\$ 629,148,130.15	2.2%	R\$ 977,345,467.17
2027	1.9%	R\$ 641,035,671.58	2.2%	R\$ 999,043,736.87
2028	1.9%	R\$ 653,147,824.09	2.2%	R\$ 1,021,223,734.81
2029	1.9%	R\$ 665,488,831.63	2.2%	R\$ 1,043,896,155.94
2030	1.9%	R\$ 678,063,018.34	2.2%	R\$ 1,067,071,932.67
<b>Total anos 1 a 6</b>	-	<b>R\$ 595,000,327.06</b>	-	<b>R\$ 915,478,795.89</b>
<b>Total anos 6 a 10</b>	-	<b>R\$ 3,266,883,475.79</b>	-	<b>R\$ 5,108,581,027.46</b>
<b>Total 10 anos</b>	-	<b>R\$ 3,861,883,802.84</b>	-	<b>R\$ 6,024,059,823.35</b>

Fonte: Elaboração própria

- Custo da poluição (morbidade evitada)

O custo a valor presente da poluição a longo prazo pode ser visto na tabela abaixo:

*Tabela 10: Custo total a valor presente com a poluição atmosférica*

Ano	Internações		Dias de trabalho perdidos	
	Elétrico	Diesel	Elétrico	Diesel
2021	R\$ 0.00	R\$ 1,584,977.97	R\$ 0.00	R\$ 893,748,366.80
2022	R\$ 0.00	R\$ 1,467,572.19	R\$ 0.00	R\$ 827,544,784.07
2023	R\$ 0.00	R\$ 1,358,863.14	R\$ 0.00	R\$ 766,245,170.43
2024	R\$ 0.00	R\$ 1,258,206.61	R\$ 0.00	R\$ 709,486,268.92
2025	R\$ 0.00	R\$ 1,165,006.12	R\$ 0.00	R\$ 656,931,730.48
2026	R\$ 0.00	R\$ 1,078,709.37	R\$ 0.00	R\$ 608,270,120.82
2027	R\$ 0.00	R\$ 998,804.97	R\$ 0.00	R\$ 563,213,074.83
2028	R\$ 0.00	R\$ 924,819.42	R\$ 0.00	R\$ 521,493,587.81
2029	R\$ 0.00	R\$ 856,314.28	R\$ 0.00	R\$ 482,864,433.15
2030	R\$ 0.00	R\$ 792,883.59	R\$ 0.00	R\$ 447,096,697.36
<b>Total anos 1 a 6</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 6,834,626.03</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 3,853,956,320.70</b>
<b>Total anos 6 a 10</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 4,651,531.64</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 2,622,937,913.97</b>
<b>Total 10 anos</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 11,486,157.67</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 6,476,894,234.68</b>

Fonte: Elaboração própria

- Custo com infraestrutura

A estimativa do custo com a infraestrutura necessária para a penetração de ônibus elétricos considerando os dados apresentados na seção 5.3.2 pode ser vista na tabela a seguir:

*Tabela 11: Custo total com infraestrutura*

Ano	Elétrico	Diesel
2021	R\$ 11,454,288.00	R\$ 0.00
2022	R\$ 11,454,288.00	R\$ 0.00
2023	R\$ 11,454,288.00	R\$ 0.00
2024	R\$ 11,454,288.00	R\$ 0.00
2025	R\$ 11,454,288.00	R\$ 0.00
2026	R\$ 0.00	R\$ 0.00
2027	R\$ 0.00	R\$ 0.00
2028	R\$ 0.00	R\$ 0.00
2029	R\$ 0.00	R\$ 0.00
2030	R\$ 0.00	R\$ 0.00
<b>Total anos 1 a 6</b>	<b>R\$ 57,271,440.00</b>	<b>R\$ 0.00</b>
<b>Total anos 6 a 10</b>	<b>R\$ 0.00</b>	<b>R\$ 0.00</b>
<b>Total 10 anos</b>	<b>R\$ 57,271,440.00</b>	<b>R\$ 0.00</b>

Fonte: Elaboração própria

- Custo com manutenção

O resumo dos dados apresentados na seção 5.3.3 pode ser visto na tabela abaixo:

*Tabela 12: Custos com manutenção*

custo/km		km/ano.veículo	custo por ano
diesel	0.77	83921	R\$ 64,619.17
eletrico	0.58		R\$ 48,674.18

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE (2019) e Fetranspor (2019)

A estimativa do custo com a manutenção dos veículos pode ser vista na tabela a seguir:

*Tabela 13: Custo total a valor presente com manutenção*

Ano	Elétrico	Diesel
2021	R\$ 60,590,340.36	R\$ 80,438,900.14
2022	R\$ 56,102,167.00	R\$ 74,480,463.09
2023	R\$ 51,946,450.93	R\$ 68,963,391.75
2024	R\$ 48,098,565.67	R\$ 63,854,992.36
2025	R\$ 44,535,708.96	R\$ 59,124,992.93
2026	R\$ 206,183,837.77	R\$ 273,726,819.11
2027	R\$ 190,910,960.90	R\$ 253,450,758.43
2028	R\$ 176,769,408.24	R\$ 234,676,628.18
2029	R\$ 163,675,378.00	R\$ 217,293,174.24
2030	R\$ 151,551,275.92	R\$ 201,197,383.55
<b>Total anos 1 a 6</b>	<b>R\$ 261,273,232.93</b>	<b>R\$ 346,862,740.26</b>
<b>Total anos 6 a 10</b>	<b>R\$ 889,090,860.82</b>	<b>R\$ 1,180,344,763.51</b>
<b>Total 10 anos</b>	<b>R\$ 1,150,364,093.75</b>	<b>R\$ 1,527,207,503.77</b>

Fonte: Elaboração própria

- Custo total

A tabela abaixo mostra o custo presente líquido total estimado para eletrificação da frota ao longo do período considerado, comparando com a substituição da frota circulante pela mesma tecnologia (diesel).

