



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Laiza Molezon Soares

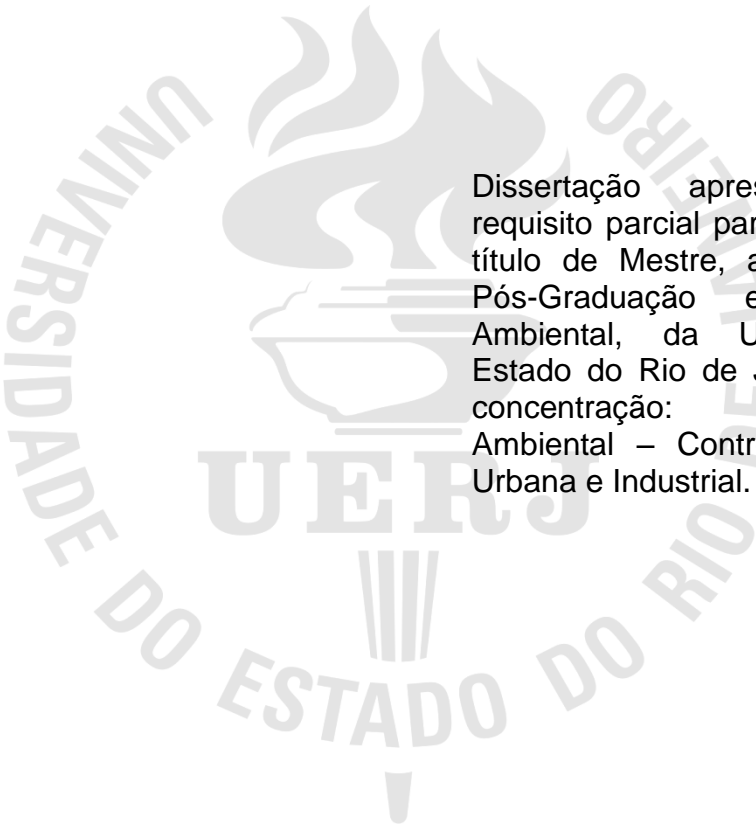
**Previsão das emissões veiculares com a implantação gradativa de  
veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de  
Janeiro**

Rio de Janeiro

2019

Laiza Molezon Soares

**Previsão das emissões veiculares com a implantação gradativa de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Simone Lorena Quitério de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Monteiro Martins

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S676 Soares, Laiza Molezon.  
Previsão de emissões veiculares com a implantação gradativa  
de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro /  
Laiza Molezon Soares. – 2019.  
113f.

Orientadora: Simone Lorena Quitério de Souza.  
Coorientador: Eduardo Monteiro Martins.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Ar - Poluição - Teses. 3.  
Veículos a motor - Dispositivos de controle da poluição - Teses.  
4. Poluentes - Teses. I. Souza, Simone Lorena Quitério de. II.  
Martins, Eduardo Monteiro. III. Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.512

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial  
desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Laiza Molezon Soares

**Previsão das emissões veiculares com a implantação gradativa de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em: 29 de agosto de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Lorena Quitério de Souza (Orientadora)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. Eduardo Monteiro Martins (Coorientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Dr<sup>a</sup>. Luciana Maria Baptista Ventura  
Instituto Estadual do Ambiente – INEA

---

Prof. D.Sc. Sérgio Machado Corrêa  
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2019

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus por ter me dado a oportunidade de ingressar em uma universidade conceituada e tradicional, podendo assim, concluir o curso de mestrado em Engenharia Ambiental, tornando-me mestre. Dedico também aos meus pais e amigos, por todo apoio, incentivo e compreensão nestes anos de estudo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por me guiar e sempre tornar realidade os meus sonhos, sendo um deles o de concluir o curso de mestrado em Engenharia Ambiental em uma universidade conceituada e tradicional, fazendo de mim um profissional mais qualificado e preparado para atuar no mercado de trabalho.

À minha mãe, Leila Molezon, por sempre me apoiar e incentivar nos estudos e na vida.

Ao meu pai Leonardo Soares e ao meu avô Edson Molezon pela dedicação e educação investida;

Aos meus amigos mais próximos por compreenderem a minha ausência em alguns momentos;

À minha ex-chefe e amiga, Luciana Ventura, pelos ensinamentos acadêmicos e pela motivação em ingressar no curso de mestrado.

Ao meu co-orientador prof. D.Sc. Eduardo Monteiro Martins que desde o início acreditou no meu potencial e me apoiou sempre que precisei, além dos ensinamentos, dedicação e confiança.

À minha orientadora, prof<sup>a</sup>. D.Sc. Simone Quitério, pela orientação, ensinamentos e dedicação.

Aos colegas no mestrado pelo companheirismo, apoio e motivação;

Aos ótimos professores do PEAMB, pelos ensinamentos da teórica e da prática profissional;

À Mariana Palagano, minha ex-chefe do INEA, ao Guilherme Wilson e à Christiane Chafim, meus ex-chefes da Fetranpor, ao Sr. José Antônio, meu ex-chefe da Auto Viação Três Amigos e à Ana Luiza Fragomeni e Lorena Nascimento, minhas atuais chefes da Cosan Lubrificantes, por acreditarem no meu potencial e me concederem a oportunidade de conciliar o trabalho com o mestrado, podendo assim concluir mais um sonho.

Sonhos determinam o que você quer e a ação determina o que  
você conquista!

*Aldo Novak*

## RESUMO

SOARES, L. M.. *Previsão das emissões veiculares com a implantação gradativa de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro*. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O setor de transporte é o principal causador das emissões de poluentes atmosféricos locais, que afetam diretamente o bem-estar e a saúde da população. O desenvolvimento de soluções inovadoras e ambientalmente corretas para o setor de transporte rodoviário assume um papel de relevância. Diante disto, o objetivo principal deste estudo foi prever as emissões veiculares da cidade do Rio de Janeiro com a implantação gradual de automóveis e ônibus elétricos e híbridos-elétricos até 2030. Para isto foram simulados 07 (sete) cenários, considerando a implantação de 10 % de ônibus elétrico e híbrido-elétrico em 2020, 15 % em 2021, 20 % em 2022, até atingir 100 % em 2030. Para os automóveis elétricos e híbrido-elétricos foi considerado a implantação de 2% em 2020 aumentando progressivamente 3% ao longo dos anos até alcançar 52% em 2030. Os dados das emissões veiculares estimadas pelo Inventário de Emissões de Fontes Veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Ano-base 2013 foram utilizados como base do estudo. Os resultados apontaram que a substituição de 52% da frota de automóvel convencional por automóveis elétricos, em 2030, poderá reduzir 36% das emissões de CO, bem como 35% e 47% de NMHC e RCHO, respectivamente. Já a substituição de 100% da frota de ônibus convencional por elétricos, reduzirá 19% de MP<sub>escap</sub> e 28% de NOx. As tecnologias veiculares elétricas e híbrido-elétricas poderão contribuir para a redução dos níveis de emissão dos poluentes, auxiliando no atendimento à Resolução CONAMA n° 491/18, a qual estabelece os novos Padrões de Qualidade do ar do Brasil.

Palavras- chave: Emissão veicular; Automóvel híbrido; Ônibus híbrido; *Top-down*.



## ABSTRACT

SOARES, L. M.. *Prediction of vehicular emissions with the gradual implementation of hybrid and electric vehicles in the city of Rio de Janeiro*. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The transport sector is the main cause of local air pollutant emissions, which directly affect the well-being and health of the population. The development of innovative and environmentally friendly solutions for the road transport sector plays a key role. Given this, the main objective of this study was to predict the vehicle emissions of the city of Rio de Janeiro with the gradual deployment of electric and hybrid electric cars and buses by 2030. For this, 07 (seven) scenarios were simulated, considering the implementation of 10 % of electric and hybrid-electric buses in 2020, 15 % in 2021, 20 % in 2022, until reaching 100 % in 2030. For electric and hybrid-electric cars it was considered the implementation of 2 % in 2020 increasing progressively 3 % over 52 % by 2030. Vehicle emission data estimated by the Rio de Janeiro Metropolitan Region Vehicle Source Emissions Inventory: Base Year 2013 were used as the basis of the study. The results showed that replacing 52 % of the conventional car fleet with electric cars by 2030 could reduce 36 % of CO emissions as well as 35% and 47 % of NMHC and RCHO, respectively. Replacing 100% of the conventional bus fleet with electric buses will reduce 19% MPescap and 28 % NOx. Electric and hybrid electric vehicle technologies can contribute to reducing pollutant emission levels, helping to comply with Resolution CONAMA n°. 491/18, which establishes the new Brazilian Air Quality Standards..

Keywords: Vehicle emission; Hybrid car; Hybrid bus; *Top-down*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Perfil médio de temperatura das camadas da atmosfera, em função da pressão e altitude. ....	19
Figura 2:Divisão da troposfera: Camada Limite e Atmosfera Livre .....	21
Figura 3:Perfil das concentrações médias horárias anuais de CO (ppm) no bairro de Copacabana no Rio de Janeiro. ....	26
Figura 4:Esboço do mecanismo de formação de ozônio fotoquímico e acoplamento de "ciclo ROX" e "ciclo NOX". Os caminhos de reação mostrados em vermelho, verde, azul e preto referem-se ao "ciclo NOX", "ciclo ROX", incluindo processos de formação e término dos radicais, respectivamente. ....	31
Figura 5:concentrações máximas de ozônio em partes por milhão (linhas) em função dos níveis de COVs e NOx.....	32
Figura 6: Perfil da frota do município do Rio de Janeiro por ano de fabricação .....	60
Figura 7:Perfil da frota do município do Rio de Janeiro por combustível .....	60
Figura 8:Sistema de Propulsão convencional – veículo rodoviário .....	68
Figura 9: Motor de Combustão Interna de 4 tempos por centelhamento – Motor de Ciclo Otto.....	69
Figura 10: Motor de Combustão Interna de 4 tempos por compressão – Motor do Ciclo Diesel .....	70
Figura 11: Sistema de propulsão elétrico com baterias – veículos elétricos puros plug-in .....	73
Figura 12: Sistema de propulsão elétrica híbrido em série – veículo rodoviário .....	73
Figura 13: Representação do Local de estudo: Brasil, Estado do Rio de Janeiro e cidade do Rio de Janeiro.....	78
Figura 14: Município do Rio de Janeiro dividido em áreas zonas geográficas .....	79
Figura 15: Previsão de crescimento da frota de automóveis até 2030.....	93
Figura 16: Previsão de crescimento da frota de ônibus urbano até 2030 .....	94
Figura 17:Previsão de crescimento da frota dos Demais Veículos do Ciclo Otto até 2030 .....	94
Figura 18:Previsão de crescimento da frota dos Demais Veículos do Ciclo Diesel até 2030 .....	95
Figura 19:Emissões totalizadas do cenário 01, considerando as 4 categorias	

veiculares (tonelada/ano) .....	96
Figura 20: Emissões totalizadas do cenário 01, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano) .....	97
Figura 21: Emissões totalizadas do cenário 02, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano) .....	98
Figura 22: Emissões totalizadas do cenário 03, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano) .....	99
Figura 23: Emissões totalizadas do cenário 04, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano) .....	100
Figura 24: Emissões totalizadas do cenário 05, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano) .....	101
Figura 25: Emissões totalizadas do cenário 06, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano) .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de Qualidade do Ar recomendados pela Organização Mundial de Saúde.....	35
Tabela 2: Padrões nacionais de qualidade do ar em vigor nos EUA, estabelecidos pela EPA.....	37
Tabela 3: Padrões de Qualidade do Ar, estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018.....	39
Tabela 4: Níveis de atenção aletrta e emergência estipulados pela Resolução CONAMA nº 491/2018.....	40
Tabela 5: Fases do PROCONVE para veículos do ciclo Diesel.....	44
Tabela 6: Limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de uso rodoviário, da Fase P8 do PROCONVE.....	47
Tabela 7: Fases do PROCONVE para veículos leves do ciclo Otto.....	47
Tabela 8: Limites máximos de emissão de poluentes por categoria de veículos, para veículos da Fase PROCONVE L7.....	48
Tabela 9: Limites máximos de emissão de poluentes corporativo para veículos da fase PROCONVE L8.....	48
Tabela 10: Fases do PROMOT para ciclomotores, motocicletas e similares.....	49
Tabela 11: Limites máximos de emissão de poluentes no ciclo dinamométrico para a fase do PROMOT M5. Valores expressos em $\text{mg km}^{-1}$ .....	49
Tabela 12: Limites máximos de emissão de poluentes em marcha lenta e acima de 2000 rpm para a fase do PROMOT M5. Valores expressos em ppm (partes por milhão, em volume).....	50
Tabela 13: Frota, por tipo de veículos, do município do Rio de Janeiro em maio de 2019.....	58
Tabela 14: Relação de tipo de veículos com combustível e poluente emitido.....	61
Tabela 15: Fatores de Emissão para automóveis e ônibus híbrido-elétrico.....	75
Tabela 16: Intensidade de Uso de Referência ( $\text{Km ano}^{-1}$ ).....	82
Tabela 17: Fatores de Emissão Utilizadas ( $\text{g km}^{-1}$ ).....	84
Tabela 18 : Percentuais de implantação gradual ao longo dos anos estudados ( $P_{in}$ ).....	86
Tabela 19: Percentuais de redução das emissões dos veículos híbrido-elétricos em	

comparação aos veículos convencionais .....	87
Tabela 20: Comparação dos resultados dos cenários hipotéticos em 2030 .....	103

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Definições dos tipos de veículos automotores -----	42
Quadro 2: Definição dos tipos de veículos-----	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRACICLO	Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CETESB	Companhia Ambiental do Estado do Rio de Janeiro
DETRAN-RJ	Departamento Estadual de Trânsito do Rio de Janeiro
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEMA	Instituto de energia e Meio Ambiente
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	16
1- REVISÃO DA LITERATURA .....	19
1.1- A atmosfera .....	19
1.2- Poluição Atmosférica.....	22
1.2.1- Material Particulado (MP).....	24
1.2.2- Monóxido de carbono (CO).....	25
1.2.3- Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ) .....	26
1.2.4- Óxidos de nitrogênio (NO e NO <sub>2</sub> ).....	27
1.2.5- Compostos Orgânicos Voláteis (COV).....	27
1.2.6- Ozônio (O <sub>3</sub> ) .....	28
1.3- Aspectos legais sobre poluição atmosférica de origem veicular .....	34
1.3.1- Padrões de qualidade do ar .....	35
1.3.2- Controle das Emissões Veiculares .....	40
1.3.3- Inventários de Emissões Atmosféricas por Fontes Móveis .....	51
1.4- Perfil da frota do município do Rio de Janeiro.....	58
1.5- Combustível .....	61
1.5.1- Óleo Diesel .....	61
1.5.2- Gás Natural Veicular (GNV).....	64
1.5.3- Etanol Hidratado .....	65
1.5.4- Gasolina.....	66
1.6- Sistema de propulsão e uso de energia .....	67
1.6.1- Sistema de propulsão elétrico.....	70
1.6.2- Sistema de propulsão híbrida .....	71
1.7- Introdução de veículos elétricos e híbridos-elétricos.....	76
2- METODOLOGIA.....	78
2.1- Característica do município do Rio de Janeiro.....	78
2.2- Emissões Veiculares do Caso Base .....	80
2.2.1- Frota Veicular.....	81
2.2.2- Intensidade de Uso .....	82
2.2.3- Fator de Emissão.....	84
2.2.4- Emissão da cidade do Rio de Janeiro em 2013.....	85



2.3-	Emissões Veiculares dos veículos elétricos.....	85
2.4-	Emissões Veiculares dos veículos híbrido-elétricos.....	86
2.5-	Emissões do Cenário 01 .....	88
2.6-	Emissões do Cenário 02 .....	89
2.7-	Emissões do Cenário 03 .....	89
2.8-	Emissões do Cenário 04 .....	90
2.9-	Emissões do Cenário 05 .....	91
2.10-	Emissões do Cenário 06 .....	92
3-	RESULTADOS .....	93
3.1-	Projeção da Frota Veicular.....	93
3.2-	Emissões Veiculares do Caso Base .....	95
3.3-	Emissões do Cenário 01 .....	96
3.4-	Emissões do Cenário 02 .....	98
3.5-	Cenário 03.....	99
3.6-	Cenário 04.....	100
3.7-	Cenário 05.....	100
3.8-	Cenário 06.....	102
3.9-	Resumo dos Resultados .....	103
	CONCLUSÃO .....	104
	TRABALHOS FUTUROS .....	105
	REFERÊNCIAS.....	106

## INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um grande problema dos centros urbanos e vem se agravando ao longo dos tempos devido, em sua maior parte, pelo crescimento intensivo da frota de veículos automotores de combustão interna (WHO, 2006; ALVIM et al., 2017). As emissões veiculares na qualidade do ar não respeitam fronteiras geográficas ou políticas, nem se limitam a problemas urbanos pontuais, pois os gases emitidos propagam-se pela atmosfera, conforme as condições meteorológicas (LOUREIRO, 2005). Este fato compromete a qualidade de vida da população, além de causar impactos a níveis regionais e globais, como as chuvas ácidas e as mudanças climáticas (WHO,2006).

Os principais poluentes atmosféricos emitidos por veículos leves com motores de ciclo Otto, como os automóveis e as motocicletas, são o monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (COV). Os óxidos de nitrogênio (NOx) e o material particulado (MP) são os principais poluentes emitidos por veículos pesados com motores a diesel, como os caminhões e os ônibus (INEA, 2016).

Diante da poluição atmosférica causada por veículos de combustão interna, a adoção de tecnologias menos poluidoras, tais como veículos elétricos (VEs) e veículos híbridos elétricos (VHEs) são de suma importância e, portanto, tem se tornado foco de grandes estudos.

Lopes (2008) estudou as estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido em série.

Hidrué et al.. (2011) pesquisou sobre cinco características dos veículos elétricos: autonomia, tempo de carga, redução de custos com combustível, redução da poluição e desempenho.

Richardson (2013) buscou na literatura atual as interações dos veículos elétricos com fontes de energias renováveis, bem como, pesquisou sobre os impactos econômicos, ambientais e na rede elétrica relacionados à estas interações. Segundo Richardson (2013) uma série de impactos positivos podem ser esperados a partir da introdução dos veículos elétricos, incluindo menores custos de operação dos veículos, as reduções de emissões de CO<sub>2</sub> e a capacidade de introduzirem energia elétrica gerada por fontes renováveis na rede elétrica.

Neste sentido, também é necessário a realização de estudos que consigam avaliar, mensurar o impacto na qualidade do ar caso a frota atual da cidade do Rio

de Janeiro seja substituída por veículos híbridos e/ou elétricos, tornando-se assim um instrumento que possa subsidiar as tomadas de decisões quanto aos investimentos nestes tipos de tecnologias para redução das emissões veiculares.

Portanto, o objetivo geral deste estudo foi prever as emissões veiculares da cidade do Rio de Janeiro para os próximos 10 anos (2020 a 2030), considerando a implantação gradativa de automóveis e ônibus elétricos e híbrido-elétricos

Os objetivos específicos foram realizar a pesquisa bibliográfica no que tange a poluição atmosférica e veículos híbridos e elétricos; projetar a frota veicular até 2030, a partir dos dados do Detran – RJ dos últimos 5 anos; estimar as emissões de 2013 da cidade do Rio de Janeiro, baseado nas emissões da RMRJ calculada pelo Inventário do INEA - ano base 2013; calcular as emissões de 2014 da cidade do RJ até 2030; calcular as emissões dos automóveis e dos ônibus híbrido-elétrico, baseado nos fatores de emissão encontrados na literatura; simular cenários hipotéticos envolvendo a implantação gradual de automóveis e ônibus elétricos e híbrido-elétricos na cidade do Rio de Janeiro.

A estrutura do estudo está dividido em 5 partes: Introdução, a qual fornece uma contextualização do tema proposto, bem como a sua justificativa, relevância e objetivos gerais e específicos; Referencial Teórico, o qual apresenta o levantamento bibliográfico dos principais temas abordados nesta pesquisa; Metodologia, que apresenta as etapas realizadas e necessárias para a elaboração do estudo; Resultados e Discussões, onde os resultados obtidos por este estudo são apresentados e discutidos e por fim, Conclusões, que descreve, resumidamente, os resultados obtidos de modo contextualizado, havendo o apontamento das fragilidades, oportunidades e recomendações para trabalhos futuros.

A elaboração deste estudo contou com algumas limitações, a saber:

- A frota veicular da cidade do Rio de Janeiro foi obtida a partir dos dados disponíveis no endereço eletrônico do Detran-RJ (2018), ao invés de ser estimada conforme a metodologia descrita no Inventário do INEA (INEA, 2016) para estimar a frota circulante;
- A projeção da frota veicular de 2019 à 2030 foi baseada em um método simples de tendência linear, a partir de 2015, a qual poderia ter sido utilizado um modelo matemático específico para crescimento de frota;
- As emissões foram calculadas baseadas somente na metodologia *top-down* estimadas pelo Inventário do INEA (INEA, 2016), as quais poderiam ter

considerado, também, as calculadas pela metodologia *botton-up*. Além disso, as emissões deste estudo não foram estimadas de acordo com todas as premissas descritas pela metodologia *top down* no Inventário do INEA. Foi utilizado um cálculo simples, considerando a frota registrada no Detran-RJ, a Intensidade de Uso de Referência, o Fator de Emissão fixo de 2018 para cada categoria veicular e poluente e as emissões de 2013 estimadas para a cidade do Rio de Janeiro;

- As estimativas das emissões foram realizadas de forma global para a cidade do Rio de Janeiro, ou seja, não houve estimativa para cada zona administrativa;
- Para estimar as emissões dos veículos híbridos seriam considerados fatores de emissão encontrados em estudos realizados na China e EUA, sendo estes, maiores que os estipulados pela CETESB (2018), resultando em altas emissões. Por este motivo, para o cálculo das emissões dos veículos híbridos foram considerados os percentuais de reduções das emissões encontrados nestes estudos aplicados as emissões dos veículos convencionais.
- Para este estudo não foi realizada simulação matemática para determinação das concentrações de Ozônio nos cenários hipotéticos, o que seria um estudo de grande relevância, pois este poluente é considerado crítico pelos órgãos públicos, por ser secundário e de difícil controle.

## 1- REVISÃO DA LITERATURA

### 1.1- A atmosfera

A atmosfera é uma mistura de gases que envolve a Terra devido a sua força gravitacional, sendo responsável por regular o clima e proteger a superfície terrestre das radiações ultravioletas oriundas do Sol e das radiações cósmicas, absorvendo-as quase inteiramente (REBELLATTO, 2005). De acordo com a temperatura, pressão e concentração de substâncias características, a atmosfera subdivide-se em alta (termosfera) atmosfera, média (estratosfera e mesosfera) e baixa (troposfera), conforme a Figura 1 (REBELLATTO, 2005; BRAESICKE, 2015).

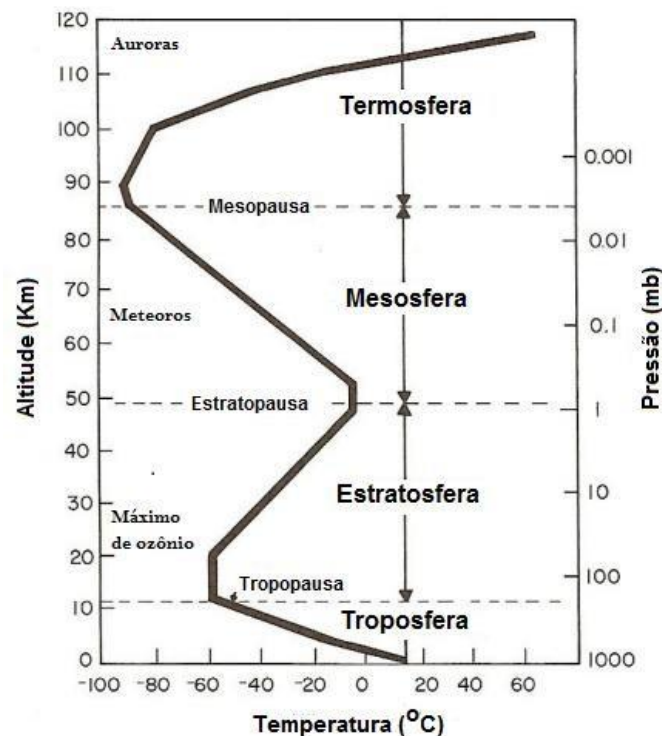


Figura 1: Perfil médio de temperatura das camadas da atmosfera, em função da pressão e altitude.  
Fonte: Adaptado de Braesicke, 2015

A termosfera (em grego “termo” significa quente) inicia-se em aproximadamente 85Km de altitude e funde-se no espaço. As temperaturas começam a aumentar rapidamente e os processos físicos existentes como a difusão molecular, ionização e arrasto iônico tornam-se fatores importantes na determinação do comportamento da camada (BRAESICKE, 2015). Nesta camada existem os sistemas de comunicação via satélite, sistemas de localização de direção, posicionamento baseado no espaço, navegação, sensores remotos e

sistemas de radar (BRAESICKE, 2015).

Abaixo da termosfera, encontra-se a mesosfera, parte superior da atmosfera média, que varia, aproximadamente, de 50 a 85Km acima da superfície da Terra e em 85Km encontra-se a mesopausa, camada que a separa da termosfera, também chamada de alta atmosfera. (REBELLATTO, 2005; BRAESICKE, 2015). A temperatura na mesosfera diminui com altura, podendo atingir  $-100^{\circ}\text{C}$  no limite superior. É a camada mais fria da atmosfera, sendo possível congelar o vapor de água em nuvens de gelo e, além disso, é a camada onde os meteoros, se queimam ao adentrarem na atmosfera da Terra (REBELLATTO, 2005).

Variando entre 10 e 50Km, está a estratosfera, que é parte inferior da atmosfera média (BRAESICKE, 2015). A temperatura da estratosfera é constante até aproximadamente 30Km, onde encontra-se a camada de ozônio, o que faz a temperatura aumentar até o alto da estratosfera, podendo alcançar temperaturas perto de  $0^{\circ}\text{C}$  (BRAGA et al., 2002). Esta ascensão na temperatura é causada pela absorção da radiação ultravioleta (UV) provenientes do sol através das moléculas de ozônio, protegendo, assim, a superfície terrestre. Este perfil de temperatura e radiação causa condições atmosféricas muito estáveis pela falta de turbulência do ar, fenômeno que é intenso na troposfera. Conseqüentemente, a estratosfera está quase completamente livre das nuvens ou de outros fatores climáticos, favorecendo os voos de longa-distância (REBELLATTO, 2005; BRAESICKE,2015).

A camada mais baixa da atmosfera é a troposfera que se estende desde a superfície até 8 -17 Km, variando de altura de acordo com a latitude, ou seja, é mais baixa nos polos e mais alta nas regiões equatoriais/latitudes tropicais (BRAGA et al., 2002; BRAESICKE, 2015). A temperatura desta camada também varia em função da altitude, diminuindo  $6,5^{\circ}\text{C}$  a cada 1Km de altura, em média. Nesta camada ocorrem os fenômenos climáticos, ou seja, movimentos de convecção (vertical) e advecção (horizontal), o que proporciona a mistura desta camada. Os poluentes emitidos próximos à superfície terrestre são transportados, dispersos, transformados e removidos dentro desta camada (BRAESICKE, 2015; LEE, 2018).

A troposfera é bem misturada e sua composição é 78% de  $\text{N}_2$ , 21% de  $\text{O}_2$ , 1% de Ar e 0,036% de  $\text{CO}_2$ , quantidades variáveis de vapor de água, dependendo da altitude temperatura e quantidades mínimas de vários gases traços (ATKINSON, 2000).

Na baixa troposfera encontra-se a Camada Limite Atmosférica (CLA), a qual é

variável no tempo e no espaço, oscilando de 100 a 3000 metros de altitude em relação à superfície terrestre e, acima desta, o restante do ar na troposfera corresponde à atmosfera livre, conforme mostra a Figura 2 (STULL, 1998; ANISIMOV et al., 2017).

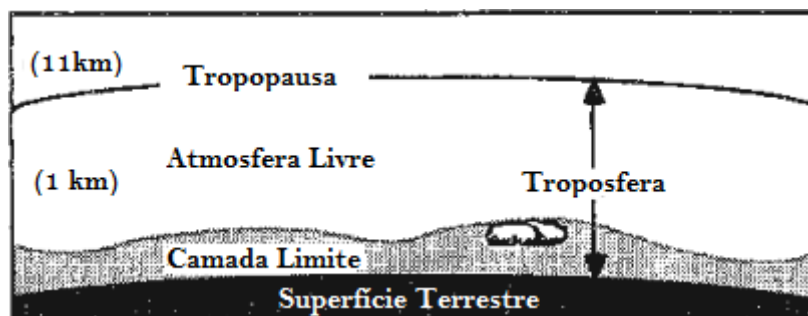


Figura 2: Divisão da troposfera: Camada Limite e Atmosfera Livre  
Fonte: Adaptado de STULL, 1998

Na Camada Limite Atmosférica (CLA) ocorrem os fenômenos ligados à dispersão de poluentes atmosféricos, uma vez que nesta região localiza-se a maior parte das fontes emissoras de gases e material particulado, as quais podem ser naturais ou antropogênicas. Os poluentes atmosféricos, quando emitidos, sofrem suas primeiras transformações químicas e fotoquímicas, devido às variáveis meteorológicas, temperatura, umidade do ar, pressão, radiação solar, direção e velocidade do vento (LEE, 2018). Já na atmosfera livre não ocorre turbulência, uma vez que se encontra fora destas regiões instáveis.

A dispersão dos poluentes está intimamente relacionada às condições climáticas, que alteram o comportamento da CLA. Quando o tempo está ensolarado e quente, do meio dia solar ao pôr do sol, a superfície terrestre é aquecida, formando uma camada de ar quente na superfície e movimentos verticais ascendentes, de modo que o ar quente sobe, transferindo calor, umidade e poluentes para as camadas superiores (TORRACA, 2012). Esta camada é a chamada Camada de Mistura (CM). Devido aos movimentos verticais ascendentes que ocorrem na CM, as melhores condições para dispersão dos poluentes estão associadas a episódios de forte instabilidade e a uma CM profunda, já as mais críticas ocorrem quando surgem inversões térmicas próximo da superfície de uma CLA estável (YANG et al., 2017).

