



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

EVERTON LOPES DA SILVA

**Eficiência Energética e Emissões Gasosas na
Indústria Automotiva – Análise abrangente
de alternativas tecnológicas para a
mobilidade do futuro**

CAMPINAS
2022

EVERTON LOPES DA SILVA

Eficiência Energética e Emissões Gasosas na Indústria Automotiva – Análise abrangente de alternativas tecnológicas para a mobilidade do futuro

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO EVERTON LOPES DA SILVA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. WALDYR LUIZ RIBEIRO GALLO.

CAMPINAS
2022

FICHA CATALOGRÁFICA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
ROSE MEIRE DA SILVA – CRB 8/5974

Si38e Silva, Everton Lopes da, 1981-
Eficiência energética e emissões gasosas na indústria automotiva - análise abrangente de alternativas tecnológicas para a mobilidade do futuro / Everton Lopes da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Waldyr Luiz Ribeiro Gallo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Eficiência Energética. 2. Gases de combustão. 3. Biocombustíveis. 4. Indústria automobilística. I. Gallo, Waldyr Luiz Ribeiro, 1954-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em outro idioma: Energy efficiency and gaseous emissions in the automotive industry
- comprehensive analysis of technological alternatives for the mobility of the future

Palavras-chave em inglês:

Energy efficiency

Combustion gases

Biofuels

Automotive Industry

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Waldyr Luiz Ribeiro Gallo [Orientador]

Carla Kazue Nakao Cavaliero

Gonçalo Amarante Guimarães Pereira

Data de defesa: 26-08-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-6966-3214> -

Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5672390313112290>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Eficiência Energética e Emissões Gasosas na Indústria Automotiva – Análise abrangente de alternativas tecnológicas para a mobilidade do futuro

Autor: Everton Lopes da Silva

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo, Presidente
Departamento de Energia/Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP

Profa. Dra. Carla Kazue Nakao Cavaliero
Departamento de Energia/Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP

Prof. Dr. Gonçalo Amarante Guimarães Pereira
Departamento de Genética, Evolução, Microbiologia e Imunologia/Instituto de Biologia/UNICAMP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 26 de Agosto de 2022.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou no potencial transformador do conhecimento, em especial à minha esposa Bruna e à minha filha Malu, pela paciência e incentivo ao meu progresso como pessoa e profissional.

Agradecimentos

Quero agradecer ao Prof. Dr. Waldyr Luiz Gallo, pela orientação e conhecimentos divididos ao longo deste mestrado, à MAHLE Metal Leve por incentivar o desenvolvimento dos colaboradores e em especial ao auxílio para que eu concluísse esta importante etapa e a todos meus amigos da Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (SAE) e Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA) que me ajudaram através da troca de informações e experiências.

Resumo

Silva, Everton L., Eficiência Energética e Emissões Gasosas na Indústria Automotiva – Análise abrangente de alternativas tecnológicas para a mobilidade do futuro; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 2022. 138p. Dissertação de Mestrado.

O mercado automotivo é um pilar importante na economia mundial e colabora ativamente para o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas ao transporte de pessoas e bens de consumo. Este setor também colabora na ordem de 14% para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), em função da queima de combustíveis fósseis, sendo também a maior fonte de emissões nocivas (locais) em grandes centros urbanos. Por este motivo, há mais de quarenta anos, programas de controle de emissões foram introduzidos nos mercados com maior comercialização de veículos e, mais recentemente, programas de eficiência energética, incentivando a redução do consumo de combustível e, por consequência, os impactos no aquecimento global. Este trabalho indica ações necessárias no médio e longo prazo no campo da eficiência energética e emissões gasosas no Brasil, através da revisão bibliográfica abrangente das políticas automotivas globais e regionais, rotas tecnológicas adotadas globalmente para solução dos desafios ambientais. Os veículos evoluíram de forma significativa com a adoção dos programas automotivos, introduzindo tecnologias para redução de massa, resistência ao rolamento, arrasto aerodinâmico, aumento da eficiência dos motores a combustão e dos componentes acessórios, otimizações nas transmissões, melhoria da qualidade dos combustíveis, adoção de sistemas de pós-tratamento de gases de escapamento, sistemas de controles eletrônicos e de diagnóstico a bordo. No Brasil, com os programas de controle de emissões e eficiência energética já consolidados, é possível prever, com base nas experiências dos programas anteriores e de outros países, qual será o caminho tecnológico adotado no futuro de médio e longo prazo, levando em consideração as limitações locais de investimentos e infraestruturas. Mesmo com o grande avanço das legislações brasileiras nos últimos anos, ainda há vários pontos que necessitam ser considerados nas próximas fases para garantir a melhoria da qualidade do ar em grandes centros e contribuição efetiva na redução dos gases de efeito estufa no transporte. A introdução de programas de inspeção e manutenção de veículos em uso, especialmente em veículos que operam em grandes centros, controle de número de partículas provenientes da combustão para veículos leves dotado de injeção direta e estudo sobre

partículas provenientes do sistema de freios e pneus, são pontos de atenção. Melhorias nos combustíveis para ciclo Otto seguem rotas como o aumento das octanas RON, reduzindo o consumo da frota nas condições reais, habilitando também a introdução de novas tecnologias. Já para o ciclo Diesel a introdução do HVO, como solução complementar ao Biodiesel acima de 15% de mistura, em função de sua característica *drop-in*. A definição de novas metas de eficiência energética para veículos leves e pesados pós 2022 com base na necessidade de redução de GEE, garantirá a evolução tecnológica e a competitividade do veículo produzido no Brasil.

Palavras Chave: Eficiência Energética, Emissões Veiculares, Biocombustíveis, Tecnologia Automotiva.

Abstract

Silva, Everton L., Energy Efficiency and Gaseous Emissions in the Automotive Industry - Comprehensive analysis of technological alternatives for the mobility of the future; Mechanical Engineering School, University of Campinas; 2022. 138p. Masters dissertation.

The automotive market is an important pillar in the global economy and actively collaborates in the development of new technologies aimed at transporting people and consumer goods. This sector also contributes to around 14% of greenhouse gas (GHG) emissions, due to the usage of fossil fuels, and is also the largest source of harmful (local) emissions in large urban centers. For this reason, more than forty years ago, emission control programs were introduced in the representative markets and, recently, energy efficiency programs, encouraging the reduction of fuel consumption and, consequently, the impacts on global warming. This dissertation, through a comprehensive bibliographic review of global and regional automotive policies, technological routes adopted globally to solve environmental challenges, indicates necessary actions in the medium and long term in the field of energy efficiency and gaseous emissions in Brazil. Vehicles have evolved significantly with the adoption of automotive programs, introducing technologies for weight reduction, rolling resistance, aerodynamic drag, increasing the efficiency of combustion engines and accessory components, optimizing transmissions, improving fuel quality, adopting of exhaust gas aftertreatment systems, electronic controls and on-board diagnostics systems. In Brazil, with the emissions control and energy efficiency programs already consolidated, it is possible to predict, based on the experiences of previous programs and of other countries, which will be the technological path to be adopted in the medium and long term future, taking into account the local limitations on investments and infrastructure. Even with the great advance of Brazilian legislation in recent years, there are still several points that need to be considered in the next phases to ensure the improvement of air quality in large centers and an effective contribution to the reduction of greenhouse gases in transport. The introduction of inspection and maintenance programs for vehicles in use, especially in vehicles that operate in large centers, control of the number of particles from combustion for light vehicles with direct injection and study of particles coming from the brakes and tires system, are attention points. Improvements in fuels for the Otto cycle

follow routes such as increasing RON octane, reducing fleet consumption in real conditions, also enabling the introduction of new technologies, while for the Diesel cycle the introduction of HVO, as a complementary solution to Biodiesel above 15 % blend due to its drop-in attributes. The definition of new energy efficiency targets for light and heavy vehicles after 2022, based on the need to reduce GHG, will guarantee the technological evolution and the competitiveness of the vehicle made in Brazil.

Key Word: Energy Efficiency, Vehicle Emissions, Biofuels, Automotive Technology.

Lista de Ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1. Limites de Emissões Proconve – Veículos Diesel..... | 22 |
| Figura 2. Limites de Emissões Proconve – Veículos Leves. | 23 |
| Figura 3. Metas de Emissões de CO ₂ para veículos leves de passageiro | 24 |
| Figura 4. Detalhamento do Efeito Estufa..... | 30 |
| Figura 5 - Evolução das emissões de GEE..... | 31 |
| Figura 6 – Evolução das emissões de CO ₂ | 32 |
| Figura 7 – Evolução das emissões de GEE entre 1970 e 2010..... | 32 |
| Figura 8 – Emissões de GEE de diversos setores da economia..... | 34 |
| Figura 9 – Temperatura combinada dos continentes e oceanos entre 1850 e 2012, relativo ao período de 1986 a 2005..... | 35 |
| Figura 10 – Impactos do aquecimento global por região..... | 37 |
| Figura 11 – Variação da Composição dos Gases de Escape em função da composição da mistura..... | 40 |
| Figura 12 – Composição da estrutura de carbono do material particulado..... | 42 |
| Figura 13 – Impacto da redução das emissões de PM _{2,5} de veículos leves e pesados em 6 países do G20..... | 44 |
| Figura 14 – Emissões Locais de poluentes na RMSP 2015..... | 45 |
| Figura 15 – SMOG Fotoquímico cidade de São Paulo..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 16 – Cronograma de implementação das legislações de emissões para veículos leves e comerciais..... | 49 |
| Figura 17 – Visão Geral dos limites do PROCONVE para Veículos Leves..... | 50 |
| Figura 18 – Visão Geral dos limites do PROCONVE para Veículos Pesados..... | 52 |
| Figura 19 – Etiqueta PBEV..... | 54 |
| Figura 20 – Metas definidas para o Programa INOVAR-AUTO..... | 55 |
| Figura 21 – Créditos <i>off cycle</i> e super créditos ROTA2030..... | 59 |
| Figura 22 – Diagrama de perdas de energia de um veículo. | 61 |
| Figura 23 – Forças atuantes em um veículo..... | 62 |
| Figura 24 – Resistência ao Rolamento em Função da Velocidade..... | 63 |
| Figura 25 – Defletores para redução do arraste aerodinâmico..... | 65 |
| Figura 26 – Grade frontal com acionamento eletrônico..... | 65 |
| Figura 27 – Principais contribuições para resistência ao Rolamento de um pneu..... | 66 |
| Figura 28 – Frequência (Hz) versus Dissipação de energia..... | 67 |
| Figura 29 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia..... | 68 |
| Figura 30 – Redução de massa versus custos de materiais..... | 70 |
| Figura 31 – Média da aplicação de materiais em veículos de passeio..... | 70 |
| Figura 32 – Representação do trabalho em um ciclo real..... | 72 |
| Figura 33 – Diagrama de Perdas de um Motor..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 – Detalhamento das perdas mecânicas de um Motor..... | 74 |
| Figura 35 - Evolução e Classes API dos Óleos Lubrificantes..... | 75 |
| Figura 36 - Construção e nomenclatura típica para pistões e anéis..... | 76 |
| Figura 37 - Operação de uma bronzina em regime hidrodinâmico. | 77 |
| Figura 38 - Diagrama de Stribeck para superfície radial..... | 77 |
| Figura 39 - Diferentes sistemas de trem de válvulas..... | 78 |
| Figura 40 - Pressão de atrito dos diferentes trens de válvulas aplicados no mercado..... | 79 |
| Figura 41 - Consumo dos sistemas auxiliares motor SI..... | 80 |
| Figura 42 - Princípios do conceito de <i>downsizing</i> | 81 |
| Figura 43 - Configuração dos sistemas de Injeção Direta e Indireta..... | 82 |
| Figura 44 – Aumento da eficiência térmica em função da taxa de compressão..... | 83 |
| Figura 45 – Tendências Tecnologias para motores a combustão interna..... | 83 |
| Figura 46 – Evolução da participação em vendas dos veículos <i>flex fuel</i> | 85 |
| Figura 47 – Evolução da participação do Biodiesel no Diesel..... | 86 |
| Figura 48 – Sistema DOC em corte..... | 88 |
| Figura 49 – Sistema SCR..... | 88 |
| Figura 50 – Sistema EGR em motores Diesel..... | 89 |
| Figura 51 – Visão em corte do Sistema DPF..... | 90 |
| Figura 52 – Conversor Catalítico de 3 vias..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figura 53. Conceito Poço à Roda..... | 92 |
| Figura 54 - Ciclo do Carbono..... | 93 |
| Figura 55 - Emissão de CO ₂ eq de diferentes tecnologias e combustíveis..... | 94 |
| Figura 56 - Célula Combustível de Membrana de Troca de Prótons..... | 95 |
| Figura 57 - Tecnologia célula a combustível com reforma a bordo. | 96 |
| Figura 58 - Projeto Audi e-gas – geração de Synfuel..... | 96 |
| Figura 59 - Matriz Energética Elétrica Brasileira..... | 97 |
| Figura 60 - Comparação de Emissões de CO ₂ eq de diferentes tecnologias..... | 99 |
| Figura 61 - Introdução dos programas de etiquetagem globais..... | 103 |
| Figura 62 - Tecnologias introduzidas para redução de emissões em veículos leves..... | 105 |
| Figura 63 - Tecnologias introduzidas para redução de emissões em veículos leves..... | 105 |
| Figura 64 - Comparação consumo energéticos modelos Brasileiros Dez/14 e Set/17..... | 107 |
| Figura 65 - Relação cumulativa de redução de consumo de combustível e custos de tecnologias..... | 108 |
| Figura 66 - Evolução da massa média da frota brasileira entre 2017 e 2020..... | 109 |
| Figura 67 - Possível Evolução das Metas de Eficiência Energética..... | 110 |
| Figura 68 - Ciclo RDE MAHLE Jundiaí..... | 113 |
| Figura 69 - Resultados de Consumo de Combustível do Experimento..... | 115 |
| Figura 70 - Parâmetros comparativos do veículo operando com Gasolina Convencional e Gasolina de Alta Octanagem..... | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura 71 - Comparação do tamanho de partículas em relação ao fio de cabelo humano e grão de areia..... | 117 |
| Figura 72 - Fração de deposição de partículas sólidas em diferentes pontos do sistema respiratório humano em função do tamanho da partícula (Joint Research Center, 2014)..... | 118 |
| Figura 73 - Contribuição de diversas fontes para emissões de partículas..... | 119 |
| Figura 74 - Componentes do sistema de injeção de um motor diesel após funcionamento com mistura de biodiesel acima de 15%..... | 121 |
| Figura 75 - Sistema de pós tratamento Proconve P8 - EURO VI (VOLVO)..... | 122 |
| Figura 76 - Tecnologias para melhoria da eficiência energética em veículos pesados..... | 124 |
| Figura 77 - Consumo específico comparativo entre combustível HVO e Diesel B7 Europeu..... | 126 |
| Figura 78 – Comparativo de emissões e consumo entre combustível HVO e Diesel B7 Europeu | 126 |
| Figura 79 - Potencial de redução de consumo em uma aplicação de caminhão com implemento (ICCT,2017)..... | 127 |
| Figura80 - Média das Emissões dos Veículos por Tecnologia, tipo e resultado da inspeção..... | 129 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Limites para o PROCONVE L8..... | 51 |
| Tabela 2 – Tabela comparativa de aplicação de materiais leves..... | 72 |
| Tabela 3 - Avaliação do atendimento das medidas de efetividade dos programas de emissões e eficiência energética nos maiores mercados de veículos..... | 101 |
| Tabela 4 - Comparação das características dos veículos leves em diferentes regiões..... | 103 |
| Tabela 5 - Exemplo de Eficiência Energética para veículo de passeio..... | 111 |
| Tabela 6 - Exemplo de Eficiência Energética para veículo híbrido e elétrico..... | 112 |
| Tabela 7 - Características dos combustíveis utilizados..... | 114 |
| Tabela 8 - Características do veículo utilizado no experimento..... | 115 |
| Tabela 9 - Índice de máximo incremento em massa de ozônio de determinados gases..... | 120 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Gregas

ρ – Densidade do Ar.