*Tabela 14: Custo total a valor presente*

Ano	Elétrico	Diesel
2021	R\$ 1,239,712,138.39	R\$ 1,509,444,245.17
2022	R\$ 1,237,389,053.28	R\$ 1,441,053,239.07
2023	R\$ 1,235,439,334.07	R\$ 1,378,102,592.17
2024	R\$ 1,233,839,127.25	R\$ 1,320,197,626.15
2025	R\$ 1,232,566,418.09	R\$ 1,266,973,082.59
2026	R\$ 835,331,967.92	R\$ 2,218,948,776.91
2027	R\$ 831,946,632.48	R\$ 2,175,234,035.56
2028	R\$ 829,917,232.33	R\$ 2,136,846,430.66
2029	R\$ 829,164,209.63	R\$ 2,103,437,738.06
2030	R\$ 829,614,294.26	R\$ 2,074,686,557.63
<b>Total anos 1 a 6</b>	<b>R\$ 6,178,946,071.09</b>	<b>R\$ 6,915,770,785.14</b>
<b>Total anos 6 a 10</b>	<b>R\$ 4,155,974,336.61</b>	<b>R\$ 10,709,153,538.82</b>
<b>Total 10 anos</b>	<b>R\$ 10,334,920,407.70</b>	<b>R\$ 17,624,924,323.96</b>

*Fonte: Elaboração própria*

*Tabela 15: Custo total a valor presente da substituição da frota nos 5 primeiros anos*

Custos	Ônibus a diesel	Ônibus elétrico
Custo (combustível e energia elétrica)	R\$ 915,478,795.89	R\$ 595,000,327.06
Custo de aquisição	R\$ 1,792,638,302.24	R\$ 5,265,401,071.10
Custo com internações hospitalares	R\$ 6,834,626.03	Zero
Custo de dias de trabalho perdidos	R\$ 3,853,956,320.70	Zero
Custo com infraestrutura	R\$ 0.00	R\$ 57,271,440.00
Custo com manutenção	R\$ 346,862,740.26	R\$ 261,273,232.93
<b>Custo total</b>	<b>R\$ 6,915,770,785.14</b>	<b>R\$ 6,178,946,071.09</b>

*Fonte: Elaboração própria*

A tabela abaixo mostra o custo total a valor presente estimado para a substituição da frota de ônibus nos 5 anos seguintes comparando as duas tecnologias.

*Tabela 16: Custo total a valor presente de substituição da frota nos 5 anos seguintes*

Custos	Ônibus a diesel	Ônibus elétrico
Custo (combustível e energia elétrica)	R\$ 5,108,581,027.46	R\$ 3,266,883,475.79
Custo de aquisição	R\$ 1,792,638,302.24	Zero
Custo com internações hospitalares	R\$ 4,651,531.64	Zero
Custo de dias de trabalho perdidos	R\$ 2,622,937,913.97	Zero
Custo com infraestrutura	Zero	Zero
Custo com manutenção	R\$ 1,180,344,763.51	R\$ 889,090,860.82
<b>Custo total</b>	<b>R\$ 10,709,153,538.82</b>	<b>R\$ 4,155,974,336.61</b>

*Fonte: Elaboração própria*

A tabela abaixo mostra o custo total a valor presente da substituição de toda a frota de ônibus do município do Rio de Janeiro ao longo de 10 anos comparando as duas tecnologias:

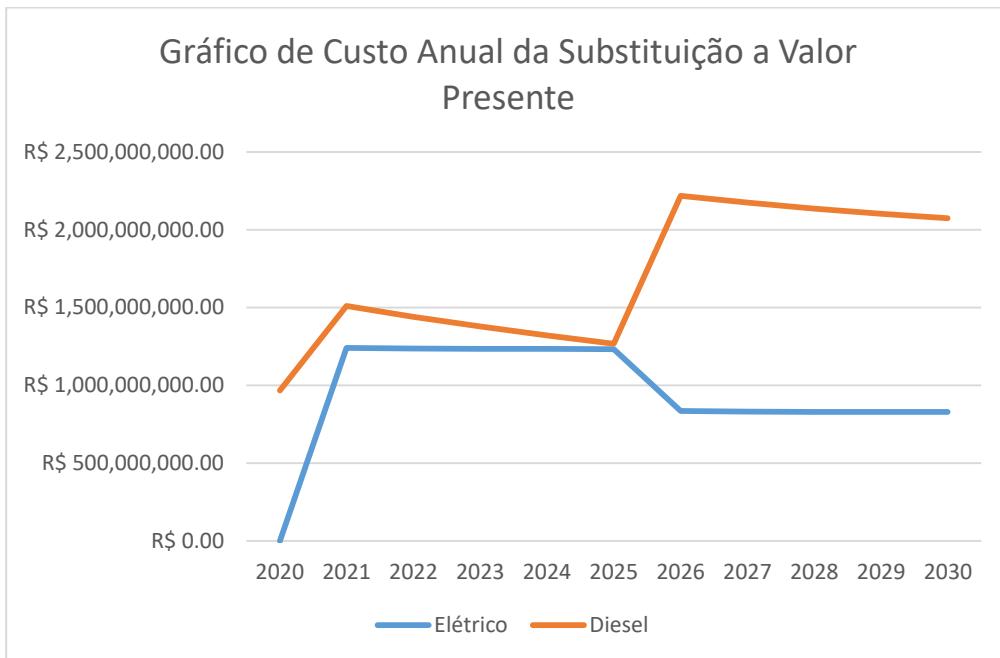
*Tabela 17: Custo total a valor presente da substituição da frota da cidade do RJ no período de 10 anos*