O fenômeno da inversão térmica acontece, geralmente no inverno, no final da madrugada e início das manhãs, quando as noites são frias com baixa umidade e

poucas nuvens e o dia seguinte tende a ser quente. Nesta situação a massa de ar frio da noite fria, se eleva bruta mente levando consigo uma camada de ar quente, que começou a se formar no início da manhã com o aquecimento do solo. No entanto, a inversão térmica ocorre várias vezes na troposfera, porém só é percebida, quando a altura da camada limite da atmosfera está baixa, fazendo com que os poluentes presentes no ar e mais próximos do solo fiquem confinados nesta camada de ar fria, dificultando a dispersão (VALLERO, 2008).

## **1.2- Poluição Atmosférica**

As atividades humanas são as maiores responsáveis pelos danos causados a atmosfera, no entanto, muitos episódios de poluição do ar podem ser causados pelos fenômenos naturais. Dessa forma, as fontes de emissões podem ser classificadas de acordo com suas origens: antrópicas ou naturais.

As fontes naturais, podem ser qualquer processo proveniente da natureza, como por exemplo, atividades vulcânicas, as quais lançam para a atmosfera grandes quantidade de poeiras, cinzas, enxofre e cloro; incêndios florestais, que são responsáveis pela emissão de monóxido e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), bem como fumos e cinzas; aerossóis dos oceanos; a ação dos ventos, que podem transportar areia e pó a grandes distâncias, contribuindo para a presença de partículas na atmosfera e pólen produzido pelas plantas, que em grandes quantidades e pela ação do vento podem causar problemas de alergia e outros respiratório (SEINFELD e PANDIS, 2006; BAIRD, 2011).

As fontes antropogênicas que resultam das atividades humanas, podem se dividir em fontes estacionárias/fixas e móveis. As fontes fixas enquadram-se as fábricas, centrais termoelétricas, incineradoras. Nas fontes móveis estão os meios de transportes automotores, que necessitam queimar combustível para sua locomoção (automotivos, aéreos e marítimos) (SEINFELD e PANDIS, 2006; UEDA e TOMAZ, 2011).

Segundo o Balanço Energético Nacional – BEN (2017), o setor de transporte é um dos maiores consumidores de derivados de petróleo do Brasil, tendo consumido 59,8% em 2016, estando muito à frente da indústria, a qual consumiu apenas 9,9% no mesmo ano. Além disso, dentro o setor de transporte, o modo rodoviário aparece em destaque em relação aos demais modais (EPE,2017).



A queima do combustível, em condições ideais, ou seja, com relação ar/combustível equilibrada, resulta na combustão completa, com a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). No entanto, como na prática, a relação ar/combustível não é a ideal para proporcionar somente a combustão completa, são formados também produtos da combustão incompleta, tais como: Monóxido de carbono (CO), Óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), Óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ), Aldeídos ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}$  ou RCHO), Material Particulado (MP), Carbono elementar (C), Hidrocarbonetos Totais (HCT), Metano ( $\text{CH}_4$ ) e Hidrocarboneto não metano (NMHC). A emissão dos produtos da combustão incompleta depende do combustível utilizado, do tipo de motor, da idade do veículo, da regulagem dos pneus, do uso de ar condicionado, do estado de manutenção do veículo e da velocidade aplicada (INEA, 2016).

Diante disto, o material particulado fino ( $\text{MP}_{2,5}$ ), os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) são poluentes primários emitidos, principalmente, por veículos pesados movidos à combustível diesel (INEA, 2016). Já o CO e os aldeídos são gases emitidos principalmente por veículos leves, como automóveis e motos, movidos à gasolina (MMA, 2011; INEA, 2016).

Os hidrocarbonetos (HC) são emitidos pelo escapamento dos veículos e, também, pela evaporação dos combustíveis e dos óleos lubrificantes, mesmo quando os veículos não estão em funcionamento (UEDA e TOMAZ, 2011; MMA, 2011; INEA, 2016).

Segundo a Resolução CONAMA nº 491/2018:

Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade.

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados de acordo com sua formação, sendo divididos em poluentes primários e secundários.

Poluentes primários são aqueles emitidos diretamente das fontes emissoras e estão presentes na atmosfera na forma em que são emitidos. Pode-se citar: poeiras, dióxido de enxofre, gás sulfídrico, monóxido e dióxido de carbono, monóxido e dióxido de nitrogênio, compostos orgânicos, compostos halogenados e compostos

radioativos(FINLAYSON-PITTS e PITTS, 1997).

Os poluentes secundários são os produzidos na atmosfera, pelas reações entre dois ou mais poluentes. Como exemplo pode-se citar o ozônio que é formado por meio de reações considerando os poluentes primários NO<sub>x</sub>, COVs, na presença de luz solar (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 1997).

#### 1.2.1- Material Particulado (MP)

O material particulado refere-se a misturas de partículas sólidas e gotas de líquidos suspensas no ar que podem ser originadas por processos naturais, como spray marinho, pólenes, poeiras e erupções vulcânicas, ou processos industriais e atividades humanas, como queima de combustíveis fósseis, incêndios florestais e agrícolas e fumaça de cigarro (QUEIROZ et al., 2007).

Essas partículas são classificadas de acordo com seu tamanho aerodinâmico. As partículas totais em suspensão (PTS) possuem diâmetro aerodinâmico menor que 100µm, são geradas por processos mecânicos, como ressuspensão de poeira do solo pelo vento, sal marinho, cinzas de combustão e emissões biogênicas naturais (QUEIROZ et al., 2007). Por estas partículas serem maiores e pesadas, possuem menos tempo de residência na atmosfera, o que faz com que se depositem próximo da fonte que a gerou (SEINFELD e PANDIS, 2006; QUEIROZ et al., 2007). Em relação à saúde, este MP é menos prejudicial, uma vez que consegue ser expelido pelas vias aéreas superiores do sistema respiratório, não penetrando tão profundamente no organismo (BAIRD,2011).

As partículas inaláveis (MP<sub>10</sub>), cujo diâmetro está compreendido no intervalo entre 2,5 e 10 µm podem ser depositadas na parte superior do sistema respiratório, região do corpo que possui um muco que é constantemente renovado e que auxilia na remoção deste poluente (WHO, 2006).

As partículas finas ou respiráveis (MP<sub>2,5</sub>) possuem diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm, sendo capazes de penetrar mais profundamente nos alvéolos pulmonares, dificultando as trocas gasosas e carreando minerais, substâncias tóxicas e microrganismos como fungos e bactérias, causando sérias doenças respiratórias (QUEIROZ et al., 2007).

Estas partículas finas podem ser consideradas como poluente primário, quando geradas a partir do processo de combustão de combustíveis fósseis (QUEIROZ et al., 2007), bem como poluente secundário, quando frações

dessepoluente são formadas a partir de reações químicas na atmosfera (QUEIROZ et al., 2007; CETESB, 2016).

### 1.2.2- Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro liberado pela combustão incompleta, ou seja, queima em condições de pouco oxigênio, de combustíveis contendo carbono (lenha, carvão vegetal e mineral, gasolina, querosene, óleo diesel, gás) (BAIRD, 2011).

O maior perigo à saúde está associado à sua inalação, pois é um gás que se combina com a hemoglobina do sangue, formando o carboxihemoglobina, que por sua vez, evita a ligação do oxigênio à hemoglobina durante o processo de respiração, reduzindo a capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue até os órgãos vitais e o resto do organismo (BAIRD, 2011). A afinidade da hemoglobina por CO é cerca de 320 maior que do oxigênio, e uma vez ligado a uma hemoglobina, é reduzida a velocidade de liberação das moléculas de oxigênio para as células. Alguns estudos revelaram que indivíduos expostos a altas concentrações de CO em um curto período de tempo apresentaram funções mentais reduzidas, assim como exposição por longos períodos a baixas concentrações, isto porque, o cérebro, assim como o coração é um órgão que requer muita quantidade de oxigênio para o seu perfeito funcionamento (BAIRD, 2011). A exposição à altas concentrações de CO pode resultar em fadiga, dores no peito, dores de cabeça, náuseas, asfixia e até morte, caso a exposição persista por longos períodos (BAIRD, 2011).

Neste sentido, os veículos automotores são os principais responsáveis pela emissão deste poluente, principalmente os veículos do ciclo Otto, como os automóveis e motocicletas. Além disso, este poluente pode ser emitido por processos industriais, como a fabricação de produtos químicos e por fontes naturais como os incêndios florestais (MMA, 2011; INEA, 2016).

Geralmente, o comportamento das concentrações médias horárias anuais de CO são mais elevadas nas primeiras horas do dia e entre 18:30h e 22:30h, períodos de fluxo intenso de veículos, causado pelo deslocamento casa-trabalho da população. Por este motivo, estas horas do dia estão sujeitas a congestionamentos, que por sua vez, contribuem para o aumento das emissões de poluentes atmosféricos no ar (SOARES et al., 2018). A Figura 3 ilustra o perfil das

concentrações de CO no bairro de Copacabana do município do Rio de Janeiro, cuja a principal fonte de poluição atmosférica são os veículos.

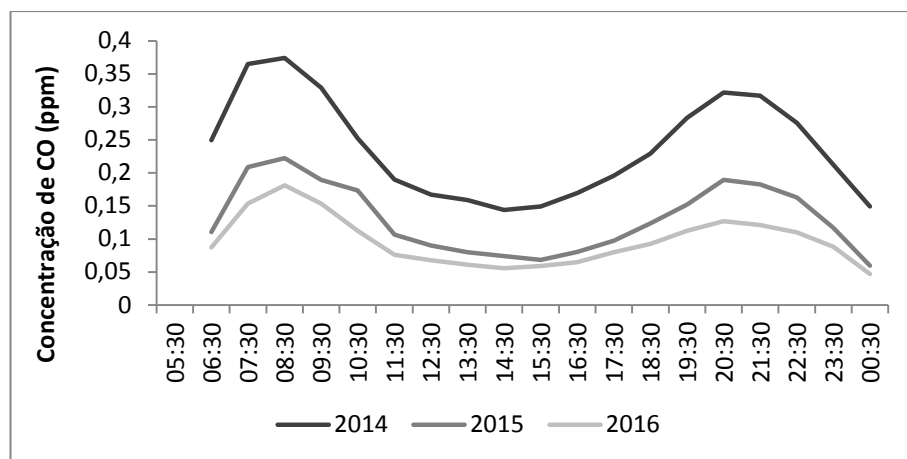


Figura 3: Perfil das concentrações médias horárias anuais de CO (ppm) no bairro de Copacabana no Rio de Janeiro.

Fonte: Adaptado de Soares, 2018

### 1.2.3- Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)

O SO<sub>2</sub> é um gás tóxico e incolor, que pode ser emitido, majoritariamente, por fontes naturais, como vulcões e pela oxidação de gases sulfurados decorrente da decomposição das plantas (BAIRD, 2011; CETESB, 2016). Como fontes antropogênicas, pode-se citar a combustão de combustíveis fósseis que contenham em sua composição o enxofre (S), em especial o diesel (BRAGA et al., 2005).

De todo o enxofre queimado nesses combustíveis, pelo menos 90% é emitido na forma de SO<sub>2</sub>, e pequenas proporções de alguns sulfatos. Uma vez lançado na atmosfera, este gás reage com OH formando ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), que por sua vez, dá origem ao ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), causador principal da chuva ácida, um importante problema ambiental (SEINFELD e PANDIS, 2006; BAIRD, 2011).

A inalação do SO<sub>2</sub>, mesmo em baixas concentrações, pode ocasionar problemas no sistema respiratório, podendo ser desde pequenas inflamações nas vias aéreas superiores até graves inflamações nas mucosas do trato respiratório. Estas inflamações podem afetar diretamente a remoção de partículas que possam ser inaladas na respiração (SEINFELD e PANDIS, 2006; BAIRD, 2011).

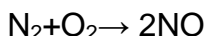
No decorrer dos anos ocorreram várias alterações no teor de enxofre nos combustíveis, seguindo as fases de emissão estabelecidas pelo PROCONVE –

Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, criado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da Resolução nº 18, em 1986, com o objetivo de redução das emissões de poluentes de veículos novos, com foco na melhoria da qualidade do ar.

Segundo Baird (2011) a indústria do petróleo emite o dióxido de enxofre para a atmosfera diretamente como SO<sub>2</sub> ou indiretamente como H<sub>2</sub>S (sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico), quando o óleo é refinado e o gás natural é purificado antes da distribuição (BAIRD, 2011).

#### 1.2.4- Óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub>)

Os compostos de nitrogênio se formam durante os processos de combustão. O nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>) presente na própria atmosfera é relativamente não-reactivo sob condições normais atmosféricas. Entretanto, quando exposto à altas pressões e temperaturas, reage com o oxigênio (O<sub>2</sub>), gerando o óxido nítrico, um gás incolor e inodoro e é essencialmente insolúvel em água (VALLERO, 2008).



Essas condições de alta temperatura/alta pressão ocorrem no interior dos motores de combustão interna. Portanto, para que ocorra a combustão dentro do motor é necessária uma parcela de ar, que contém N<sub>2</sub> e combustível. Neste sentido, no interior do motor o N<sub>2</sub> é transformado em NO, que quando emitido pelo escapamento dos veículos é rapidamente convertido em dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Por isto, considera-se óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) o somatório de NO e NO<sub>2</sub> (VALLERO, 2008; BAIRD, 2011).

Ambos são prejudiciais e tóxicos aos seres humanos, embora as concentrações atmosféricas de NO estejam, normalmente, muito abaixo das concentrações que possam conduzir algum tipo de efeito adverso à saúde (VALLERO, 2008).

Condições de alta temperatura e pressão também podem existir em caldeiras de usinas de energia, perto de chamas de queimadores em câmaras de combustão, e outros tipos de indústrias (VALLERO, 2008).

#### 1.2.5- Compostos Orgânicos Voláteis (COV)

Os compostos orgânicos voláteis - COV são compostos que tem a capacidade de vaporizar/evaporar, sob condições normais (25°C e 1 atm), a pressão de vapor

acima de 10 Pa e temperatura de ebulição abaixo de 260°C (CETESB, 2016; GERALDINO et al., 2017). Além disso, os COVs devem possuir até 15 átomos de carbono, que após evaporado, permanece na atmosfera e participa de diversas reações químicas e fotoquímicas complexas (CETESB, 2016).

Os COVs são emitidos por atividades antropogênicas, tais como processos evaporativos de combustíveis e solventes orgânicos, pela queima incompleta de combustíveis automotivos e pelos processos industriais.

Entretanto, há COVs emitidos, em grandes quantidades, por processos naturais (biogênicos), como o isopreno (2-metil-1,3-butadieno). Estes processos são responsáveis pelo crescimento, defesa e reprodução das espécies de vegetais (GERALDINO et al., 2017).

Os COVs possuem grande diversidade de funções químicas, incluindo carbonilas, ácidos carboxílicos, álcoois, alcanos, alquenos, ésteres e compostos aromático (GERALDINO et al., 2017).

A exposição à alguns tipos de COVs podem afetar significativamente a saúde humana, podendo causar desde irritação nos olhos, nariz e trato respiratório como efeitos deletérios no DNA humano e até câncer, como exemplo do benzeno e do 1,3-butadieno (RUCHIRAWAT et al., 2010; GERALDINO, 2017).

Portanto, os COVs em uma atmosfera poluída são responsáveis por efeitos diretos e indiretos ao meio ambiente, diminuindo a qualidade do ar e ainda sendo precursores de poluentes secundários, como o ozônio (CETESB, 2016).

#### 1.2.6- Ozônio (O<sub>3</sub>)

O ozônio - O<sub>3</sub> é um poluente secundário formado na baixa troposfera a partir das reações fotoquímicas, considerando os poluentes primários precursores, NO<sub>x</sub>, COVs, emitidos por fontes naturais e antropogênicas (MARTINS et al., 2015; ATKINSON, 2000; SHARMA et al., 2017)

A velocidade das reações aumenta com a temperatura e a incidência da radiação solar (SEINFELD e PANDIS, 2006; BAIRD, 2011). Por este motivo, as mais altas concentrações de O<sub>3</sub> são observadas no período do verão, onde a radiação solar e a temperatura são mais intensas, fato este que corrobora para as frequentes ultrapassagens aos padrões de O<sub>3</sub> estabelecidos pelos órgãos ambientais ao redor do mundo.

Segundo os Relatórios de Qualidade do Ar publicados, anualmente, pelo Instituto Estadual do Ambiente – INEA, a maioria das estações de monitoramento de qualidade do ar do Estado do Rio de Janeiro apontou frequentes violações ao padrão nacional de qualidade do ar para ozônio estabelecido pela Resolução CONAMA nº 03/90, principalmente as estações da Região Metropolitana. Este fato é notório ao se observar os Relatórios de 2007 a 2015, publicados no site, sendo o Ozônio o poluente mais crítico do Estado (INEA, 2007; INEA, 2008; INEA, 2009; INEA, 2011; INEA, 2012; INEA, 2013; INEA, 2014; INEA, 2015).

Outros autores também observaram altas concentrações de O<sub>3</sub>, levando a ultrapassagens ao padrão de qualidade do ar, em outras cidades do mundo. Segundo Wang et al. (2017), altas concentrações de ozônio têm sido observadas nos principais centros urbanos da China, como *Jing-Jin-Ji*, delta do Rio Yangtze e delta do Rio das Pérolas, excedendo o padrão de qualidade do ar por 100 a 200% vezes (WANG et al., 2017).

De forma a controlar as concentrações do O<sub>3</sub>, é necessário compreender a sua formação, juntamente com os poluentes primários, seus precursores.

A química de formação do ozônio é bastante complexa e não linear. Primeiramente, o monóxido de nitrogênio - NO, é emitido diretamente para atmosfera por meio de processos de combustão nitrogenada. Na atmosfera, o NO sofre oxidação e forma o dióxido de nitrogênio - NO<sub>2</sub>, que por sua vez também pode ser emitido diretamente das fontes de combustão, no entanto a maior parte é formada pela oxidação do NO (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 1997).

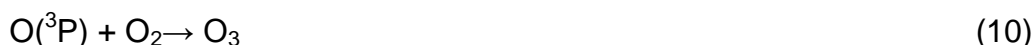
Na troposfera, a formação do ozônio começa sob a luz solar com a dissociação fotoquímica do dióxido de nitrogênio –NO<sub>2</sub>, chamada de fotólise, em comprimentos de onda menores que 424nm, Equação (1). (FINLAYSON-PITTS E PITTS, 1997; MARTINS et al., 2015; SILVA et al., 2016; WANG et al., 2017).



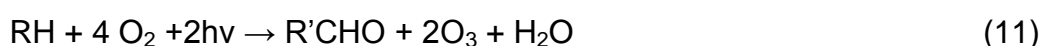
Seguindo a Equação (2), o ozônio é formado pela reação do oxigênio atômico Oe oxigênio molecular - O<sub>2</sub> (WANG et al., 2017). Ressalta-se que ainda ocorre um fluxo de ar contendo O<sub>3</sub> natural transferido da estratosfera para a troposfera,

contribuindo para o ozônio troposférico (FINLAYSON-PITTS e PITTS, 1997). Na reação representada pela Equação (3) o ozônio reage com o NO, formado pela fotólise do NO<sub>2</sub>, e forma o NO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, havendo assim o consumo do ozônio.

As equações de (1) a (3) representam uma atmosfera com ausência dos COVs, onde estas espécies NO, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> se equilibram, apresentando baixa produção de ozônio. Entretanto, na presença dos COVs o equilíbrio destas espécies é desestabilizado, devido à uma sequência de reações dos COVs com radicais livres presentes na atmosfera, como por exemplo o radical hidroxila – OH, alquilperoxi - RO<sub>2</sub> e hidroperoxi - HO<sub>2</sub> (MARTINS et al., 2015; WANG et al., 2017). Estas reações fazem com que o NO seja convertido para NO<sub>2</sub> sem que uma molécula de ozônio seja consumida. Desta forma uma nova molécula de NO<sub>2</sub> está disponível para iniciar o processo fotoquímico de formação do ozônio conforme mostra as equações de (4) a (11), representam esta situação (MARTINS et al., 2015; WANG et al., 2017).



Sendo o resultado,



Os COVs presentes na atmosfera reagem com os radicais livres OH, HO<sub>2</sub> e RO<sub>2</sub> (Equação 4, 5 e 7), que por sua vez oxidam o NO à NO<sub>2</sub> (Equação 6 e 8), estas reações são chamadas de "ciclo do radical ROx" (OH+HO<sub>2</sub>+RO<sub>2</sub>). As reações representadas pelas equações 1, 6 e 8, estabelecem um eficiente "ciclo do NOx", o qual produz o ozônio sem o consumir o NOx (Figura 4).



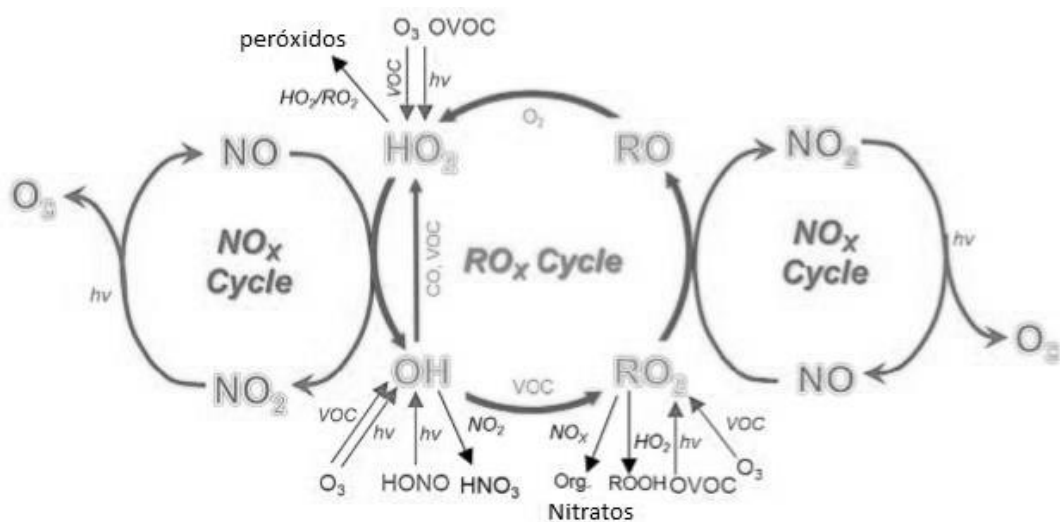


Figura 4: Esboço do mecanismo de formação de ozônio fotoquímico e acoplamento de "ciclo ROX" e "ciclo NOX". Os caminhos de reação mostrados em vermelho, verde, azul e preto referem-se ao "ciclo NOX", "ciclo ROX", incluindo processos de formação e término dos radicais, respectivamente.  
Fonte: WANG et al., 2017

O processo de formação de ozônio pode ser limitada pelas concentrações de COVs e/ou NO<sub>x</sub>, ou seja depende da relação COV/NO<sub>x</sub> (SEINFELD, 1989; MARTINS et al., 2015).

Quando essa relação é baixa (a ordem de 5 ppmC/ppm), a formação do ozônio é limitada pela concentração dos orgânicos disponíveis, ou seja, em casos de altas concentrações de NO<sub>x</sub> em relação aos COVs, as concentrações de O<sub>3</sub> irão reduzir rapidamente, caso haja a redução dos COVs e vice versa (SEINFELD, 1989; MARTINS et al., 2015).

Quando essa relação é alta (em torno de 20 ppmC / ppm, onde ppmC), a formação do O<sub>3</sub> é limitada pelo NO<sub>x</sub>, ou seja, ocorre em casos onde a concentração dos COVs é elevada em comparação ao NO<sub>x</sub>, e por meio da redução do NO<sub>x</sub> é possível controlar as concentrações de O<sub>3</sub> (SEINFELD, 1989; MARTINS et al., 2015).

Regiões com concentrações mais baixas de NO<sub>x</sub> favorecem a formação de ozônio, uma vez que mais radicais OH ficam disponíveis para reagir com os COVs, continuando assim, a formação de ozônio, sem consumo do mesmo. Já em regiões com baixas concentrações de COV, a concentração de O<sub>3</sub> tende a reduzir, uma vez que reduzirá as reações dos COVs com os radicais livres (MARTINS et al., 2015).

Esta relação COV/NO<sub>x</sub> pode ser representada por meio de Isopletras de

ozônio, Figura 5, que podem ser obtidas por modelos fotoquímicos. A Figura 5 representa as concentrações máximas de ozônio em partes por milhão (linhas) em função das concentrações iniciais de COVs e NOx. A mesma foi gerada usando o modelo EKMA da *United States Environmental Protection Agency* – US EPA, sob condições padrões.

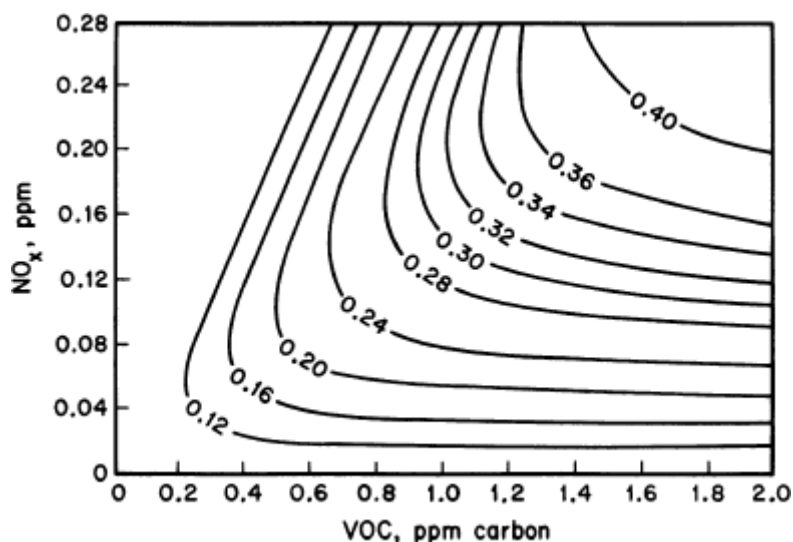


Figura 5: concentrações máximas de ozônio em partes por milhão (linhas) em função dos níveis de COVs e NOx  
 Fonte: SEINFELD, 1989

Este tipo de gráfico auxilia nas estratégias de controle das concentrações de ozônio à longo prazo. Como pode ser percebido, estratégias que seguem a crista em direção à origem é menos eficaz na redução do ozônio do que as que favorecem descidas mais acentuadas, nas condições de altas concentrações de NOx e COV (SEINFELD, 1989).

O ozônio é um dos componentes mais tóxicos da mistura fotoquímica de uma atmosfera poluída. Muitos estudos epidemiológicos observaram efeitos significativos da exposição ao O<sub>3</sub> na saúde humana. Segundo estes estudos, por ser um poluente oxidante, altas concentrações de O<sub>3</sub> resultam em inflamações nas membranas das mucosas respiratórias e outros tecidos pulmonares, bem como causa diversos danos epitelial nos pulmões, podendo causar suscetibilidade à infecções respiratórias bacterianas (FOSTER et al., 1987; DEVLIN et al., 1991; BALMES et al., 1996; FOSTER et al., 1996; GRYPARIS et al., 2004; WANG et al., 2017).

Exposições a concentrações elevadas pode levar ao aumento das internações hospitalares por pneumonia, doença pulmonar obstrutiva crônica, asma, rinite alérgica e outras doenças respiratórias, uma vez que reduz a função pulmonar, por

alterações nos volumes e fluxo pulmonar (GRYPARIS et al., 2004; WANG et al., 2017).

Grypariset al. (2004) investigaram os efeitos das concentrações de ozônio troposférico nos índices de mortalidade de 1990 a 1993 em 23 cidades da Europa. Os autores observaram que no inverno não houve impactos significativos associando concentrações de ozônio à mortalidade. No entanto, no verão, observou-se aumento na concentração de ozônio, que esteve associado a um aumento de 0,33 % no número total de mortes diárias, bem como 0,45 % no número de mortes cardiovasculares e 1,13% no número de mortes respiratórias (GRYPARIS et al., 2004).

Altos níveis de ozônio não têm impacto somente sobre a saúde humana, mas também na vegetação, produtividade agrícola e até danos materiais, incluindo edifícios e propriedades culturais (KIM et al., 2004; WANG et al., 2017).

O ozônio pode ser facilmente transportado para regiões distantes do local de sua formação, bem como ser formado em áreas rurais afastadas dos grandes centros urbanos, afetando assim as culturas agrícolas e as vegetações (WANG et al., 2017).

O ozônio afeta a vegetação devido a sua alta capacidade oxidativa, fazendo com que o ozônio reaja com o gás eteno produzido pelas plantas, produzindo radicais livres danosos às plantas como OH, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Estes radicais livres atacam a composição, a estrutura e a função da membrana plasmática. Os sintomas mais comuns da lesão foliar são as alterações na pigmentação, como falta de clorofila e senescência prematura, envelhecimento precoce das células, sintomas estes, que afetam o crescimento das plantas (WANG et al., 2017).

Segundo Feng et al. (2015), uma cultura de arroz exposta a 62 ppb de ozônio no campo da China, pode reduzir o seu rendimento de 14% a 20%.

Já o trigo cultivado na primavera, há perdas previstas para 2020, variando entre 2% e 29%. Na mesma estação, as perdas do arroz podem ficar entre 3,7% e 10%, as perdas do milho, no verão, podem chegar a 64% e a soja a 45% até 2020, embora essas estimativas também sejam altamente variáveis (FENG et al., 2015).

### **1.3- Aspectos legais sobre poluição atmosférica de origem veicular**

Diante do aumento da poluição atmosférica, principalmente nas regiões metropolitanas, decorrente do acelerado crescimento urbano e industrial brasileiro e da frota de veículos automotores, foi necessário estabelecer estratégias para o controle, preservação e recuperação da qualidade do ar, válidas para todo o Território Nacional, conforme previsto na Lei nº 6.938, de 31/08/81, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1989).

Neste contexto, em 05 de junho de 1989 foi publicado o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR, por meio da Resolução CONAMA nº 05/1989. Seu objetivo foi limitar os níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica, visando : a) uma melhoria na qualidade do ar; b) o atendimento aos padrões estabelecidos; c) o não comprometimento da qualidade do ar em áreas consideradas não degradadas, permitindo o desenvolvimento econômico e social do País de forma ambientalmente segura (BRASIL,1989).

O PRONAR deu origem à ações de curto, médio e longo para que os controles da qualidade do ar , a nível federal, pudessem ser concretizados (BRASIL, 1989).

As ações de curto prazo foram a definição dos limites de emissão para fontes poluidoras prioritárias; definição dos padrões de qualidade do ar; enquadramento das áreas na classificação de usos pretendidos; apoio a formulação dos Programas estaduais de controle de poluição do ar.