λ – Razão de relação Ar/Combustível ideal pela razão Ar/Combustível real.

Letras Latinas

w – Trabalho realizado

f – Coeficiente de resistência ao rolamento

η - Rendimento do trem de força

Abreviações

CFC - Clorofluorocarboneto

CH₄ - Metano

CO – Monóxido de Carbono

COV – Composto Orgânico Volátil

CVT - *Continuously Variable Transmission*

DLC – *Diamond Like Carbon*

DOC – *Diesel Oxidation Catalyst*

EGR – *Exhaust Gas Recirculation*

ESC – *European Steady Cycle*

ETC – *European Transient Cycle*

GPF – *Gasoline Particle Filter*

GSI – *Gear Shift Indicator*

HCO – Aldeídos Totais

HOF – *High Octane Fuel*

H₂O – Água

I/M – Inspeção e Manutenção Veicular

ISC – *In Service Conformity*

MP – Material Particulado

NO_x – Óxido de Nitrogênio

N₂O – Óxido Nitroso

NH₃ - Amônia
O₃ - Ozônio
PCV – *Positive Crankcase Ventilation*
PN – *Particle Number*
PH - Potencial Hidrogeniônico
RDE – *Real Drive Emissions*
RON – *Research Octane Number*
ROC - *Reactive Organic Compound*
RRC - *Rolling Resistance Coefficient*
SCR - *Selective Catalytic Reduction*
SO_x - Óxidos de Enxofre
SO₂ – Dióxido de Enxofre
THC – Total de Hidrocarboneto
TTW – *Tank to Wheel*
TPMS – *Tyre Pressure Monitoring System*
WHSC – *World Harmonized Steady Cycle*
WHTC – *World Harmonized Transient Cycle*
WNTE – *World Harmonized Not to Exceed*
WTW – *Well to Wheel*
WHR – *Waste Heat Recovery*

Siglas

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
CAFE – *Corporate Average Fuel Economy*
CARB – California Air Resources Board
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
G20 – Grupo das 20 maiores economias
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INOVAR-AUTO - Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores
IPCC - *The Intergovernmental Panel on Climate Change*

ICCT – *International Council on Clean Transportation*

MME – Ministério de Minas e Energia

OICA - *Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles*

ONU – Organização das Nações Unidas

PBEV – Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PECO – Programa de Economia de Combustível

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PROMOT - Programa de Controle da Poluição de Ar por Motociclos e Veículos Similares.

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

Sumário

| | |
|---|-----|
| 1 INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 Objetivos | 25 |
| 1.1.1 Objetivos Específicos..... | 25 |
| 1.2 Motivação..... | 25 |
| 1.3 Organização do trabalho..... | 26 |
| 2 METODOLOGIA | 27 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA | 29 |
| 3.1 Aquecimento global..... | 29 |
| 3.1.1 – Estimativas de aumento da temperatura | 34 |
| 3.1.2 - Consequências do aquecimento global..... | 35 |
| 3.2 Emissões gasosas locais | 37 |
| 3.2.1 Formação das emissões em motores do ciclo otto..... | 40 |
| 3.2.2 Formação das emissões em motores do ciclo Diesel..... | 41 |
| 3.2.3 Emissões gasosas em grandes centros..... | 43 |
| 3.3 Ações para reduzir os impactos ambientais (legislações automotivas) | 46 |
| 3.4 Tecnologias automotivas..... | 59 |
| 3.4.1 Tecnologias para eficiência energética | 60 |
| 3.4.2 Tecnologias – emissões gasosas | 84 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 100 |
| 4.1 Programas globais e comparação com o cenário brasileiro | 100 |
| 4.2 Veículos leves | 104 |
| 4.3 Veículos pesados. | 120 |
| 4.4 Sumário – cenário brasileiro (médio – longo) prazo..... | 128 |
| 5 CONCLUSÃO | 131 |

1 INTRODUÇÃO

O mercado automotivo é um importante pilar na economia mundial. Dados da OICA (*Organization Internationale des Constructeurs d' Automobiles*) indicam que as vendas de veículos automotores tiveram crescimento global e constante de 65.923.794 unidades em 2005 para 82.684.788 em 2021, crescimento de 20% em 15 anos. Esse crescimento foi atenuado pelo efeito da pandemia COVID19 no ano de 2020, no entanto, o setor continua com previsão de crescimento nos próximos anos em virtude da demanda global por mobilidade.

A participação do transporte nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) é da ordem de 14% (IPCC, 2014), o que tem criado a necessidade de definição de legislações automotivas para controle e redução destas emissões, com foco em diminuir o impacto deste setor no aquecimento global.

O aquecimento global causado pelo efeito estufa é um dos grandes temas ambientais discutido na atualidade, afetando diretamente as condições de vida da espécie humana e ao mesmo tempo impactando na atividade econômica da sociedade moderna. É um fenômeno que tem provocado o aumento da temperatura média do planeta ao longo dos últimos tempos. Para ilustrar este cenário, estudos indicam que a temperatura média da Terra avançou 0,7°C comparando com os valores médios de 150 anos atrás. Toda essa mudança é atribuída às atividades antrópicas, em especial pela queima de combustíveis fósseis. (MOLIN, 2008).

Estas indicações também são realizadas de forma oficial pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que é uma organização científico-política criada em 1988 pelas Nações Unidas (ONU), cuja principal tarefa é analisar, reunir e publicar os estudos mais avançados relacionados às mudanças climáticas.

O setor de transporte, além de ter uma contribuição significativa para as emissões de GEE, também contribui consideravelmente para as emissões gasosas nocivas, tais como monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), bem como o material particulado (MP). Tais emissões são provenientes do processo de queima de combustíveis e tem sido foco de atenção e tema para políticas públicas, especialmente em grandes centros,

onde a concentração destes poluentes tem impacto direto na saúde pública e por consequência na economia.

Uma das maiores fontes de poluição urbana são os veículos automotores equipados com motores Otto e Diesel. Estas emissões veiculares são formadas através do processo de queima do combustível durante o funcionamento dos motores a combustão interna (HEYWOOD, 1988).

Há mais de 40 anos, a existência de programas de controle de emissões veiculares ao redor do mundo, especialmente nos grandes mercados, resultou em veículos mais modernos que emitem atualmente uma pequena fração das emissões de anos atrás. No entanto, mesmo com os avanços tecnológicos que apoiaram esta grande redução, as emissões veiculares ainda continuam sendo responsáveis por 3,1 milhões de mortes ao ano (ICCT, 2017).

No Brasil, o PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores), que é coordenado pelo IBAMA no Ministério de Meio Ambiente, foi estabelecido em 1986, baseado na experiência internacional e define que veículos novos atendam os limites máximos de emissão em ensaios padronizados com combustíveis de referência. O programa ainda proíbe a comercialização de veículos não homologados segundo seus critérios.

A evolução do PRONCONE permitiu considerável redução das emissões de poluentes, acima de 90% para veículos leves e pesados, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2.

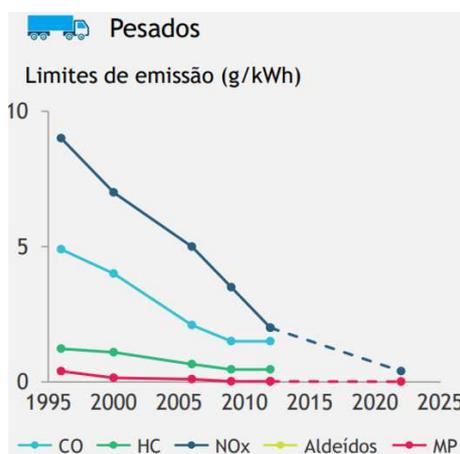


Figura1. Limites de Emissões Proconve – Veículos Diesel (ANFAVEA, 2021)

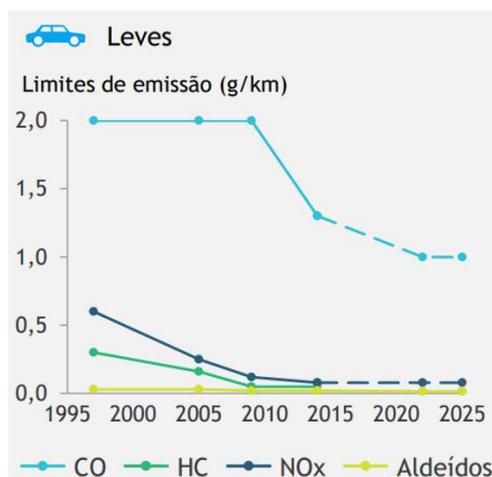


Figura 2. Limites de Emissões Proconve – Veículos Leves (ANFAVEA, 2021)

As emissões gasosas podem ser classificadas em dois principais grupos, denominados como poluentes primários e poluentes secundários. Tal classificação está diretamente relacionada à fonte de emissão, ou seja, os primários são originários diretamente da fonte de emissões, e os secundários são os poluentes formados através de reações que ocorrem em atmosfera baixa (DRUM, 2014).

Em grandes centros urbanos, esse problema é agravado pela grande concentração de atividade industrial e de transporte. As emissões causadas por veículos automotores carregam uma grande variedade de substâncias tóxicas, que provocam uma série de efeitos negativos sobre a saúde (DRUM, 2014). Por este motivo, o controle das emissões e a implementação de tecnologias que reduzam este impacto têm sido o foco de desenvolvimento de políticas públicas, bem como tecnologias que apoiem o alcance destas metas.

Atualmente, estimativas indicam que a quantidade de veículos no mundo alcança 1,2 bilhão de unidades e provavelmente deverá alcançar 2 bilhões em 2035 (SAMARAS, 2017). Portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias que permita a redução das emissões nocivas e de GEE conforme indicado na Figura 3, é fundamental para a busca da descarbonização da mobilidade.

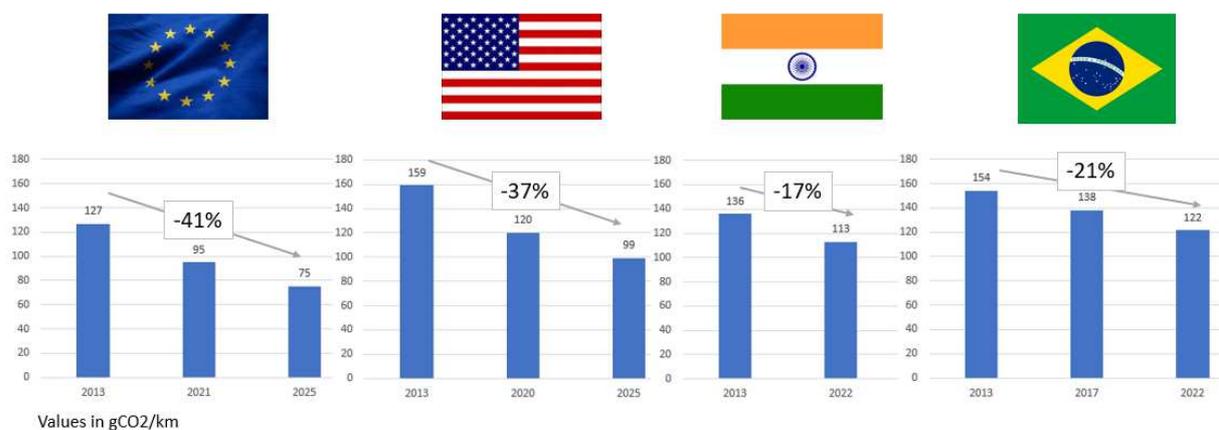


Figura 3. Metas de Emissões de CO2 para veículos leves de passageiro (ICCT, 2015)

As introduções de novas tecnologias estão em sua grande maioria direcionadas a duas principais áreas: o *powertrain* e o *chassis*. No campo do *powertrain*, as melhorias introduzidas em motores a combustão visam promover o aumento da eficiência térmica através da redução das perdas térmicas e por atrito, bem como a aplicação de materiais mais leves (SAMARAS, 2017). Os motores elétricos e baterias, à medida que se tornem mais competitivos em termos de custo com os motores à combustão, deverão também ganhar espaço nas vendas de novos veículos. Para transmissões, a aplicação dos sistemas de dupla embreagem, *Continuously Variable Transmission* (CVT) e câmbio otimizados para manter o motor o maior tempo possível nos regimes de máxima eficiência, deverão ser as tecnologias mais empregadas.