Custos	Ônibus a diesel	Ônibus elétrico
Custo total (Ano 1 a 5)	R\$ 6,915,770,785.14	R\$ 6,178,946,071.09
Custo total (Ano 6 a 10)	R\$ 10,709,153,538.82	R\$ 4,155,974,336.61
<b>Custo final</b>	<b>R\$ 17,624,924,323.96</b>	<b>R\$ 10,334,920,407.70</b>

*Fonte: Elaboração própria*

A figura abaixo mostra a evolução anual do custo total a valor presente da substituição da frota comparando as duas tecnologias. Foi considerada uma taxa fixa de substituição de 20% da frota ao ano.

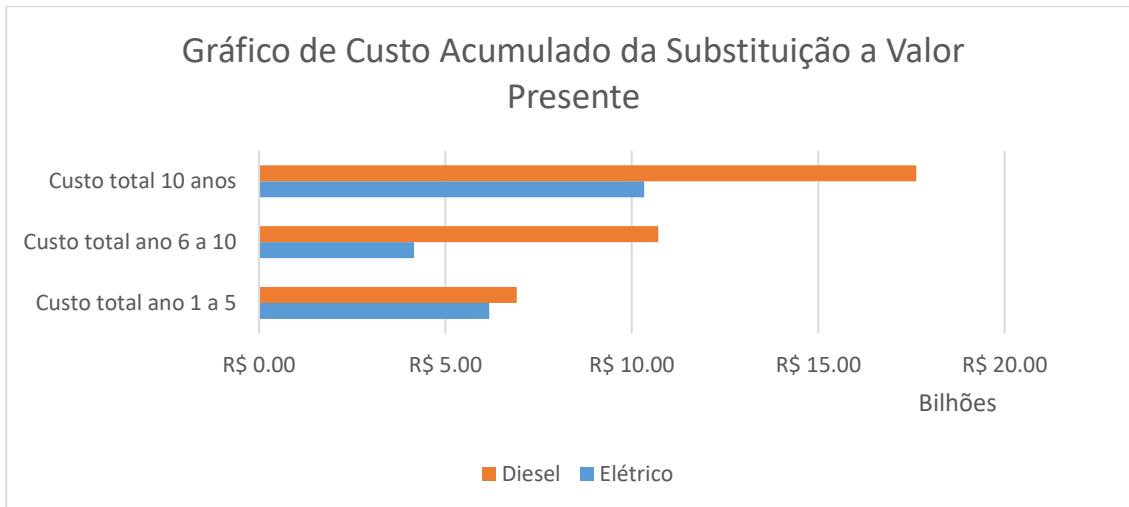
*Figura 11: Gráfico de Custo Acumulado da Substituição a Valor Presente*



*Fonte: Elaboração Própria*

A figura abaixo mostra a comparação entre os custos finais a valor presente da substituição da frota comparando as duas tecnologias ao longo do período avaliado:

*Figura 12: Gráfico de Custo Acumulado da Substituição a Valor Presente*



*Fonte: Elaboração própria*

#### **6.4. Discussão**

Segundo os cálculos apresentados, a eletrificação da frota reduziria a concentração de MP10 na atmosfera em  $17,45\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Essa alteração na qualidade do ar do município do Rio de Janeiro leva a uma redução de custo de R\$4 milhões ao ano com internações por problemas respiratórios e de R\$2,5 bilhões ao ano com dias de trabalho perdidos. Existem outras formas de morbidade que poderiam ser aplicadas neste trabalho. No entanto, optou-se por utilizar apenas essas duas por serem as mais expressivas e pela razoável disponibilidade de dados estatísticos referentes a elas.

Somando esses custos do impacto da poluição atmosférica na morbidade, chega-se a um custo estimado na ordem de R\$2,5 bilhões ao ano. Nota-se que o custo com o número de dias de trabalho perdidos é bem maior que o custo com internações, pois muitas pessoas deixam de comparecer aos postos de trabalho por problemas respiratórios, mas não necessariamente são internadas por isso.

Os custos de operação com a fonte energética e com manutenção também são maiores na frota com tecnologia poluidora. Para cada veículo substituído, a estimativa revelou uma economia de R\$43,795.01 ao ano com a fonte energética e de R\$ 15,944.99 ao ano com manutenção. Vale ressaltar que o custo de operação também levaria em conta outras taxas (administração, intermédio, financeiro, mão de obra, etc.) que não foram consideradas no cálculo. Sabe-se que o custo com mão-de-obra seria basicamente o mesmo considerando que manteriam o mesmo quadro de motoristas.