As ações de médio prazo destacaram-se a continuação da definição dos demais limites de emissão para fontes poluidoras; implementação da rede nacional de monitoramento da qualidade do ar; criação do inventário nacional de fontes e emissões.

Como ações de longo período destacaram-se a avaliação e retro-avaliação do PRONAR, sendo a capacitação laboratorial e de recursos humanos metas traçadas para o curto prazo que se estendeu até ao longo prazo.

Como instrumentos do PRONAR estão os Limites Máximos de Emissão; os Padrões de Qualidade do Ar; PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores; PRONACOP - Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial; Programa Nacional de Avaliação da Qualidade do Ar; Programa Nacional de Inventário de Fontes Poluidoras do Ar ; Programas Estaduais

de Controle da Poluição do Ar (BRASIL, 1989).

### 1.3.1- Padrões de qualidade do ar

Os padrões de qualidade do ar são instrumentos importantes na gestão de riscos e políticas ambientais de um país, os quais devem ser estabelecidos com o objetivo de proteger a saúde pública de seus cidadãos (WHO, 2006).

A Organização Mundial da Saúde (OMS), pertencente ao sistema da Organização das Nações Unidas (ONU), faz algumas recomendações quanto às concentrações ambientais de certos poluentes, com o objetivo de subsidiar a gestão ambiental de cada país, proporcionando a definição e alcance de objetivos de gestão da qualidade do ar para uma maior proteção à saúde (WHO, 2006).

Estas recomendações podem ser aplicadas globalmente, no entanto, fica a critério de cada país estabelecer seus próprios padrões de qualidade do ar em função de suas necessidades e características.

Dessa forma, os valores-guia recomendados pela OMS para os poluentes atmosféricos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Padrões de Qualidade do Ar recomendados pela Organização Mundial de Saúde

<b>Poluentes</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>OMS</b>
CO (Monóxido de Carbono) $\mu\text{g m}^{-3}$	1h	30
	8h	100
SO <sub>2</sub> (Dióxido de Enxofre) $\mu\text{g m}^{-3}$	10 min	500
	24h	20
O <sub>3</sub> (Ozônio) $\mu\text{g m}^{-3}$	8h	100
NO <sub>2</sub> (Dióxido de Nitrogênio) $\mu\text{g m}^{-3}$	1h	200
	MAA	40
PM <sub>10</sub> (Material Particulado < 10) $\mu\text{g m}^{-3}$	24h	50
	MAA	20
PM <sub>2,5</sub> (Material Particulado < 2,5) $\mu\text{g m}^{-3}$	24h	25
	MAA	10

Fonte: (WHO, 2006)

As diretrizes recomendadas pela OMS consideram a heterogeneidade e particularidade de cada país, deste modo, reconhece que, ao formular metas depolítica, os governos devem considerar cuidadosamente suas próprias

características locais antes de usar as diretrizes diretamente como padrões baseados em leis (WHO, 2006).

As principais agências ambientais do mundo estabeleceram seus padrões de qualidade do ar, a exemplo da *Environmental Protection Agency* (EPA) e da agência do estado da Califórnia (CARB), ambas nos Estados Unidos, bem como as Normas Oficiais Mexicanas (NOM), os padrões de qualidade do ar da China, a Lei do Ar da Índia, e os padrões de qualidade da União Européia (MARTINS et al., 2017).

Os Estados Unidos da América – EUA definiram os seus padrões de qualidade do ar a nível nacional, por meio da Agência de Proteção Ambiental Americana (US EPA), criada em 1970(EPA,2018).

A EPA especifica através do *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS) os níveis máximos permitidos para diversos poluentes atmosféricos, de modo que a máxima concentração de um poluente é especificada em função de um período médio de tempo. Atualmente, a legislação federal dos EUA estabelece padrões de qualidade do ar para CO, chumbo, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub> e SO<sub>2</sub>, cujos valores estão na Tabela 2. Vale ressaltar que nos EUA, os Estados têm autonomia para estabelecer seus próprios padrões de qualidade do ar, desde que mais rigorosos do que os nacionais (EPA, 2018).

Tabela 2: Padrões nacionais de qualidade do ar em vigor nos EUA, estabelecidos pela EPA

Poluentes	Primário e/ou Secundário (*)	Tempo de Amostragem	Concentração - EUA	Observação
CO	Primário	1h 8h	35 ppm 9 ppm	Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano
Chumbo	Primário e Secundário	Média móvel trimestral	0,15 $\mu\text{g m}^{-3}$	Não deve ser ultrapassado
NO <sub>2</sub>	Primário	1h	100 ppb	Percentil 98 sobre média de 3 anos
	Primário e Secundário	Anual	53 ppb	Média Anual
O <sub>3</sub>	Primário e Secundário	8h	0,070 ppm	Quarta maior máxima média diária de 8 horas anual sobre médias de 3 anos
SO <sub>2</sub>	Primário	1h	75 ppb	Percentil 99 das máximas de 1h diária(s), média de 3 anos
	Secundário	3h	0,5 ppm	Não deve ser excedido mais que uma vez por ano
MP <sub>10</sub>	Primário e Secundário	24h	150 ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Não deve ser excedido mais de uma vez por ano sobre média de 3 anos
MP <sub>2,5</sub>	Primário	Anual	12 ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Média de 3 anos
	Secundário	Anual	15 ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Média anual sobre média de 3 anos
	Primário e Secundário	24h	35 ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Percentil 98 sobre média de 3 anos

Fonte: EPA (2018)

No Brasil, com base no PRONAR, foi necessário a criação dos Padrões de Qualidade do Ar a nível nacional, os quais tiveram como referência as leis norte-americanas.

Sendo assim, os padrões brasileiros de qualidade do ar foram estabelecidos através da Portaria Normativa IBAMA nº 348 de 14/03/1990, transformados na

Resolução CONAMA nº 03/90, de 28/06/1990, a qual foi revogada pela Resolução CONAMA nº 491, 19/11/2018.

Segundo a Resolução CONAMA nº 491/18, um padrão de qualidade do ar é:

Um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica

(BRASIL, 2018).

A nova Resolução definiu os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI), os quais são os valores temporários que devem ser cumpridos em etapas, bem como os Padrões de Qualidade do Ar Final (PF), que são os valores onde se pretendem atingir, baseado nos valores guia definidos pela OMS em 2005.

Segundo o Art. 4º da Resolução, os Padrões de Qualidade do Ar serão adotados, sequencialmente, em 4 (quatro) etapas.

A primeira corresponde aos PI-1, as quais entram em vigor a partir da publicação da resolução, ou seja, entrou em vigor em 19/11/18.

As próximas etapas, PI – 2, PI-3, e PF serão adotadas subsequentemente, levando em consideração os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas, os quais serão elaborados pelos órgãos estaduais e distritais de meio ambiente em até 3 anos a partir da entrada em vigor desta Resolução. Além disso, estes órgãos deverão elaborar a cada 3 anos um relatório de acompanhamento do plano. A Tabela 3 apresenta os novos Padrões de Qualidade nacional, estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/18.



Tabela 3: Padrões de Qualidade do Ar, estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018

<b>Poluente Atmosférico</b>	<b>Período de Referência</b>	<b>PI-1 µg m<sup>-3</sup></b>	<b>PI-2 µg m<sup>-3</sup></b>	<b>PI-3 µg m<sup>-3</sup></b>	<b>PF µg m<sup>-3</sup></b>	<b>PF ppm</b>
Material	24 horas	120	100	75	50	-
Particulado - PM <sub>10</sub>	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Material	24 horas	60	50	37	25	-
Particulado - PM <sub>2,5</sub>	Anual <sup>1</sup>	20	17	15	10	-
Dióxido de	24 horas	125	50	30	20	-
Enxofre - SO <sub>2</sub>	Anual <sup>1</sup>	40	30	20	-	-
Dióxido de	1 hora <sup>2</sup>	260	240	220	200	-
Nitrogênio - NO <sub>2</sub>	Anual <sup>1</sup>	60	50	45	40	-
Ozônio - O <sub>3</sub>	horas <sup>3</sup>	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual <sup>1</sup>	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas <sup>3</sup>	-	-	-	-	9
Partículas	24 horas	-	-	-	240	-
Totais em Suspensão - PTS	Anual <sup>4</sup>	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb <sup>5</sup>	Anual <sup>1</sup>	-	-	-	0,5	-

1- Média aritmética anual

2- Média horária

3- Máxima média móvel obtida no dia

4- Média geométrica anual

5- Medido nas partículas totais em suspensão

Fonte: Resolução CONAMA nº 491/2018

A nova resolução também estipulou os níveis de atenção, alerta e emergência, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Níveis de atenção aletrta e emergência estipulados pela Resolução CONAMA nº 491/2018

<b>Poluentes e concentrações</b>						
Nível	SO <sub>2</sub> µg m <sup>-3</sup> média de 24h	MP <sub>10</sub> µg m <sup>-3</sup> média de 24h	PM <sub>2,5</sub> µg m <sup>-3</sup> média de 24h	CO ppm média móvel de 08h	O <sub>3</sub> µg m <sup>-3</sup> média móvel de 8h	NO <sub>2</sub> µg m <sup>-3</sup> média de 1h
Atenção	800	250	125	15	200	1130
Alerta	1600	420	210	30	400	2260
Emergência	2100	500	250	40	600	3000

Fonte: Resolução CONAMA nº 491/2018

A nova resolução incluiu o PM<sub>2,5</sub> como critério para episódios agudos de poluição do ar e alterou a análise das concentrações de O<sub>3</sub>, de média horária para média móvel de 8 horas, consequentemente reduzindo para o limite de 200 µg m<sup>-3</sup> para níveis de Atenção, 400 µg m<sup>-3</sup> para níveis de Alerta e 600 µg m<sup>-3</sup> para níveis de Emergência.

### 1.3.2- Controle das Emissões Veiculares

Devido ao desenvolvimento industrial no Brasil, até meados da década de 80, as indústrias representavam as principais fontes de poluição do ar nos grandes centros urbanos (VENTURA et al., 2019).

A partir daí, percebeu-se um ligeiro crescimento da população urbana, junto com a intensificação do uso dos veículos automotores. Diante disto, estas novas fontes de emissão passaram a contribuir significativamente para a degradação da qualidade do ar nos principais centros urbanos, que por sua vez, passou a afetar diretamente a saúde da população, causando desde irritação nos olhos a problemas cardiorrespiratórios com alto nível de severidade (VENTURA et al., 2019).

Neste contexto, foi necessária a criação de medidas de controle da poluição veicular, de modo a estabelecer metas e prazos para a redução dos poluentes atmosféricos emitidos por tais veículos automotores.

Uma das principais maneiras de controle da poluição veicular foi a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) publicado pela Resolução CONAMA nº 18/1986 e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), publicado pela Resolução CONAMA nº 297/2002.

Ambos foram criados baseados em padrões internacionais de emissão, para

os veículos do ciclo Otto (movidos à gasolina, etanol, GNV ou *flex*), a referência foi dos Estados Unidos e para os veículos do ciclo Diesel, foram dos padrões europeus (VENTURA, et al., 2019).

Estes Programas preconizavam desde a melhoria da qualidade dos combustíveis à fabricação de veículos com tecnologias mais limpas. Seus principais objetivos eram reduzir as emissões dos veículos pesados (P), leves (L) e motocicletas e similares (M), estabelecendo limites máximos de emissão para os novos veículos fabricados, de modo a atender os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo PRONAR. As definições destes tipos de veículos são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Definições dos tipos de veículos automotores

Veículos Leves	Veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar até doze passageiros ou com massa total máxima igual ou inferior a 2.800 quilogramas. No Brasil, normalmente os veículos leves são equipados com motores do ciclo Otto.
Veículo Pesado	Veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar mais que doze passageiros ou com massa total máxima superior a 2.800 quilogramas. No Brasil, normalmente os veículos pesados são equipados com motores do ciclo Diesel.
Veículos Motociclos e Similares	Qualquer tipo de veículo automotor de duas rodas, incluídos os ciclomotores, motonetas e motocicletas.
Motor do Ciclo Otto	Motor a combustão interna de ignição por centelha. Os motores movidos a gasolina, álcool, gás natural veicular ou mesmo flex fuel são do ciclo Otto. O nome advém de seu inventor, Nikolaus August Otto, que idealizou este invento em 1861
Motor do Ciclo Diesel	Motor a combustão interna, com ignição espontânea, ou seja, o combustível é pulverizado na câmara de combustão e , por meio da elevada temperatura, se auto ignita sem auxílio de centelha externa. O nome advém de seu inventor, Rudof Christian Karl Diesel, engenheiro alemão que registrou a patente do invento em 1897.

Fonte: CNT: SEST/SENAT, 2012 e Resolução CONAMA nº 418/2009

Além disso, os Programas também estabeleciam a criação de programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso, a promoção da conscientização da população com relação à poluição do ar por veículos automotores e o estabelecimento das condições de avaliação dos resultados alcançados (IBAMA, 2011; VENTURA et al., 2019).

Como estratégia para a implementação do PROCONVE/PROMOT foi necessário o atendimento às seguintes fases (IBAMA, 2011):

- Homologação e Protótipo, onde os fabricantes/importadores implementaram projetos para garantir os limites de emissão, sendo a comprovação realizada por meio da análise técnica das especificações de engenharia e dos resultados de ensaio;
- Controle de Produção/Importação, é o acompanhamento estatístico das linhas de produção e importação, de modo a assegurar a baixa dispersão dos índices de emissão dos veículos;
- Responsabilidade do Fabricante/Importador, os quais se responsabilizavam pela fabricação, importação e comercialização, conforme as especificações apresentadas ao IBAMA na fase de homologação, re-homologando os projetos que forem alterados;
- Requisitos de Manutenção, onde o fabricante e o importador recomendavam ao usuário e ao serviço de assistência técnica, todos os procedimentos de manutenção e regulação necessários ao atendimento aos limites máximos de emissão estipulados pelo PROCONVE/PROMOT, assim como prover o fornecimento de peças de reposição;
- Controle de Pós-Venda, é a fase de intervenção dos órgãos ambientais, de modo a fiscalizar o estado de manutenção dos veículos em uso. Para isto, o CONAMA estabeleceu, por meio da Resolução CONAMA nº 256/1999, diretrizes para os órgãos ambientais estaduais e do Distrito Federal elaborarem, aprovarem e publicarem os Planos de Controle de Poluição Veicular (PCPV), os quais verificam a necessidade de um Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso – I/M,
- Programa de Inspeção e Manutenção – I/M, identifica as desconformidades dos veículos em uso, tendo como referência as especificações originais dos fabricantes. Deste modo, assegura que a população não adultere o projeto

original, podendo interferir nas emissões dos poluentes. O licenciamento anual de veículos do DETRAN é uma forma de aplicação do Programa de Inspeção.

Para a implantação do PROCONVE/PROMOT foram estabelecidas fases com valores máximos de emissão, com melhor qualidade dos combustíveis e prazos progressivos, de modo que a indústria automobilística e os fornecedores de combustíveis pudessem se adaptar gradativamente para atender à legislação brasileira.

O PROCONVE estipulou metas de redução de emissão para os veículos pesados do ciclo diesel, leves e moto. A Tabela 5 mostra as fases do PROCONVE para veículos pesados do ciclo diesel.

Tabela 5: Fases do PROCONVE para veículos do ciclo Diesel

Fases PROCONVE	Fases Euro	CO gkWh <sup>-1</sup>	HC gkWh <sup>-1</sup>	NOx gkWh <sup>-1</sup>	MP gkWh <sup>-1</sup>	Resolução CONAMA	Data de implantação	Teor de enxofre ppm
	Sem espec.							
P1	espec.	14,00 <sup>(2)</sup>	3,50 <sup>(2)</sup>	18,02	-	18/1986	1989	-
P2	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60 <sup>(2)</sup>	8/1993	1994	3.000 a 10.000
P3	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 <sup>(1)</sup>	8/1993	1996	3.000 a 10.000
P4	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15	8/1993	2000	3.000 a 10.000
P5	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 <sup>(*)</sup>	315/2002	2006	500 a 2.000
P6 <sup>(3)</sup>	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02	315/2002	2009	50
P7	Euro 5	1,50	0,46	2,00	0,02	403/2008	2012	10

Nota:<sup>(\*)</sup> para motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> e rotação à potência nominal superior a 3.000 min<sup>-1</sup>.<sup>(1)</sup> 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW; <sup>(2)</sup> não foram exigidos legalmente; <sup>(3)</sup> não chegou a ser implantada.

Fonte: (COPPETEC, 2011; CNT : SEST/SENAT, 2012)

As fases do PROCONVE para veículos pesados é uma analogia às fases da legislação europeia. Como pode perceber na Tabela 6, no decorrer dos anos ocorreram reduções significativas dos limites de emissão de poluentes, bem como o teor de enxofre do combustível diesel.

Um dos principais problemas da utilização do óleo diesel como combustível é o teor de enxofre (S) nele contido, uma vez que em sua combustão, o trióxido de

enxofre ( $\text{SO}_3$ ), ao se juntar à água, forma o ácido sulfúrico, que corrói as partes metálicas do motor (CNT: SEST/SENAT, 2012). Caso a concentração de enxofre seja elevada no diesel, as emissões de material particulado também serão altas, assim como as emissões de poluentes primários como  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , causando grandes prejuízos à saúde humana (CNT: SEST/SENAT, 2012).

Partindo desta premissa, foi necessário reduzir os teores de enxofre do diesel para não afetar a vida útil dos novos motores que estavam sendo fabricados, de modo a atender os limites de emissão estipulados pelo PROCONVE. Diante disto, em suas fases iniciais (P1 à P4) o teor de enxofre encontrava-se na faixa de 3.000 à 10.000 ppm. Na Fase P5, que foi implementada em 2006, o teor de enxofre no diesel reduziu para 500 a 2.000 ppm. A implantação da Fase P6 prevista para 2009, conforme a Resolução CONAMA nº 315/2002, enfrentou alguns problemas, uma vez que as entidades responsáveis pela especificação e produção do combustível de testes dos motores não conseguiram atender a tempo a resolução, o que impossibilitou a produção dos veículos (CNT: SEST/SENAT, 2012).

Como compensação, o Ministério Público Federal (MPF) firmou um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) entre o Estado de São Paulo, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicombustíveis (ANP), a Petrobras, a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) e a Companhia de Tecnologia Ambiental (CETESB). No TAC foi estabelecido um cronograma de medidas visando a uma transição entre as etapas P5 e P7. Diante disto, no mesmo ano de assinatura do TAC, em 29 de outubro de 2008, o CONAMA publicou a Resolução nº 403/2008, a qual estabelece a implantação da fase P7 (CNT: SEST/SENAT, 2012).

Por isto, nos anos de 2010 e 2011 ainda se encontrava nos postos de distribuição de combustível o diesel S-500, com teor de enxofre de 500 ppm. Somente em 2012 entrou no mercado o diesel S-50, com 50 ppm de enxofre, sendo substituído no ano seguinte, em 1º de janeiro de 2013 pelo S-10, com 10 ppm de enxofre em sua composição. A partir de 2012 foi sendo inserido gradativamente o diesel S-10, nas regiões metropolitanas do Brasil e em 2015 e 2016 o uso do diesel S-10 se difundiu, por completo, nos centros urbanos e permanece até os dias atuais (COPPETEC, 2011).

Para atingir os limites de emissão estipulados pelo PROCONVE, nas fases P3

e P4, correspondente ao Euro 1 e 2, foi implementado nos veículos pesados a bomba injetora de alta pressão e turbo *intercooler*. Na fase P5, foi implantado o módulo eletrônico e o sistema de injeção eletrônica de altíssima pressão (ANFAVEA, 2009).

Para atingir as metas previstas na fase P7 correspondente à fase Euro 5, a partir de 2012, os veículos com motores diesel saíram de fábrica com um sistema de tratamento de gases poluentes: SCR (*Selective Catalytic Reduction*) ou EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) (ANFAVEA, 2009; IBAMA, 2013).

Os motores com tecnologia SCR são mais utilizados em veículos com maior capacidade de carga. Este sistema faz uma conversão química dos gases poluentes, com a pulverização do ARLA 32, um reagente composto de água e uréia, transformando-os em nitrogênio e vapor de água, os quais não agridem o meio ambiente. O ARLA 32 é colocado no compartimento específico dos sistemas SCR, não podendo ser misturado ao diesel, sendo sua proporção de uso adequada de 5% do volume de diesel. O Sistema SCR, além de avisar sobre a necessidade de reabastecer o reagente, também monitora a qualidade dos gases emitidos. Sendo utilizado de maneira correta, o ARLA 32 também melhora a eficiência do motor, reduzindo o consumo de combustível (IBAMA, 2013).

A tecnologia EGR dispensa o uso do reagente ARLA 32 e é mais empregado em veículos menores, como caminhonetes e *pick-ups*. Esse sistema promove a recirculação de parte dos gases de escape, fazendo com que a temperatura interna de câmara de combustão diminua e a formação dos poluentes atinja níveis aceitáveis (IBAMA, 2013).

A fase P8, equivalente à Euro 6 foi publicada por meio da Resolução CONAMA nº 490, de 16 de novembro de 2018, cuja previsão da implantação é o ano 2022, além dos sistemas de Redução Catalítica Seletiva (SCR) e de Recirculação de Gases da Exaustão (EGR) integrados, outras tecnologias como o filtro ARLA 32, o Filtro de Partículas Diesel (DPF) e o Catalisador por Oxidação Diesel (DOC), serão inseridas nos veículos novos. Além disso, os veículos Euro 6, terão sistemas de monitoramento e controle eletrônico como o diagnóstico de bordo (OBD) e central de controle do motor (ECU). (IBAMA, 2013). A Tabela 6 mostra os novos limites de emissão estipulados para a fase P8.



Tabela 6: Limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de uso rodoviário, da Fase P8 do PROCONVE

Ciclo	CO	THC <sup>(1)</sup>	NMHC <sup>(2)</sup>	CH <sub>4</sub> <sup>(2)</sup>	NOx <sub>m</sub>	NH <sub>3</sub> <sup>(3)</sup> <sub>p</sub>	MP	NP
	mgkWh <sup>-1</sup>	mgkWh <sup>-1</sup>	mgkWh <sup>-1</sup>	mgkWh <sup>-1</sup>	gkWh <sup>-1</sup>	pm	Massa mgkWh <sup>-1</sup>	Número mgkWh <sup>-1</sup>
WHSC <sup>(1)</sup>	1.500	130	-	-	400	10	10	8,0 x 10 <sup>11</sup>
WHTC <sup>(1)</sup>	4.000	160	-	-	460	10	10	6,0 x 10 <sup>11</sup>
WHTC <sup>(2)</sup>	4.000	-	160	500	460	10	10	-
OCE (WNTE) <sup>(1)</sup>	2.000	220	-	-	600	-	16	-
CR / ISC	6.000	240	240	750	690	-	-	-

Nota: <sup>(1)</sup> Aplicável a motores de ignição por compressão

<sup>(2)</sup> Aplicável a motores de ignição por centelha

<sup>(3)</sup> Aplicável em veículos equipados com sistemas de pós-tratamento com agentes redutores ou veículos abastecidos a gás

Fonte: Resolução CONAMA nº 490/ 2018

Segundo a Resolução CONAMA nº 490/2018 estes valores de emissão foram estabelecidos de acordo com métodos de ensaio, conforme o Regulamento UN ECE R49,06, das Nações Unidas, inclusive os ciclos de ensaios *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC), *World Harmonized Stationary Cycle* (WHSC) e o *World Harmonized Not to Exceed* (WNTE).

O PROCONVE também estipulou metas de redução de emissão para os veículos leves do ciclo Otto, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Fases do PROCONVE para veículos leves do ciclo Otto

Fases PROCONVE	CO gkm <sup>-1</sup>	HC gkm <sup>-1</sup>	NOx gkm <sup>-1</sup>	CHO gkm <sup>-1</sup>	Datas de Implantação	Resolução CONAMA
L1	24	2,1	2	-	1990	18/1986
L2	12	1,2	1,4	0,15	1992	18/1986
L3	2	0,3	0,6	0,03	1997	18/1986
L4	2	0,16	0,25	0,03	2007	315/2002
L5	2	0,05	0,12	0,02	2009	315/2002
L6	1,3	0,05	0,08	0,02	2014	415/2009

Fonte: CONAMA (1986, 2002b, 2009)

As novas fases do PROCONVE L7 e L8 para os veículos leves do ciclo otto foram estipulados pela Resolução CONAMA nº 492/2018, conforme as Tabela 8 e 9.

Tabela 8: Limites máximos de emissão de poluentes por categoria de veículos, para veículos da Fase PROCONVE L7.

Categoria	NMOG + NOx em mg km <sup>-1</sup>	MP <sup>(1)</sup> em mg km <sup>-1</sup>	CO em mgkm <sup>-1</sup>	Aldeídos <sup>(3)</sup> em mg km <sup>-1</sup>	NH <sub>3</sub> <sup>(2)</sup> em ppm	Evaporativa <sup>(5)</sup>	Emissão de abastecimento <sup>(5)</sup>
Leve Passageiro	80	6		15		0,5 g/teste	50 mgL <sup>-1</sup> abastecido
Leve Comercial	140 <sup>(3)</sup>	6 <sup>(3)</sup>	1000	-	Declarar	-	-
	320 <sup>(4)</sup>	20 <sup>(4)</sup>		-		-	-

Nota: <sup>(1)</sup> NMHC equivalente (MIR) para uso de etanol hidratado e NMHC para uso dos demais combustíveis

<sup>(2)</sup> Aplicável a veículos equipados com motores do ciclo Otto com injeção direta de combustível ou motores do ciclo Diesel.

<sup>(3)</sup> Aplicável a veículos equipados com motores do ciclo Diesel com sistemas de pós-tratamento que utilizem agente redutor líquido

<sup>(4)</sup> Aplicável somente a veículos equipados com motores do ciclo Otto <sup>(5)</sup> Aplicável somente a veículos equipados com motores do ciclo Diesel

NMOG = gases orgânicos não metano

Fonte: Resolução CONAMA nº 492/2018

Tabela 9: Limites máximos de emissão de poluentes corporativo para veículos da fase PROCONVE L8

		NMOG + NOx	MP <sup>(1)</sup>	CO	Aldeídos <sup>(3)</sup>	NH <sub>3</sub> <sup>(3)</sup>	Evaporativa <sup>(3)</sup>	Emissão de abastecimento		
		g km <sup>-1</sup>	mgkm <sup>-1</sup>	mgkm <sup>-1</sup>	mgkm <sup>-1</sup>	ppm	g ensaio <sup>-1</sup>	mgL <sup>-1</sup>		
Veículos leves comerciais diesel	Veículos leves comerciais ignição por centelha, acima de 1700 kg de ME (4)	Veículos leves de passageiros e comerciais leves até 1700 kg de ME (4)	Nível	320	20	1000	-			
			320	320	20	1000	-			
			280	280	20	1000	-			
			250	250	20	1000	-			
			220	220	10	1000	-			
			200	200	10	1000	-			
			170	170	9	1000	-			
			140	140	6	1000	15			
			110	110	6	1000	15	10	0,5	50
			80	80	6	1000	15			
			70	70	4	600	10			
			60	60	4	600	10			
			50	50	4	600	10			
40	40	4	500	10						
30	30	3	500	8						
20	20	2	400	8						
0	nula	nula	nula	nula	nula	nula	nula	nula		

Fonte: Resolução CONAMA nº 492/2018

NMOG = gases orgânicos não metano

O PROMOT estabeleceu metas de redução de emissão para a motocicleta e

similares, conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Fases do PROMOT para ciclomotores, motocicletas e similares

Fases	Categorias	Velocidade Máxima (km/h)	cc	CO g km <sup>-1</sup>	HC g km <sup>-1</sup>	NOx g km <sup>-1</sup>	CO + Nox g km <sup>-1</sup>	COc % vol.	Ano	Resolução CONAMA
M1	Motociclos e similares	-	≤ 250	13,00	3,00	0,30	-	6,00%	2003	297/2002
		-	> 250	-	-	-	-	4,50%		
	Ciclomotores	-	-	6,00	-	-	3,00	-		
M2	Motociclos	-	< 150	5,50	1,20	0,30	-	-	2005	342/2003
		-	≥ 150	5,50	1,00	0,30	-	-		
	Assemelhados	-	-	7,00	1,50	0,40	-	-		
	Ciclomotores	-	-	1,00	-	-	1,20	-		297/2002
M3	Motociclos e similares	-	< 150	2,00	0,80	0,15	-	-	2009	342/2003
		-	≥ 150	2,00	0,30	0,15	-	-		
M4	Motociclos e similares	< 130 <sup>(1)</sup>	-	2,00	0,80	0,15	-	-	2014	456/2013
		≥ 130 <sup>(1)</sup>	-	2,00	0,30	0,15	-	-		
		< 130 <sup>(2)</sup>	-	2,00	0,56	0,13	-	-	2016	
		≥ 130 <sup>(2)</sup>	-	2,00	0,25	0,17	-	-		
Ciclomotores	-	-	1,00	0,80	0,15	-	-	2014		

Nota: <sup>(1)</sup> motociclos de três rodas (triciclos) e quatro rodas (quadriciclos).

<sup>(1)</sup> Modelos novos; <sup>(2)</sup> todos os modelos.

Fonte: CONAMA (2002a, 2003, 2013); MMA (2013b)

Em 2019 foram publicados a fase PROMOT M5, por meio da Resolução Conama nº 493 de 24 de junho de 2019.

Os novos limites máximos de emissão de poluentes provenientes de motocicletas, ciclomotores, triciclos e quadriciclos, serão estabelecidos a partir de 1º de janeiro de 2023 para novos modelos e, a partir de 1º de janeiro de 2025, para todos os modelos, conforme Tabelas 11 e 12.

Tabela 11: Limites máximos de emissão de poluentes no ciclo dinâmico para a fase do PROMOT M5. Valores expressos em mgkm<sup>-1</sup>

Ano	Modelos	CO	THC <sup>(1)</sup>	NMHC	NOx	MP <sup>(2)</sup>	Aldeídos	CO <sub>2</sub>
1/1/2023	Para os novos	1.000	100	68	60	4,5	20 ou 30 <sup>(3)</sup>	Informar
1/1/2025	Para todos	1.000	100	68	60	4,5	20	Informar

Nota: <sup>(1)</sup> Limite a ser respeitado apenas por veículos que utilizem gás natural como combustível

<sup>(2)</sup> Limite a ser respeitado apenas por veículos com sistema de injeção direta total ou parcial de combustível.

<sup>(3)</sup> Limite para motocicletas com velocidade máxima final superior a 130 km/h.

Fonte: Resolução Conama nº 493/2019

Tabela 12: Limites máximos de emissão de poluentes em marcha lenta e acima de 2000 rpm para a fase do PROMOT M5. Valores expressos em ppm (partes por milhão, em volume).