No campo do *chassis* as tecnologias introduzidas para redução da potência resistiva do veículo, como arraste aerodinâmico e atrito ao solo, redução de massa com aplicação de materiais mais leves e resistentes, deverão liderar os avanços tecnológicos, ressaltando que os requisitos de segurança veicular também serão levados em consideração na escolha de novas tecnologias. Tais tecnologias, assim como as legislações, serão detalhadas ao longo deste trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é realizar análise abrangente das alternativas tecnológicas para a indústria automotiva com foco nos desafios do atendimento das legislações para eficiência energética e emissões gasosas, com abrangência global, ao mesmo tempo realizando um paralelo ao cenário brasileiro, indicando as tendências de aplicação de novas tecnologias para o atendimento das metas dos programas automotivos existentes e recomendações para futuras legislações.

1.1.1 Objetivos Específicos

O objetivo específico desta dissertação é através da revisão bibliográfica abrangente dos principais programas de eficiência energética e emissões gasosas locais e das tecnologias automotivas empregadas para atendimento das metas estabelecidas nesses programas, analisar os cenários de evolução brasileiro para as próximas fases da legislação automotiva, indicando as possíveis rotas tecnológicas para a mobilidade local e complementações nos programas existentes, com foco em apoiar a previsibilidade de ações para a indústria automotiva e legisladores.

1.2 Motivação

A necessidade de mobilidade na sociedade moderna tem aumentado consideravelmente as vendas de veículos automotores nas últimas décadas (OICA, 2022). Ao mesmo passo, as questões ambientais, tais como, o aquecimento global e concentração de poluentes em grandes centros urbanos geraram a necessidade de criação de legislações automotivas e desenvolvimento tecnológico na indústria automotiva. As rápidas mudanças nos cenários econômicos e ambientais têm criado algumas incertezas no futuro da indústria automotiva quanto à direção correta para adoção de novas tecnologias.

O setor de transporte tem uma contribuição significativa às emissões de gases de efeito estufa (GEE), portanto este trabalho abordará os principais caminhos tecnológicos que a indústria automotiva poderá seguir com o objetivo de amenizar o impacto no aquecimento

global e na qualidade do ar em grandes centros, contribuindo para o crescimento sustentável do setor.

1.3 Organização do trabalho

No Capítulo 1 trata da introdução sobre o trabalho, construindo visão geral sobre o tema, indicando os objetivos e motivação para realizar o estudo.

No Capítulo 2 será apresentada a metodologia adotada para esta dissertação.

O Capítulo 3 focará na revisão da literatura, onde será abordado o tema aquecimento global e o impacto dos diversos setores, bem como as emissões gasosas que são nocivas à saúde. Também serão analisados os programas globais existentes para aumento da eficiência energética dos veículos e redução das emissões gasosas com indicação das tecnologias que podem ser adotadas visando alcançar os objetivos destes programas.

No Capítulo 4, resultados e discussões, serão feitas análises e comparações entre os diversos programas de eficiência energética e emissões, indicando suas vantagens e desvantagens, com avaliação detalhada das tendências tecnológicas a serem aplicadas, indicando a viabilidade de implementação destas tecnologias, gerando um cenário futuro para o Brasil.

No Capítulo 5, as principais conclusões serão indicadas, bem como as recomendações deste trabalho para contribuição no desenvolvimento de políticas automotivas e estudos futuros.

2 METODOLOGIA

Através da revisão bibliográfica abrangente das legislações globais de emissões gasosas e eficiência energética, bem como das tecnologias disponíveis para garantir o atingimento das metas estabelecidas, foi elaborada a análise com foco na aplicação brasileira.

Com base nesta análise, essa dissertação realizou recomendações para as próximas etapas da legislação automotiva brasileira para veículos leves e pesados, seja para emissões ou eficiência energética, com indicações de medidas possíveis de serem adotadas com foco na equalização dos programas brasileiros aos internacionais, com objetivo de reduzir a lacuna tecnológica entre o Brasil e os países mais desenvolvidos nestes temas.

Cenários de possíveis rotas tecnológicas também foram indicados neste trabalho, levando em consideração as medidas adotadas em outros países com metas similares e experiências nas fases passadas das legislações automotivas brasileiras.

Experimentos foram realizados para fundamentar recomendações realizadas neste trabalho, onde não havia referências sobre o tema. Neste caso específico, o experimento realizado tem o objetivo de demonstrar os benefícios da aplicação de combustíveis de maior octanagem para melhorar o desempenho dos veículos leves nas condições reais de uso, que têm diferenças significativas em relação aos procedimentos de certificação convencional em laboratório, em especial nas temperaturas de trabalho do veículo e carregamento utilizado.

Para este experimento, um veículo de passeio, *flex fuel*, 1,6L, representativo do mercado brasileiro, foi selecionado e utilizado para as análises. O objetivo do experimento foi a medição volumétrica do consumo de combustível em ciclo de utilização real, com composição de trechos entre cidade, interurbano e rodovia, totalizando 70 km de extensão, conforme apresentado na Figura 68.

O consumo de combustível avaliado foi expresso em autonomia [km/l] e foram utilizados três combustíveis na avaliação: Etanol hidratado, Gasolina Comum e Gasolina de Alta Octanagem, conforme descrito na Tabela 7.

Para realização do ciclo com o menor desvio possível, foi selecionado condutor experiente, que realizou vários testes em banco, sem medição de consumo, para conhecer o ciclo e garantir repetibilidade.

Os fatores como trânsito e temperatura ambiente são fundamentais para o resultado do experimento, portanto, foram selecionados três dias com tempo estável, sem chuva e temperatura ambiente média de 28°C e os horários de realização entre 10h e 13h, visando a menor variação possível entre os experimentos.

Para garantir a validação dos ciclos, os seguintes parâmetros foram medidos:

- Temperatura ambiente [°C]
- Temperatura do ar no coletor de admissão [°C]
- Posição de pedal de acelerador [%]
- Velocidade do veículo [km/h]
- Avanço de ignição [°]

Os resultados deste experimento são apresentados neste trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas informações sobre o aquecimento global, bem como detalhamento sobre a formação e impacto das emissões de poluentes. Também serão apresentadas tecnologias para melhoria do desempenho dos veículos quanto a eficiência energética e emissões de poluentes.

3.1 Aquecimento global

O aquecimento global, em virtude dos seus impactos na existência das espécies no planeta Terra, é um assunto muito estudado e discutido na atualidade. Diversas atividades econômicas foram estudadas e avaliadas e seus impactos na emissão de GEE já são conhecidos.

Análises mais recentes realizadas pelo IPCC indicam que além do 0,7 °C de aumento na temperatura média da Terra já ocorrida no século XX, as previsões para o século XXI indicam aumento adicional de 1 °C, em caso de preservação da atmosfera, ou de 1,8 a 4°C, em cenário mais pessimista, caso as metas de redução das emissões não sejam alcançadas (IPCC, 2014).

O aquecimento global, causado pelo efeito estufa, se desenvolve da seguinte forma: o Sol é a fonte primária de energia para o planeta Terra; essa energia pode ser traduzida em radiação eletromagnética, que tem comprimentos de onda entre 0,1µm à 4µm, caracterizadas como radiação de ondas curtas (ROC). Conforme ilustrado na Figura 4, uma parte dessa energia é refletida de volta ao espaço exterior, cerca de 30%, e o restante do fluxo passa através da atmosfera terrestre, sendo absorvida pela superfície que se aquece.

Os corpos encontrados na superfície terrestre como na atmosfera emitem radiação com comprimento de onda entre 4µm e 50µm, chamada de radiação de ondas longas (ROL). Esse comprimento de onda emitido pelos corpos da superfície terrestre é absorvido por gases como o vapor d'água (H₂O), o gás carbônico (CO₂), o metano (CH₄), o ozônio (O₃), o óxido nitroso (N₂O) e compostos de clorofluorcarbono (CFC), vulgarmente conhecidos por fréons. Tais gases, chamados de gases de efeito estufa, no processo de absorção e emissão de (ROL) que escaparia para o espaço exterior, formam o chamado efeito estufa (MOLIN, 2008).

O vapor da água é o principal gás de efeito estufa devido a sua concentração no planeta, no entanto, o CO₂ tem sido o principal gás a ser controlado em função do seu considerável aumento após a industrialização.

Vale ressaltar que o efeito estufa até certo ponto é benéfico para a sobrevivência na Terra, pois se não fosse o calor retido, o planeta congelaria, já que sua temperatura média seria de -17°C. No entanto, emissões demasiadas, especialmente de CO₂, estão causando um desequilíbrio, onde há indicações que haverá aumento da temperatura média do planeta, conforme citado anteriormente, o que também coloca em risco a existência de algumas espécies.

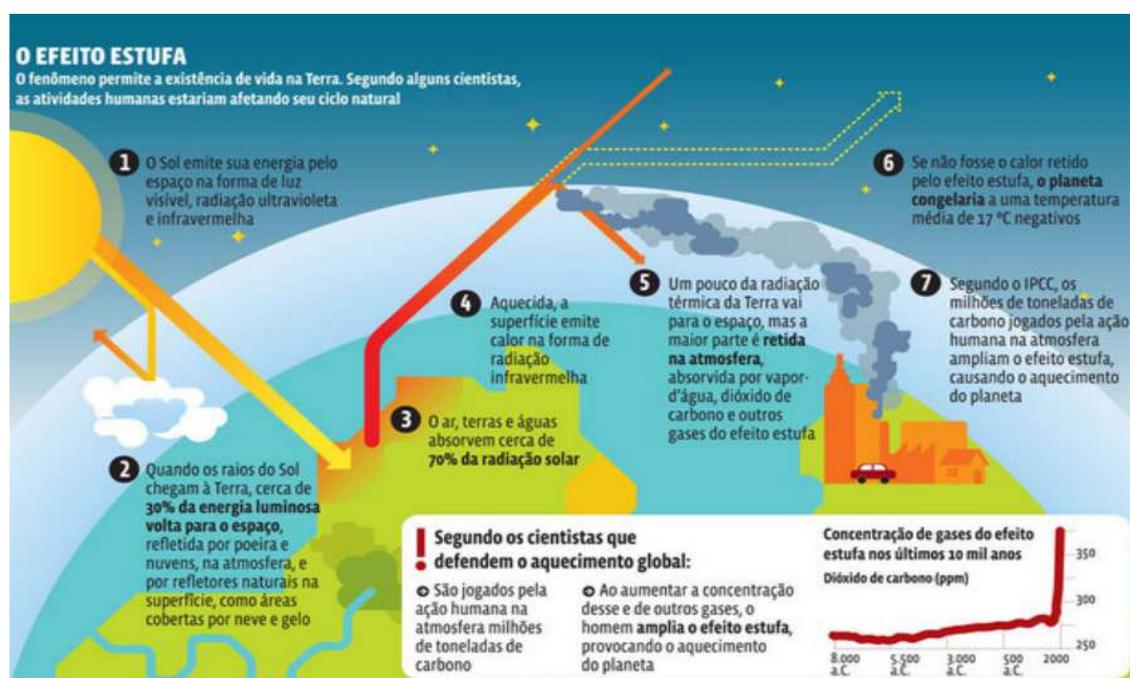


Figura 4. Detalhamento do Efeito Estufa (IPCC, 2014)

As atividades humanas, especialmente nas últimas décadas, têm contribuído para o incremento da concentração dos gases de efeito estufa. Dentre as que mais contribuem, é possível destacar a queima de combustíveis fósseis e todos os processos de transformação industrial, que fizeram aumentar em aproximadamente 35% a concentração se comparada à era pré revolução industrial, com concentrações alcançando níveis em torno de 400ppm após o ano 2000, conforme apresentado a seguir.

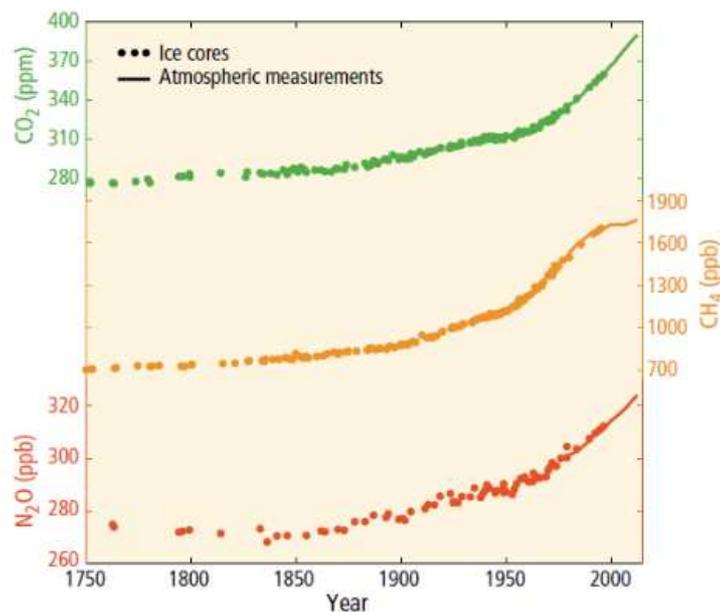


Figura 5 - Evolução das emissões de GEE (LINDSEY, 2009)

Análises mais recentes demonstram que outro gás tem se tornado relevantes no efeito estufa, além do vapor da água e do CO₂. O metano (CH₄), em função do aumento da atividade agrícola e da decomposição do lixo orgânico, passou de 772 ppb (partes por bilhão) na era pré-industrial para 1893 ppb em 2014 (BLASTING, 2015). A contribuição do metano vem sendo reavaliada, pois há previsão de aumento da sua contribuição à medida que os solos das regiões frias derretam o *permafrost*, onde há uma grande quantidade de matéria orgânica congelada que entrará em decomposição, liberando tal gás (IPCC, 2014).