Os investimentos necessários para a substituição da frota seriam o custo de aquisição dos ônibus e o custo com infraestrutura. No caso, o custo total com a infraestrutura de recarga necessária foi estimado na ordem de R\$ 57 milhões. É importante frisar que a mudança para a tecnologia elétrica é um processo iminente e sem volta, ou seja, a tendência é de que aos poucos os veículos com tecnologia poluidora sejam substituídos por outros modelos mais limpos, e que assim permaneçam.

Considerando essas estimativas de custos e as condições de financiamento do BNDES, fizemos uma análise de custo benefício da substituição da frota ao longo de 10 anos separada em dois períodos: Nos primeiros 5 anos e, depois, nos 5 anos seguintes. Consideramos a vida útil de 5 anos para os ônibus à diesel e de 10 anos para os ônibus elétricos.

Desde os primeiros anos, a estimativa dos custos com a eletrificação da frota foi menor que a substituição dos ônibus por veículos à diesel mais novos. Mesmo com o custo de aquisição quase

quatro vezes maior. Isso ocorre, principalmente, pois os gastos gerados pela poluição do ar oriunda da utilização do diesel são muito altos. Ao longo de 10 anos foram estimados aproximadamente R\$6,5 bilhões com gastos hospitalares e perda de produtividade por conta dos impactos da poluição ao ar. A economia com a eletrificação da frota (frente o uso do diesel) nos primeiros 5 anos ficou em torno de R\$ 700 mil.

Com o passar do tempo, o fato da vida útil estendida do ônibus elétrico fez com que o custo de substituição da frota caísse em aproximadamente R\$ 2 bilhões nos 5 anos seguintes em relação aos primeiros 5 anos, como pode ser visto na figura 11. Isso ocorre, pois não existiram novos investimentos com a aquisição de novos ônibus e com infraestrutura, apenas custos com eletricidade e manutenção. Enquanto que, no mesmo período, os veículos a diesel geraram um custo na ordem de R\$ 10 bilhões, somando um total de R\$17,5 bilhões ao longo dos 10 anos, sendo 40% desse custo devido à poluição atmosférica gerada.

Portanto, ao longo de 10 anos, a escolha pelos ônibus elétricos resulta em uma economia na ordem de R\$7 bilhões ou R\$1 milhão por cada veículo a diesel substituído por um elétrico, considerando apenas dois impactos da poluição atmosférica na morbidade: Internações por doenças do aparelho respiratório e dias de atividade perdidos.

## **7. Conclusão**

Neste estudo foi feita a valoração do custo monetário da poluição atmosférica na cidade do Rio de Janeiro relacionado à alta concentração do poluente MP10 na atmosfera, devido as emissões dos ônibus urbanos municipais. Para isso, foram considerados gastos hospitalares com internações por problemas no aparelho respiratório e dias de trabalho perdidos. Os resultados mostraram que esses custos chegam na ordem de R\$1 bilhão ao ano.

Na análise do custo benefício da eletrificação da frota do Rio de Janeiro, consideramos o custo monetário da poluição atmosférica, os custos operacionais (manutenção, combustível e eletricidade) e os investimentos necessários para a realização da troca (custos de aquisição dos veículos e custos com infraestrutura). Nesta análise, comparamos dois cenários: A substituição da frota por ônibus elétricos e a renovação por ônibus novos à diesel, considerando a vida útil de 5 anos para os aqueles à diesel e de 10 anos para os ônibus 100% elétricos. Para entender o custo benefício da eletrificação, foi feita também uma análise da viabilidade econômica deste empreendimento, considerando dois períodos de tempo: Os 5 primeiros anos de substituição e os 5 anos seguintes, utilizando as condições de financiamento do BNDES.

Os resultados encontrados indicam que a eletrificação da frota é mais vantajosa. Apesar do alto custo de aquisição dos ônibus elétricos, a utilização de uma frota com fonte de energia limpa garante a redução das concentrações de poluentes atmosféricos e, consequentemente, reduz os gastos com morbidades, com combustível (já que a energia elétrica é mais barata e menos poluidora) e com manutenções.

A economia estimada é da ordem de R\$700 mil nos primeiros 5 anos de substituição e de R\$7 bilhões ao longo de 10 anos. Portanto, é evidente que a fonte energética dos meios de transporte necessita de uma transição para fontes de energia limpa. Hoje, no Rio de Janeiro, a questão da mobilidade precisa ser amplamente discutida. A cidade vive problema de saturação de tráfego e a frota de veículos da cidade continua crescendo. À medida que a frota cresce, os impactos do transporte urbano vão se tornando mais evidentes em toda a cidade. O custo da poluição atmosférica no município foi estimado na ordem de R\$6,5 bilhões ao longo de 10 anos.

As políticas públicas adotadas para amenizar os problemas ambientais no trânsito urbano se restringiram ao controle das emissões dos veículos, à mistura de bicompostíveis aos combustíveis fósseis para reduzir seu potencial poluidor e à melhoria da qualidade do diesel e da gasolina. São medidas importantes, mas deixam de ser plenamente efetivas em função do aumento vertiginoso da frota circulante de veículos.