<b>Ano</b>	<b>Modelos</b>	<b>CO<sup>(1)</sup> (marcha lenta)</b>	<b>CO<sup>(1)</sup> (≥ 2000 rpm)</b>	<b>HC<sup>(1,2)</sup> (marcha lenta)</b>
1/1/2023	Para os novos	5.000	3.000	50
1/1/2025	Para todos	5.000	3.000	50

Nota:<sup>(1)</sup> Valores corrigidos pelo fator de diluição conforme definido na Resolução CONAMA nº 418/2009. O fator de diluição deve ser inferior a 2,5.

<sup>(2)</sup> Valor expresso em equivalente hexano.

Fonte: Resolução Conama nº 493/2019

Como visto, todos os benefícios trazidos pelo PROCONVE e PROMOT não se sustentam sem a implantação de Programas que incentivem a manutenção preventiva da frota no país.

Neste sentido, considerando o atendimento ao PRONAR (Resolução CONAMA nº 5/1989) e ao PROCONVE (Resolução CONAMA nº 18/1986), foi criada a Resolução CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009, que dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso (CONAMA nº 418, 2009).

Nesta Resolução foi estipulada a elaboração do Plano de Controle de Poluição Veicular- PCPV pelos órgãos ambientais estaduais, municípios e Distrito Federal. O PCPV deve ter como base os inventários de emissões de fontes móveis, e quando houver monitoramento da qualidade do ar, deve caracterizar, claramente, as alternativas de ações de controle da emissão veicular, podendo incluir um Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso – I/M (CONAMA nº 418, 2009).

O Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M tem o objetivo de identificar desconformidades dos veículos em uso, tendo como referências as especificações originais dos fabricantes dos veículos, as exigências da regulamentação do PROCONVE e as falhas de manutenção e alterações do projeto original que causem aumento na emissão de poluentes (CONAMA nº 418, 2009).

O Estado do Rio de Janeiro foi o pioneiro em promover ações referentes ao

controle das emissões veiculares, através da publicação da Lei Estadual nº 2539, de 19 de abril de 1996, que determina a implantação do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M. Este Programa foi aplicado, primeiramente na Região Metropolitana do Rio de Janeiro e, posteriormente em 2000, foi ampliado para todo o Estado, devido ao convênio de cooperação técnica entre a extinta FEEMA, hoje INEA e o DETRAN- RJ (VENTURA et al.,2019).

Neste convênio, o DETRAN executa, em nome do INEA, as aferições de gases e partículas emitidas pelos veículos automotores registrados e licenciados no Estado. Até 1999 o Programa foi executado com caráter educativo e a partir de 2000 o Programa passou a punir os veículos a diesel (ônibus, caminhão, vans etc), veículos de aluguel e taxis que estivessem emitindo além dos limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA. A partir de 2008 esta punição foi ampliada para os automóveis de passeio, motocicletas e demais veículos fabricados a partir de 1998 (CONEMA Nº 70, 2016; VENTURA et al., 2019).

Além deste Programa, o Estado do Rio de Janeiro implementou outra iniciativa para o controle da emissão veicular, o chamado Programa de Auto monitoramento de Emissão de Fumaça Preta por Veículo Automotor do Ciclo Diesel (PROCON Fumaça Preta), criado pela Deliberação nº 4.814/2007, de 17 de abril de 2007, pela Comissão Estadual de Controle Ambiental (CECA).

Neste programa todas as empresas que possuam frota movida à diesel (empresas de ônibus, transportadoras) que atuam e/ou circulam no Estado do Rio de Janeiro, devem se vincular e realizar periodicamente a aferição do índice de opacidade, o qual deve ser reportado ao INEA. O nível de opacidade indica o grau de emissão de material particulado emitidos pelos veículos à diesel (CONEMA Nº 58, 2013; CONEMA Nº 70, 2016). As medições somente podem ser realizadas por empresas ou profissionais habilitados que possuam o Certificado de Registro para Medição de Emissão Veicular - CREV ou pelo Departamento de Transito do Estado do Rio de Janeiro -DETRAN-RJ.

### 1.3.3- Inventários de Emissões Atmosféricas por Fontes Móveis

Os Inventários de Emissões Atmosféricas são instrumentos de suma importância na gestão da qualidade do ar. Nestes estudos é possível quantificar as emissões atmosféricas provenientes tanto de fontes fixas das indústrias bem como dos veículos automotores circulantes em uma determinada região em um dado

período de tempo. Os inventários podem fornecer subsídios para melhor compreender as relações entre as fontes poluidoras do ar, bem como suas emissões e as concentrações dos poluentes na atmosfera. Portanto, auxilia na criação e implantação de políticas e ações para assegurar que os padrões de qualidade do ar sejam respeitados (CETESB, 2011).

Neste contexto, o PRONAR - Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar, que foi um marco normativo para a gestão da qualidade do ar no Brasil, preconizou a implantação de Programa Nacional de Inventários de Fontes Poluidoras do Ar.

Neste sentido, em 2011 foi lançado o 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, o qual teve por finalidade estimar as emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa no segmento de transporte rodoviários, a nível nacional entre 1980 e 2009, bem como emissões projetadas até 2020 (MMA, 2011).

Os resultados deste inventário mostraram queda nas emissões de CO a partir de 1991, devido a implantação do PROCONVE e PROMOT, reduzindo de cerca de 5,6 milhões de toneladas em 1991, para 1,5 milhões de toneladas em 2009. No entanto, as emissões de CO não sofreram mais reduções significativas na projeção para 2020 (MMA, 2011).

Além disso, notou-se que em 2009, os veículos do ciclo Otto (automóveis, veículos comerciais leves e motocicletas) foram responsáveis por aproximadamente 90% das emissões, destacando-se os automóveis com 48% e as motocicletas com 35%. Fato este que, segundo a previsão do estudo, deverá predominar até 2020, tendo 51% dos automóveis e 23% das motocicletas contribuindo para as emissões de CO. Em relação ao combustível, em 2009 a gasolina foi responsável por 71% das emissões de CO, sendo o Etanol Hidratado com 18%. Segundo a previsão, a gasolina passará a contribuir para emissão de CO com 47% e o etanol hidratado aumentará para 33% (MMA, 2011).

Os gráficos mostraram que entre 1985 a 1998 houve um crescimento significativo nas emissões de NOx, apresentando um pico em 1990, devido ao crescimento da frota dos veículos do ciclo Diesel anteriores à entrada do PROCONVE. No entanto, a partir de 2000 percebeu-se uma redução nas emissões de NOx, o qual segundo a previsão, a tendência será mantida até 2020. Em 2009 os caminhões pesados representaram 49% das emissões de NOx, estando

em segundo lugar os ônibus urbanos com 23%. Já a previsão para 2020 apontou aumento na contribuição de NOx pelos caminhões pesados de 54%, devido ao aumento das vendas de caminhões novos e redução de 19% da participação dos ônibus urbanos (MMA, 2011).

Em relação ao combustível, em 2009 o diesel foi responsável por 88% das emissões de NOx, tendo aumentado para 87% na previsão de 2020 contra 8% da gasolina em 2009 e 7% em 2020 (MMA, 2011).

O comportamento do NOx também foi percebido para as emissões de MP, sendo os caminhões pesados tendo contribuído em 45% para as emissões de MP em 2009 e 53% em 2020. Já os ônibus urbanos emitiram 25% em 2009 e emitirá 20% em 2020. Em 2009, 96% de todo MP foi emitido pelos veículos movidos à combustível Diesel e a previsão para 2020 será de aumento para 92% (MMA, 2011).

Em 2009, 88% dos automóveis emitiram RCHO (aldeídos) o que permanecerá na previsão para 2020. Já os comerciais leves contribuíram para 10% das emissões de RCHO em 2009 mantendo constante em 2020 (MMA, 2011).

Os aldeídos são poluentes típicos dos veículos do ciclo Otto, principalmente daqueles movidos a etanol. Diante disto, em 2009 o etanol foi responsável pela emissão de 60% de RCHO, sendo 38% de gasolina C e 3% de GNV. Para 2020 está previsto aumento de 79% das emissões de RCHO pelos veículos movidos à etanol hidratado e uma redução para 18% das emissões RCHO provenientes dos veículos movidos à gasolina C (MMA, 2011).

Além disso, os automóveis foram responsáveis por 49% das emissões de Hidrocarboneto Não Metano – NMHC, um dos poluentes precursores da formação do ozônio troposférico, em 2009, possuindo aumento na previsão de 2020. As motocicletas estiveram em segundo lugar, emitindo 26% em 2009 e com previsão pra 18% em 2020. A gasolina é o combustível que mais emitiu NMHC em 2009 com 39% e 41% previsto para 2020, sendo o etanol hidratado responsável por 22% em 2009 e 37 % em 2020 (MMA, 2011).

Ressalta-se que todos os poluentes tiveram tendência de queda de emissão devido à implantação do PROCONVE e PROMOT (MMA, 2011).

Em janeiro de 2014, o Ministério do Meio Ambiente publicou o 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013:

Ano-base 2012, com objetivo de dar continuidade à atualização periódica deste estudo. No segundo inventário foram adicionadas as emissões de material

particulado por desgaste de pneu, freios e pista, bem como trouxe melhorias nos dados utilizados nos cálculos de emissão, ampliando o escopo da ferramenta e incorporando dados de pesquisas recentes (MMA, 2014).

Os veículos movidos a gasolina C foram responsáveis por 74% das emissões de CO, 53% de RCHO, 65% de NMHC, de 7% das emissões de NO<sub>x</sub> e 4% de MP.

Os movidos à etanol hidratado emitiram 43% de RCHO, 12% de NMHC, 11% de CO e 1% de NO<sub>x</sub>, Já os movidos a diesel emitiram 91% de NO<sub>x</sub>, 96% de MP, 23% de NMHC e 14% de CO. os veículos movido a a GNV foram responsáveis por somente 2% de RCHO e 1% de CO e NO<sub>x</sub> (MMA,2014).

Os inventários formulados a nível nacional tentem a gerar resultados que permitem analisar a eficiência e eficácia dos programas de gestão da qualidade do ar, bem como subsidiar a criação e implementação de políticas nacionais, de médio a longo prazo, voltadas para a redução das emissões, como por exemplo os ajustes tecnológicos nos veículos e a melhoria dos combustíveis, estipulados pelo PROCONVE (MMA, 2011).

Baseado nos Inventários Nacionais, os Estados da Federação também realizam seus Inventários de Fontes Móveis, objetivando quantificar e avaliar suas emissões atmosféricas, de modo a criar e implementar políticas estaduais voltadas à gestão da qualidade do ar. Como exemplo pode-se citar o rodízio de veículos realizado na cidade de São Paulo e os Programas de I/M e PROCON FUMAÇA PRETA, gerido pelo Estado do Rio de Janeiro (MMA, 2011).

Diante disto, a CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, em 2011, publicou o seu Inventário Veicular no Estado de São Paulo, o qual foi atualizado em 2016 (CETESB, 2011; CETESB, 2016)

A Secretaria do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro também publicou, em 2011, o Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro (COPPETEC, 2011).

Em 2016 o INEA - Instituto Estadual do Ambiente – publicou o Inventário de Emissões de Fontes Veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Ano-base 2013, cujas emissões subsidiaram o presente estudo (INEA, 2016).

De maneira geral, todos os inventários apresentam resultados semelhantes ao 1º Inventário, uma vez que os veículos movidos a diesel, como caminhões e ônibus urbanos emitem mais NO<sub>x</sub> e MP, em relação aos demais veículos. Em contrapartida, os automóveis são responsáveis majoritariamente pela emissão de



CO, sendo os veículos movidos a etanol, responsável por maior emissão de RCHO e os movidos a gasolina responsável pela maior emissão de NMHC (MMA, 2014).

Geralmente, os inventários de fontes móveis utilizam duas metodologias para o cálculo de emissão, a *bottom-up* e a *top-down* (MMA, 2011; INEA, 2016).

A metodologia *bottom-up*, que significa de baixo para cima, visa quantificar as emissões de cada poluente e de cada fonte, de maneira desagregada e individual, sendo as emissões totais da região inventariada o somatório de todas as emissões típicas de cada tipo de veículo. Desta maneira, a metodologia *bottom-up* considera o perfil da frota, da distância percorrida ou seja a intensidade de uso do veículo e os fatores de emissão em um determinado período de tempo, conforme Equação 12 (COPPETEC, 2011; INEA, 2016; CETESB, 2016).

$$E_{i,j} = \sum_i^n \sum_j^n N_j \times d \times F_{i,j} \quad (12)$$

Onde:

i: poluente atmosférico;

j: combustível;

E: emissão por período definido ( $\text{g} \cdot \text{tempo}^{-1}$ );

N: número de veículos circulantes por período ( $\text{u} \cdot \text{tempo}^{-1}$ );

d: distância percorrida (km);

F: fator de emissão ( $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ ).

Metodologia *top-down* significa de cima para baixo e consiste em uma abordagem mais simples, que visa estimar as emissões dos poluentes a partir do consumo aparente de combustível de uma determinada região. Desta maneira, esta metodologia considera os fatores de emissão dos combustíveis e consumo dos mesmos. Seu uso é realizado em situações, principalmente, quando não há muitas informações relativas às características tecnológicas da frota circulante, seu rendimento médio e intensidade de uso. A Equação 13 apresenta a metodologia *top-down* (MMA, 2011; INEA, 2016; CETESB, 2016).

$$E_{M,C}^{A,P} = \sum_{m=1}^m \sum_{C=1}^n FR_{A,M,C} \times IU_{ajust_{A,M,C}} \times FE_{A,M,C} \quad (13)$$

E = Emissão do poluente considerado proveniente de veículos automotores, por ano calendário, ano modelo do veículo considerado e combustível utilizado (g/ano);

A = Ano calendário

P = Poluente

M = Ano modelo do veículo C = Combustível

Fr = Frota circulante estimada, expressa em número de veículos, variando de acordo com o ano calendário, o ano modelo do veículo considerado e o combustível utilizado (número de veículos).

IU<sub>ajust</sub> = Intensidade de uso ajustada, expressa em quilometragem anual percorrida (km/ano), variando de acordo com o ano calendário, o ano modelo do veículo considerado e o combustível utilizado.

Fe = Fator de emissão do poluente considerado, expresso em massa de poluentes emitidos por quilômetro percorrido ( $g_{\text{poluente}} \text{ km}^{-1}$ ). É específico para o ano modelo do veículo considerado e depende do tipo de combustível utilizado.

Além dos níveis nacional e estadual, os inventários ainda podem ser aplicados em regiões menores, como municípios e até mesmo bairros.

Teixeira et al. (2008), calcularam as emissões veiculares na Região Metropolitana de Porto Alegre – RMPA, para o ano de 2004 e Ueda e Tomaz (2011) elaboraram um inventário de emissões veiculares da Região Metropolitana de Campinas (RMC) - São Paulo, ambos utilizando a metodologia *bottom-up* (TEIXEIRA et al., 2008;UEDA e TOMAZ, 2011).

Teixeira et al.(2008) mostraram que os veículos movidos a gasolina ainda foram os responsáveis por emitir as maiores concentrações de CO ( $129.800 \text{ t ano}^{-1}$ ) e HC ( $13.570 \text{ t ano}^{-1}$ ), enquanto os veículos movidos a diesel são as maiores fontes de emissão de NOx ( $25.640 \text{ t ano}^{-1}$ ), MP ( $1.600 \text{ t ano}^{-1}$ ) e SOx ( $1.620 \text{ t ano}^{-1}$ ).

As emissões veiculares na RMC em 2003, calculadas por Ueda e Tomaz (2011) mostram-se semelhantes à RMPA, onde os automóveis movidos a gasolina contribuíram  $109.850 \text{ t ano}^{-1}$  para emissão de CO e  $11.160 \text{ t ano}^{-1}$  para as emissões de HC. No entanto, os veículos pesados movidos à diesel responderam por  $47.560 \text{ t ano}^{-1}$  de CO e  $28.470 \text{ t ano}^{-1}$  de NOx no ano de 2003, fato este que difere do estudo de Teixeira et al.(2008).

Policarpo et al.(2018) estimou as emissões da frota de veículos rodoviários das Regiões Metropolitanas de Fortaleza – RMF, Ceará, entre 2010 e 2015, assim

como Souza et al. (2013) e Réquia Jr. et al. (2015) que utilizaram a abordagem *bottom-up* para estimar a quantidade de poluentes emitidos pelo transporte rodoviário no Estado do Rio de Janeiro (RJ) de 1980 a 2010 e no Distrito Federal–Brasília, respectivamente (SOUZA et al., 2013; RÉQUIA JR. et al., 2015; POLICARPO et al., 2018).

Os resultados de Souza et al. (2013) mostram que em 2010 os automóveis foram os responsáveis por 55% das emissões de CO (47,8 t ano<sup>-1</sup>), 61% das emissões de HCT (10,44 t ano<sup>-1</sup>) e 93% das emissões de RCHO (294 t ano<sup>-1</sup>). Devido ao uso do etanol hidratado e o GNV ao invés de combustíveis derivados do petróleo, durante o período estudado 1.760.370 t de emissões de poluentes atmosféricos foram evitadas. Os caminhões pesados e os ônibus urbanos foram responsáveis por 29% (14,29 t ano<sup>-1</sup>) e 40% (19,30 t ano<sup>-1</sup>) das emissões de NOx, respectivamente (SOUZA et al., 2013).

Os resultados de Réquia Jr. et al. (2015) sugeriram que os veículos leves foram os principais responsáveis pelas emissões veiculares de CO (68,9%), CH<sub>4</sub> (93,6%) e CO<sub>2</sub> (57,9%), enquanto veículos pesados foram os principais responsáveis pelas emissões de NMHC (92,9%), NOx (90,7%) e MP (97,4%) (RÉQUIA JR. et al., 2015).

Policarpo et al. (2018) mostraram que as emissões veiculares de CO, NMHC e RCHO aumentaram principalmente pelos veículos do ciclo Otto, devido à introdução de veículos *flex fuel*. No entanto, foram observadas reduções nas emissões de NOx e MP, o que pode ter sido resultado da implantação de novas tecnologias (POLICARPO et al., 2018).

Em 2015, mais de 70.000 toneladas de CO (21,2 t 1000pessoas<sup>-1</sup>), 8.000 toneladas de NMHC (2,5 t 1000pessoas<sup>-1</sup>), 290 toneladas de RCHO (0,09 t 1000pessoas<sup>-1</sup>), 15.000 toneladas de NOx (4,4 t 1000pessoas<sup>-1</sup>) e 600 toneladas de MP (0,2 t 1000pessoas<sup>-1</sup>) foram emitidas na RMF (POLICARPO et al., 2018).

Os autores concluíram que em comparação com outras regiões brasileiras, as RMF emitem níveis mais altos de poluentes por habitante do que o Estado de São Paulo e o Estado do Rio de Janeiro, no entanto, níveis mais baixos em comparação à cidade de Porto Alegre (POLICARPO et al., 2018).

#### 1.4- Perfil da frota do município do Rio de Janeiro

Nesta seção são apresentadas as estatísticas da frota do município do Rio de Janeiro extraídas do site do Detran RJ.

A Tabela 13 mostra o perfil da frota por tipo de veículo registrado em maio de 2019. Nota-se que a frota é constituída, majoritariamente, por automóveis (73%), sendo apenas 1% representado por ônibus e microônibus. As motocicletas representam 11% da frota e os caminhões, caminhonetes e caminhonetas representam 1%, 4% e 6%, respectivamente. O Quadro 2 apresenta a definição desses tipos de veículos.

Tabela 13: Frota, por tipo de veículos, do município do Rio de Janeiro em maio de 2019.

<b>Tipo de veículo</b>	<b>Percentual</b>
Automóvel	73%
Ônibus	1%
Microônibus	1%
Caminhão	1%
Caminhonete	4%
Caminhoneta	6%
Reboque	1%
Semi-reboque	0%
Ciclomotor	0%
Motocicleta	11%
Motoneta	2%
Triciclo	0,04%
Utilitário	1%

Fonte: Detran RJ, 2019

Quadro 2: Definição dos tipos de veículos

<b>Termos e Definições</b>	
AUTOMÓVEL	Veículo automotor destinado ao transporte de passageiros, com capacidade para até oito pessoas, exclusive o condutor
CAMINHÃO	veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroçaria, e peso bruto total superior a 3500 Kg
CAMINHONETE	veículo automotor destinado ao transporte de carga, com peso bruto total de até 3500 Kg.
CAMIONETA	veículo automotor, misto, com quatro rodas, com carroçaria, destinado ao transporte simultâneo ou alternativo de pessoas e carga no mesmo compartimento.
CICLOMOTOR	veículo de duas ou três rodas, provido de um motor de combustão interna cuja cilindrada não exceda a 50 cm <sup>3</sup> (3,05 polegadas cúbicas) e cuja velocidade máxima de fabricação não exceda a 50 Km/h
MICROÔNIBUS	veículo automotor de transporte coletivo com capacidade para até 20 passageiros
MOTOCICLETA	veículo automotor de duas rodas, com ou sem side-car, dirigido em posição montada.
MOTONETA	veículo auto-motor de duas rodas, dirigido por condutor em posição sentada
ÔNIBUS	veículo automotor de transporte coletivo com capacidade para mais de 20 passageiros, ainda que, em virtude de adaptações com vista à maior comodidade destes, transporte número menor
QUADRICICLO	veículo de estrutura mecânica igual às motocicletas, possuindo eixos dianteiro e traseiro, dotados de quatro rodas
REBOQUE	veículo destinado a ser engatado atrás de um veículo automotor
SEMI-REBOQUE	veículo de um ou mais eixos que se apóia na sua unidade tratora ou é a ela ligado por meio de articulação.
SIDE-CAR	carro ou caçamba provido de uma roda acoplada na lateral da motocicleta
TRICICLO	veículo rodoviário automotor de estrutura mecânica igual à motocicleta dotado de três rodas.
UTILITÁRIO	veículo misto caracterizado pela versatilidade do seu uso, inclusive fora da estrada.

Fonte: Ministério das Cidades, Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN

A Figura 6 mostra o perfil da frota quanto ao ano de fabricação. Nota-se que 38% dos veículos que circulam no município foram fabricados entre 2010 e 2019, ou seja, com tecnologias apropriadas para a redução das emissões, correspondente à fase Euro 5 do PROCONVE. Além disso, 24 % da frota em circulação no município foi fabricada entre 2000 e 2009, correspondendo à veículos com tecnologia Euro 4, Euro 3 e Euro 2. Ainda, 17 % dos veículos que circulam no município, corresponde à fase Euro 1 do PROCONVE ou não tem especificações, o que os torna uma fonte considerável de poluição do ar.

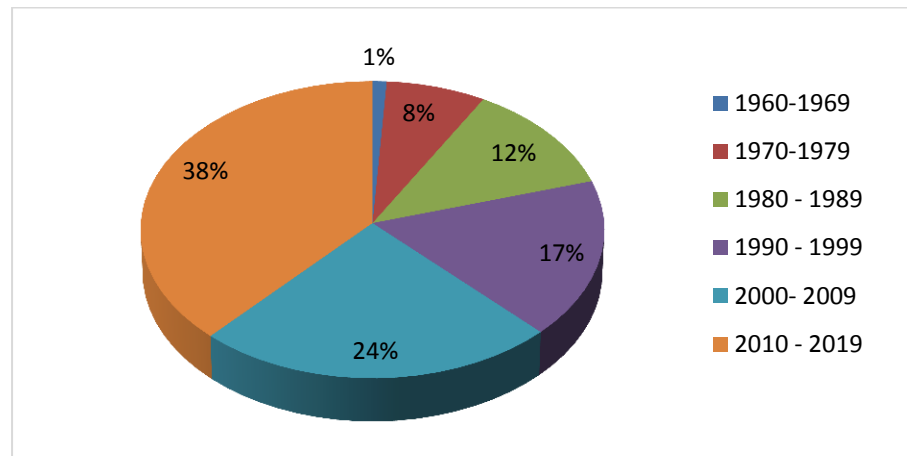


Figura 6: Perfil da frota do município do Rio de Janeiro por ano de fabricação  
 Nota: dados de maio de 2019  
 Fonte: Detran RJ, 2019

A Figura7 apresenta o perfil da frota por tipo de combustível. Nota-se que 40% da frota é movida à gasolina, estando a frente de 29 % de veículos *flex*, movidos à álcool e gasolina. Os veículos com adaptação para Gás Natural Veicular (GNV) aparecem em combinação com os veículos *flex*, movidos à álcool e gasolina (10%), com os veículos movidos apenas à gasolina (9%) e álcool (1%). Apenas 4% da frota registrada

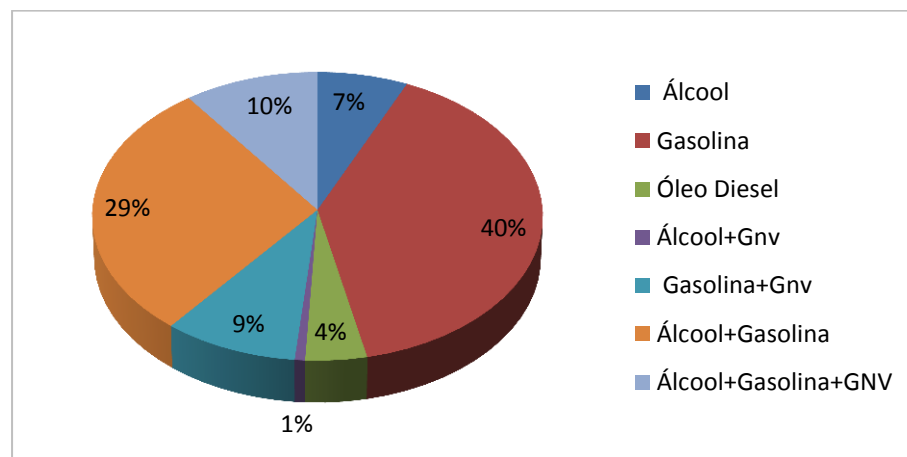


Figura 7: Perfil da frota do município do Rio de Janeiro por combustível  
 Nota: dados de maio de 2019  
 Fonte: Detran RJ, 2019

Tabela 14 apresenta os tipos de veículos relacionados ao combustível utilizado, bem como os poluentes atmosféricos emitidos.

Tabela 14: Relação de tipo de veículos com combustível e poluente emitido

<b>Veículos</b>	<b>Motor</b>	<b>Combustível</b>	<b>Poluente</b>
Automóveis e Comerciais Leves	Otto	Gasolina C Etanol GNV	CO, NOx, RCHO, NMHC, SOx, CH4 e MP CO, NOx, RCHO, NMHC, CH4 CO, NOx, RCHO, NMHC e CH4
Comerciais Leves, Caminhões Leves, Médios e Pesados Ônibus urbano, Rodoviário e Microônibus	Diesel	Diesel	CO, NMHC, NOX, SOx e MP
Motocicletas e Assemelhados	Otto	Gasolina C	CO, NOx, RCHO, NMHC, SOx, CH4 e MP

Fonte: Inventário INEA, 2016

## 1.5- Combustível

### 1.5.1- Óleo Diesel

O óleo diesel é um produto obtido a partir do refino do petróleo bruto, por meio do processo de destilação fracionada. É constituído, basicamente, por hidrocarbonetos e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio (CNT, 2015). Possui classificação mediana quanto ao nível de toxicidade, é pouco volátil, porém altamente inflamável, possuindo um odor forte e característico (CNT, 2015).

A Resolução ANP nº 65, de 09/12/2011 classifica os óleos diesel de uso rodoviário em óleo diesel A, produzido sem adição de biodiesel e o óleo diesel B, com adição de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

Em 2005 devido a publicação da lei nº 11.097, de 13/01/2005, a qual dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, todo o óleo diesel nacional disponível ao consumidor contém uma porcentagem de biodiesel em sua composição.

A lei nº 11.097/2005 conceitua o Biodiesel como:

Biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conformeregulamento para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.

O biodiesel pode ser obtido a partir de uma matéria prima oleosa, que podem ser, principalmente óleos vegetais, gorduras de origem animal, bem como resíduos industriais e esgoto sanitário. Estas gorduras são chamadas de triglicerídeos, uma vez que possuem três moléculas de ácidos graxos ligadas a uma molécula de glicerina(FETRANSPOR, 2011;MME, 2018; ANP, 2018).

Portanto, o biodiesel é produzido por meio do processo químico chamado de transesterificação, onde os triglicerídeos, na presença de um catalisador, reagem com um álcool primário, metanol ou etanol, e se separam da glicerina, tornando o óleo mais fino e menos viscoso (FETRANSPOR, 2011;MME, 2018; ANP,2018).

No entanto, este combustível renovável só é comercializado de acordo com as normas de qualidade da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), podendo substituir total ou parcialmente o diesel de petróleo em motores do ciclo diesel automotivos ou estacionários (FETRANSPOR, 2011;MME, 2018; ANP,2018).

Em 2003 foram criados pelo governo federal a Comissão Executiva Interministerial do Biodiesel (CEIB) e o Grupo Gestor (GG), para iniciar os primeiros movimentos para a criação de uma política para a inserção do biodiesel na matriz energética brasileira. Como fruto da comissão, em 2004 foi lançado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB),com o objetivo de implementar, de maneira sustentável, técnica, econômica, a produção e o uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, via geração de emprego e renda. Além disso, foram definidos um conjunto de leis e regulamentações para a inserção do biodiesel no Brasil (MDA, 2018; ANP,2018).

Segundo a ANP o uso o biodiesel misturado ao diesel teve início em 2004, experimentalmente, e entre 2005 e 2007o diesel com 2% de biodiesel em sua composição era voluntária, passando a ser obrigatória após a publicação da lei nº 11.097/2005. Diante disto, em janeiro de 2008, entrou em vigor de forma obrigatória o uso do diesel B2 (2% de biodiesel), em todo o território nacional. No mesmo ano, no mês de julho entrou em vigor o uso do diesel B3 (3% de biodiesel). Em julho de 2009 entrou em vigor o diesel B4 (4% de biodiesel), em janeiro de 2010 o diesel B5



(5% de biodiesel), em agosto de 2014, o diesel B6 (6% de biodiesel), em novembro de 2014, o diesel B7 (7% de biodiesel) e em março de 2018 o diesel B10 (10% de biodiesel) (CORRÊA et al., 2010; ANP, 2018).