Vale ressaltar que houve aumento considerável nas emissões de GEE após 1950, sendo possível observar esse fenômeno na Figura 6, onde as emissões de CO₂ em [GtCO₂/ano] no período de 1950 a 2011 mais que quadruplicaram em relação ao período de 1750 a 1950.

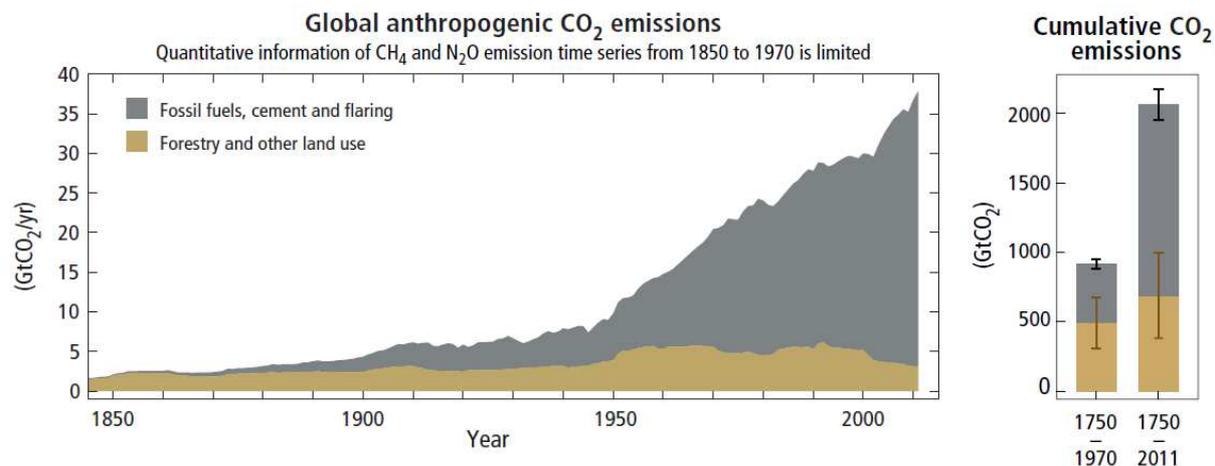


Figura 6 – Evolução das emissões de CO₂ (IPCC, 2014)

Já no período de maior aumento das emissões anuais de GEE, 1950 a 2011, é possível observar na Figura 7, que esse aumento é liderado pela queima de combustíveis fósseis e pela industrialização, demonstrando a necessidade de regulamentações para controle e contenção do aumento destas emissões.

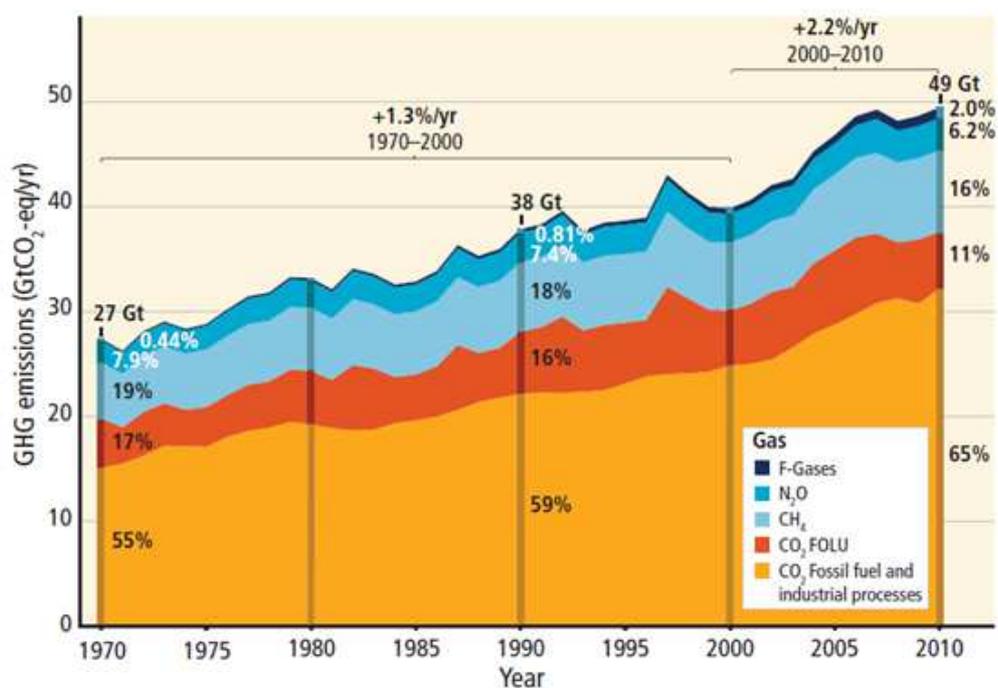


Figura 7 – Evolução das emissões de GEE entre 1970 e 2010 (IPCC, 2014)

Portanto, o aumento da concentração dos gases de efeito estufa é de origem antropogênica e a contribuição das atividades humanas pode ser dividida em diferentes setores (IPCC, 2014), como pode ser visto na Figura 8.

- **Geração de eletricidade e aquecimento:** Este setor contribui com 25% da geração de GEE, através da queima de carvão, gás natural e outros combustíveis fósseis.
- **Indústria:** Este setor contribui com 21% da geração de GEE, através da queima de combustíveis fósseis para geração de energia na transformação de materiais no segmento químico, metalúrgico e mineral.
- **Agricultura:** Este setor contribui com 24% da geração de GEE, através do cultivo de alimentos e pecuária, bem como, desmatamento. As estimativas indicam que o processo de sequestro de carbono pela fotossíntese alcance 20% do total emitido por este setor.
- **Transporte:** Este setor contribui com 14% da geração de GEE, principalmente pela queima de combustíveis fósseis que envolvem os modais, rodoviário, aeroviário, ferroviário e marítimo.
- **Residencial:** Este setor contribui com 6% da geração de GEE, principalmente pela queima de combustíveis fósseis para aquecimento, geração de energia e preparo de alimentação.
- **Outras fontes:** Responsável por 10% da geração de GEE, está ligado a todas as emissões para geração de energia que não estão associadas com energia elétrica ou aquecimento, como por exemplo, extração, refino, produção e transporte de combustíveis.

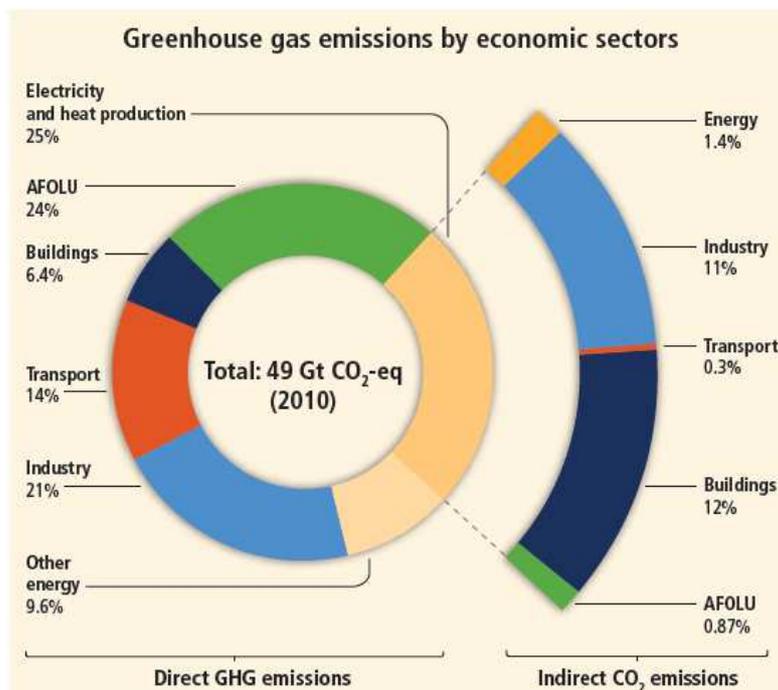


Figura 8 – Emissões de GEE de diversos setores da economia (IPCC, 2014)

O setor de transporte, foco deste trabalho, representa diretamente 14% das emissões totais dos GEE. Atualmente, há programas que apoiam a redução de consumo energético dos veículos e o aumento da participação de combustíveis renováveis com foco na redução do impacto deste setor. É importante ressaltar que as maiores emissões de GEE estão relacionadas à geração de energia elétrica e aquecimento, portanto, neste cenário é necessário avaliar com critério as soluções alternativas apresentadas, pois algumas utilizam a matriz elétrica para abastecimento e há risco de não mitigar estas emissões ao substituir as tecnologias tradicionais. Tal análise será abordada neste trabalho com o cenário na América do Sul.

3.1.1 – Estimativas de aumento da temperatura

Em função da maior concentração de GEE, a temperatura combinada dos continentes e oceanos tem apresentado tendências de aumento contínuo na série histórica. Os valores apresentados são referenciados à temperatura relativa entre 1986 e 2005, demonstrando que

em períodos anteriores a temperatura foi mais baixa em torno $-0,8^{\circ}\text{C}$ e em 2005 a temperatura é $+0,2^{\circ}\text{C}$, conforme se verifica na Figura 9.

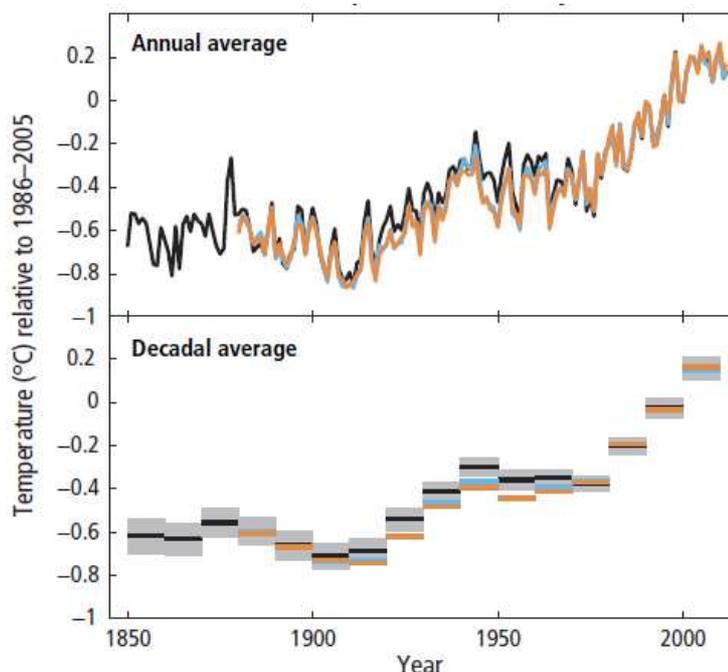


Figura 9 – Temperatura combinada dos continentes e oceanos entre 1850 e 2012, relativo ao período de 1986 a 2005 (IPCC, 2014)

É possível notar que a temperatura tem aumentado consideravelmente a cada década, em especial nas últimas duas décadas, associada às emissões de GEE que aumentaram na mesma proporção, conforme apresentado nas Figuras 6 e 7.

3.1.2 - Consequências do aquecimento global

O aquecimento global afeta em grandes proporções o planeta Terra. Tal mudança climática amplificará os riscos existentes para os sistemas naturais e para a manutenção da vida, impactando pessoas, espécies e ecossistema.

Em diversas regiões, a mudança dos ciclos de chuvas e o derretimento das geleiras em função do aquecimento devem alterar de forma substancial o sistema hídrico global, alterando a quantidade e qualidade da água disponível.

Nas últimas duas décadas a perda de massa dos glaciais tem contribuído consideravelmente para o aumento do nível do mar. Entre os períodos de 1993 e 2010 o nível do mar tem aumentado entre 2,6 e 3,6mm/ano, indicando potencial alagamento de regiões litorâneas em médio prazo (IPCC, 2014). O aquecimento associado à absorção de GEE nos oceanos também tem efeito negativo na mudança do nível de acidez da água (ph), impactando de forma acentuada nas condições básicas de manutenção da vida marinha.

A alteração da precipitação em diversas regiões impacta significativamente a produção de alimentos. A Figura 10 apresenta o impacto da mudança climática em todos os continentes, nos sistemas físicos, biológicos e produção de alimentos, divididos em três cenários: presente, médio e longo prazo. É possível observar que no presente, os impactos são baixos, mas no cenário de longo prazo (2080-2100), mesmo que o aumento da temperatura média seja apenas 2°C, em várias localidades o risco já terá alcançado nível médio e se o aumento for de até 4°C será de médio para alto, afetando diretamente a vida marinha, os níveis dos oceanos e a economia.