Entretanto, no Rio de Janeiro, uma mudança efetiva está sendo ensaiada com o Decreto Municipal nº 46.081/2019 que determina instaurar uma frota de zero emissão a partir de 1º de janeiro de 2025. Apesar de curto espaço de tempo para uma mudança tão estrutural, as conclusões deste trabalho indicam uma economia expressiva com a adoção dos ônibus elétricos. Apesar disso, o Decreto é inconclusivo no que se refere ao planejamento para tal mudança, o que coloca em questão a sua real efetividade

De qualquer forma, a transição para utilização de fontes de energia limpa com zero emissão no transporte público no Brasil, apesar de ainda tímida, está prestes a ganhar robustez caso realmente ocorra a eletrificação da frota de uma das mais importantes cidades brasileiras. Entende-se que essa avaliação econômica representa um embasamento eficiente para a redução das emissões atmosféricas e da poluição ambiental. O entendimento dos ganhos econômicos com a manutenção dos serviços ambientais é uma grande ferramenta para levar a mudanças estruturais significativas na sociedade, uma vez que monetizar os efeitos à saúde é uma forma de se criar indicadores para priorização e intervenção.

Portanto, a substituição dos ônibus a diesel por ônibus puros tem vantagens econômicas, sociais e ambientais. No aspecto econômico, apesar do custo de aquisição superior do ônibus elétrico, os custos com externalidades, combustível e manutenção são inferiores, levando a sua viabilidade em alguns casos. No aspecto social, alguns benefícios diretos da substituição são a melhoria da qualidade do ar nos centros urbanos, a redução do nível de ruído, e a possível melhoria da qualidade do material rodante no serviço de transporte. No aspecto ambiental, os ônibus elétricos permitem evitar a emissão de CO<sub>2</sub>, oriunda da queima do óleo diesel, além de poluentes locais como o material particulado (MP), CO e NOx.

### **7.1. Limitações do estudo e recomendações para estudos futuros**

É importante salientar as diversas limitações desse estudo. Em primeiro lugar, deve-se notar que a relação linear entre emissão e concentração assumida neste trabalho não é uma boa representação da realidade. Para estimativas mais acuradas, são necessários modelos sofisticados de dispersão de poluentes, levando em consideração variáveis como o vento, temperatura e relevo. Assim, saberíamos com maior precisão os efeitos das emissões sobre as morbilidades analisadas na cidade em questão.

Outro aspecto que também necessita de análise mais aprofundada é a estimativa da população afetada pela alteração da qualidade atmosférica. Assim como no caso anterior, é necessária uma modelagem mais sofisticada.

Além disso, a metodologia desenvolvida pelo Banco Mundial oferece um referencial de magnitude do dano, sendo uma aproximação. Ele não reflete fielmente a realidade brasileira, pois os estudos que geraram as funções doses-resposta (coeficientes b) foram realizados em outros países com outras condições climáticas. No entanto, a metodologia oferece uma facilidade de manuseio e resultados satisfatórios apesar de aproximados (KNIGHT et YOUNG, 2005).

Outra questão é o uso de coeficientes constantes de emissão para os veículos à diesel. O desenvolvimento da tecnologia ao longo dos anos induz o aprimoramento da performance dos motores, e é esperado que as novas gerações de motores à diesel sejam bem menos poluentes que a atual, reduzindo o volume de emissão, de material particulado e de outros poluentes.

Além das questões com a valoração ambiental, outro ponto de atenção seria a análise dos impactos do aumento expressivo do uso de energia elétrica, que não foram considerados neste estudo.

Apesar das limitações deste trabalho, é possível observar que a perda social e econômica gerada pela degradação do ar na cidade do Rio de Janeiro é significativa e chega a mais de R\$ 1 bilhão por ano. Considerando que apenas a morbidade foi calculada e que todos os impactos sobre a mortalidade prematura foram desconsiderados, pode-se concluir que a questão da melhoria da qualidade do ar deve ser prioridade no desenvolvimento de novas políticas públicas que incentivem a substituição dos veículos pesados por veículos menos poluentes em todo o Brasil. Além disso, a questão da maior vida útil dos ônibus elétricos também é muito expressiva e leva a uma economia da ordem dos bilhões de reais, já que dobra a vida útil e evita a substituição de mais de 6mil veículos.

As oportunidades para estudos futuros neste tema são diversas. O aprofundamento na questão das modelagens de dispersão de poluentes e da população afetada pela poluição, por exemplo, levaria a uma maior precisão dos resultados deste trabalho.

Outra sugestão é o desenvolvimento de uma análise considerando os impactos do aumento expressivo do uso de energia elétrica com a eletrificação de toda a frota de ônibus urbanos, o que levariam a uma estimativa mais acurada da perda social e econômica do uso de energias

poluidoras. Sabe-se que a matriz energética brasileira é essencialmente limpa, porém a geração de energia elétrica não é emissão zero.

## **Referências Bibliográficas**

Amorim, W Nilson De. “Ciência de dados, poluição do ar e saúde”. Universidade de São Paulo, 2019.

Andrade, Carlos Eduardo Sanches De. “Avaliação E Mitigação Das Emissões De Dióxido De Carbono Nos Modos De Transportes De Passageiros Rodoviário E Metroviário: Aplicação Na Cidade Do Rio De Janeiro”, 2014.

Barbier, Edward B. “Valuing ecosystem services as productive inputs”. In *Economic Policy*, 22:177–229, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0327.2007.00174.x>.