Embora o mercado atual esteja comercializando o diesel B10, existem diversos estudos com biodiesel de diferentes misturas (BX), aplicadas em diversos motores (ônibus, caminhões, motores de bancadas, entre outros).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento publicou um trabalho em 2015 que compilou 57 estudos sobre biodiesel com diferentes misturas no Brasil e no Mundo. O trabalho concluiu que os estudos realizados no Brasil com os diesel B20, B50 e B100 reduziram 11%, 23% e 39% das emissões de MP, respectivamente. Ainda, o estudo da ANP (2014) mostrou que os veículos movidos a B100 obtiveram nível de opacidade (MP) entre 69 e 73% menor do que os veículos similares movidos à diesel S10. Além disso, também mostrou que os veículos híbridos, que já atendem as especificações PROCONVE P7, reduziram em 80% as emissões de MP (ANP, 2014; MAPA, 2015).

O estudo realizado pela COPPETEC em 2011 calculou as emissões dos poluentes por tipo de combustível para o ano de 2010, bem como estimou as emissões para 2020 e 2030.

Segundo este estudo, o combustível diesel contribuiu para 74% das emissões de CO em 2010, reduzindo para 51% e 41% nas previsões para 2020 e 2030, respectivamente. Os veículos movidos a diesel contribuíram para 81% das emissões de NOx em 2010, aumentando para 85% em 2020 e 88% em 2030. Além disso, outro poluente característico do combustível diesel são os materiais particulados, principalmente os finos. Segundo o COPPETEC (2011) os veículos a diesel contribuíram para 91% das emissões de MP em 2010, diminuindo para 85% em 2020 e 81% em 2030. No entanto, o diesel não tem participação nas emissões dos aldeídos (RCHO) e do metano (CH<sub>4</sub>), e participa pouco das emissões dos Hidrocarbonetos Não Metanos (NMHC), sendo registrado pelo estudo, 12% em 2010, 22% em 2020 e 25% em 2030 (COPPETEC, 2011).

Além disso, o estudo encontrou contribuição do diesel em 44% em 2010, 46% em 2020 e 47% em 2030 das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (COPPETEC, 2011).

### 1.5.2- Gás Natural Veicular (GNV)

O Gás Natural Veicular (GNV) é um combustível de origem fóssil composto basicamente por gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e é utilizado, por muitas vezes, com uma fonte alternativa para os veículos de ciclo Otto movidos a etanol hidratado ou gasolina C. Este combustível pode ser adicionado a um veículo de ciclo Otto já em uso como também podem ser introduzido em veículos originais de fábrica movidos à GNV (CETESB, 2016).

O GNV veio como um combustível para substituir o óleo diesel e a gasolina, para veículos rodoviários, nos grandes centros urbanos (ANP, 2003).

Em meados dos anos 80 foi criado PLANGAS - Plano Nacional de Gás Natural, desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia, que tinha como objetivo utilizar o gás natural nem substituição do óleo diesel utilizado nos transportes de carga e de passageiros nos centros urbanos (ANP, 2003).

Em 1996 foi criado o Decreto Federal nº 1.787/96, o qual autorizou o uso de GNV para veículos particulares com o objetivo de incentivar as conversões. No entanto, para a utilização do GNV os veículos deveriam estar registrados e licenciados na forma da legislação vigente e possuir características apropriadas para receber, armazenar e consumi-lo (ANP, 2003).

A qualidade do Gás Natural comercializado no Brasil é estabelecida pela Resolução ANP nº 16/2008, a qual aplica-se ao gás natural a ser utilizado como combustível para fins industriais, residenciais, comerciais, automotivos (GNV) e de geração de energia.

Do ponto de vista ambiental a contribuição do combustível GNV para as emissões de CO foram de 7 % em 2010, sendo previsto 10% para 2020 e 7% em 2030, segundo o estudo da COPPETEC (2011). O GNV também contribuiu para 7% das emissões de NOx em 2010, mantendo o mesmo valor em 2020 e reduzindo para 5% em 2030. Já em relação às emissões de RCHO e de NMHC os veículos movidos a GNV contribuíram para 14% das emissões de RCHO em 2010, 13% em 2020 e 8% em 2030 e 3% para NMHC em 2010 e 2020 e 1% em 2030 (COPPETEC, 2011).

Para as emissões de  $\text{CO}_2$ , o GNV contribuiu apenas 2% em 2010 e segundo a previsão, esta porcentagem se manterá em 2020 e 2030 (COPPETEC, 2011).

No entanto, por ser um combustível composto basicamente de metano ( $\text{CH}_4$ ),

possui grande participação nas emissões deste poluente. Em 2010, contribuiu para 61 % das emissões de CH<sub>4</sub>, 68 % em 2020 e 60 % em 2030 (COPPETEC, 2011).

### 1.5.3- Etanol Hidratado

O etanol hidratado é um álcool etílico com teor de água próximo de 5% em volume, utilizado diretamente nos veículos movidos a etanol ou nos veículos *flex*.

Além disso, ainda existe o etanol anidro, que também é um álcool etílico com teor de água próximo de zero que é misturado à gasolina A para formar a gasolina

C. No Brasil, ambos são obtidos a partir da cana-de-açúcar, o que os classifica como um combustível renovável (CETESB, 2016).

Em 1975, foi publicado Decreto nº 76.593, de 14 de Novembro de 1975, o qual instituiu o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), com o objetivo de incentivar a aquisição de veículos movidos a etanol. Em 1977 a gasolina recebeu 4,5% de etanol, sendo assim chamada de gasool (mistura de gasolina com álcool anidro), sendo a porcentagem de etanol aumentada para 15 % em 1979 (CORRÊA, 2010).

Em 1983, 90% dos veículos leves foram vendidos com etanol. Em 1985 a gasolina passou a ter 22% de etanol em sua composição, chegando a 25% de etanol nos anos 90. Em 1999 os veículos leves passaram a utilizar o GNC (Gás Natural Comprimido), sendo em 2003 iniciado o uso dos veículos *flex* (COPPETEC, 2011).

De acordo com o estudo do COPPETEC (2011), os veículos movidos à etanol hidratado contribuíram para 11% das emissões de CO em 2010, 17% em 2020 e 23% em 2030. Este combustível contribui de maneira insignificante para as emissões de NO<sub>x</sub>, sendo registrada 2% em 2010 com previsão para se manter em 2020 e 2030 (COPPETEC, 2011).

A maior participação do etanol hidratado está nas emissões de RCHO, onde registrou 39% em 2010 e esteve previsto aumento para 59% em 2020 e 68% em 2030, segundo COPPETEC (2011). Em seguida, o etanol hidratado também participa significativamente das emissões de NMHC, sendo registrado pelo estudo 12% em 2010 e previsto 14% para 2020 e 17% em 2030 (COPPETEC, 2011).

Além disso, contribuiu 5% e 7% em 2010, sendo previsto aumento de 6% e 11% em 2020 e 10% e 13% em 2030 para as emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, respectivamente (COPPETEC, 2011).

#### 1.5.4- Gasolina

A gasolina é um combustível composto pela mistura complexa de hidrocarbonetos relativamente voláteis obtido através do petróleo, podendo variar entre 5 a 12 carbonos, por isto é classificada como um combustível fóssil e não renovável (CETESB, 2016; ANP, 2018).

A gasolina que é produzida nas refinarias não possui etanol em sua composição, por isto é chamada de gasolina pura ou Gasolina A, não sendo vendida nos postos de abastecimento (CETESB, 2016; PETROBRAS, 2018).

As distribuidoras compram a gasolina A das refinarias, formuladores, centrais petroquímicas ou importam das empresas autorizadas pela ANP, bem como o etanol anidro das usinas produtoras para misturar e transformar em gasolina C, a qual é vendida nos postos de revenda de combustível (ANP, 2018; PETROBRAS, 2018).

No entanto, para que qualquer gasolina automotiva seja comercializada no Brasil, deve atender integralmente à Resolução ANP nº 40/2013, que compreende o Regulamento Técnico ANP nº 3/2013.

Segundo a Petrobras a proporção de etanol anidro na gasolina C é determinada pelo Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA), podendo variar entre 18% e 27%, através de resoluções (PETROBRAS, 2018).

A Resolução CIMA nº 1 DE 04/03/2015, recomendou a adição de 27% de etanol na gasolina comum e 25% na gasolina *premium* a partir de 16/03/2015.

Outro aspecto importante a ser abordado é a porcentagem de enxofre na gasolina C. A gasolina Cassim com o diesel, vem passando por alterações no teor de enxofre para atender as fases do PROCONVE. Nos últimos 18 anos o teor de enxofre reduziu em, aproximadamente 96,7% na gasolina C. Em 1998 a gasolina C possuía  $1500 \text{ mg kg}^{-1}$  de enxofre, reduzindo para  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  em 1999, regredindo para  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  em 2011 chegando em  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  em 2014, o qual se mantém até hoje (ANP, 2018).

Além do teor de enxofre, destacam-se também a redução dos limites máximos de hidrocarbonetos aromáticos, olefínicos e benzeno, além da avaliação do teor de fósforo (no caso de suspeita de contaminação) e silício. Essas determinações atendem à fase L-6 do PROCONVE, estabelecida pela Resolução Conama nº 415/2009, que impôs limites mais restritos para os níveis de emissões de motores ciclo Otto a partir do início de 2014 (ANP, 2018).

Segundo o estudo do COPPETEC (2011), os veículos movidos à gasolina C possuem maior influência nas emissões de NMHC e CO (COPPETEC, 2011).

As emissões de NMHC em 2010 foi de 73%, com tendência à redução de 61% e 57 % nas previsões de 2020 e 2030. Ainda, o estudo registrou 74% das emissões de CO provenientes da gasolina C em 2010, também com redução prevista de 51% para 2020 e 41% para 2030 (COPPETEC, 2011).

Em relação às emissões dos gases de efeito estufa GEE, a gasolina C foi responsável por 34% das emissões de CH<sub>4</sub> e 26% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2010. A previsão foi de 26% e 30% das emissões de CH<sub>4</sub> em 2020 e 2030, respectivamente e de 28% das emissões de CO<sub>2</sub> em 2020 e 2030 (COPPETEC, 2011).

No entanto, a contribuição da gasolina para as emissões de NO<sub>x</sub> são praticamente insignificantes, sendo registrado 2% nos anos estudados pelo inventário da COPPETEC (2011). Também possui baixa participação das emissões de MP, sendo registrado 9% em 2010 e previsto 15% em 2020 e 19% em 2030. No futuro, o óleo diesel ainda será o maior contribuinte para as emissões de MP (COPPETEC, 2011).

## **1.6- Sistema de propulsão e uso de energia**

O transporte é a capacidade de um objeto se deslocar em uma determinada distância ao longo do tempo, quando se é aplicado algum tipo de energia. Neste sentido, os transportes dependem de uma força de propulsão para o seu deslocamento (D'AGOSTO, 2015).

No caso do transporte rodoviário, alvo desta dissertação, para que aja o deslocamento do veículo, a força de propulsão deve vencer as forças naturais de resistência ao movimento, tais como a aerodinâmica, ao rolamento e as forças necessárias à variação de velocidade (D'AGOSTO, 2015).

Neste sentido, os sistemas de propulsão são classificados em sistemas convencionais e não convencionais.

O sistema de propulsão convencional possui um motor alternativo de combustão interna (MCI), onde é misturado o combustível armazenado no tanque com o ar do ambiente, transformando a energia química dos combustíveis em energia mecânica para transmitir a potência e o torque do motor às rodas

eimpulsionar o veículo (D'AGOSTO, 2015). A Figura 8 apresenta um esquema de um sistema de propulsão convencional (D'AGOSTO, 2015).

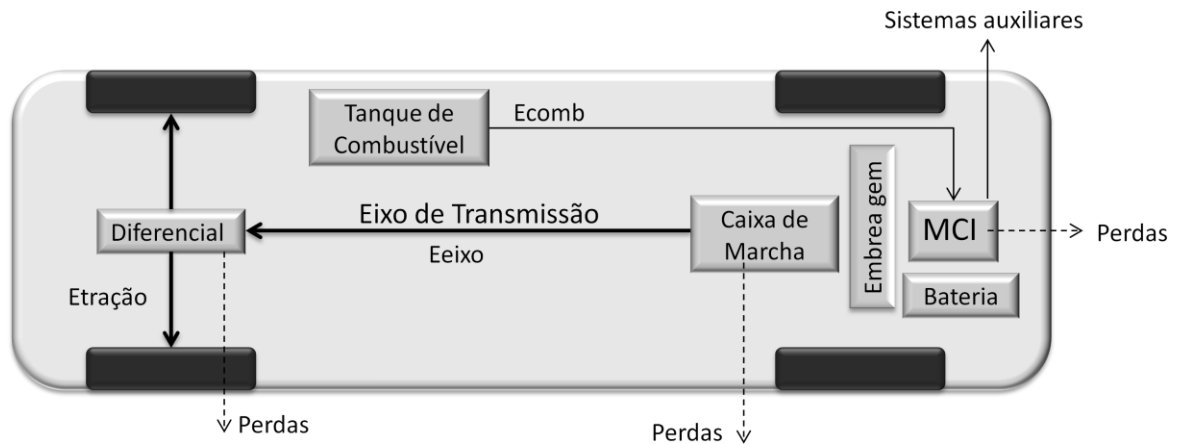


Figura 8: Sistema de Propulsão convencional – veículo rodoviário

Legenda: Ecomb : energia química contida no combustível;

Eeixo – energia mecânica disponível no eixo de transmissão para gerar torque; Etração - energia mecânica disponível no eixo de tração para gerar torque.

Fonte: D'Agosto, 2015.

A ignição da mistura do ar com o combustível (mistura A/C) dentro do motor, pode acontecer por meio de uma centelha (motores do ciclo Otto) ou por compressão (Motores do ciclo Diesel).

Os motores de combustão interna do ciclo Otto possuem uma vela de ignição, a qual propicia a combustão/explosão do motor. Geralmente são utilizados nos automóveis, motos, em alguns veículos comerciais que utilizam gasolina C, etanol hidratado ou GNV como combustível e também nos veículos tipo *flex-fuel* (D'AGOSTO, 2015; CETESB, 2016).

Nos motores de combustão interna do ciclo Diesel, não há a necessidade de vela de ignição, uma vez que a combustão/explosão do motor ocorre devido ao aumento da pressão e temperatura do interior do cilindro provocada pela compressão do ar. Este motor é empregado nos ônibus, caminhões, em alguns comerciais leves, furgões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e fontes estacionárias como geradores elétricos e moto bombas de combate à incêndio, que utilizam diesel como combustível (D'AGOSTO, 2015; CNT, 2015; CETESB, 2016).

Estes dois tipos de motores podem ser classificados em dois ou quatro tempos (2T ou 4T). O tempo do motor de dá pelo movimento de rotação do eixo das manivelas do motor. A pressão no interior do cilindro aumenta durante a queima da

mistura A/C por isto, o pistão se desloca para baixo e depois para cima, completando um ciclo. Logo, nos MCIs ocorrem 4 ciclos ou fases, a admissão de ar, a compressão, a combustão/queima e a exaustão dos gases. O que difere o motor de 2 tempos do de 4 tempos é o momento de execução destas fases (D'AGOSTO, 2015).

No motor de 2 tempos a admissão da mistura A/C e a compressão ocorrem no primeiro tempo, ou seja, em um giro completo da árvore de manivelas, ocorrendo a combustão e a exaustão dos gases no segundo tempo (D'AGOSTO, 2015).

Já o motor de 4 tempos estas fases ocorrem de forma mais bem demarcadas, sendo que cada tempo ocorre a cada dois giros completos da árvore de manivela.

Na fase da admissão ocorre a entrada da mistura A/C nos motores do ciclo Otto e apenas de ar nos motores do ciclo diesel quando o pistão ainda está em baixo. Ao subir o pistão comprime a mistura aumentando a pressão e a temperatura. No caso dos motores do ciclo Otto, neste momento, ocorre a centelha a qual auxilia na explosão do motor, já no caso dos motores do ciclo diesel ocorre a injeção do combustível, o qual é comprimido e explode. Na explosão ocorre a expansão dos gases e o pistão volta para baixo e os gases escapam (D'AGOSTO, 2015).

A composição destes gases de escape depende do tipo de combustível utilizado e da regulagem do motor. As Figuras 9 e 10 apresentam os motores por centelha, ou do ciclo Otto e por compressão, ou motor do ciclo diesel.

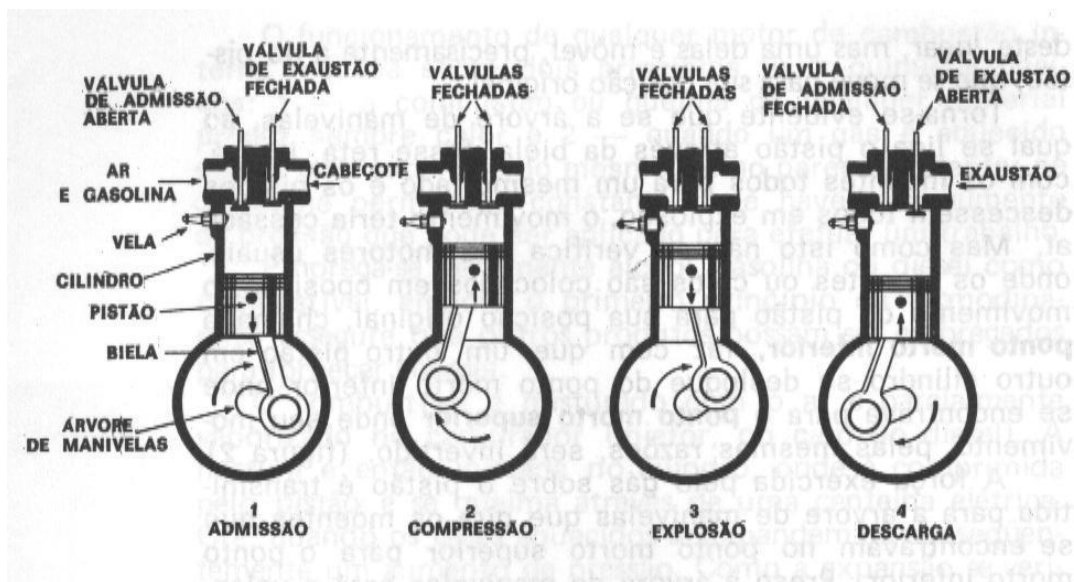


Figura 9: Motor de Combustão Interna de 4 tempos por centelhamento – Motor de Ciclo Otto  
Fonte: D'Agosto, 2015.

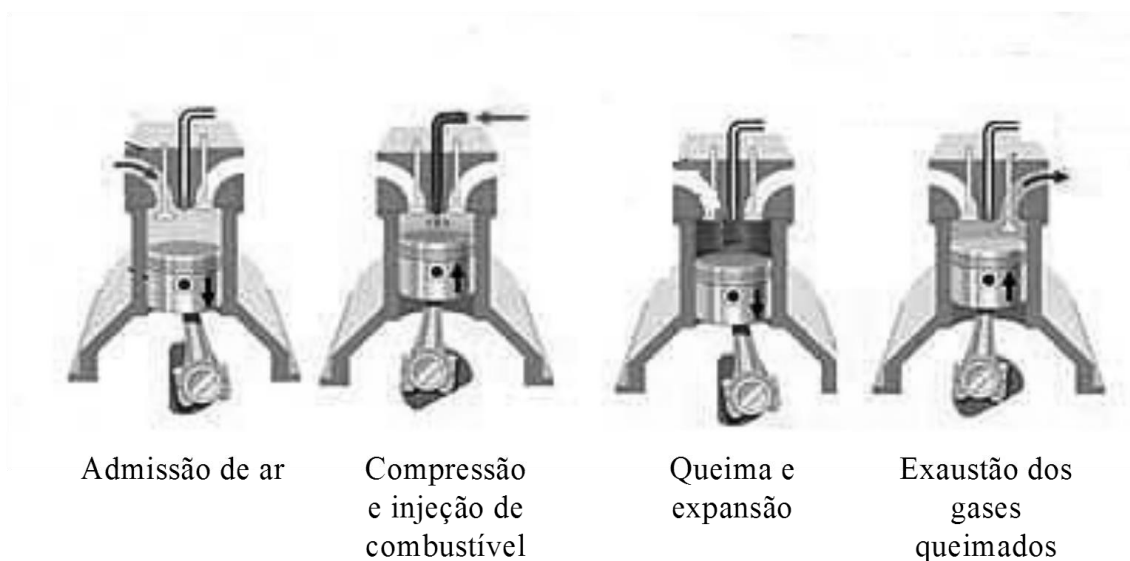


Figura 10: Motor de Combustão Interna de 4 tempos por compressão – Motor do Ciclo Diesel  
Fonte: D'Agosto, 2015.

Os sistemas de propulsão não convencionais podem assumir duas configurações básicas: motor elétrico (ME) e sistema de transmissão mecânica, também chamado de sistema de propulsão elétrico e a combinação diferentes motores e sistema de transmissão mecânica, também chamado de sistema de propulsão híbrido. Nesta dissertação será abordado o sistema de propulsão híbrido possuindo um motor de combustão interna (MCI) e um motor elétrico (ME).

#### 1.6.1- Sistema de propulsão elétrico

Os veículos que possuem sistema de propulsão elétrico são chamados de veículos elétricos, por não possuírem um motor alternativo de combustão interna, sendo o seu principal sistema de tração o motor elétrico.

Os veículos elétricos podem utilizar um ou mais motores elétricos, em parte ou completamente, para propulsão. Nestes veículos, o combustível é a eletricidade, que pode ser obtida de diferentes maneiras.

Em uma das possibilidades, a energia elétrica pode ser captada por cabos aéreos proveniente de uma fonte externa de eletricidade, não sendo estocada ou gerada e armazenada em quantidade suficiente nos acumuladores internos ao veículo. Estes veículos são chamados de trólebus, os quais não são muito utilizados devido à restrição dos movimentos, uma vez que depende de uma via eletrificada (D'AGOSTO, 2015; FGV Energia, 2017).



Em uma segunda opção a energia elétrica pode ser captada por meio de uma fonte externa (a rede elétrica, por exemplo) e armazenada em baterias localizadas no interior do veículo, alimentando o motor elétrico, o qual por meio do sistema de transmissão mecânico propulsiona as rodas, como pode ser observado na Figura 11. Estes veículos podem ser chamados de veículos elétricos puros plug-in que significa “ligado na tomada”, uma vez que usam exclusivamente a eletricidade como combustível e são conectados a uma fonte externa para a obtenção da energia elétrica. Por este motivo, são independentes da existência da rede elétrica e mais versáteis. (D’AGOSTO, 2015; FGV Energia, 2017). Além disso, estes veículos ainda podem obter energia por meio da energia mecânica de frenagem (frenagem regenerativa, ao se frear o veículo) (FGV Energia, 2017).

Outra opção para fornecer energia ao motor elétrico são as pilhas de combustível, a partir da reação do hidrogênio e oxigênio com água em uma célula de combustível (D’AGOSTO, 2015; FGV Energia, 2017). No entanto, nesta dissertação não serão abordados os veículos movidos à célula de combustível.

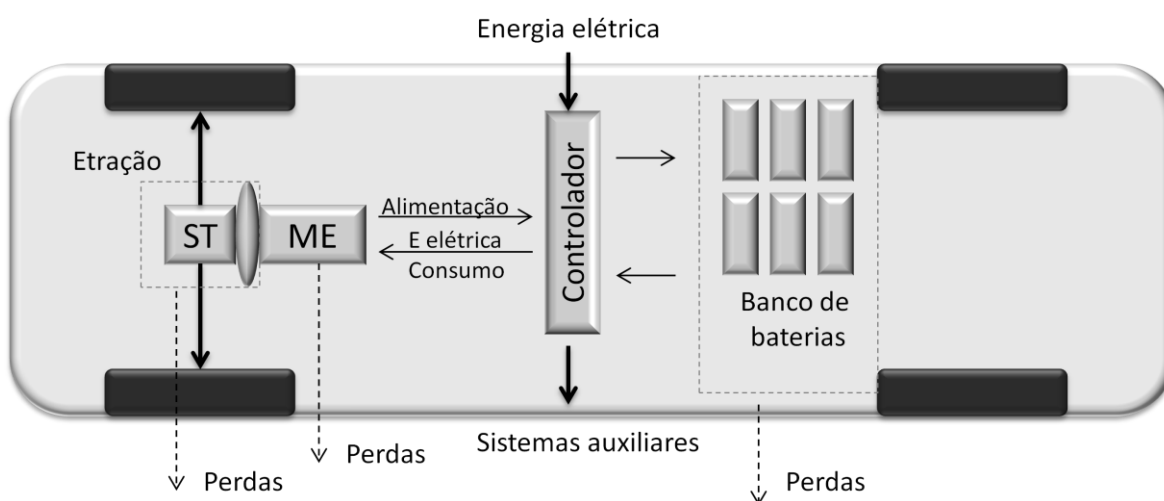


Figura 11: Sistema de propulsão elétrico com baterias – veículos elétricos puros plug-in  
Fonte: D’Agosto, 2015.

Legenda: ST= Sistema de Transmissão; ME= Motor elétrico; Eelétrica= energia elétrica; Etração = energia mecânica disponível no eixo de tração para gerar torque

### 1.6.2- Sistema de propulsão híbrida

Os veículos que possuem propulsão híbrida são aqueles que utilizam mais de um sistema de propulsão em movimento. Os veículos mais desenvolvidos no mundo possuem sistemas de propulsão compostos por um motor elétrico (ME) e um

motor alternativo de combustão interna (MCI) para a propulsão. Nesta combinação, os MCI são menores do que os MCIs dos veículos convencionais, proporcionando um regime de rotação próximo da máxima eficiência energética (D'AGOSTO, 2015; FGV Energia, 2017).

Os veículos híbridos podem ser classificados em série e em paralelo. Nos veículos híbridos em série os MCI fornecem eletricidade ao ME, sendo este o único responsável pelo deslocamento do veículo, como pode ser visto na Figura 12. Já os veículos em paralelo podem utilizar ambos motores para propulsão, por exemplo, em áreas urbanas, a propulsão pode ocorrer apenas por meio do ME, enquanto nas estradas e rodovias apenas o MCI pode ser acionado (Figura 13) (D'AGOSTO, 2015; FGV Energia, 2017).

Ambos os casos, o sistema é composto de unidade de conversão de energia, unidade de estocagem de energia e unidade de tração.

Os veículos híbridos também podem ser chamados de híbrido puro, onde o MCI é o principal responsável pela propulsão do veículo, sendo a eletricidade fornecida ao ME tanto pelo MCI quanto pelo sistema de frenagem regenerativa do veículo. Neste caso a função do ME é apenas melhorar a eficiência do MCI (FGV Energia, 2017).

Nos veículos híbridos *plug-in* o MCI também é o principal motor responsável pela propulsão do veículo, no entanto, a energia fornecida ao ME também é proveniente de fonte externa de eletricidade. Ambos são híbridos do tipo paralelo, conforme a Figura 13 (FGV Energia, 2017).

Já os veículos híbridos de longo alcance são híbridos em série, sendo o ME o principal motor, o qual é alimentado diretamente de uma fonte externa de eletricidade. Neste caso, a função do MCI é fornecer energia a um gerador que é capaz de manter um nível mínimo de carga nas baterias, aumentando assim o seu alcance (FGV Energia, 2017).

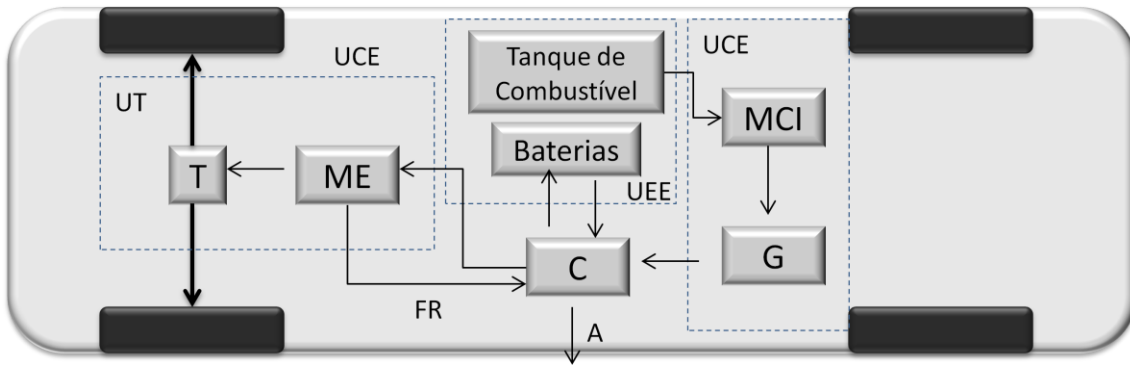


Figura 11: Sistema de propulsão elétrico com baterias – veículos elétricos puros plug-in  
 Legenda - T: Mecanismo de tração; ME: Motor elétrico; C: Controlador; G: Gerador; MCI: Motor de combustão interna; UT: Unidade de tração; UEE: Unidade de estocagem de energia; UCE: Unidade de conversão de energia; FR: Freio regenerativo; A: Carga dos acessórios  
 Fonte: D'Agosto, 2015

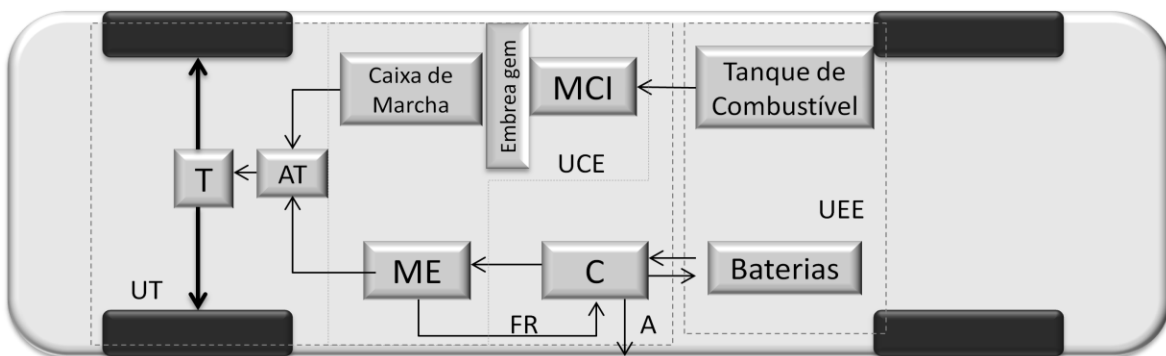


Figura 12: Sistema de propulsão elétrica híbrido em série – veículo rodoviário  
 Legenda: T – Mecanismo de tração AT – Acoplador de torque ME – Motor elétrico C – Controlador MCI – Motor de combustão interna UT – Unidade de tração UEE – Unidade de estocagem de energia UCE – Unidade de conversão de energia FR – Freio regenerativo A – Carga dos acessórios  
 Fonte: D'Agosto, 2015

Por serem tecnologias veiculares menos poluidoras, os veículos elétricos (VEs) e veículos híbridos elétricos (VEHs) tem se tornado foco de grandes estudos, como é o caso de Lopes (2008), que estudou as estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido em série. Hidrue et al. (2011), que pesquisou sobre cinco características dos veículos elétricos: autonomia, tempo de carga, redução de custos com combustível, redução da poluição e desempenho; e Richardson (2013), que buscou na literatura atual as interações dos veículos elétricos com fontes de energias renováveis, bem como, pesquisou sobre os impactos econômicos, ambientais e da rede elétrica relacionados à estas interações. Segundo Richardson (2013) uma série de impactos positivos podem ser esperados a partir da introdução dos veículos elétricos, incluindo menores custos de operação dos veículos, as reduções de emissões de CO<sub>2</sub> e a capacidade introduzirem energia elétrica gerada por fontes renováveis na

rede elétrica.