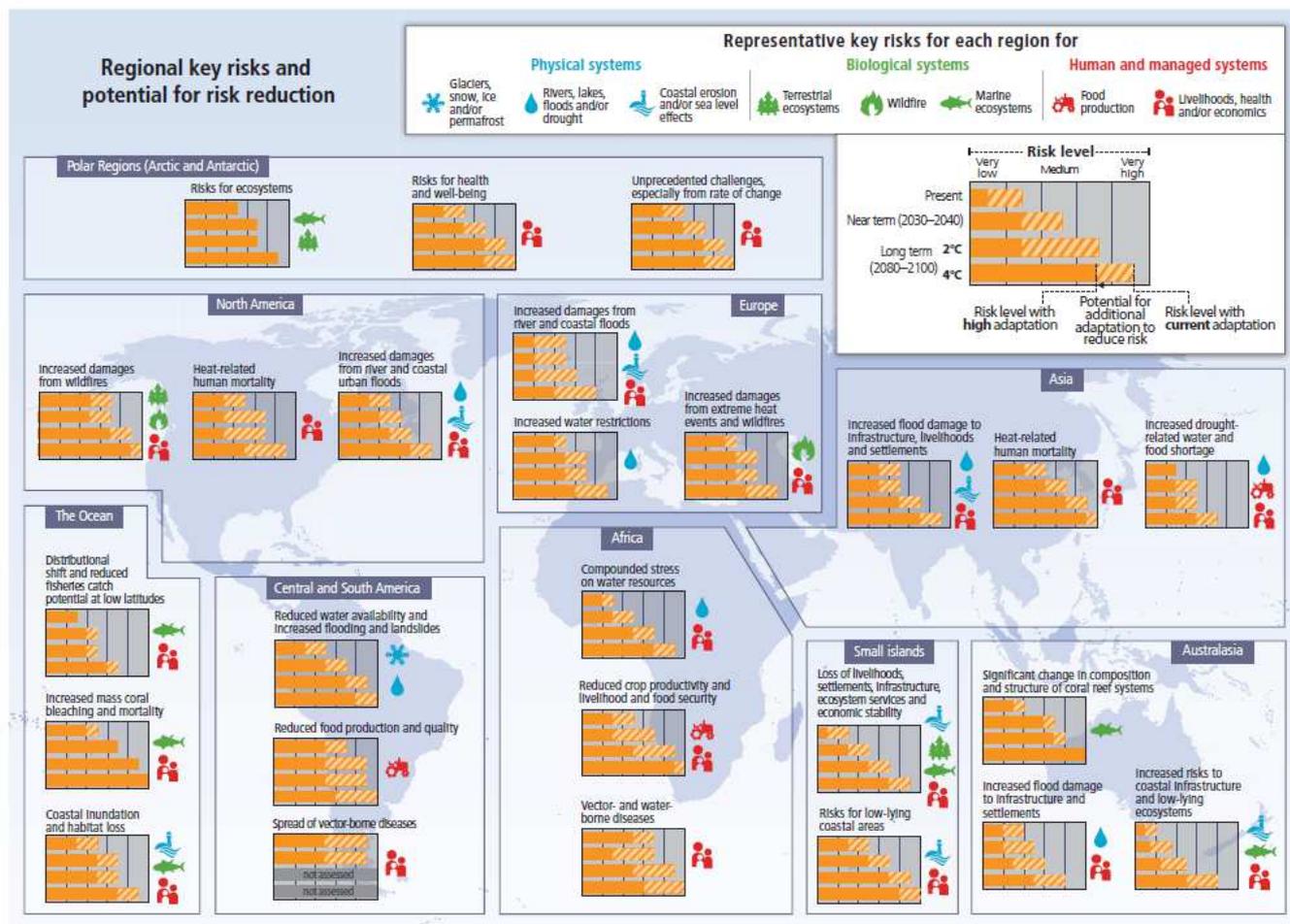


Figura 10 – Impactos do aquecimento global por região (IPCC, 2014)

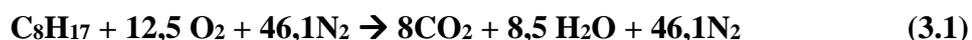
3.2 Emissões gasosas locais

As emissões gasosas locais provenientes da poluição veicular podem ser classificadas em função do resultado do impacto de seus principais poluentes, que podem ser locais, causando impacto somente na área próxima à fonte de emissão, ou poluentes globais, que são os expelidos pelo escapamento para a atmosfera e que impactam o aquecimento global.

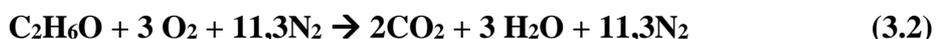
As emissões gasosas locais são controladas pelos órgãos ambientais. Elas não contribuem para o efeito estufa, mas são nocivas à saúde humana, como por exemplo o THC, CO, NOx e MP, que são subprodutos da queima de combustíveis. A concentração destes gases

provenientes da combustão depende da composição do combustível, da condição de funcionamento do motor e da qualidade da mistura ar-combustível.

Se considerada a gasolina, representada por C_8H_{17} e assumindo o ar composto em volume de 21% de O_2 e 79% de N_2 , tem-se a seguinte formação de gases do processo de combustão ideal (HEYWOOD, 1988).



Já para o combustível etanol (C_2H_6O), tem-se a seguinte reação global.



No processo de combustão, o Carbono e o Hidrogênio oxidam, assim liberando energia e formando as emissões gasosas, que são subprodutos da combustão. O gás de escapamento para uma combustão perfeita tem como composição apenas CO_2 e H_2O , o que na prática não é possível.

Sendo a combustão um processo imperfeito, surgem outros subprodutos, que estão classificados a seguir (BRUNETTI, 2012), que são emissões de efeito local, ou seja, tais efeitos ocorrem próximos às fontes emissoras:

- Monóxido de carbono (CO): é formado pela oxidação parcial do carbono em função da quantidade de oxigênio na mistura durante o processo de combustão. Por este motivo a emissão deste gás é menor em motores movidos a etanol em função da presença da molécula de oxigênio no combustível. O CO é um gás inodoro, incolor e insípido, quando inalado reage com a hemoglobina do sangue, diminuindo a capacidade de oxigenação, causando inicialmente cefaleia e, dependendo da intensidade e tempo de exposição, resultar em morte.
- Óxidos de nitrogênio (NOx): é o resultado da combinação do oxigênio e nitrogênio presentes no ar admitido pelo motor, em condições de altas temperaturas e pressões. É o termo geral que identifica a soma do monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Na atmosfera, o NOx em

contato com o vapor de água resulta em ácido nítrico, que somado ao ácido sulfúrico (H_2SO_4), proveniente da queima de combustíveis com enxofre, contribuem para formação da chuva ácida. O NO_x Também participa de forma ativa nas reações fotoquímicas que formam o SMOG. Além disso, a ação de raios ultravioletas (UV) no NO_2 provoca a geração de ozônio, que, mais próximo ao solo, causa problemas pulmonares. Por fim, o NO_x provoca irritação das vias pulmonares e participa no desenvolvimento de doenças, como por exemplo, a enfisema pulmonar.

- Hidrocarbonetos (HC): Os hidrocarbonetos são provenientes da emissão de todos os hidrocarbonetos que saem da câmara de combustão sem serem oxidados. Geralmente se encontram na parede da câmara de combustão, onde a temperatura é mais baixa, não alcançando um nível suficiente para completar a reação. Os HC reagem com outros gases em baixa atmosfera formando emissões secundárias.
- Aldeídos Totais (HCO): Quando a temperatura na câmara de combustão é baixa, ocorre a formação deste tipo de hidrocarboneto, pois ocorre a decomposição de hidrocarbonetos primários em outros hidrocarbonetos de menor peso molecular. Tem formação especialmente em motores do ciclo Otto funcionando com etanol ou motores Diesel onde há excesso de ar. O nível de toxicidade dos aldeídos e o impacto na saúde humana são caracterizados por irritação dos olhos, nariz garganta e epiderme.
- Óxidos de enxofre (SO_x): Este gás é o resultado da reação do enxofre existente no combustível e também contribui para formação de chuva ácida, pois o dióxido de enxofre, ao reagir com o vapor d'água na atmosfera propicia a formação de ácido sulfúrico e de sais de sulfato. Na saúde humana pode provocar danos no sistema respiratório.
- Material particulado (MP): É formado pela combustão incompleta, em especial em temperaturas mais baixas de combustão. O MP é formado por partículas

pequenas, que podem ser provenientes não somente da combustão, mas também do desgaste de pneus e freios. O MP tem grave efeito à saúde, pois se aloja nos tecidos pulmonares prejudicando a capacidade respiratória.

- Dióxido de carbono (CO₂): é um dos produtos primários da combustão de hidrocarbonetos. Não é considerado como poluente devido seu baixo nível tóxico, no entanto, o acúmulo deste gás na atmosfera é um dos principais responsáveis pelo aquecimento global, conforme já apresentado neste trabalho.

3.2.1 Formação das emissões em motores do ciclo otto

A qualidade da mistura ar-combustível tem um papel fundamental na formação de poluentes conforme demonstrado na Figura 11.

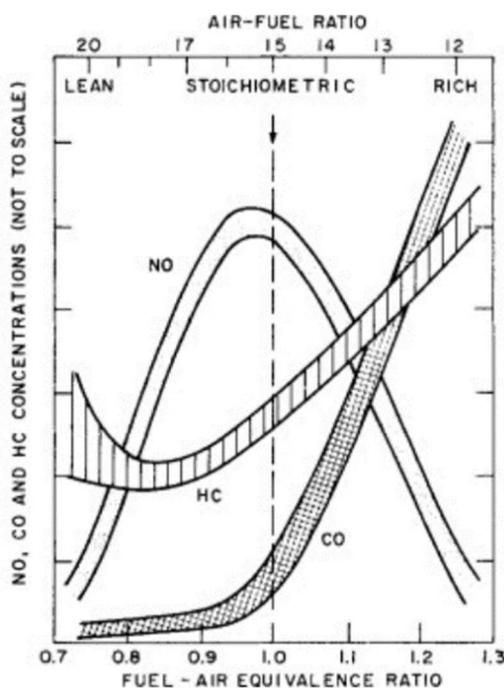


Figura 11 – Variação da Composição dos Gases de Escape em função da composição da mistura ar-combustível (HEYWOOD, 1988)

A mistura estequiométrica é a razão ar-combustível para que a combustão seja completa. Considerando a gasolina pura a mistura deve ser 14,9:1, para a gasolina comercial brasileira 13:1, pois possui etanol em sua composição e 9:1 para o Etanol combustível puro.

Para determinar esta razão de ar-combustível, emprega-se a uma constante de ar, conhecida com lambda (λ), que é determinada da seguinte forma.

$$A = \frac{\text{Mistura Ar Combustível}}{\text{Mistura Ar Combustível Estequiométrica}} \quad (3.3)$$

A mistura é classificada como:

$\lambda < 1,0$ – Mistura Rica (falta de Ar)

$\lambda = 1,0$ – Mistura Estequiométrica

$\lambda > 1,0$ – Mistura Pobre (Excesso de Ar)

A mistura de ar-combustível, tem um papel fundamental na formação de poluentes, sendo que as misturas ricas aumentam a formação de CO e HC.

Quanto ao NO, a maior concentração é na periferia da região estequiométrica em função da maior temperatura. No entanto, tanto enriquecendo quanto empobrecendo a mistura a temperatura diminui e por consequência reduz a concentração de NO.

Há tecnologias capazes de reduzir consideravelmente estas emissões, chamados de pós-tratamento, que serão abordadas posteriormente.

3.2.2 Formação das emissões em motores do ciclo Diesel

Para os motores Diesel as emissões mais críticas são o material particulado e os óxidos de nitrogênio (NOx).

O material particulado (MP) consiste basicamente em carbono proveniente da combustão associado a outros compostos. Grande parte do material particulado resulta da combustão incompleta dos hidrocarbonetos em alguns casos com contribuição do óleo lubrificante.

A temperatura na câmara de combustão é determinante para indicar a emissão deste poluente. Nas temperaturas acima de 500°C pequenas partículas de carbono de diversas formas se aglomeram com tamanho entre 15nm e 30nm. A associação destas partículas forma uma estrutura cristalina chamada de material particulado.

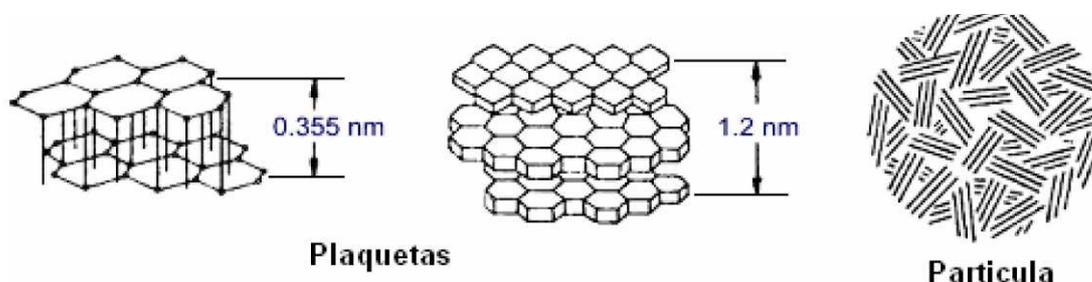


Figura 12 – Composição da estrutura de carbono do material particulado (HEYWOOD, 1988)

Para temperaturas abaixo de 500°C, outros compostos de origem orgânica e inorgânica iniciam processo de condensação e associação nas partículas. Os compostos orgânicos são os hidrocarbonetos não queimados, oxigenados e aromáticos policíclicos. Já os compostos inorgânicos são os dióxidos de enxofre e nitrogênio, ácido sulfúrico e outros sulfatos.

A evolução dos motores Diesel com novos sistemas eletrônicos e tecnologias para melhorar a eficiência do motor tem reduzido consideravelmente a emissão de fumaça, CO e HC. No entanto, o aumento do rendimento dos motores eleva os níveis de emissão de NOx. Ao mesmo passo, toda alteração de motor para reduzir o desempenho, seja por reduzir a taxa de compressão ou o avanço de injeção, contribui para a redução do NOx. Este é um compromisso muito utilizado durante o processo de desenvolvimento de motores.

Várias tecnologias foram implementadas nos últimos anos com objetivo de possibilitar estes motores a alcançar níveis mais baixos de emissões para atendimento da legislação ambiental, como sistemas de injeção eletrônica, pós tratamento de gases, recirculação de gases, entre outros, que serão abordados mais adiante.

3.2.3 Emissões gasosas em grandes centros

A poluição do ar pelas emissões gasosas está associada globalmente a 3,1 milhões de mortes no ano de 2013, onde 75% deste número ocorreu nos países do G20, que são os 20 países com os maiores níveis de atividades econômicas no mundo atual, com 66% da população mundial, mais de 80% da demanda de energia e 90% das vendas de novos veículos (ICCT, 2017).

As emissões em grandes centros geralmente têm concentrações de Material Particulado [MP], Ozônio [O₃], Dióxido de Enxofre [SO₂], Óxido Nítrico [NO], Dióxido de Nitrogênio [NO₂], a soma dos óxidos de nitrogênio conhecidos como [NO_x], monóxido de carbono [CO], os compostos orgânicos voláteis [COV] e os hidrocarbonetos [HC] (MOLINA, 2004).