Batista, Alexandre Kotchergenko. “Subsídios A Combustíveis Fósseis No Brasil E O Efeito Lock-In Rio De Janeiro - RJ, 2019

BNDES. CIRCULAR SUP/AOI Nº 01/2015 (2015).

BNDES. “Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades”, [s.d.].

Borba, Bruno Soares Moreira Cesar. “MODELAGEM INTEGRADA DA INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS LEVES CONECTÁVEIS À REDE ELÉTRICA NO SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

Brajterman, Olivia. “INTRODUÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E IMPACTOS SOBRE O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

Brasil. “Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável”, 2017.

Brasil. “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários”, 2013.

Carvalho, Rodrigo Yago Costa, e Joel Medeiros Bezerra. “IMPACTO AMBIENTAL DA EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO PELO TRANSPORTE ESCOLAR PÚBLICO EM MOSSORÓ/RN”, [s.d.].

Carvalho-Oliveira, R., R. M.K. Pozo, D. J.A. Lobo, A. J.F.C. Lichtenfels, H. A. Martins-Junior, J. O.W.V. Bustilho, M. Saiki, I. M. Sato, e P. H.N. Saldiva. “Diesel emissions significantly influence composition and mutagenicity of ambient particles: A case study in São Paulo, Brazil”. *Environmental Research* 98, nº 1 (2005): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.05.007>.

Castro, Nivalde de, Mauricio Moszkowicz, e Antônio Lima. “Perspectivas dos Veículos Elétricos”, [s.d.].

Cesar, Arthur, Menezes Soares, Guilherme Wilson, Giselle Ribeiro, Paula Leopoldino, e Aline Lessa. “Programa Ambiental Fetranspor”, [s.d.].

Chen, Dima, Zhichun Lan, Xue Bai, James Grace, and Yongfei Bai . 2013 . “Evidence that Acidification- Induced Declines in Plant Diversity and Productivity Are Mediated by Changes in Below-Ground Communities and Soil Properties in a Semi-Arid Steppe .” *Journal of Ecology* 101: 1322–34

Cohen, Aaron J, H Ross Anderson, Bart Ostro, Kiran Dev Pandey, Michal Krzyzanowski, Nino Künzli, Kersten Gutschmidt, et al. “Urban air pollution”. In *Comparative Quantification of Health Risks*, [s.d.].

Costanza, Robert, Rudolf de Groot, Stephen Farberk, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, et al. “The value of the world’s ecosystem services and natural capital”. *NATURE*. Vol. 387, 1997.

Costanza, Robert, Rudolf de Groot, Paul Sutton, Sander van der Ploeg, Sharolyn J. Anderson, Ida Kubiszewski, Stephen Farber, e R. Kerry Turner. “Changes in the global value of ecosystem services”. *Global Environmental Change* 26, nº 1 (2014): 152–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>.

Dante, Pedro Henrique. “Mobilidade elétrica e a necessidade para atender a nova demanda”. *Canal Energia*, 2019.

Daumas, Regina Paiva, Gulnar Azevedo e.Silva Mendonça, e Antonio Ponce de León. “Air pollution and mortality in the elderly in Rio de Janeiro: a time-series analysis”. *Cadernos de saúde pública / Ministério da Saúde, Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública* 20, nº 1 (2004): 311–19. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2004000100049>.

EPE. “Avaliação de Ônibus Elétricos Municipais: Guia Prático para o Uso da Ferramenta”, [s.d.].

EPE. “Eletromobilidade e Biocombustíveis”, 2018.

EPE. “Veículos Elétricos e Matriz Energética”, 2009.

EPE. “Plano Nacional de Energia 2030”. Brasília, 2006.

European Communities. “The Economics of Ecosystems and Biodiversity: An interim report”, 2008.

Falco, Daniela Godoy. “Avaliação do desempenho ambiental do transporte coletivo urbano no estado de São Paulo: uma abordagem de ciclo de vida do ônibus a diesel e elétrico à bateria”. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2017.

FEEMA. “Relatório Anual de Qualidade do Ar”. Rio de Janeiro, 2007.

Fernandes, Vicente Aprigiano, Marcio De Almeida D’Agosto, Cintia Machado de Oliveira, Fabiana Do Couto Assumpção, e Ana Carolina Peixoto Deveza. “Eco-driving: uma ferramenta para aprimorar a sustentabilidade do transporte de resíduos urbanos”. *TRANSPORTES* 23, nº 2 (28 de agosto de 2015): 5. <https://doi.org/10.14295/transportes.v23i2.773>.

FETRANSPO. “Biodiesel B20 O Rio de Janeiro anda na frente”, 2011.

Filho, ALBERTO DANTAS DE OLIVEIRA. “SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR GÁS NATURAL EM ÔNIBUS DO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO”. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2006.

Freire, Wagner. “Veículos elétricos irão adicionar 6,8% ao consumo de eletricidade global em 2040, diz BNEF”. *Canal Energia*, 2019.

Freitas, Erick Batalha, JUSSARA SOCORRO CURY MACIEL Maciel, e Camila Monteiro Penz. “UTILIZAÇÃO DO GÁS NATURAL NO TRANSPORTE COLETIVO DE MANAUS: UMA ANÁLISE ECONÔMICA E SOCIOAMBIENTAL”, 2018.