Além disso, os autores da Tabela 15 realizaram testes comparando as emissões dos veículos convencionais (MCI) com as dos veículos híbridos-elétricos, resultando em fatores de emissões para os híbrido.

Tabela 15: Fatores de Emissão para automóveis e ônibus híbrido-elétrico

Autor	Ano	Local	Revista	Tipo de veículo	Unidade	Fatores de emissão médio				Redução			
						CO	NOx	HC	PM	CO	NOx	HC	PM
Zang et al., 2014	2014	China	Applied Energy	Ônibus diesel com SCR Euro V	gKm <sup>-1</sup>	4,15	7,45	0,25	-	-	-	-	-
				Ônibus híbrido com SCR Euro IV	gKm <sup>-1</sup>	3,00	4,40	0,09	-	-28%	-41%	-64%	-
COPPE, 2012 appud IEA (2002) e NAVC (2000)	1999	EUA	-	Ônibus híbrido	-	-	-	-	-	16% e 55% <sup>a</sup>	100%	77% a 100%	
COPPE, 2012 appud NAVC (2000)	1999	-	-	Ônibus híbrido	-	-	-	-	67% e 99%	7% a - 39%	máx 79%	máx 92%	
COPPE, 2012 appud Mora et al (2009)	2009	-	-	Ônibus híbrido	-	-	-	-	77%	85%	96%	96%	
Wu et al., 2015	2015	China	Atmospheric Pollution Research	Automóvel Convencional (9 automóveis +11 táxis a gasolina)	gKm <sup>-1</sup>	0,56	0,12	0,05	-	-	-	-	-
				Automóvel Híbrido (Prius II e III)	gKm <sup>-1</sup>	0,25	0,01	0,01	-	-56%	-93%	-73%	-
Ahmadi, 2019	2019	EUA	Journal of Cleaner Production	Automóvel Convencional (Toyota Corola)	g milhas <sup>-1</sup>	0,26	0,34	-	0,41	-	-	-	-
				Automóvel Híbrido (Prius )	g milhas <sup>-1</sup>	0,26	0,25	-	0,32	0%	-26%	-	-22%
Zhang et al., 2013 Appud Song et al., 2007	2013	China	Science of the Total Environment	Automóvel Híbrido	gKm <sup>-1</sup>	0,22	0,01	0,02	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2019

### **1.7- Introdução de veículos elétricos e híbridos-elétricos**

A implantação de veículos elétricos e híbridos é uma das alternativas para melhorar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental proveniente dos veículos automotores. Alguns países do mundo vêm adotando políticas públicas para incentivar e difundir o uso dos veículos elétricos e híbridos, de modo a torná-los sua matriz energética no futuro em detrimento aos veículos automotores de combustão.

A União Européia, por exemplo possui metas de redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que estão continuamente sendo revistas, como por exemplo, em 2020 que precisará reduzir 27% dessas emissões em comparação à legislação vigente em 2012 a 2015, sendo a hibridização e a eletrificação, formas de alcançá-las. Os EUA também possuem metas fixadas ao longo prazo, as quais são desdobradas em metas anuais (BARROS et al., 2015).

Além das legislações que estabelecem reduções de CO<sub>2</sub>, existem as focadas em reduzir outros gases e estão cada vez mais restritivas. Por exemplo, a meta conjunta da União Européia é ter em circulação nas ruas em torno de oito milhões a nove milhões de veículos elétricos em 2020. Na França, Alemanha e Holanda, a meta é ainda mais agressiva com a implantação de dois milhões, um milhão e duzentos mil veículos, respectivamente (MCKINSEY e COMPANY, 2014).

Em relação aos incentivos financeiros os países da América do Norte (EUA), da Europa (Alemanha, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Holanda, Itália, Noruega, Reino Unido e Suécia) e da Ásia (China, Índia e Japão) incentivam os consumidores a comprarem estes veículos com a isenção das taxas de licenciamento, subsídios na compra dos veículos e incentivos fiscais. No ponto de vista de infraestrutura investem em pontos de recargas distribuídos em locais públicos, residências, em ruas e rodovias. Além disso, destaca-se outros incentivos como a gratuidade em estacionamentos públicos, usos de faixas exclusivas, isenção de pedágios em rodovias, descontos no seguro do veículo, dispensa de inspeções veiculares, descontos no valor da eletricidade para recarga de veículos elétricos, etc (BARROS et al., 2015).

Segundo Barros (2015), em 2013 foram licenciados em todo o mundo, aproximadamente 1,7 milhão de veículos híbridos ou elétricos, o que corresponde à aproximadamente 2% do total. Embora em pequena proporção desde 2005, o

mercado destes veículos vem crescendo 24,9% ao ano, contra 3,1% do mercado dos convencionais. Quem lidera este número é o Japão, o qual em 2013 licenciou mais de novecentos mil veículos híbridos, tendo em vista que estes veículos são comercializados desde 1997 com diversos incentivos. A montadora japonesa, Toyota, dispõe de seis modelos de veículos híbridos, os quais estiveram entre os 10 mais licenciados do mundo em 2013, sendo a família do Prius a que mais se destaca (BARROS et al., 2015).

Já o mercado de veículos 100% elétricos teve crescimento de 77,6% de 2012 para 2013, sendo os EUA o maior mercado, o qual deteve o licenciamento de 40% dos veículos licenciados no mundo em 2013. Na Noruega, este mercado aumentou 83% de 2012 para 2013, devido à políticas públicas agressivas que incentivaram financeiramente e não financeiramente (BARROS et al., 2015).

No Brasil o cenário é um pouco diferente em relação ao que mundo já está propondo. Ainda existem poucos incentivos monetários e não monetários para estimular o mercado desses tipos de veículos. A maior parte dos automóveis comercializados no Brasil são de luxo e são de modelos híbridos. Segundo o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) em dezembro de 2014 foi registrado uma frota de 1730 híbridos contra 34 modelos 100% elétricos, sendo estes a maior parcela composta por taxis nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo (BARROS et al., 2015).

Em relação aos ônibus, a frota elétrica no Brasil é majoritariamente de trólebus, os quais estão presentes em alguns corredores exclusivos para ônibus no estado de São Paulo (SP) e Curitiba (PR) (BARROS et al., 2015).

De uma maneira geral, tanto no Brasil quanto no resto do mundo, as fontes renováveis de eletricidade terão um papel fundamental para a inserção de veículos elétricos e híbridos.

## 2- METODOLOGIA

### 2.1- Característica do município do Rio de Janeiro

O município do Rio de Janeiro está localizado à latitude  $-22^{\circ}54'23''$  longitude  $-43^{\circ}10'21''$ , na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro, conforme Figura 14. Ao norte faz fronteira com os municípios de Itaguaí, Seropédica, Nova Iguaçu, Mesquita, Nilópolis, São João de Meriti, Duque de Caxias e Niterói, ao sul é banhado pelo oceano Atlântico, a leste pela Baía de Guanabara e a oeste pela Baía de Sepetiba (RIO DE JANEIRO, 2019), como mostra a Figura 15.

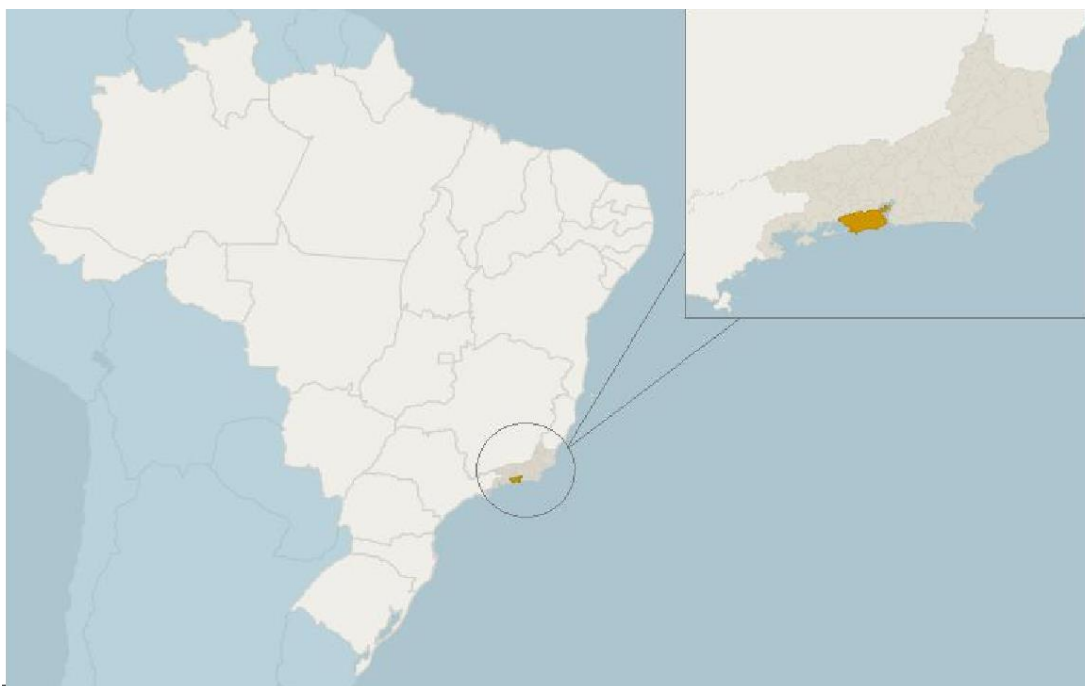


Figura 13: Representação do Local de estudo: Brasil, Estado do Rio de Janeiro e cidade do Rio de Janeiro

Fonte: Adaptado de IBGE, 2019 e *Google earth*





Figura 14: Município do Rio de Janeiro dividido em áreas zonas geográficas  
Fonte: (SEBRAE, 2015)

Segundo o IBGE a população do último censo (2010), no município do Rio de Janeiro, foi de 6.320.446 pessoas distribuídas em uma extensão territorial de 1.200,27 km<sup>2</sup>, possuindo uma densidade demográfica de 5.265,82habkm<sup>-2</sup> (IBGE, 2019).

O município é dividido em zonas geográficas: Centro, Zona Sul, Zona Norte e Zona Oeste, conforme Figura 15. A região do centro e da Zona Sul, juntas, possuem 39 bairros, em 2000, de um ranking dos bairros com os 10 melhores Índices de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), obtiveram uma média de 0,96. A Zona Norte conta com 87 bairros, e no mesmo ranking, obtiveram uma média de 0,91. A Zona Oeste, que conta com 34 bairros e apresentou, em 2000, o menor IDHM, com uma média de 0,88 (SEBRAE, 2015).

O clima no município é tropical, quente e úmido, porém possui variações locais, devido à diferenças de altitude, vegetação e por estar próximo ao oceano e baías. A cidade possui um relevo bem diversificado, contrastando entre mar e montanhas recobertas pela mata atlântica. Possui grandes maciços, tais como o da Pedra Branca com 1025 m de altitude, da Tijuca com 1022 metros e de Gericinó com 964 metros, os quais impactam na circulação de massa de ar em áreas distantes da costa, dificultando, por muitas vezes, a dispersão de poluentes atmosféricos (SOLURI et al., 2007; RIO DE JANEIRO, 2019).

A ocupação do solo do município é basicamente antrópica, sendo sua

principal fonte de poluição atmosférica os veículos, seguidas das indústrias, instaladas na Zona Oeste e Norte. O centro e Zona Sul possuem mais estabelecimentos comerciais e empresas de prestação de serviços, sendo o fluxo veicular caracterizado pela circulação de automóveis, motocicletas e ônibus urbano (SEBRAE, 2015; INEA,2016).

As regiões das Zonas Oeste e Norte são compostas de um número expressivo de estabelecimentos econômicos, bem como possui uma alta densidade industrial nos bairros de Santa Cruz, Campo Grande e Paciência, o que além de representar significativas fontes fixas de emissões, ainda propicia o intenso fluxo de veículos, em suas vias, correspondendo ao transporte de carga e de passageiros (ônibus transportando os trabalhadores para estas áreas) (INEA,2016).

## **2.2- Emissões Veiculares do Caso Base**

O caso base consiste nas emissões de uma frota projetada de 2020 à 2030 não considerando futuros avanços nas tecnologias dos motores de combustão interna e nas melhorias da qualidade dos combustíveis. Ou seja, os veículos fabricados de 2019 a 2030 terão as mesmas características que aqueles fabricados em 2018.

Para o cálculo das emissões de 2020 à 2030 foi necessário utilizar as emissões calculadas pelo Inventário de Emissões de Fontes Veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro – ano base 2013, publicado pelo Instituto Estadual do Ambiente em 2016, de modo a considerar a circulação dos veículos fabricados desde 1969 a 2013 nos anos projetados.

Neste sentido, foram consideradas as emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), material particulado de escapamento ( $\text{MP}_{\text{escap}}$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não metanos total ( $\text{NMHC}_{\text{total}} = \text{NMHC}_{\text{escapamento}} + \text{NMHC}_{\text{evaporativo}}$ ) e aldeídos (RCHO), calculadas pela metodologia *top-down*, uma vez que é uma abordagem mais simples, a qual considera a intensidade de uso da frota, o número de veículos e o fator de emissão.

Além disso, as emissões do Inventário INEA (2016) foram divididas por 04 (quatro) categorias veiculares, a saber:

- Automóveis;
- Ônibus urbanos;

- Demais Veículos do Ciclo Otto, que considera as emissões das motocicletas e dos veículos comerciais leves do ciclo Otto;
- Demais Veículos do Ciclo Diesel, que considera as emissões dos caminhões pesados e dos veículos comerciais leves do ciclo Diesel.

Portanto, as emissões veiculares do caso base (2020 à 2030) foram estimadas, por categoria, por meio da Equação 14.

$$Emiss\tilde{o}n = \frac{(Frota_n \times IU_{ref} \times Fe_{2018})}{100000} + Emiss\tilde{o}r_{j2013} \quad (14)$$

Onde:

Emiss\tilde{o}n = Emissão do ano a ser projetado (t ano<sup>-1</sup>)

Fr<sub>n</sub> = Frota circulante de veículos do ano a ser projetado (número de veículos)

IU<sub>ref</sub> = Intensidade de uso do veículo (km ano<sup>-1</sup>)

Fe<sub>2018</sub> = Fator de emissão do poluente considerado (g km<sup>-1</sup>). É específico para o ano-modelo de veículo considerado e depende do tipo de combustível utilizado .

Emiss\tilde{o}2013 = Emissão do município do RJ de 2013

### 2.2.1- Frota Veicular

Os dados da frota veicular do município do Rio de Janeiro foram obtidos a partir do site do DETRAN-RJ, considerando a frota registrada nos meses de dezembro de cada ano avaliado (2015 a 2019). Para este estudo a frota foi reclassificada em quatro categorias: automóveis, ônibus urbano, demais veículos do Ciclo Otto (motocicletas e caminhoneta) e demais veículos do Ciclo Diesel (caminhões pesados e caminhonete).

A frota foi projetada de 2020 à 2030, aplicando a tendência determinística, utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ) a partir de 2015, conforme as Equações 15 e 16.

$$b = \frac{\sum\{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\}}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (16)$$

### 2.2.2- Intensidade de Uso

A Intensidade de Uso é a distância percorrida pelo veículo ao longo de um ano. Para cada categoria e idade de veículo é estabelecida uma intensidade de uso de referência, a qual foi considerada neste estudo para o cálculo das emissões. A Intensidade de Uso de Referência foi obtida a partir da última publicação do site da CETESB, ou seja, para o ano de 2017 (CETESB, 2017).

Geralmente, as emissões dos Inventários são calculadas considerando a Intensidade de Uso ajustada, a qual considera o consumo aparente de combustível anual ( $l \text{ ano}^{-1}$ ) e o consumo de combustível de todas as categorias de veículos, estimado pela relação entre os valores de intensidade de uso de referência (km/ano) e autonomia (km/l). Como estes dados não foram obtidos para este estudo, optou-se em utilizar apenas a Intensidade de Uso de Referência disponibilizada pela CETESB, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16: Intensidade de Uso de Referência ( $\text{Km ano}^{-1}$ )

<b>Anos</b>	<b>Automóvel <i>flex-fuel</i></b>	<b>Ônibus Urbanos</b>	<b>Motocicletas</b>	<b>Comerciais Leves <i>flex- fuel</i></b>	<b>Caminhões Pesados</b>	<b>Comerciais Leves Diesel</b>
0	8.610	31.235	6.403	9.110	28.112	14.221
1	17.220	62.470	12.807	18.220	56.223	28.443
2	15.968	58.979	13.078	21.110	55.200	27.358
3	15.277	55.908	13.243	21.914	54.176	26.321
4	15.001	53.205	13.313	21.277	53.152	25.270
5	14.995	50.816	13.293	19.843	52.129	24.142
6	15.112	48.689	13.192	18.255	51.105	22.874
7	15.208	46.769	13.019	17.160	50.081	21.406
8	15.136	45.004	12.781	16.102	49.057	19.673
9	14.750	43.341	12.486	15.044	48.034	17.614
10	14.744	41.727	12.142	14.624	47.010	15.950
11	14.739	40.108	11.758	14.198	45.986	15.950
12	14.645	38.432	11.341	13.767	44.963	15.950
13	14.500	36.644	10.900	13.336	43.939	15.950
14	14.309	34.693	10.442	12.905	42.915	15.950
15	14.075	32.525	9.976	12.476	41.892	15.950
16	13.803	30.709	9.509	12.053	40.868	15.950
17	13.495	29.329	9.050	11.636	39.844	15.950
18	13.157	28.010	9.050	11.229	38.820	15.950

<b>Anos</b>	<b>Automóvel flex-fuel</b>	<b>Ônibus Urbanos</b>	<b>Motocicletas</b>	<b>Comerciais Leves flex- fuel</b>	<b>Caminhões Pesados</b>	<b>Comerciais Leves Diesel</b>
19	12.793	26.751	9.050	10.834	37.797	15.950
20	12.406	25.548	9.050	10.452	36.773	15.950
21	12.000	24.400	9.050	10.086	35.749	15.950
22	11.580	23.303	9.050	9.737	34.726	15.950
23	11.149	22.255	9.050	9.409	33.702	15.950
24	10.712	21.255	9.050	9.103	32.678	15.950
25	10.273	20.299	9.050	8.822	31.655	15.950
26	9.835	19.386	9.050	8.567	30.631	15.950
27	9.402	18.515	9.050	8.341	29.607	15.950
28	8.980	17.682	9.050	8.146	28.583	15.950
29	8.571	16.887	9.050	7.984	27.560	15.950
30	8.180	16.128	9.050	7.858	26.536	15.950
31	7.810	15.403	9.050	7.862	25.512	15.950
32	7.467	14.711	9.050	7.862	24.489	15.950
33	7.153	14.049	9.050	7.862	23.465	15.950
34	6.873	13.418	9.050	7.862	22.441	15.950
35	6.631	12.814	9.050	7.862	21.418	15.950
36	6.430	12.238	-	7.862	20.394	15.950
37	6.276	11.688	-	7.862	19.370	15.950
38	6.172	11.163	-	7.862	18.346	15.950
39	6.174	10.661	-	7.862	17.323	15.950
40	6.174	10.181	-	7.862	16.299	15.950

Fonte: CETESB, 2017

No cálculo das emissões (Equação 16) foram adicionadas as emissões de 2013 calculadas por INEA (2016), de modo a considerar os veículos antigos em circulação até 2013. Para considerar os veículos que entraram em circulação em 2014 até 2019 foram consideradas as intensidade de uso de referência a partir do sexto ano de uso.

Para estimar as emissões de 2020, por exemplo, foi utilizada a Intensidade de Uso de 6 anos, o que corresponde à presença dos veículos que entraram em circulação de 2014 à 2020. De maneira análoga as emissões de 2021 consideraram a intensidade de uso de 7 anos, até chegar em 2030 com a Intensidade de Uso de 16 anos.

### 2.2.3- Fator de Emissão

Fator de emissão é a massa de poluente emitida pelos veículos ao circularem por um determinado trecho e esses valores são publicados pela CETESB todo ano, a partir de informações recebidas dos fabricantes ou importadores de veículos ou motores (CETESB, 2017).

Neste sentido, os fatores de emissão foram obtidos do site da CETESB (2018) e foram considerados os valores constantes do ano de 2018, para os anos de 2019 a 2030, pois este é o último ano disponibilizado pelo órgão, para cada categoria e poluente, como pode ser visto na Tabela 17.

Tabela 17: Fatores de Emissão Utilizadas ( $\text{g km}^{-1}$ )

Tipos de Veículos	Ano	CO ( $\text{g km}^{-1}$ )	NMHC ( $\text{g km}^{-1}$ )	NOx ( $\text{g km}^{-1}$ )	RCHO ( $\text{g km}^{-1}$ )	MP ( $\text{g km}^{-1}$ )
Ônibus Urbanos	2018	0,532	0,010	2,016		0,021
Automóvel flex-fuel	2018	0,253	0,019	0,012	0,001	0,001
Comerciais Leves do ciclo Otto	2018	0,215	0,017	0,014	0,002	0,001
Motocicleta $\leq 150$ cc	2018	0,608	0,081	0,023		0,004
Caminhão Pesado	2018	0,266	0,022	1,630		0,014
Comerciais Leves do ciclo Diesel	2018	0,045	0,008	0,253	0,013	0,012

Fonte: CETESB, 2018

Para os ônibus foram considerados fatores de emissão do ônibus urbano e para os automóveis foram considerados de automóveis com motor *flex-fuel* usando gasolina C.

A categoria dos demais veículos do ciclo otto, definida neste estudo, englobou as motocicletas e as caminhonetes, as quais utilizaram fatores de emissão correspondentes à motocicletas com cilindradas menores e iguais à 150 cc e veículos comerciais leves do ciclo Otto com motor *flex-fuel* usando gasolina C, respectivamente.

A categoria dos demais veículos do ciclo Diesel, a qual considerou os caminhões e caminhonetes, utilizou os fatores de emissão dos caminhões pesados e dos veículos comerciais leves do ciclo Diesel, respectivamente.

### 2.2.4- Emissão da cidade do Rio de Janeiro em 2013

O Inventário do INEA (2016) estimou as emissões veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) no ano de 2013. Como o local de estudo desta dissertação é a cidade do Rio de Janeiro, foi necessário estimar as emissões para o município, utilizando a Equação 17. Multiplicou-se a emissão da RMRJ de 2013 por um fator de conversão, que por sua vez foi a razão da frota do município pela frota da RMRJ em 2013.

$$Emiss\tilde{a}o_{RJ} = \frac{Frota_{RJ} \times Emiss\tilde{a}o_{RMRJ2013}}{Frota_{RMRJ}} \quad (17)$$

Onde:

$Emiss\tilde{a}o_{RJ}$  = Emissão do município do Rio de Janeiro em 2013

$Frota_{RJ}$  = Frota veicular do município do Rio de Janeiro em 2013 (Detran-RJ, 2018)

$Emiss\tilde{a}o_{RMRJ}$  = Emissão da RMRJ de 2013 (INEA, 2016)

$Frota_{RMRJ}$  = Frota veicular da RMRJ em 2013 (Detran-RJ, 2018)

Para obter a frota da RMRJ foi necessário extrair da base de dados do Detran-RJ, disponível em seu site, os dados da frota de todos os municípios que fazem parte da RMRJ, sendo possível realizar o somatório.

### 2.3- Emissões Veiculares dos veículos elétricos

A partir das emissões calculadas de 2020 à 2030 foi possível estimar as emissões da cidade do Rio de Janeiro, considerando a implantação gradativa dos veículos elétricos ao longo dos anos estudados. Para este cálculo, bastou-se subtrair o percentual de implantação dos veículos elétricos das emissões calculadas do ano projetado, conforme a Equação 18.

$$Emiss\tilde{a}o_{nVE} = Emiss\tilde{a}o_n - (Emiss\tilde{a}o_n \times P_{in}) \quad (18)$$

Onde:

$E_{nVE}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos veículos elétricos

$E_n$  = Emissão do ano projetado

$P_{in}$  = Percentual de implantação gradual dos veículos elétricos.

$n$  = ano projetado

A Tabela 18 apresenta os percentuais de implantação gradual ao longo dos anos estudados para os ônibus e automóveis elétricos. Este percentual significa que em 2020, por exemplo, 10% da frota convencional de ônibus e 2% da frota convencional de automóvel serão substituídas por ônibus e automóveis elétricos e assim sucessivamente até 2030. Esta implantação gradual será apresentada no detalhamento dos cenários hipotéticos.

Tabela 18 : Percentuais de implantação gradual ao longo dos anos estudados ( $P_{in}$ )

Anos	Ônibus elétrico	Automóvel elétrico
2020	10%	2%
2021	15%	5%
2022	20%	8%
2023	30%	11%
2024	40%	14%
2025	50%	17%
2026	60%	20%
2027	70%	23%
2028	80%	26%
2029	90%	29%
2030	100%	50%

Fonte: Autor, 2019

#### 2.4- Emissões Veiculares dos veículos híbrido-elétricos

Para estimar as emissões dos veículos híbridos foram considerados os fatores de emissão pesquisados na literatura, conforme a Tabela 15. Para este estudo foram consideradas reduções de 77% das emissões de CO e  $MP_{escap}$ , bem como 85%, 79% de NOx, HCtotal, respectivamente para os ônibus híbridos elétricos.

Para os automóveis híbridos-elétricos foram consideradas reduções de 56% para CO, 93% de NOx, 73% de HC total e 22% de  $MP_{escap}$ . Não foi encontrado fator



de emissão para os Aldeídos, portanto, este poluente não foi considerado na análise dos veículos híbridos. A Equação 19 descreve o cálculo da estimativa das emissões dos veículos híbridos.

$$Emiss\tilde{a}o_{nVH} = Emiss\tilde{a}o_n - (Emiss\tilde{a}o_n \times P_{RH}) \quad (19)$$

Onde:

$Emiss\tilde{a}o_{nVH}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos veículos híbrido-elétricos

$Emiss\tilde{a}o_n$  = Emissão do ano projetado

$P_{RH}$  = Percentual de redução das emissões dos veículos híbrido-elétricos em comparação aos veículos convencionais

n = ano projetado

A Tabela 19 apresenta os percentuais de redução das emissões dos veículos híbrido-elétricos em comparação aos veículos convencionais pesquisados na literatura.

Tabela 19: Percentuais de redução das emissões dos veículos híbrido-elétricos em comparação aos veículos convencionais

<b>Veículos Híbridos</b>	<b>CO</b>	<b>HCT</b>	<b>MP escp</b>	<b>NOx</b>
Automóveis híbrido	56%	73%	22%	93%
Ônibus híbrido	77%	79%	77%	85%

Fonte: Autor, 2019

## 2.5- Emissões do Cenário 01

O cenário 01 considera a implantação gradual de automóveis elétricos na cidade do Rio de Janeiro, em substituição aos automóveis convencionais. No entanto, os ônibus urbanos e os demais veículos do ciclo Otto e Diesel continuarão sendo convencionais, considerando o crescimento anual da categoria

Portanto, para este cenário foram somadas as emissões dos ônibus urbanos, dos demais veículos do ciclo Otto e Diesel convencionais com as emissões considerando a implantação dos automóveis elétricos a cada ano projetado (2020-2030), conforme Equação 20.

$$Emiss\tilde{a}o_{C1} = Emiss\tilde{a}o_{nON} + Emiss\tilde{a}o_{nDO} + Emiss\tilde{a}o_{nDD} + Emiss\tilde{a}o_{nVE(a)} \quad (20)$$

Onde:

$Emiss\tilde{a}o_{C1}$  = Emissão do cenário 01 do ano projetado

$Emiss\tilde{a}o_{nON}$  = Emissão dos ônibus urbanos convencionais do ano projetado

$Emiss\tilde{a}o_{nDO}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Otto do ano projetado

$Emiss\tilde{a}o_{nDD}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Diesel do ano projetado

$Emiss\tilde{a}o_{nVE(a)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos automóveis elétricos

n = ano projetado

A implantação dessa tecnologia veicular terá início em 2020 com a inserção de 2% de automóveis elétricos na frota veicular no município do Rio de Janeiro, substituindo 2% dos automóveis convencionais. Este percentual aumentará para 7% em 2021, 12% em 2022 e continuará a aumentar 5% nos demais anos, até atingir 52% de automóveis elétricos em 2030 junto com 48% de automóvel convencional. Estes percentuais de implantação gradual pode ser observado pela Tabela 18.

Portanto, a previsão para 2030 é a redução de 52% dos poluentes atmosféricos emitidos pelos automóveis convencionais, uma vez que os veículos elétricos não emitem poluentes para a atmosfera.

## 2.6- Emissões do Cenário 02

O cenário 02 considera a implantação gradual de automóveis híbrido-elétricos na cidade do Rio de Janeiro, em substituição aos automóveis convencionais. No entanto, os ônibus urbanos e os demais veículos do ciclo Otto e Diesel continuarão sendo convencionais.

Portanto, para este cenário foram somadas as emissões dos ônibus urbanos, dos demais veículos do ciclo Otto e Diesel convencionais com as emissões considerando a implantação dos automóveis híbridos-elétricos, conforme Equação 21.

$$Emiss\tilde{a}o_{C2} = Emiss\tilde{a}o_{nON} + Emiss\tilde{a}o_{nDO} + Emiss\tilde{a}o_{nDD} + Emiss\tilde{a}o_{nVH(a)} \quad (21)$$

Onde:

$Emiss\tilde{a}o_{C2}$  = Emissão do cenário 02

$Emiss\tilde{a}o_{nON}$  = Emissão dos ônibus urbanos convencionais

$Emiss\tilde{a}o_{nDO}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Otto

$Emiss\tilde{a}o_{nDD}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Diesel

$Emiss\tilde{a}o_{nVH(a)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos automóveis híbrido-elétricos

n = ano projetado

Os percentuais de implantação gradual são análogos ao cenário 01.