É importante ressaltar que no caso específico do MP, este poluente é reportado como a concentração de massa total em partículas suspensas em determinados tamanhos, sendo PM₁₀ para partículas de diâmetro inferior a 10 micrometros (µm), e PM_{2,5} para partículas de diâmetro inferior a 2,5 micrometros (µm), pois partículas deste tamanho são capazes de atingir o sistema respiratório causando uma série de doenças. Vale ressaltar que a composição desta concentração de partículas em suspensão é extremamente complexa e variável, pois podem ser emitidas pelos veículos, indústria e processos de transformação de materiais. Diversos fatores afetam a concentração deste poluente, tais como, topografia e condições meteorológicas.

Em algumas cidades com grande concentração de veículos, já existem regras para proibição de circulação de veículos mais antigos em função dos elevados níveis de concentração de MP e NO_x. Estas medidas foram tomadas com foco na redução da concentração desses poluentes com consequente melhoria da qualidade do ar e redução dos problemas de saúde pública.

Os países de forma geral estão definindo e introduzindo políticas públicas que apoiam a redução das emissões gasosas provenientes da mobilidade. Estas políticas regulam

especialmente a redução das emissões mais críticas, bem como o aumento da eficiência energética com foco na redução do consumo de combustíveis fósseis e consequente redução da emissão de CO₂.

Caso as políticas públicas que foram definidas nos últimos anos sejam introduzidas de forma efetiva nestes países entre 2018 e 2021, e considerando a renovação da frota (os veículos em 2030 com modelos mais eficientes e menos poluentes) é estimado que as emissões de MP sejam reduzidas em 74% em comparação a 2015, resultando na redução de 60.000 mortes por ano, conforme indica a Figura 13.

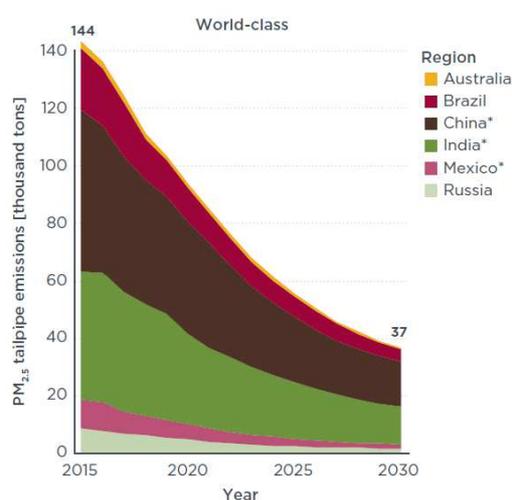


Figura 13 – Impacto da redução das emissões de PM_{2,5} de veículos leves e pesados em 6 países do G20 (ICCT, 2017)

No Brasil, analisando as emissões gasosas, a região de maior atenção é a metropolitana de São Paulo, por sua alta concentração de veículos. Para apoiar o controle, existe um inventário anual conduzido pelo Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, que indica que cerca de 3 mil mortes por ano nesta região estão relacionadas à poluição do ar e representa um custo de 1,5 bilhão de reais aos cofres públicos (CETESB, 2016).

Regiões com alta concentração de O₃, formado especialmente por elementos precursores como os óxidos nitrosos (NO_x) e hidrocarbonetos provenientes da queima do combustível fóssil, aumentam em 30% a probabilidade de uma pessoa morrer por problemas

respiratórios. No Brasil, grandes centros como a região metropolitana de São Paulo sofrem com concentração excessiva de ozônio na atmosfera (CETESB, 2016).

A Figura 14 apresenta as emissões do setor de transporte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em 2015, indicando que o setor de transporte representa grande parte das emissões locais.

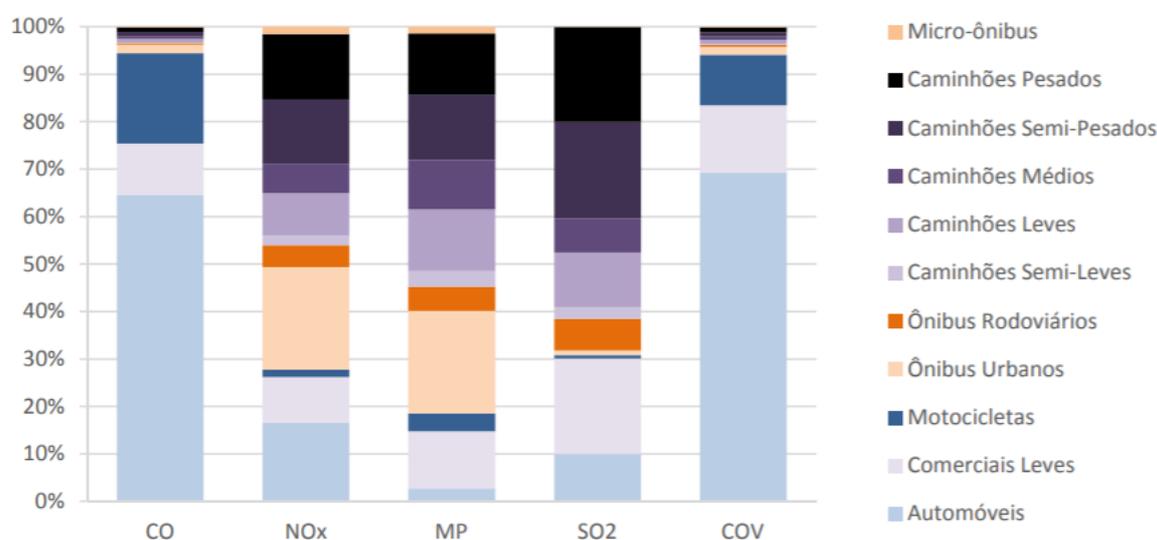


Figura 14 – Emissões Locais de poluentes na RMSP 2015 (CETESB, 2016)

As emissões de NOx e MP da RMSP estão relacionadas diretamente aos veículos movidos a Diesel, enquanto as emissões de CO e Composto Orgânicos Voláteis (COV) se relacionam sobretudo aos veículos do ciclo Otto, incluindo motocicletas, que até pouco tempo atrás não tinham suas emissões controladas no Brasil. Vale ressaltar que o MP é um importante parâmetro para avaliação da qualidade do ar, no entanto, em função de ser composto por partículas sólidas, este poluente não se espalha, ficando concentrado em torno da fonte de emissão, o que degrada consideravelmente a qualidade do ar na região afetada. Este tipo de poluente tem sido o grande motivo da restrição de circulação de veículos em grandes centros, especialmente na Europa.

As emissões em grandes centros podem gerar fenômenos ambientais que afetam diretamente a saúde pública. Um fenômeno crítico que tem afetado a qualidade do ar é o SMOG Fotoquímico, conforme demonstrado na Figura 15.

O nome SMOG é a junção de duas palavras, sendo *SMOKE*, que significa fumaça na língua inglesa e *FOG*, que significa névoa. O SMOG é formado pela reação do óxido nítrico, NO e os hidrocarbonetos e compostos orgânicos voláteis (COV).

Esses poluentes reagem na presença da luz solar e a partir de diversas reações químicas simultâneas o SMOG se desenvolve. Conforme apresentado na Figura 15, o SMOG é a faixa de cor castanha, tal fenômeno causa diversos problemas de saúde, como irritação e danos nos olhos, na pele e pulmões, alterações no sistema imunológico e doenças respiratórias.



Figura 15 – SMOG Fotoquímico cidade de São Paulo (SILVA, 2013)

3.3 Ações para reduzir os impactos ambientais - legislações automotivas

O aumento expressivo do consumo de combustíveis fósseis no período pós-guerra foi liderado pela tecnologia disponível na época que permitiu a fabricação de veículos em grandes volumes e este produto invadiu as ruas de países industrializados, resultando no aumento da emissão de poluentes na atmosfera e congestionamentos (FREIRE DE MELLO, 2017), gerando a necessidade da promoção de estudos das diversas fontes de poluição durante as décadas de 1950 e 1960.

A primeira ação efetiva para controle de emissões de poluentes foi a adoção de um sistema denominado PCV – *Positive Crank Ventilation*, utilizado pela primeira vez pela GM

em 1963. Este sistema permitiu o controle de emissão de hidrocarbonetos (HC) provenientes do sistema de lubrificação do motor, seguido por uma série de outras tecnologias, que serão abordadas mais adiante nesta dissertação.

Com a necessidade de criar de forma contínua programas de pesquisa e legislações para esta área, em 1966 o estado da Califórnia introduziu a primeira legislação de emissões de escapamento nos Estados Unidos através do CARB - *California Air Resources Board* e em 1968 o EPA - *United States Environmental Protection Agency* estendeu a legislação para todos os estados norte-americanos.

Os países que compõem o G20 coletivamente são responsáveis por 80% da demanda de energia e mais de 90% das vendas de veículos novos (ICCT, 2017). Nestes países, em função do grande impacto das atividades do transporte em especial nas últimas quatro décadas, uma série de pesquisas e inventários para buscar conhecer o perfil das fontes móveis de emissões dos principais poluentes foram conduzidos. Estes estudos foram fundamentais para a formação de políticas públicas ambientais e de gestão do transporte para promover redução efetiva nas emissões locais.

As políticas definidas nos últimos anos nestes países têm ditado globalmente os impactos positivos no setor de transporte com foco na qualidade do ar, mudanças climáticas e consumo energético. Países como Canada, Japão, Estados Unidos e União Europeia, são os líderes em termos de legislações em todas as classes, sejam veículos de passeio, comerciais leves e pesados, bem como as aplicações fora de estrada.

No Brasil, o controle das emissões gasosas teve início em 1986 com a criação do PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, instituído através do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, sob a responsabilidade do IBAMA - Instituto Nacional do Meio Ambiente.

O PROCONVE estabelece limites de emissões gasosas para os veículos automotores comercializados no Brasil, sendo veículos de passeio, comerciais e fora de estrada, equipados com motores do ciclo OTTO e DIESEL e alimentados com Gasolina, Etanol, Diesel e GNV.

Os limites de emissões e fases do PROCONVE são definidos de acordo com a categoria dos veículos, sendo:

- Veículos Leves (Passeio): PROCONVE L-x
- Veículos Pesados (Comerciais): PROCONVE P-x
- Veículos Fora de Estrada: PROCONVE MAR-x
- Motociclos e veículos similares: PROCONVE – PROMOT

O quadro apresentado na Figura 16 promove uma visão geral dos principais programas de controle de emissões estabelecidos globalmente. É possível observar pelas cores indicadas em cada fase da legislação, que o Brasil tem um atraso de nível de legislação em comparação com a União Europeia e os Estados Unidos.

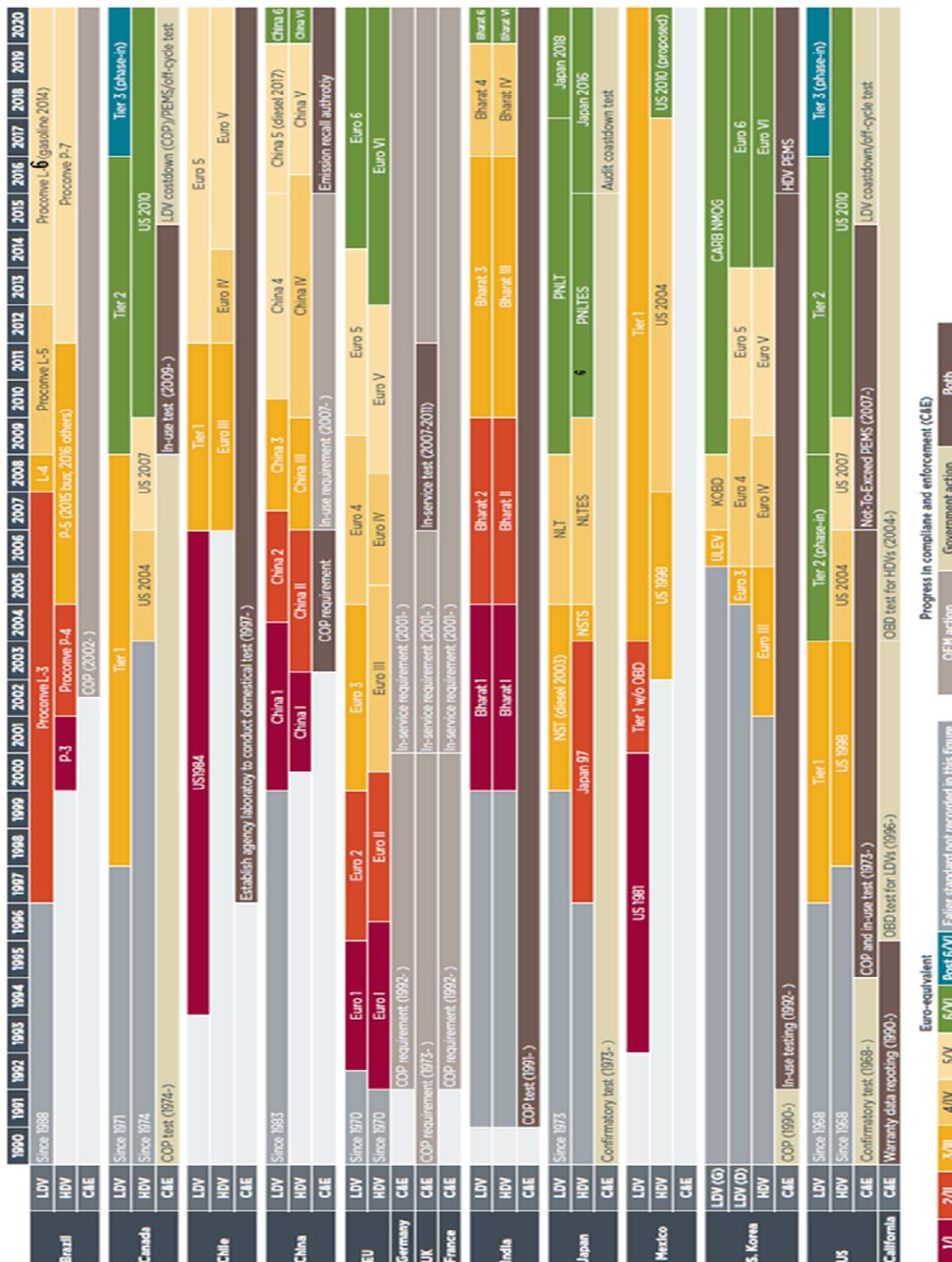


Figura 16 Cronograma de implementação das legislações de emissões para veículos leves e comerciais (ICCT, 2017)

Para os veículos leves, o programa entrou em 2022 na 7ª fase (PROCONVE L7). O programa para esta classe de veículos está baseado na legislação dos Estados Unidos definida no CFR – *Code of Federal Regulations* – Título 40 - Parte 86, e incorporou adaptações para condições brasileiras, como: combustível, condições de uso dos veículos, velocidades de trocas de marcha, entre outros.