Godoi, Maurício. “Utilities podem gerar até US\$ 10 bi em valor com veículos elétricos, aponta BCG”. *Canal Energia*, 2019.

Gouveia, Nelson. “Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras”. *Ciencia e Saude Coletiva* 19, nº 10 (1 de outubro de 2014): 4141–47.  
<https://doi.org/10.1590/1413-812320141910.09232014>.

Grandjean, Philippe, and Philip Landrigan . 2014 . “Neurobehavioral Effects of Developmental Toxicity .” *The Lancet Neurology* 13: 330–38

Greaver, Tara, Timothy Sullivan, Jeffrey Herrick, Mary Barber, Jill Baron, Bernard Cosby, Marion Deer- hake et al . 2012 . “Ecological Effects of Nitrogen and Sulfur Air Pollution in the US: What Do We Know?”

Guenther, Paulo Renato, e Thomaz Dalmas Padilha. “ESTUDO DE VIABILIDADE PARA SUBSTITUIÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO POR VEÍCULOS DE TRAÇÃO ELÉTRICA EM UMA LINHA DE ÔNIBUS DE CURITIBA”. Universidade Federal do Paraná, 2016.

Guimarães, João Roberto Penna de Freitas. “Toxicologia das emissões veiculares de diesel: um problema de saúde ocupacional e pública\*”, [s.d.].

Henrique, Carlos, e Ribeiro De Carvalho. “Emissões relativas de poluentes do transporte urbano”. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental IPEA*, 2011.

IEA. *Chapter 9: Fossil-fuel subsidies. World Energy Outlook 2014*, 2014.

IEA. “World Energy Outlook 2018: The Future is Electrifying”. *Oecd/Iea*, 2018.

INEA. “Inventário de Emissões de Fontes Veiculares: RMRJ”, 2016.

INEA. “Relatório de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro”. Rio de Janeiro, 2016.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Kristin Seyboth (USA)*. Gian-Kasper Plattner, 2015.

Jabareen, Yosef. “Teaching Sustainability: A Multidisciplinary Approach”. *Creative Education* 02, nº 04 (31 de outubro de 2011): 388–92. <https://doi.org/10.4236/ce.2011.24055>.

Knight, Vivian Mac, e Carlos Eduardo Frickmann Young. “Análise custo benefício da substituição do diesel por gás natural veicular em ônibus na região metropolitana de São Paulo”. *Revista de Economia Mackenzie*, 2010.

Knight, Vivian Mac, e Carlos Eduardo Frickmann Young. “CUSTO DA POLUIÇÃO GERADA PELOS ÔNIBUS URBANOS NA RMSP”, 2006.

Lvovsky, Kseniya, Gordon Hughes, David Maddison, Bart Ostro, e David Pearce. “Environmental Costs of Fossil Fuels: A Rapid Assessment Method with Application to Six Cities”, 2000.

Maia, Gabriel, e Maria Cáceres. “ESTUDO DA QUALIDADE DO AR NO ENTORNO DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO”, [s.d.].

Martins, Eduardo Monteiro, Aline Ribeiro Meireles, Francisca Rodrigues Magalhaes, Josie Batista Bastos Carvalho, e Maycon Maia Ribeiro. “Concentrações de poluentes atmosféricos no Rio de Janeiro em relação a normas nacionais e internacionais”. *Revista Internacional de Ciências* 7, nº 1 (18 de julho de 2017). <https://doi.org/10.12957/ric.2017.25799>.

Mattos, Laura Bedeschi Rego de. “A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa - o caso do município do Rio de Janeiro.” Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

MCTI. 2014. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2a ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being : synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.

Ministério do Meio Ambiente. “1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários”, 2011.

Miraglia, Georges Simone El Khouri, e Nelson Gouveia. “Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras”, 2014. <https://doi.org/10.1590/1413-812320141910.09232014>.

MME, 2011. Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional. Brasil.

MME, 2018. Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional. Brasil.

Motta, Ronaldo Seroa da. “Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais”, 1997.

Oliveira, Gabriel Tenenbaum De, Carlos Eduardo Sanches De Andrade, Ilton Curty Leal Junior, Carlos David Nassi, e Cláisse Cunha Linke. “REDUÇÃO DE EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO COM A IMPLEMENTAÇÃO DO BRT TRANSOESTE NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO”. Curitiba, [s.d.].

Oliveira, Vinicius de. “A qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: a saúde pública como elo central de articulação e suas implicações na gestão integrada saúde e ambiente”. FIOCRUZ, 2008.

ONU. “Outcome document of the United Nations Conference on Sustainable Development”, 2012.

Oprešnik, Samuel Rodman, Tine Seljak, Rok Vihar, Marko Gerbec, e Tomaž Katrašnik. “Real-world fuel consumption, fuel cost and exhaust emissions of different bus powertrain technologies”. *Energies* 11, nº 8 (1 de agosto de 2018). <https://doi.org/10.3390/en11082160>.

Pabst, Gabriel, Carlos Augusto Arentz Pereira, e Carlos Eduardo Frickmann Young. “Análise preliminar do custo-benefício no adiantamento da implantação do diesel B-20 na Cidade do Rio de Janeiro”. *XIII Encontro Sociedade Brasileira de Economia Ecológica*, 2019.

Pearce, David W., e R. Kerry Turner. *Economics of Natural Resources and the Environment*, 1990.