## 2.7- Emissões do Cenário 03

O cenário 03 considera a implantação gradual de ônibus urbanos elétricos na cidade do Rio de Janeiro, em substituição aos ônibus urbanos convencionais. No entanto, os automóveis e os demais veículos do ciclo Otto e Diesel continuarão sendo convencionais.

Portanto, para este cenário foram somadas as emissões dos automóveis, dos demais veículos do ciclo Otto e Diesel convencionais com as emissões considerando a implantação dos ônibus elétricos, conforme Equação 22.

$$Emiss\tilde{a}o_{C3} = Emiss\tilde{a}o_{nAU} + Emiss\tilde{a}o_{nDO} + Emiss\tilde{a}o_{nDD} + Emiss\tilde{a}o_{nVE(ON)} \quad (22)$$

Onde:

Emissão<sub>C2</sub> = Emissão do cenário 02

Emissão<sub>nAU</sub> = Emissão dos automóveis convencionais

Emissão<sub>nDO</sub> = Emissão dos Demais veículos do ciclo Otto

Emissão<sub>nDD</sub> = Emissão dos Demais veículos do ciclo Diesel

Emissão<sub>nVE(ON)</sub> = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos ônibus elétricos

n = ano projetado

A implantação dessa tecnologia veicular terá início em 2020 com a inserção de 10% de ônibus elétricos na frota veicular no município do Rio de Janeiro, substituindo 10% dos ônibus convencionais. Este percentual aumentará para 15% em 2021, 20% em 2022 e continuará a aumentar 10% nos demais anos, até atingir 100% de ônibus elétricos em 2030, conforme Tabela 18. Logo, a previsão para 2030 é a redução de 100% dos poluentes atmosféricos emitidos pelos ônibus convencionais, uma vez que não emitem poluentes para a atmosfera.

## 2.8- Emissões do Cenário 04

O cenário 04 considera a implantação gradual de ônibus híbrido-elétricos na cidade do Rio de Janeiro, em substituição aos ônibus convencionais. No entanto, os automóveis e os demais veículos do ciclo Otto e Diesel continuarão sendo convencionais.

Portanto, para este cenário foram somadas as emissões dos automóveis, dos demais veículos do ciclo Otto e Diesel convencionais com as emissões considerando a implantação dos ônibus híbridos-elétricos, conforme Equação 23.

$$Emissão_{C4} = Emissão_{nAu} + Emissão_{nDO} + Emissão_{nDD} + Emissão_{nVH(ON)} \quad (23)$$

Onde:

Emissão<sub>C4</sub> = Emissão do cenário 04

Emissão<sub>nAu</sub> = Emissão dos automóveis convencionais

Emissão<sub>nDO</sub> = Emissão dos Demais veículos do ciclo Otto

Emissão<sub>nDD</sub> = Emissão dos Demais veículos do ciclo Diesel

$Emissão_{nVH(ON)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos ônibus híbrido-elétricos

n = ano projetado

Os percentuais de implantação gradual são análogos ao cenário 03.

## 2.9- Emissões do Cenário 05

O cenário 05 considera a implantação gradual de automóveis e ônibus elétricos na cidade do Rio de Janeiro, em substituição aos convencionais. No entanto, os demais veículos do ciclo Otto e Diesel continuarão sendo convencionais.

Portanto, para este cenário foram somadas as emissões dos demais veículos do ciclo Otto e Diesel convencionais com as emissões considerando a implantação dos automóveis e ônibus elétricos, conforme Equação 24.

$$Emissão_{C5} = Emissão_{nDO} + Emissão_{nDD} + Emissão_{nVE(AU)} + Emissão_{nVE(ON)} \quad (24)$$

Onde:

$Emissão_{C5}$  = Emissão do cenário 05

$Emissão_{nDO}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Otto

$Emissão_{nDD}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Diesel

$Emissão_{nVE(AU)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos automóveis elétricos

$Emissão_{nVE(ON)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos ônibus elétricos

n = ano projetado

Os percentuais de implantação gradual para os automóveis e ônibus elétricos estão descritos na Tabela 18.

## 2.10- Emissões do Cenário 06

O cenário 06 considera a implantação gradual de automóveis e ônibus híbrido-elétricos na cidade do Rio de Janeiro, em substituição aos convencionais. No entanto, os demais veículos do ciclo Otto e Diesel continuarão sendo convencionais.

Portanto, para este cenário foram somadas as emissões dos demais veículos do ciclo Otto e Diesel convencionais com as emissões considerando a implantação dos automóveis e ônibus híbrido-elétricos, conforme Equação 25.

$$Emiss\tilde{a}o_{C6} = Emiss\tilde{a}o_{nDO} + Emiss\tilde{a}o_{nDD} + Emiss\tilde{a}o_{nVH(AU)} + Emiss\tilde{a}o_{nVH(ON)}$$

(25)

Onde:

$Emiss\tilde{a}o_{C6}$  = Emissão do cenário 06

$Emiss\tilde{a}o_{nDO}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Otto

$Emiss\tilde{a}o_{nDD}$  = Emissão dos Demais veículos do ciclo Diesel

$Emiss\tilde{a}o_{nVH(AU)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos automóveis elétricos

$Emiss\tilde{a}o_{nVH(ON)}$  = Emissão do ano projetado, considerando implantação dos ônibus elétricos

n = ano projetado

Os percentuais de implantação gradual para os automóveis e ônibus híbrido-elétricos estão descritos na Tabela 18.

### 3- RESULTADOS

#### 3.1- Projeção da Frota Veicular

A projeção da frota de automóvel, considerando a frota registrada do Detran dos últimos 05 anos resultou em um aumento de 6% de 2015 à 2020, bem como 11% de 2020 à 2030, conforme apresentado na Figura 15.

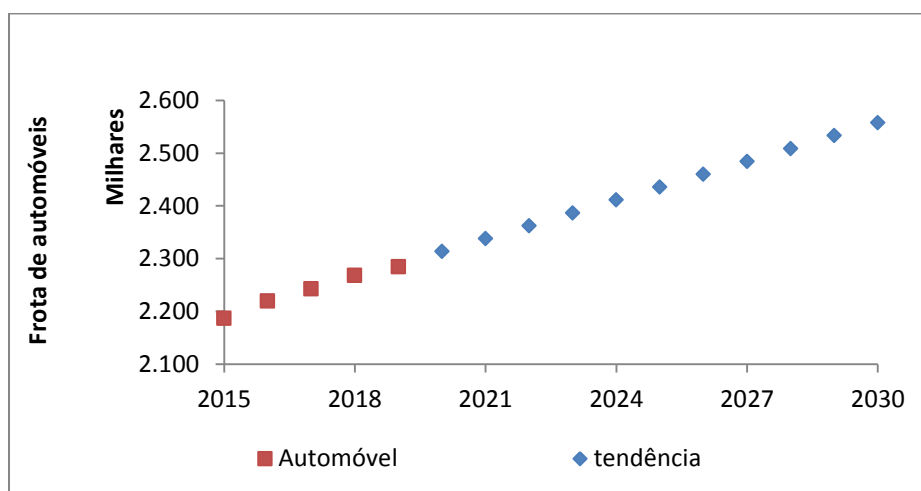


Figura 15: Previsão de crescimento da frota de automóveis até 2030  
Fonte: Adaptado de Detran RJ

Nos últimos 05 anos (2015 a 2019) a frota de ônibus da cidade do Rio de Janeiro reduziu devido à reorganização do sistema de ônibus que teve início em 2011 com a modernização da frota e a implantação das primeiras faixas preferenciais para ônibus, os corredores BRS (*Bus Rapid Service*) e BRT (*Bus Rapid Transit*). No final de 2015 a cidade passou por uma nova reorganização do sistema rodoviário: a racionalização da frota da Zona Sul, a qual culminou na eliminação de linhas de ônibus sobrepostas, extinguindo-as ou encurtando seus trajetos. Estas, por sua vez, foram substituídas por um conjunto enxuto de novos serviços chamado de linhas troncais, integradas e circulares (Rio Prefeitura, 2019). Diante disto, a projeção da frota de ônibus urbano resultou em uma queda de 8 % de 2015 à 2020, e continuou a reduzir 21% de 2020 à 2030, conforme a Figura 16.

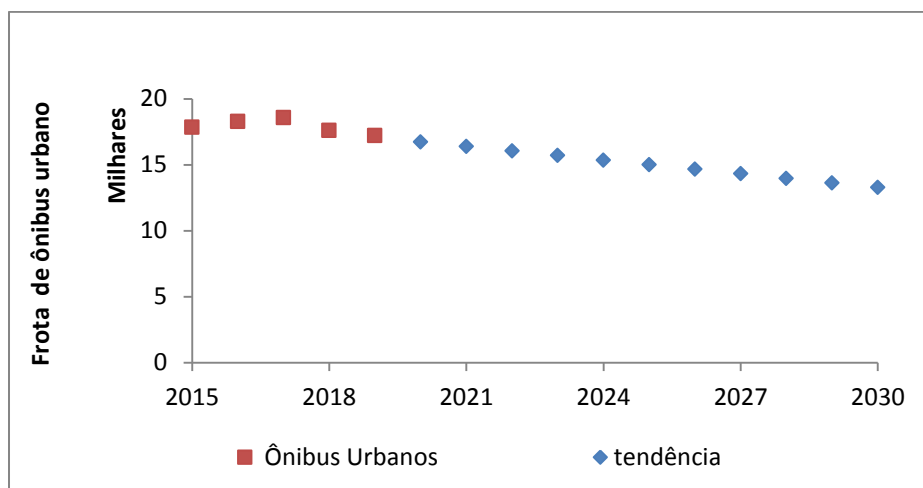


Figura 16: Previsão de crescimento da frota de ônibus urbano até 2030  
 Fonte: Adaptado de Detran RJ

A projeção da frota dos Demais veículos do ciclo Otto resultou em um aumento de 11% de 2015 à 2020 e de 20% de 2020 à 2030, conforme pode ser visto na Figura 17. Para os Demais Veículos do Ciclo Diesel também houve um aumento de 11% de 2015 à 2020 e de 18% de 2020 à 2030, conforme a Figura 18.

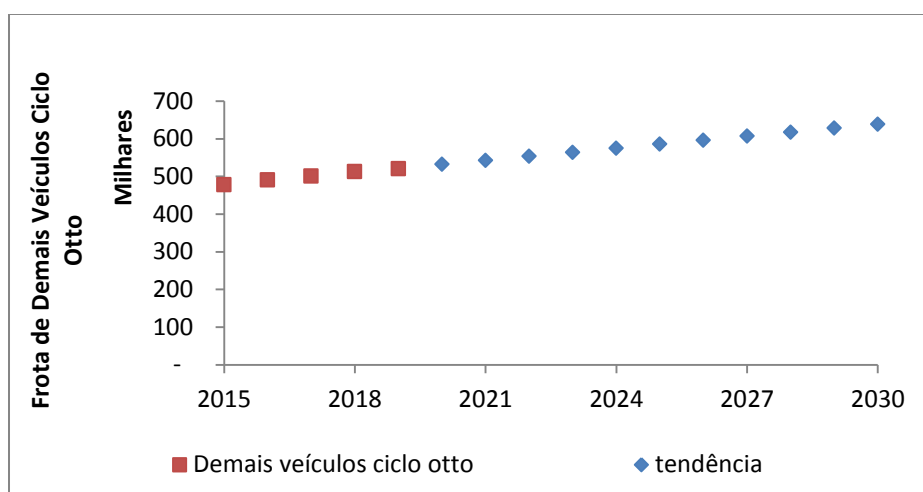


Figura 17: Previsão de crescimento da frota dos Demais Veículos do Ciclo Otto até 2030  
 Fonte: Adaptado de Detran RJ



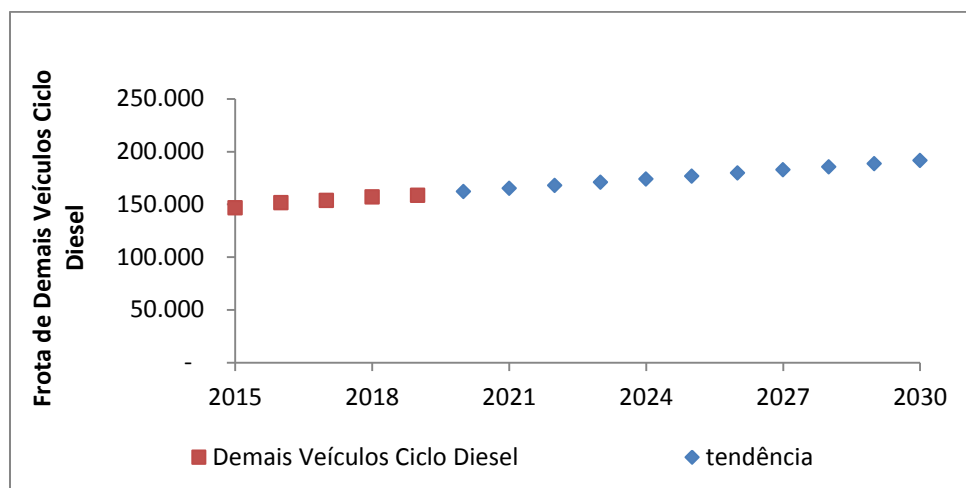


Figura 18: Previsão de crescimento da frota dos Demais Veículos do Ciclo Diesel até 2030  
Fonte: Adaptado de Detran RJ

### 3.2- Emissões Veiculares do Caso Base

Embora a projeção da frota total de veículos convencionais tenha apresentado aumento de 12% de 2020 à 2030, as emissões de CO, RCHO, NMHC, MP<sub>escap</sub> e NOx obtiveram redução de 5 %, 2 %, 3 %, 12 % e 20 %, respectivamente, como pode ser visto na Figura 19 (a-e).

Isto pode ter ocorrido porque foi considerado fatores de emissão (Fe) constantes, do ano de 2018, sem considerar os possíveis avanços das tecnologias veiculares e das melhorias da qualidade dos combustíveis ao longo dos anos. Além disso, o cálculo das emissões considerou a Intensidade de Uso, a qual decresce à medida que os veículos ficam mais velhos. No entanto, de uma maneira geral, este cenário não seria visto caso fossem conhecidos os fatores de emissão previstos até 2030.

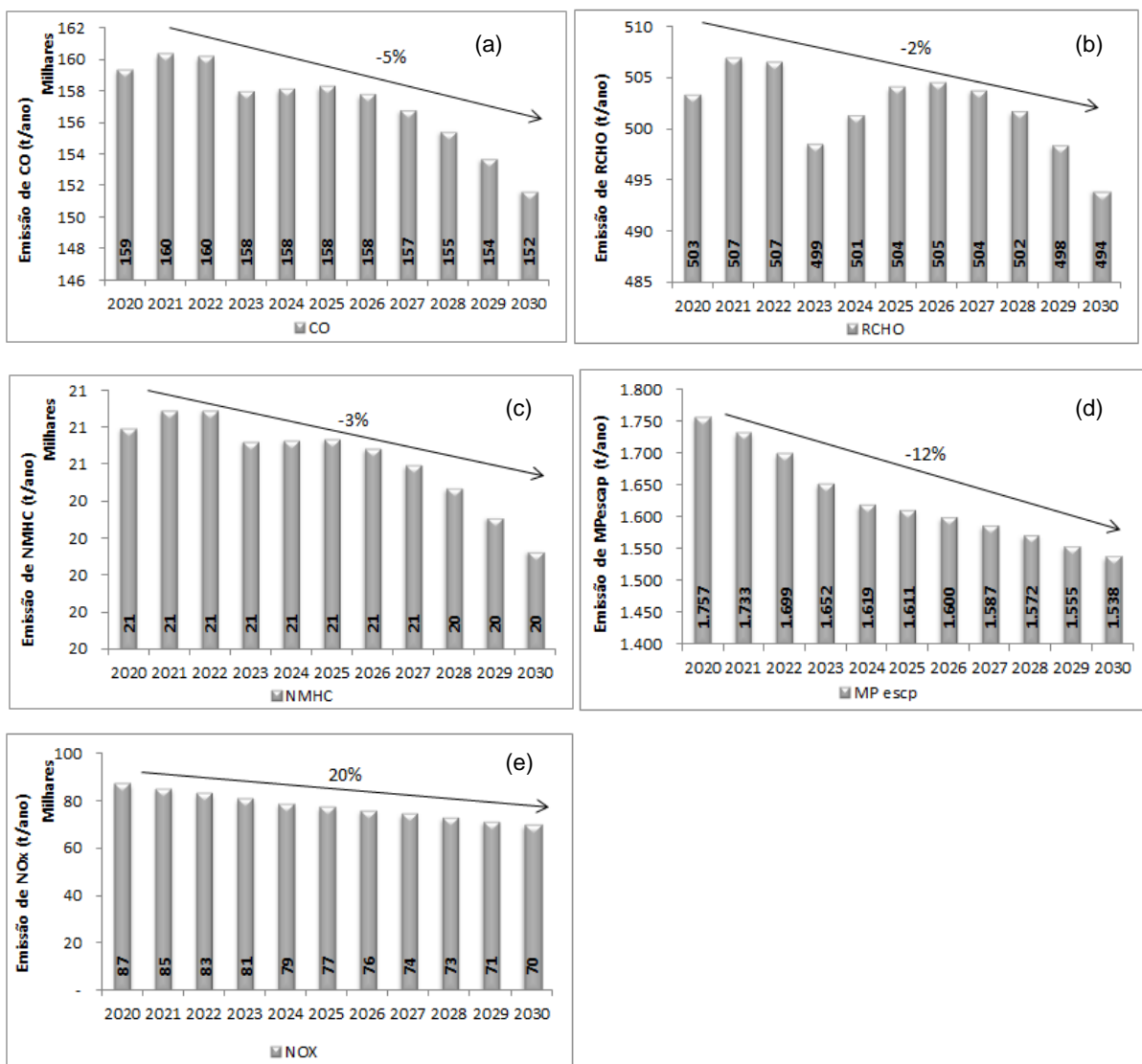


Figura 19: Emissões totalizadas do cenário 01, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)  
Fonte: Autor, 2019

### 3.3- Emissões do Cenário 01

De acordo com os resultados do Cenário 01, em 2030, quando a frota de automóvel corresponderá à 52% de automóveis elétricos e 48% de automóveis convencionais, as emissões de CO, RCHO e NMHC poderão ser reduzidas 36 % , 47 % e 35 % , respectivamente, em relação ao caso base. Além disso, as emissões de MP<sub>escap</sub> poderá reduzir 12%, bem como Nox poderá reduzir 5 % (Figura 20 d e e).

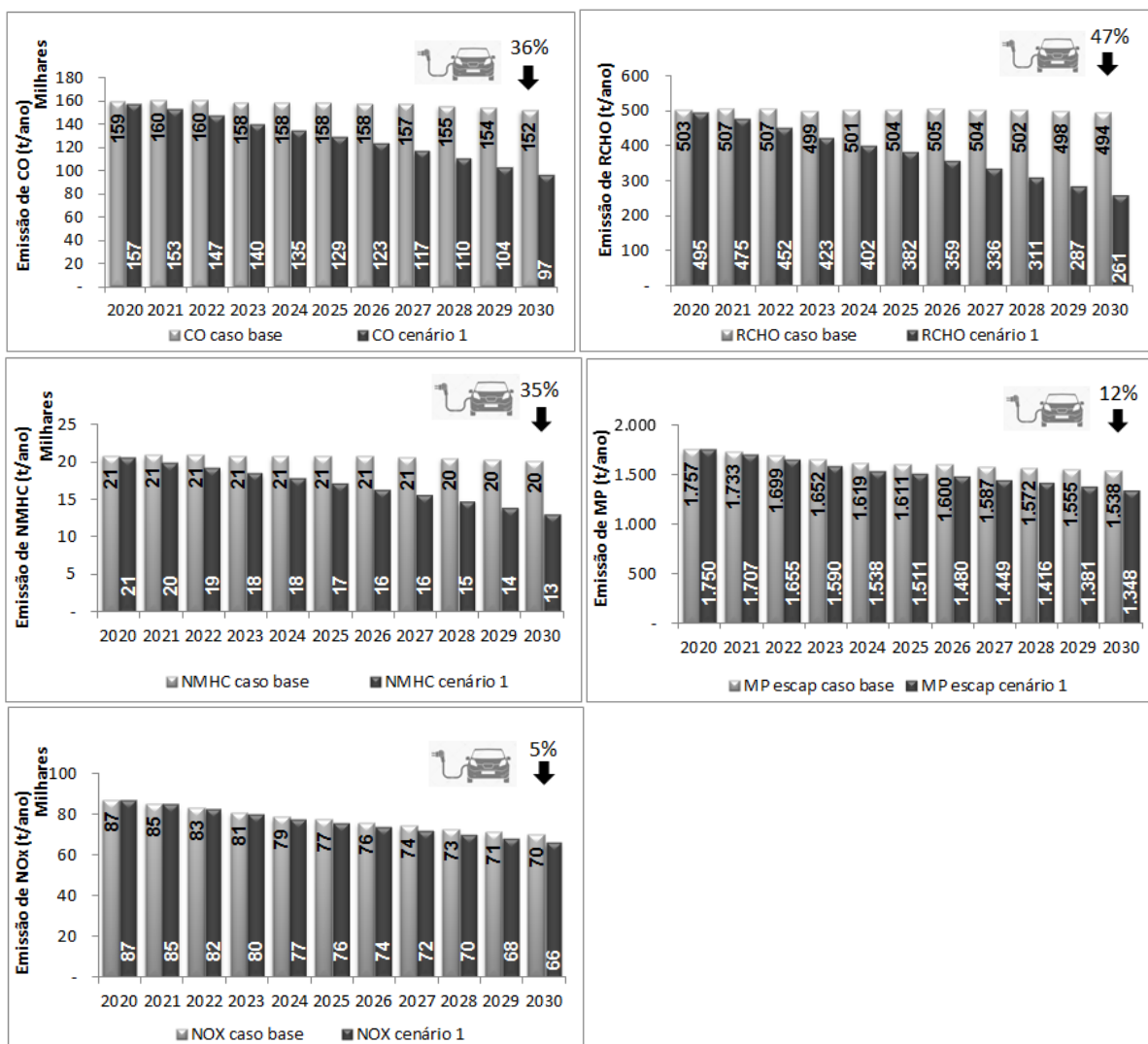


Figura 20: Emissões totalizadas do cenário 01, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)

(a) Emissão de CO, (b) Emissão de RCHO, (c) Emissão de NMHC, (d) Emissão de MP escap, (e) Emissão de NOx.

Fonte: Autor, 2019

Estes resultados podem ser explicados porque os automóveis contribuem mais para as emissões de CO, NMHC e RCHO do que os veículos do ciclo diesel, pois são movidos à gasolina e etanol, possuem fatores de emissão específicos e ainda apresentam uma frota em número elevado.

Em 2013, o INEA estimou as emissões de CO para a RMRJ e concluiu que pela metodologia *top-down* a contribuição dos automóveis nas emissões de CO foi de 63% contra 11% dos ônibus. Ainda no Inventário do INEA, em 2013 os automóveis contribuíram para 78% das emissões de NMHC contra 2,6 % dos ônibus.

As emissões de RCHO no inventário do INEA de 2013 chegaram à 90,3%, com contribuição específica dos automóveis.

### 3.4- Emissões do Cenário 02

Segundo o cenário 02, em 2030 quando a frota de automóvel corresponderá à 52% de automóveis híbrido-elétrico e 48% de automóveis convencionais, as emissões de CO poderão reduzir em 20 %, assim como as emissões de NMHC que poderá reduzir 24% (Figura 21 a, b). As emissões de MP<sub>escap</sub> e de NOx reduzirão 3 % e 5 %, respectivamente (Figura 21 c e d).

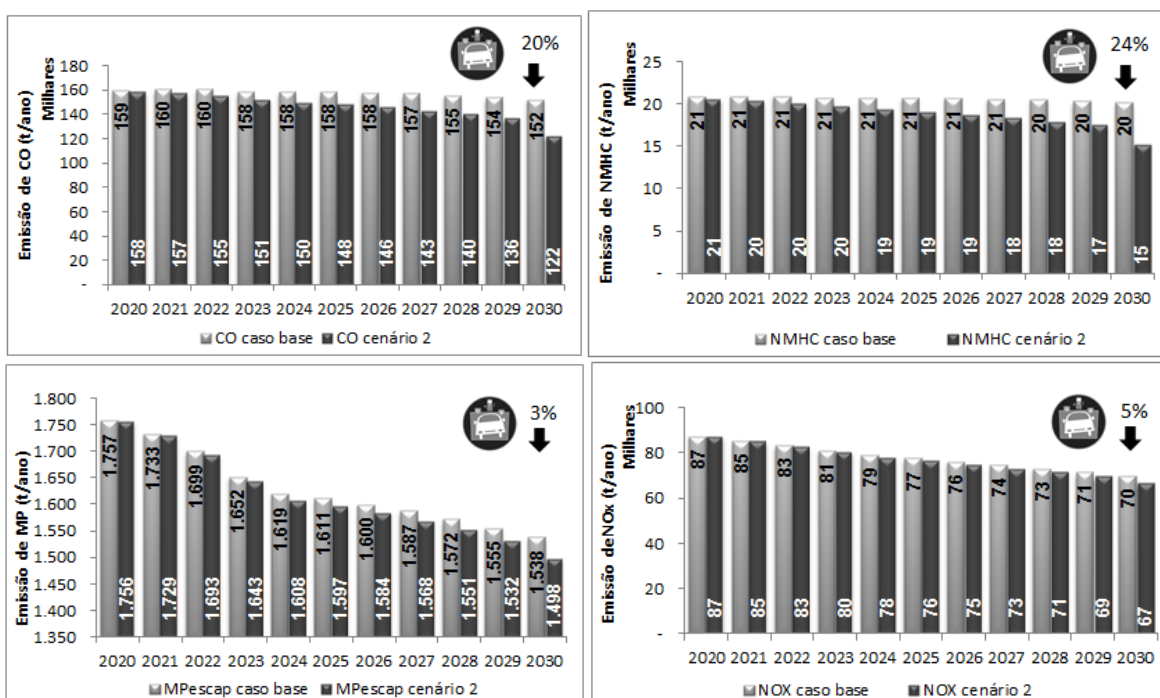


Figura 21: Emissões totalizadas do cenário 02, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)

(a) Emissão de CO, (b) Emissão de NMHC, (c) Emissão de MP escap, (d) Emissão de NOx.

Fonte: Autor, 2019

### 3.5- Emissões do Cenário 03

Observando a Figura 22 (c, d), notou-se que o cenário 03 poderá levar a redução de 19% das emissões de MP<sub>escap</sub>, bem como 28% das emissões de NOx em 2030, em comparação ao casobase.

Estes resultados podem ser explicados porque os ônibus contribuem mais para as emissões de MP<sub>escap</sub> e NOx do que os automóveis e os veículos do Ciclo Otto, pois são movidos à combustível diesel.

No entanto, estas reduções não foram mais expressivas devido aos demais veículos do Ciclo Diesel, como os caminhões, permanecerem possuindo motor de combustão interna e movidos à diesel em 2030.

Todavia, as emissões de CO e NMHC poderão reduzir somente 3 % em 2030 em relação ao caso base (Figura 22 a e b).

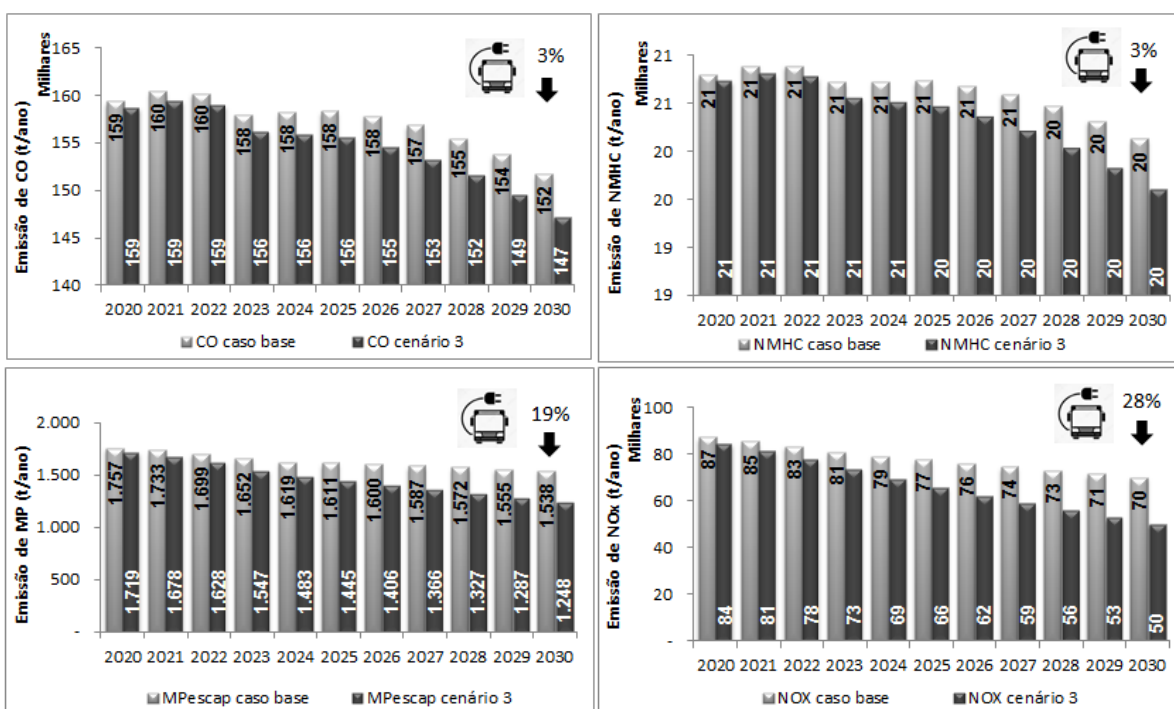


Figura 22: Emissões totalizadas do cenário 03, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)

(a) Emissão de CO, (b) Emissão de NMHC, (c) Emissão de MP escap, (d) Emissão de NOx.

Fonte: Autor, 2019

### 3.6- Emissões do Cenário 04

O Cenário 04, que considera a implantação de ônibus híbrido-elétrico, assim como no cenário 03, reduziu as emissões de  $MP_{\text{escap}}$  em 15 % e de  $NOx$  em 24 % em 2030, comparando ao caso base. E a redução das emissões de CO e dos NMHC foram somente de 2 %. Isto pode ser visto na Figura 23.