Desde a primeira fase (PROCONVE L1) houve uma redução considerável das emissões gasosas, em especial para os gases regulamentados, tais como CO, HC, NOx e HCO, com reduções próximas a 90% se comparadas as fases L1 e L8, conforme apresentado na Figura 17.

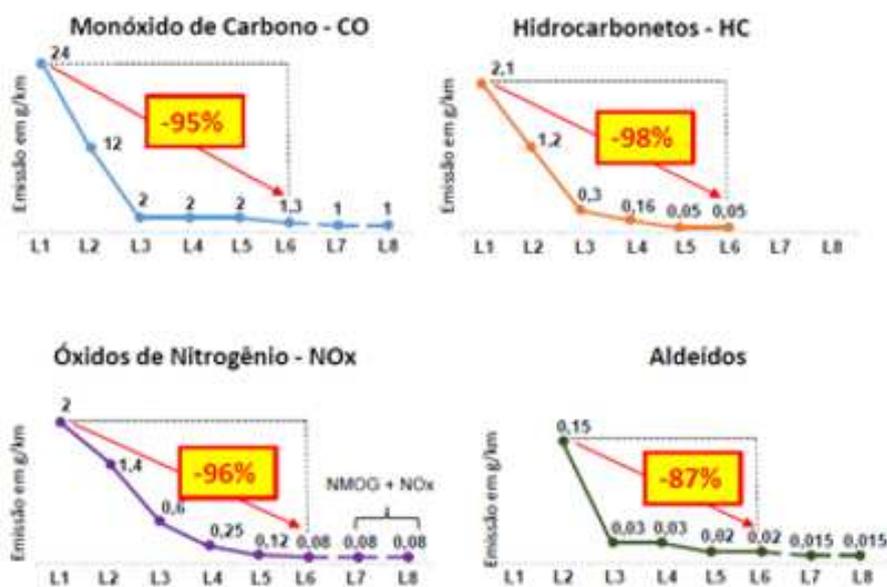


Figura 17 – Visão Geral dos limites do PROCONVE para Veículos Leves (ANFAVEA, 2020)

Na fase L7, se iniciou o controle da emissão do etanol não queimado na fase fria do teste de certificação, ou seja, as emissões deste componente não podem mais ser descontadas do total de HC, como era realizado até a fase L6. As emissões evaporativas também ficaram mais restritas, sendo controlada não apenas a emissão evaporativa do sistema de armazenamento de combustível na condição estática, mas também no momento do reabastecimento, necessitando de sistemas mais robustos de retenção dos gases evaporados.

Nessa fase também se iniciou o monitoramento das emissões em ciclo de condução real, ou seja, além da tradicional medição no laboratório em condições controladas, é necessária a medição das emissões em tráfego real, o que é chamado de RDE (*Real Drive Emission*) na tradução livre, Emissões em Condições Reais.

Na fase L8, com início previsto em 2025, uma nova metodologia será adotada, onde a média corporativa das emissões gasosas da montadora será considerada, sendo a média de todos os modelos comercializados pela montadora, através do limite de NMOG (Gases Orgânicos Não Metano) somado ao NOx. O valor desta soma vai definir o nível de emissões da montadora que por consequência definirá os limites dos demais gases, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites para o PROCONVE L8 (CONAMA, 2018)

| | Emission Level | NMOG+Nox [mg/km] | MP [mg/km] | CO [mg/km] | Aldehydes [mg/km] | NH3 [ppm] | Evap. [g] | Refueling emissions [mg/L] |
|---|----------------|------------------|------------|------------|-------------------|-----------|-----------|----------------------------|
| Passenger cars and Light commercial vehicles (<1700kg) - SI | 320 | 320 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 280 | 280 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 250 | 250 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 220 | 220 | 10 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 200 | 200 | 10 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 170 | 170 | 9 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 140 | 140 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 110 | 110 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 80 | 80 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 70 | 70 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 60 | 60 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 50 | 50 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 40 | 40 | 4 | 500 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 30 | 30 | 3 | 500 | 8 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 20 | 20 | 2 | 400 | 8 | 10 | 0.5 | 50 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Light commercial vehicles (>1700kg) - SI | 320 | 320 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 280 | 280 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 250 | 250 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 220 | 220 | 10 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 200 | 200 | 10 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 170 | 170 | 9 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 140 | 140 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 110 | 110 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 80 | 80 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 70 | 70 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 60 | 60 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 50 | 50 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 40 | 40 | 4 | 500 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 30 | 30 | 3 | 500 | 8 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 20 | 20 | 2 | 400 | 8 | 10 | 0.5 | 50 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Light commercial vehicles - Diesel | 320 | 320 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 280 | 280 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 250 | 250 | 20 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 220 | 220 | 10 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 200 | 200 | 10 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 170 | 170 | 9 | 1000 | - | 10 | 0.5 | 50 |
| | 140 | 140 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 110 | 110 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 80 | 80 | 6 | 1000 | 15 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 70 | 70 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 60 | 60 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 50 | 50 | 4 | 600 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 40 | 40 | 4 | 500 | 10 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 30 | 30 | 3 | 500 | 8 | 10 | 0.5 | 50 |
| | 20 | 20 | 2 | 400 | 8 | 10 | 0.5 | 50 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Para os veículos pesados, o programa entrou em 2022 em sua 8ª fase (PROCONVE P8). Este programa para veículos comerciais, diferente dos veículos leves, é baseado na normativa europeia, por razões históricas, onde grande parte das empresas que comercializam caminhões e ônibus no Brasil têm origem naquele continente.

Entre as fases P1 e P8, as alterações tecnológicas nos veículos foram substanciais, o que permitiu a redução drástica dos poluentes, em especial o MP e NOx, alcançando valores de redução acima de 90%, conforme apresentado na Figura 18.

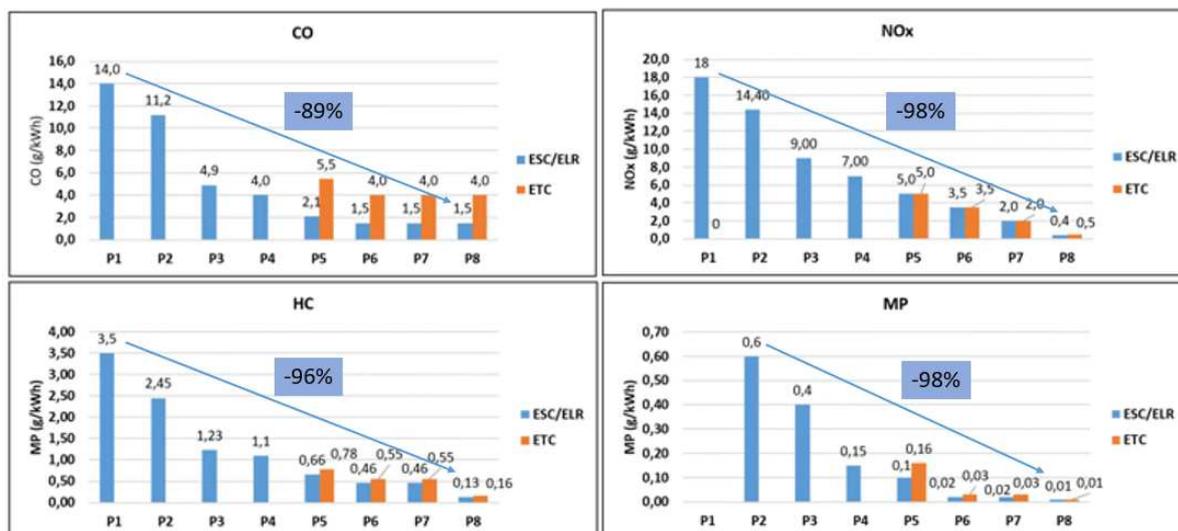


Figura 18 – Visão Geral dos limites do PROCONVE para Veículos Pesados (Adaptado ANFAVEA,2021)

Para a recente fase P8, houveram alterações dos ciclos de testes para condições harmonizadas globalmente, seguindo o regulamento UN ECE R49.06 das Nações Unidas.

Tais ciclos são denominados WHSC (*World Harmonized Steady State Cycle*), que consiste em um protocolo de testes de motor em dinamômetro, onde as emissões são medidas em 13 condições distintas de rotação e carga, sendo o resultado definido como a média ponderada dessas medições. O WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*), que também é realizado no motor em dinamômetro, sendo um teste transiente, reproduzindo condições de funcionamento do motor em veículo e o WNTE (*World Harmonized Not to Exceed*), que é considerado um teste de auditoria completar aos demais protocolos, com objetivo de garantir que o motor atenderá os limites de emissões em qualquer condição de funcionamento.

Os limites de emissões também ficaram mais restritos para os poluentes críticos, tais como MP e NOx. Adicionalmente, será necessário demonstrar as emissões do modelo certificado durante a vida útil através do ciclo de comprovação denominado ISC (*In Service Conformity*), onde, além dos gases regulamentados, será necessário reportar também as emissões de CO2 com objetivo de gerar banco de dados para definição dos objetivos de eficiência no futuro.

Nos últimos anos foram introduzidas diversas políticas visando aumento da eficiência energética dos veículos, com foco na introdução de tecnologias que apoiam a redução da emissão de CO₂, sempre considerando as emissões do tanque à roda (TTW). A maioria das políticas implementadas estão voltadas para veículos de passeio, no entanto, em algumas localidades como Estados Unidos e União Europeia, já existem políticas de eficiência energética para veículos comerciais.

Conforme indicado na Figura 3 desta dissertação, as metas para eficiência energética dos veículos, expressas em [g CO₂/km], [mpg] ou [l/100km] para a União Europeia, Estados Unidos, Japão, China e Índia, indicam que os modelos comercializados deverão ser entre 17% e 40% mais eficientes em 2022-2025, comparado aos modelos comercializados em 2013. Portanto, tecnologias tanto no campo do motor como também no chassis deverão ser introduzidas para apoiar o atendimento das metas estabelecidas.

No Brasil, o programa de eficiência energética teve seu início em 2012, quando o governo brasileiro, com objetivo de elevar o nível tecnológico dos produtos brasileiros e da sua indústria, criou o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, chamado de INOVAR-AUTO. Este programa definiu metas tanto para empresas com produção local como também empresas que somente comercializam veículos leves através de importação. Tais metas vão desde investimentos em pesquisa e desenvolvimento a metas de atingimento de eficiência energética para os veículos comercializados.

Para criação deste programa, experiências internacionais foram consideradas, como por exemplo, o programa CAFE (*Corporate Average Fuel Economy*) nos Estados Unidos e o programa definido pelo Parlamento Europeu através do regulamento n°443/2009, que define metas objetivas de redução de consumo para os veículos comercializados na União Europeia.

O programa INOVAR-AUTO também se beneficiou de iniciativas anteriores que foram desenvolvidas no Brasil, sendo elas o Programa de Economia de Combustíveis (PECO), estabelecido na década de 80 e o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), estabelecido em 2008, voltado apenas a veículos leves.

O Programa de Economia de Combustíveis (PECO), formalizado entre o governo federal e a ANFAVEA em 1979, tinha como principais objetivos a publicação de um guia com indicadores de consumo de combustível dos veículos nacionais e estabelecimento de metas. No entanto, com a queda do preço do petróleo na década de 1980, este programa perdeu a prioridade e foi encerrado (ALMEIDA FILHO, 2018).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) foi criado em 2008, associado a outros programas existentes como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) criado em 1984 pelo INMETRO com objetivo de informar aos consumidores sobre eficiência energética dos vários produtos comercializados. Anteriormente, em 1991 o MME (Ministério de Minas e Energia), com apoio técnico da Petrobras, criou o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), com objetivo de garantir o uso racional de recursos naturais não renováveis (ALMEIDA FILHO, 2018).

O principal objetivo do PBEV é garantir que o consumidor, no momento da compra, possa comparar a eficiência energética, fornecendo informações sobre o consumo de combustível e emissão de CO₂ em [g/km]. As informações são indicadas em uma etiqueta que vem afixada no veículo novo e compara o modelo com os demais da mesma categoria, atribuindo uma classificação de “A” a “E”, sendo o “A” o mais eficiente e o “E” o veículo menos eficiente. Os modelos são classificados em 10 categorias de acordo com o tamanho do veículo e sua aplicação, garantindo para o consumidor a experiência de compra consciente, conforme apresentado na Figura 19.



Figura 19 – Etiqueta PBEV (INMETRO, 2016)

Com a base de dados disponível pelo PBEV, foi possível conhecer o consumo energético dos modelos comercializados no Brasil e, com isso, determinar metas de redução de consumo de combustível, que foram estabelecidas pelo governo federal, tomando como referência um veículo de massa de 1121kg e um consumo energético de 2,07 MJ/km, sendo estabelecido como compromisso obrigatório o valor de 1,82 MJ/km para a referência definida. Com isso, o valor de redução médio esperado definido foi de 12,08%.

Adicionalmente à meta obrigatória, o INOVAR-AUTO também estabeleceu duas metas adicionais, com o benefício de desconto de até dois pontos percentuais no IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados). Tais metas adicionais se referem a uma redução no consumo de combustível de 15,46% para obter menos 1 ponto percentual no IPI e 18,84% para menos 2 pontos percentuais no imposto indicado, todos com base no veículo de referência de 1121kg. A Figura 20 ilustra as metas do programa Inovar Auto.