Peterson, Bradley, Virginia Rauh, Ravi Bansal, Xuejun Hao, Zachary Toth, Giancarlo Nati, Kirwan Walsh et al . 2015 . “Effects of Prenatal Exposure to Air Pollutants (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) on Development of Brain White Matter, Cognition, and Behavior in Later Childhood .” *JAMA Psychiatry* 72 (6): 531–40

Pires, Dilson. “Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

Rio de Janeiro. “PLANO DE MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO”. Rio de Janeiro, 2015.

Rio de Janeiro. Decreto 44210 2018 (2018).

Rio de Janeiro. “Decreto 4608”, 2019.

Rodrigues, Cristina Guimarães, Evangelina da Motta Pacheco Araújo Vormittag, Julia Affonso Cavalcante, e Paulo Hilário Nascimento Saldiva. “Forecasting of mortality and hospital admissions from public healthcare attributable to air pollution in State of São Paulo between 2011 and 2030”. *Revista Brasileira de Estudos de População* 32, nº 3 (2015): 489–509. <https://doi.org/10.1590/S0102-3098201500000029>.

Rodrigues, Cristina Guimarães, Evangelina da Motta Pacheco Araújo Vormittag, Julia Affonso Cavalcante, e Paulo Hilário Nascimento Saldiva. “Projeção da mortalidade e internações hospitalares na rede pública de saúde atribuíveis à poluição atmosférica no Estado de São Paulo entre 2012 e 2030”. *Revista Brasileira de Estudos de População* 32, nº 3 (1 de setembro de 2015): 489–509. <https://doi.org/10.1590/S0102-3098201500000029>.

Romanel Presidente, Celso, Fernando Luiz Cumplido Mac Dowell da Costa Co-orientador PUC-Rio Paulo Cesar Martins Ribeiro, Hostilio Xavier Ratton Neto, e José Eugenio Leal. “TAISA DORNELAS ABBAS O setor de transportes urbanos por ônibus no Rio de Janeiro e a emissão de gases de efeito estufa”, [s.d.].

Said, Paloma Costa. “Universidade Federal Do Amazonas Paloma Costa Said Avaliação Do Perfil De Consumo De Gás Natural Veicular No Estado Do Amazonas Em Comparaçāo Ao Consumo Nacional”. Universidade Federal do Amazonas, 2018.

Salge, Guilherme Nunes. “Avaliação do Transporte Público no Município de Uberlândia com base na planilha de custos da ANTP de 2017”. Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

São Paulo. “Plano de Mobilidade de São Paulo”. São Paulo, 2015.

Silva, Patricia, e Stefano Pagiola. “A Review of the Valuation of Environmental Costs and Benefits in World Bank Projects”, 2003.

Silva, Patricia, e Stefano Pagiola. “A Review of the Valuation of Environmental Costs and Benefits in World Bank Projects”, 2003.

Smajgl, Alex. “USAID Mekong Adaptation and Resilience to Climate Change (USAID Mekong ARCC) Ecosystem Value Estimation : Technical Document”. Bangkok, 2015.

Souza, Luciano Barcelos de, e Vicente Mariano Canalli. “Estudo Preliminar da Viabilidade Técnica e Financeira na substituição de um ônibus a diesel por um ônibus com propulsão elétrica na empresa Viamão”. PUC RS, 2017.

Tang, Deliang, Joan Lee, Loren Muirhead, Tingyu Li, Lirong Qu, Jie Yu, and Frederica Perera . 2014 .

“Molecular and Neurodevelopment Benefits to Children of Closure of a Coal Burning Power Plant in China .” PLoS ONE 9 (3): e91966

Teixeira, E. H. S. B. et al. “Guia da mobilidade e desenvolvimento inteligente”, 2016.

Turner, R. Kerry, Jouni Paavola, Philip Cooper, Stephen Farber, Valma Jessamy, e Stavros Georgiou. “Valuing nature: Lessons learned and future research directions”. *Ecological Economics* 46, nº 3 (2003): 493–510. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00189-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00189-7).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Valuing Mortality Risk Reductions for Environmental Policy: A White Paper. EPA. 2010

Vara-Vela, A., M. F. Andrade, P. Kumar, R. Y. Ynoue, e A. G. Muñoz. “Impact of vehicular emissions on the formation of fine particles in the São Paulo Metropolitan Area: A numerical study with the WRF-Chem model”. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, nº 2 (2016). <https://doi.org/10.5194/acp-16-777-2016>.

Vishnevetsky, Julia, Deliang Tang, Hsin-Wen Chang, Emily Roen, Ya Wang, Virginia Rauh, Shuang Wang et al . 2015 . “Combined Effects of Prenatal Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Material Hardship on Child IQ .” *Neurotoxicology and Teratology* 49: 74–80

Wang, Zhihua. “Energy and Air Pollution”. In *Comprehensive Energy Systems*, Vol. 1–5, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00127-9>.

WESTIN, Ricardo. “Carro elétrico ainda espera incentivos para crescer no Brasil”. *Jornal do Senado* Nº 637, nº Especial Cidadania (2018).

World Bank Group. “The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action”. Washington, DC, 2016.

Zampier, João Fortunato, e Gabriel M. Miranda. “LEVANTAMENTO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS PARA VALORAÇÃO ECONÔMICA DE BENS AMBIENTAIS”. *Revista Eletrônica Lato Sensu*, 2007.