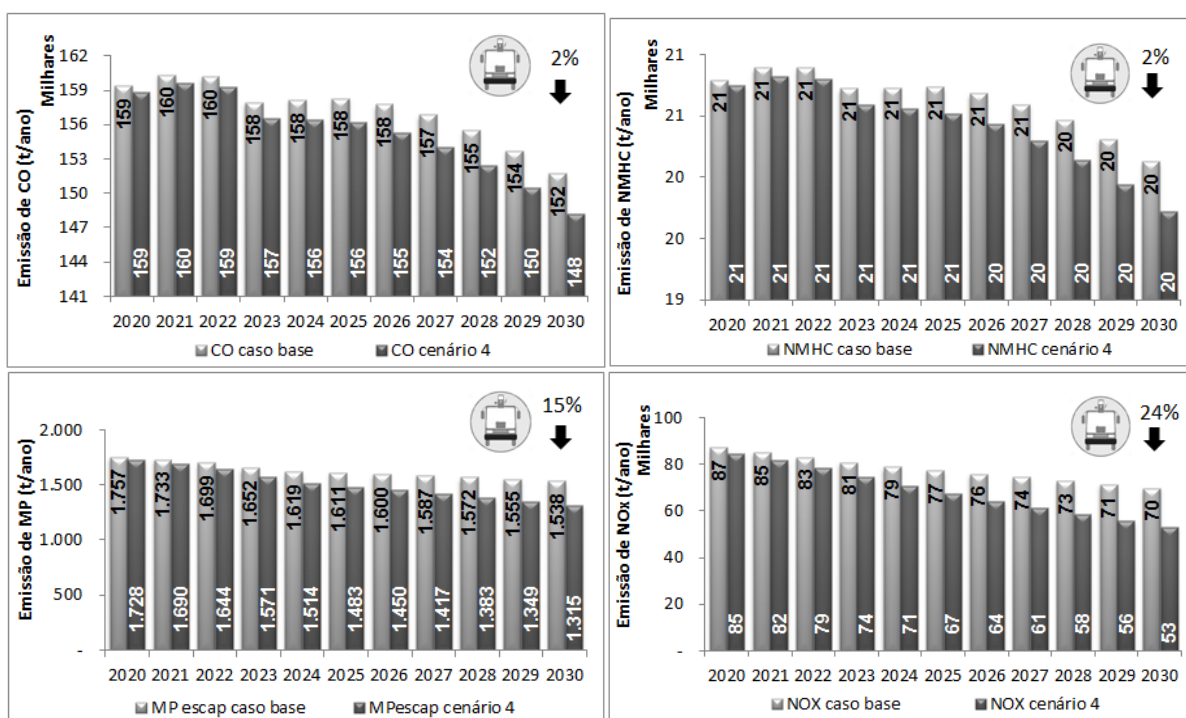


Figura 23: Emissões totalizadas do cenário 04, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)

(a) Emissão de CO, (b) Emissão de NMHC, (c) Emissão de MP escap, (d) Emissão de NOx.

Fonte: Autor, 2019

### 3.7- Emissões do Cenário 05

O cenário 5 é caracterizado pela adoção simultânea de automóvel e ônibus elétrico na cidade do Rio de Janeiro. Portanto, em 2020 considerou-se a implantação de 2 % de automóvel elétrico concomitante à 10% de ônibus elétrico, sendo os demais veículos do Ciclo Otto e Diesel permanecendo convencionais.

Segundo os resultados deste cenário foi possível verificar que a redução de CO, RCHO e NMHC poderá ser de 39 %, 47 % e 37 %, respectivamente em 2030, comparado ao caso base (Figura 24 a, b, c).

Diante dos poluentes emitidos principalmente por veículos pesados, foi

possível verificar que em comparação ao caso base, a redução de  $MP_{\text{escap}}$  foi de 31 % e a de  $NO_x$  foi de 34 % (Figura 24 d, e).

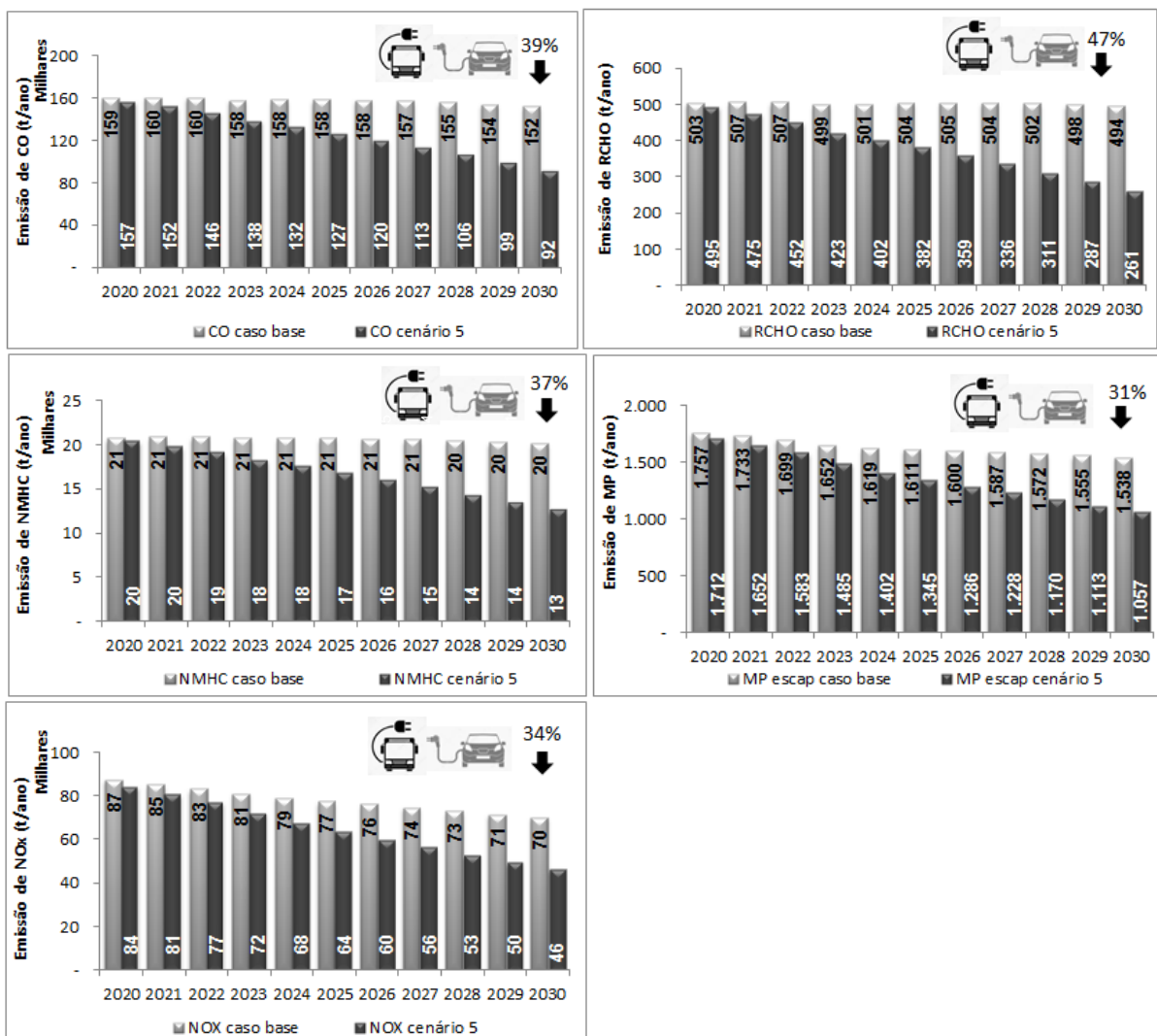


Figura 24: Emissões totalizadas do cenário 05, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)  
 (a) Emissão de CO, (b) Emissão de RCHO, (c) Emissão de NMHC, (d) Emissão de MP escap, (e) Emissão de NOx.

Fonte: Autor, 2019

### 3.8- Emissões do Cenário 06

O Cenário 6 (Figura 25) é a representação da implantação gradual anual de automóveis e ônibus híbrido-elétricos na cidade do Rio de Janeiro, de maneira concomitante.

Assim como o Cenário 05, em 2020 considerou-se a implantação de 2 % de automóvel híbrido-elétrico concomitante à 10% de ônibus híbrido-elétrico, sendo os demais veículos do Ciclo Otto e Diesel permanecendo convencionais.

Neste cenário foi possível verificar que houve a redução de 22 % nas emissões de CO, 26% das emissões de NMHC, 17 % de MP<sub>escap</sub> e 29 % de NOx em 2030, comparado ao caso base.

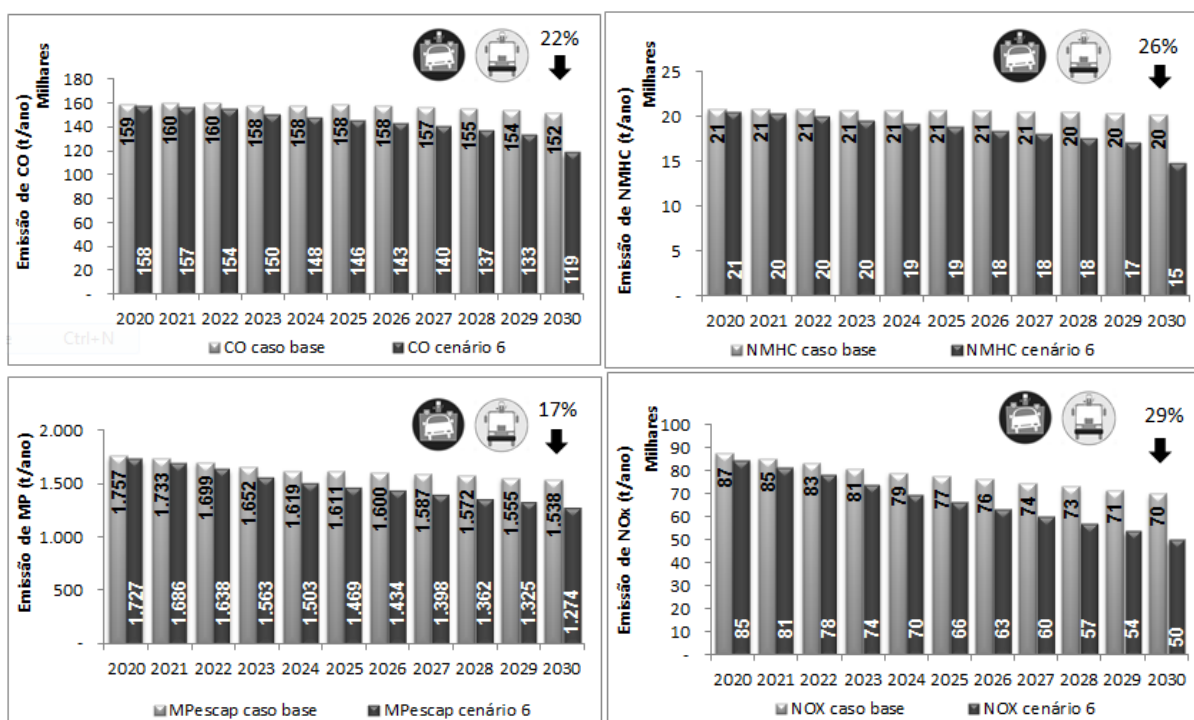


Figura 25: Emissões totalizadas do cenário 06, considerando as 4 categorias veiculares (tonelada/ano)

(a) Emissão de CO, (b) Emissão de NMHC, (c) Emissão de MP escap, (d) Emissão de NOx.

Fonte: Autor, 2019









### 3.9- Resumo dos Resultados

A Tabela 20 apresenta os resultados dos cenários hipotéticos de maneira resumida, de modo a facilitar a sua visualização. O cenário 1 corresponde ao percentual de redução dos poluentes atmosféricos após a introdução de 52% automóveis elétricos, contra 48 % de automóveis convencionais, em 2030. De maneira análoga, o cenário 02 corresponde à introdução de automóveis híbrido-elétrico em 2030. Os Cenários 03 e 04 correspondem à redução de poluentes após a frota de ônibus convencionais na cidade do Rio de Janeiro ser substituída por 100% de ônibus elétricos e híbrido-elétricos, respectivamente, em 2030. O cenário 05 é introdução dos cenários 01 e 03 simultaneamente, bem como o cenário 06 corresponde à introdução dos cenários 02 e 04 no mesmo momento.

Ressalta-se que em todos considerou-se que os demais veículos do ciclo Otto e diesel se mantiveram convencionais.

Tabela 20: Comparação dos resultados dos cenários hipotéticos em 2030

Cenários	CO	RCHO	NMHC	MP	NOx
Cenário 01 	-36%	-47%	-35%	-12%	-5%
Cenário 02 	-20%	-	-24%	-3%	-5%
Cenário 03 	-3%	-	-3%	-19%	-28%
Cenário 04 	-2%	-	-2%	-15%	-24%
Cenário 05 	-39%	-47%	-37%	-31%	-34%
Cenário 06 	-22%	-	-26%	-17%	-29%

Fonte: Autor, 2019

## CONCLUSÃO

Os cenários que substituíram a frota de automóveis convencionais por automóveis elétricos (Cenário 01) e híbridos-elétricos (Cenário 02) contribuíram mais para a redução das emissões de CO, NMHC e RCHO. Essas tecnologias veiculares poderão levar a redução de 35 % e 24 % das emissões de NMHC (Cenário 01 e 02), 47 % das emissões de RCHO (Cenários 01) e 36 % e 20 % das emissões de CO (Cenário 01 e 02) em 2030.

No entanto, quando se tratou das emissões de  $MP_{escap}$ , os cenários 01 e 02 contribuíram para uma redução de 12% e 3%, respectivamente. Os dois cenários contribuíram para a redução de 5% de NOx.

Os cenários os quais substituíram os ônibus convencionais por ônibus elétricos (Cenário 03) e híbrido-elétricos (Cenário 04) contribuíram mais para a redução de  $MP_{escap}$  e de NOx. Em 2030, as emissões de  $MP_{escap}$  poderão chegar à redução de 19 % e 15 % nos Cenários 03 e 04, respectivamente, assim como as emissões de NOx poderão reduzir 28 % no Cenário 03 e 24% no Cenário 04. As emissões de CO e NMHC poderão reduzir 3 % no Cenário 03 e 2 % no Cenário 04 em 2030, comparando ao caso base.

No entanto, quando se introduz na frota do município automóveis e ônibus elétricos (Cenário 05) de maneira conjunta, a redução de CO poderá chegar à 39 % em 2030, bem como as emissões de NMHC, RCHO,  $MP_{escap}$  e NOx poderão chegar a reduzir 37 %, 47 %, 31 % e 34 %, respectivamente em comparação ao caso base.

Quando há a introdução de automóveis e ônibus híbrido-elétricos concomitantemente (Cenário 06), em 2030 as emissões de CO poderão reduzir 22%, as de NMHC poderão reduzir 26 %, e as emissões de  $MP_{escap}$  e NOx poderão chegar a reduções de 17 % e 29 %, respectivamente em relação ao caso base.

Portanto, as tecnologias veiculares elétricas e híbridas-elétricas implementadas gradativamente ao longo dos próximos 10 anos, poderão contribuir para o atendimento da Resolução CONAMA nº 491/2018, que estipula novos padrões nacionais de qualidade do ar.

## TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros poderiam realizar um cálculo de emissão considerando todas as premissas da metodologia *top-down* descrita no Inventário do INEA (INEA, 2016). Além disso, poderia realizar simulações com modelos matemáticos para estimar as concentrações de ozônio nos cenários hipotéticos.

## REFERÊNCIAS

- AHMADI, P. Environmental Impacts And Behavioral Drivers Of Deep Decarbonization For Transportation Through Electric Vehicles. *Journal of Cleaner Production*. v. 225, p.1209-1219, 2019.
- ALVIM, D. S. et al.. Main ozone-forming VOCs in the city of Sao Paulo: observations, modelling and impacts. *Air Quality, Atmosphere and Health*, [s.l.], v. 10, n° 4, p. 421–435, 2017.
- ANFAVEA, 2009. *As Fases Passadas e Futuras - PROCONVE. Seminário sobre Emissões de Veículos Diesel*, [s.l.], 2009.
- ANISIMOV, S.V.; GALICHENKO S.V.; MAREEV, E.A.. Electrodynamics properties and height of atmospheric convective boundary layer. *Atmospheric Research*. v 194, p. 119-129, 2017.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Gás Natural e Biocombustíveis . Biodiesel. 2018. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>>. Acessado em 06/11/2018.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. *Gasolina*, 2018. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1855-gasolina>>. Acessado em 10/11/2018.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Gás natural veicular mercado em expansão Superintendência de Comercialização e Movimentação de Gás Natural. [s.l.], p. 1–16, 2003.
- ANP-AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS – ANP. Relatório Técnico nº 02/2014/SBQ/RJ. *Apresentação dos resultados dos Testes de uso experimental e específico de biodiesel e suas misturas com óleo diesel em teores diversos do autorizado em legislação*. Rio de Janeiro. 2014.
- ATKINSON, R.. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric Environment*, [s.l.], v. 34, n° 12–14, p. 2063–2101, 2000. ISBN:1352-2310.
- BAIRD, Colin. Química ambiental. 4.ed. Porto Alegre, Bookman, p. 844, 2011.
- BALMES, J.R., et al.. Ozone-induced decrements in FEV1 and FVC do not correlate with measures of inflammation. *Am J Respir Crit Care Med*. v.153, p.904–909, 1996.
- VAZ, L.F.H., BARROS, D.C., CASTRO, B.H.R. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segment. *Automotivo - BNDES Setorial* v. 41, p. 295-344, 2015.
- BRAESICKE, P. Middle Atmosphere | Zonal Mean Climatology. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 2ª ed. pp. 50-56, 2015.

BRAGA, B. et al.. Introdução à Engenharia Ambiental. São Paulo: Prentice Hall, 2002

BRAGA,B., et al., Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. *Diário Oficial da União*, [s.l.], v. 1, p. 14713–14714, 1989.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 03 de 22 de agosto de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.[s.l.], v. 80, no D, 1990.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 418 de 25 de novembro de 2009. Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso . *Diário Oficial da União*, [s.l.], nº 053, p. 58–63,2009.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 490 de 16 de novembro de 2018. Estabelece a Fase PROCONVE P8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras providências.. [s.l.],p.13,2018.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 491 de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar [s.l.],p.7,2018.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 492 de 20 de dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário, altera a Resolução CONAMA nº 15/1995 e dá outras providências. [s.l.], p.13,2018.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 493 de 24 de junho de 2019. Estabelece a Fase PROMOT M5 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos similares – PROMOT para controle de emissões de gases poluentes e de ruído por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, altera as Resoluções CONAMA nºs 297/2002 e 432/2011, e dá outras providências. [s.l.], p.7, 2019.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 58 de 13 de dezembro de 2013. Aprova a NOP-INEA-14 - que revisa as diretrizes do Programa de Autocontrole de Emissão de Fumaça Preta. [s.l.], p.12, 2019.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 70 de 19 de janeiro de

2016. Estabelece os limites de emissão veicular a serem aplicados nos programas de controle da poluição veicular implantados no Estado do Rio de Janeiro, e dá outras providências. [s.l.], p.77,2019.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. São Paulo [s.l.], p.73, 2011.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Padrões de Qualidade do Ar*. 2018. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/> Acessado em 25/10/2016.

COPPE/FETRANSPOR. *Alternativas Tecnológicas para ônibus no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro , p.140,2012.

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE : SEST/SENAT, 2012. *A fase P7 do Proconve e o impacto no setor de transporte*. 2.ed. – Brasília: CNT : Sest/Senat, 2012p. 20, 2012.

CNT- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Os Impactos Da Má Qualidade Do Óleo Diesel Brasileiro*. [s.l.], p. 1–14, 2015.

COPPETEC, 2011. *Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, p. 151, 2011.

CORRÊA et al.. Five years of formaldehyde and acetaldehyde monitoring in the Rio de Janeiro downtown area - Brazil. *Atmospheric Environment*, [s.l.], v. 44, n<sup>o</sup> 19, p. 2302–2308, 2010.

D'AGOSTO, M. A.. Transporte, uso de energia e impactos ambientais. Editora Elsevier. Rio de Janeiro, p. 251, 2015.

DETRAN-DEPARTAMENTODETRANÔNITODOESTADODORIODEJANEIRO. Estatística.Disponível em <[http://www.detran.rj.gov.br/\\_estatisticas.veiculos/index.asp](http://www.detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/index.asp)>Acessado em dezembro2018.

DEVLIN, R.B., et al...Exposure of humans to ambient levels of ozone for 6.6 hours causes cellular and biochemical changes in the lung. *Am J Respir Cell Mol Biol* v4, p.72–81, 1991.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. *Emissões de Fontes Veiculares da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro [s.l.], p.352, 2016.

EPA - Environmental Protection Agency. *NAAQS Table, 2018*. Disponível em <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Acessado em 24/10/2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional: Ano base 2016*. [s.l.], p. 296, 2017.

FENG et al..Ground-level O<sub>3</sub>pollution and its impacts on food crops in China: A review.*Environmental Pollution*, [s.l.], v. 199, p. 42–48, 2015.

FETRANSPOR - FEDERAÇÃO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Biodiesel B20: O Rio de Janeiro anda na frente.Rio de Janeiro [s.l.], p. 104, 2011.

FINLAYSON-PITTS E PITTS. Tropospheric air pollution: Ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles. *Science*, [s.l.], v. 276, n° 5315, p. 1045–1052, 1997.

FOSTER, W.M., COSTA, D.L., LANGENBACK, E.G.. Ozone exposure alters tracheobronchial mucociliary function in humans. *Journal of Applied Physiology*, v 63, p.996– 1002, 1987

FOSTER, W.M., STETKIEWICZ, P.T.. Regional clearance of solute from the respiratory epithelia: 18–20 hr postexposure to ozone. *Journal of Applied Physiology*; v 81, p.1143–1149. 17,1996.

GERALDINO.*Avaliação dos episódios de altas concentrações de ozônio nobairro de Bangu, Rio de Janeiro*. 2017. 145f. Dissertação (Mestrado em Química) - Centro de Tecnologia e Ciências Instituto de Química. Universidade do Estado do Rio de Janeiro,Rio de Janeiro, 2017.

GERALDINO, C. G. P. et al.. An Analytical Investigation of Ozone Episodes in Bangu, Rio de Janeiro. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, Rio de Janeiro. v. 98, no 5, p. 632–637, 2017.

GRYPARIS et al.. Acute effects of ozone on mortality from the “Air Pollution and Health: A European Approach” project. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, [s.l.], v. 170, no 10, p. 1080–1087, 2004.

HIDRUE, M. K., PARSONS, G.R., KEMPTON, W., GARDNER, M. P. Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. *Resource and Energy Economics*, v. 33 p.686–705, 2011.

IBAMA- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Proconve: Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores*. [s.l.], p. 181, 2013.

IBAMA- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2011. *Promot - Programa De Controle Da Poluição Do Ar Por Motociclos e Veículos Similares*. [s.l.]: [s.n.], 2011.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades*.Rio de Janeiro. 2015. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=330455>> acesso em 10 jun. 2019.

FEEMA - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE. *Relatório Anual de Qualidade do Ar*. Rio de Janeiro, p.91, 2007.

IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Bus System for the Future: Achieving Sustainable Transport Worldwide*. Paris, França, 2002.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, p.105, 2008.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, p.108, 2009.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro - Ano base 2010 e 2011*. Rio de Janeiro, p.141, 2012.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro - Ano base 2012*. Rio de Janeiro, p.148, 2013.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro - Ano base 2013*. Rio de Janeiro, p.188,2014

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro - Ano base 2014*. Rio de Janeiro, p.198,2015

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. *Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro - Ano base 2015*. Rio de Janeiro, p.197,2016

KIM et al.. Assessment of the effect of air pollution on material damages in Northeast Asia. *Atmospheric Environment*, [s.l.], v. 38, n° 1, p. 37–48, 2004

LEE, X. *Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology – Introduction*. Springer *Atmospheric Sciences* p.242., 2018.

LOPES, J. *Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série*. 2008. 178p. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LOUREIRO, L. N. *Panorâmica sobre Emissões Atmosféricas Estudo de Caso: Avaliação do Inventário Emissões Atmosféricas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro para Fontes Móveis*. 2005.153f.Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MDA– MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. *O que é o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)*,2018 . Disponível em <http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-biodiesel/o-que-%C3%A9-o-programa-nacional-de-produ%C3%A7%C3%A3o-e-uso-do-biodiesel-pnpb>. Acessado em 06/11/2018.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Usos de Biodiesel no Brasil e no Mundo*. 1a Edição. Brasília, [s.n.], v. 5, p.1-62 I, 2015.



MARTINS et al.. Understanding ozone concentrations during weekdays and weekends in the urban area of the city of rio de janeiro. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Rio de Janeiro, v.26, nº10, p. 1967–1975,2015.

MARTINS et al.. Concentrações de poluentes atmosféricos no Rio de Janeiro em relação a normas nacionais e internacionais. *Revista Internacional de Ciências*. Rio de Janeiro v. 7, nº1, p. 32–48, 2017.

MCKINSEY & COMPANY. Evolution. Electric vehicles in Europe: gearing up for a new phase? *Amsterdam: Amsterdam Roundtables Foundation*, 2014.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários Relatório Final*. [s.l.], p. 113, 2011.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Ano base 2012*. [s.l.], p. 113, 2014.

MME- Ministério de Minas e Energia. *Sobre o Biodiesel*. 2018. Disponível em <http://www.mme.gov.br/web/guest/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/biodiesel/biodiesel?inheritRedirect=true>. Acessado em 06/11/2018.

MORA, J.M., MARTÍNEZ, H., UNAL, A. Bus technology meta-analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.,2009.

NAVC - NORTHEAST ADVANCED VEHICLE CONSORTIUM. Hybrid-electric drive heavy-duty vehicle testing project. Final emission report ,2000.

PETROBRAS. *Gasolina*, 2018. Disponível em <http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/gasolina/>. Acesso em 10/11/2018.

POLICARPO et al.. Road vehicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, [s.l.], v. 58, no December 2017, p. 172–185, 2018.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. Portal de Armazenamento de Dados Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.data.rio/> Acesso em 02/10/2018.

RICHARDSON, D. B. Electric vehicles and the electric grid:Are view of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.19, p.247–254, 2013.

QUEIROZ et al.. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. *Quimica Nova*, Minas Gerais, v. 30, nº 5, p. 1233–1239, 2007.

REBELLATTO. Material Particulado Inalável Nos Períodos Seco e Úmido Na Cidade

De Cuiabá .[s.l.], 2005.

RÉQUIA JR. et al.. Spatial distribution of vehicle emission inventories in the Federal District, Brazil. *Atmospheric Environment*, Brasília, v. 112, p. 32–39, 2015.

RUCHIRAWAT et al.. Exposure to benzene in various susceptible populations: Co-exposures to 1,3-butadiene and PAHs and implications for carcinogenic risk. *Chemico-Biological Interactions*, [s.l.], v. 184, n° 1–2, p. 67–76, 2010.

SEBRAE - SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS DO ESTADO DO RIO DO JANEIRO. *Painel Regional: Rio de Janeiro e Bairros*. Rio de Janeiro p. 31, 2015.

SEINFELD e PANDIS. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. *Atmospheric Chemistry and Physics*. [s.l.]: [s.n.], p.1232,2006.

SHARMA et al.. Photo-chemical transport modelling of tropospheric ozone: A review. *Atmospheric Environment*, [s.l.], v. 159, n° x, p. 34–54, 2017.

SILVA, D. B. N.; Martins, E. M.; Corrêa, S. M. Role of carbonyls and aromatics in the formation of tropospheric ozone in Rio de Janeiro, Brazil. *Environ Monit Assess* p.188: 289, 2016

SOARES et al., 2018. Avaliação do impacto na qualidade do ar após implantação do BRS no Rio de Janeiro. *Revista Internacional de Ciências*. Rio de Janeiro , p. 203–220, 2018.

SOLURI, D. S.. et al... Multi-site PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> aerosol source apportionment in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 18, 838-845, 2007.

SONG G, Y.U.L. et al... A comparative experimental study on the emissions of HEV and conventional gasoline vehicle. *Automotive Engineering*.v.29, p.865–9. 2007.

STULL, R. B..An Introduction to Boundary Layer Meteorology - Mean Boundary Layer Characteristics. *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*. p.670, 1998

SOUZA et al..Inventory of conventional air pollutants emissions from road transportation for the state of Rio de Janeiro. *Energy Policy*, [s.l.], v. 53, n° 2013, p. 125–35, 2013.

TEIXEIRA et al.. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. *Química Nova*, [s.l.], v. 31, no 2, p. 244–248, 2008.

TORRACA, H. B. B.. *Aplicação de técnicas de mineração de dados na avaliação da relação das condições atmosféricas com as concentrações de particulados nas estações de Copacabana e São Cristóvão*. Universidade Federal Fluminense, 2012

UEDA e TOMAZ. Inventário De Emissão De Fontes Veiculares Da Região Metropolitana De Campinas, São Paulo. *Quimica Nova*. São Paulo. v. 34, n° 8, p. 1496-1500, 2011.

VALLERO, D. *Fundamentals of Air Pollution*. 4ª ed..[s.l.]: [s.n.], p. 942, 2008.

VENTURA, L.; SOARES, M.S.; LOPES, J.S. *Evolução da Política do Controle da Poluição Veicular nos Últimos 30 anos*. 1ª ed. Editora Prismas, p. 95, 2019.

WANG et al.. Comparing air quality impacts of hydrogen and gasoline. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, [s.l.], v. 13, no 7, p. 436–448, 2008.

WANG et al.. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects. *Science of the Total Environment*, [s.l.], v. 575, p. 1582–1596, 2017.

WHO. *Air quality guidelines for Europe*. WHO regional publications. European series, [s.l.], v. 3, no 91, p. V–X, 1-273, 2006.

WU, et al... On–road measurement of gaseous emissions and fuel consumption for two hybrid electric vehicles in Macao .*Atmospheric Pollution Research*. V6 p.858-866, 2015.

YANG et al.. Technical note: Boundary layer height determination from lidar for improving air pollution episode modeling: Development of new algorithm and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, [s.l.], v. 17, n° 10, p. 6215–6225, 2017.

ZHANG, S. Can Euro V heavy-duty diesel engines, diesel hybrid and alternative fuel technologies mitigate NOX emissions. New evidence from on-road tests of buses in China. *Applied Energy* .v.132, p.118–126, 2014.

ZHANG, Q et al... Air pollutant emissions from vehicles in China under various energy scenarios. *Science of the Total Environment* .v. 450–451 ,p.250–258, 2013.