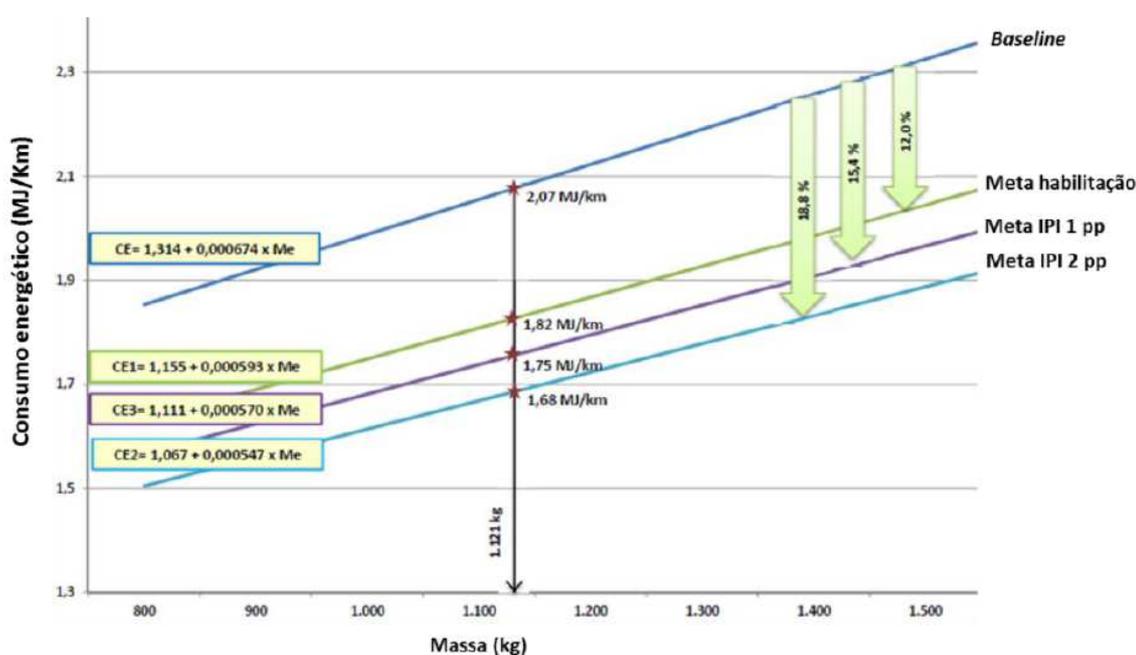


Figura 20 – Metas definidas para o Programa INOVAR-AUTO (MDIC, 2012)

A metodologia de medição do consumo energético em veículos leves é realizada através da norma NBR7024: “Medição do Consumo de Combustível de Veículos Rodoviários Automotores Leves”, onde o veículo é submetido a um ensaio em dinamômetro de chassi, reproduzindo um ciclo urbano representativo, conforme NBR 6601 e um ciclo estrada,

conforme a NBR7024. O consumo do veículo da parcela urbana e rodoviária obtidos em ciclos distintos são expressos em [km/l], e o resultado final é apresentado através da média ponderada dos ciclos, conforme equação abaixo:

$$A_{\text{comb}} = \frac{1}{\frac{0.55}{A_{\text{rep.urb}}} + \frac{0.45}{A_{\text{rep.rod}}}} \quad (3.4)$$

Onde:

A_{comb} é a autonomia de combustível combinada, expressa em quilômetros por litro (km/l);

$A_{\text{rep.urb}}$ é a autonomia de combustível urbana do veículo representativo, expressa em quilômetros por litro (km/l);

$A_{\text{rep.rod}}$ é a autonomia de combustível rodoviária do veículo representativo, expressa em quilômetros por litro (km/l);

Nesta metodologia de ensaio em banco de chassis, não é possível medir o efeito no consumo de combustível de algumas tecnologias, tais como *start-stop*, grade frontal variável, indicador de troca de marchas, bem como considerar o efeito positivo da utilização de biocombustíveis. Portanto, na metodologia de determinação do consumo energético do veículo são inseridos créditos adicionais, ou seja, descontado no valor medido, conforme adoção de tecnologias, determinados como créditos *offcycle* (Portaria MDIC N74/2015):

- Sistema de desligamento em marcha lenta (*Start-Stop*): 0,0227 MJ/km;
- Sistema de controle da grade frontal (*Active Aero Improvement*): 0,0049 MJ/km;
- Indicador de troca da marcha (GSI): 0,0134 MJ/km;
- Sistema de monitoramento de pressão dos pneus (TPMS): 0,0134 MJ/km.

E para veículos *Flex Fuel* e dedicados a etanol, dotados de motorização que utilize combustível etanol hidratado, é concedido um crédito pré-definido adicional de 0,0041 MJ/km, denominado como super crédito.

O programa INOVAR AUTO foi encerrado em dezembro de 2017, onde o resultado alcançado foi de 1,74 MJ/km para a frota de 1,94 milhões de veículos vendidos no período dos 12 meses anteriores, resultando em um nível de melhoria de consumo de 15,9% em comparação com a referência definida em 2012.

Em 2018 entrou em vigor a próxima etapa do programa, no entanto de forma mais ampla. Denominado ROTA2030 – Mobilidade e Logística, estabelecido pela lei 13755 de 2018, tem o objetivo de ampliar a inserção global da indústria automotiva brasileira, por meio de exportação de veículos e autopeças. Também de forma complementar, contém políticas de estímulo à pesquisa e desenvolvimento (P&D) com foco em toda a cadeia industrial automotiva.

O ROTA 2030 tem basicamente três pilares, sendo eles (MDIC,2018):

- Estabelecimento de requisitos obrigatórios para comercialização de veículos novos no país, através da adesão do programa de rotulagem veicular para 100% dos modelos, atendimentos das metas de eficiência energética definidas e inserção de tecnologias voltadas à segurança veicular;
- Concessão de benefício tributário à empresa que realizar dispêndios em P&D no país, com percentuais exigidos entre 0,25% a 1,20% da receita bruta total da empresa;
- Isenção de imposto de importação de autopeças sem produção nacional equivalente, tendo como contrapartida a realização pelos importadores, de dispêndios correspondentes a dois por cento do valor aduaneiro, em projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação e em programas prioritários de apoio ao desenvolvimento industrial e tecnológico para o setor automotivo e sua cadeia.

Especificamente sobre as metas de eficiência energética, o programa ROTA2030, a partir de 2023, passará a exigir nova redução mínima de consumo em relação aos níveis de 2017, que varia de acordo com três categorias de veículos (MDIC, 2018):

- 11% para automóveis e comerciais leves;
- 4,9% para veículos 4x4 e SUVs grandes com área superior a 8 m²;
- 8,6% para comerciais leves não derivados de automóveis para transporte de carga ou até 12 passageiros.

Assim como já ocorre hoje, veículos que não atingem a meta mínima pagam multa de R\$ 50 a R\$ 360 por unidade vendida, dependendo de quanto ficar abaixo do objetivo.

Nesta nova etapa do programa de eficiência energética, os veículos pesados também terão metas de eficiência energética, que serão definidas a partir de 2023, quando também entra em vigor a nova legislação de emissões de poluentes Proconve P8.

Haverá também incentivos para superação das metas definidas, onde os fabricantes de veículos leves que superarem a meta mínima de aumento de eficiência energética recebem desconto extra de um ou dois pontos percentuais (pp) na alíquota no IPI a partir de 2023. No entanto, neste caso, o desconto do IPI será apenas para o modelo que superar a meta. Em resumo, ganha um pp de desconto no IPI quem melhorar a meta em 16,7% e dois pp se o avanço for de 21,5% sobre o consumo médio mínimo requerido em 2017 (MDIC,2018).

Para veículos 4x4 e SUVs grandes (área superior a oito m²) o benefício de um pp do IPI é para melhoria de 5,6% e dois pp para 9,8%. Para os comerciais leves não derivados de automóveis para transporte de carga ou até doze passageiros, o desconto é de um pp do IPI para redução de 14,2% e dois pp para 19,1%.

No programa ROTA2030 as tecnologias *offcycle* e os super créditos definidos no Inovar Auto continuam, porém com a adoção de novos créditos para tecnologias adicionais, como visto na Figura 21.

| Inovar | | Rota 2030 | |
|--------------------------------------|--------|---|--------|
| Off cycle | | Off cycle | |
| | MJ/km | | MJ/km |
| Start- Stop | 0,0227 | Start- Stop | 0,0027 |
| Grade Frontal Variavel | 0,0049 | Grade Frontal Variavel | 0,0049 |
| Indicador de troca de Marcha | 0,0134 | Indicador de troca de Marcha | 0,0134 |
| TPMS (monitoramento pressão pneus) | 0,0134 | TPMS (monitoramento pressão pneus) | 0,0134 |
| | | Compressor Variável A/C | 0,04 |
| | | novo Gerenciamento Térmico (max) | 0,0363 |
| | | Iluminação (max) | 0,0084 |
| | | Arrasto Aerodinamico (max) | 0,0268 |
| Paridade energética Etanol | 0,004 | X 10 Paridade energética Etanol | 0,04 |
| | | novo Autonomia Etanol até 10% >paridade | 6% |
| | | novo Limite multiplicador na eletrificação | 0,033 |

Figura 21 – Créditos *offcycle* e super créditos ROTA2030 (MDIC,2018)

A seguir serão abordadas tecnologias disponíveis para apoiar o alcance das metas definidas para os programas de emissões gasosas e eficiência energética.

3.4 Tecnologias automotivas

A busca por soluções ambientais para reduções das emissões locais e de GEE, bem como o consumo de recursos, requer, além de legislações automotivas que definam metas para aumento da eficiência energética dos veículos e reduzam as emissões gasosas, também desenvolvimento de produtos adequados ao custo que o mercado tem condições de absorver. Isso determina a escolha de conceitos adequados, determinando como este produto será efetivamente aplicado.

Desde a invenção do veículo automotor, houve desenvolvimento tecnológico constante, sempre direcionado pelas necessidades do mercado ou por legislações específicas como já apresentado nesta dissertação. O desenvolvimento tecnológico tem englobado diversas áreas do conhecimento, tais como sistemas mecânicos, eletrônica, química, desenvolvimento de materiais, entre outros.

Os principais requisitos no desenvolvimento de novos veículos estão relacionados à redução das emissões gasosas, ao aumento da eficiência energética e à segurança veicular e neste trabalho são abordados os dois primeiros temas, respectivamente.

Em geral, as tecnologias automotivas para aumento da eficiência energética dos veículos estão associadas à:

- Redução da força trativa através da redução de massa, resistência à rolagem e arrasto aerodinâmico;
- Aumento da eficiência do motor à combustão;
- Redução do consumo energético dos acessórios;
- Otimizações na transmissão.

Já as tecnologias de redução de emissões gasosas estão associadas à:

- Melhoria na qualidade de combustíveis;
- Aplicação de sistemas de pós-tratamento de gases de escapamento;
- Introdução de sistemas de controle eletrônicos e de diagnóstico a bordo.

3.4.1 Tecnologias para eficiência energética

3.4.1.1 Perdas de energia em um veículo

O consumo de combustível não está associado apenas ao motor, mas o foco de desenvolvimento de veículos eficientes deve ser em nível sistêmico, que inclui todos os sistemas e subsistemas de um veículo.

No projeto de um novo veículo, o foco em melhorar o consumo energético é um atributo e em geral, a eficiência do motor é o principal sistema desenvolvido. No entanto, quando se busca alcançar resultados ótimos é importante considerar os benefícios potenciais do desenvolvimento de sistemas complementares, tais como: transmissão, aerodinâmica, resistência de rolagem e perdas por acessórios, observando sua integração sistêmica. Para ilustrar este cenário, a Figura 22 apresenta o diagrama com as principais perdas.

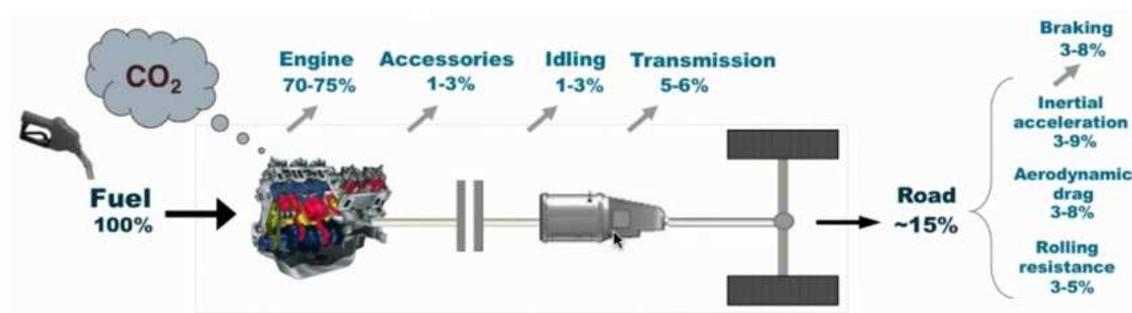


Figura 22 – Diagrama de perdas de energia de um veículo (Adaptado HEYWOOD, 1988)

Com base da Figura 22, no projeto de um novo veículo com foco na otimização da eficiência energética, os parâmetros mais importantes são a redução da massa, do coeficiente aerodinâmico e da resistência ao rolamento. As eficiências do motor e transmissões devem ser maximizadas, com este balanço permitirá alcançar a eficiência ótima para o projeto veicular.

Conforme (CHEAD, 2010) os principais parâmetros do balanço energético do veículo estão relacionados e descritos na equação a seguir.

$$FC = \frac{\int b_e \cdot P dt}{\int v dt} = \frac{\int b_e \left(\frac{F_t \cdot v}{\eta} \right) dt}{\int v dt} \quad (3.5)$$

Onde:

FC = consumo de combustível ou autonomia (l/km);

b_e = consumo específico do motor (g/kw.h)

P = Potência de saída ou fornecida pelo motor (kW);

t = tempo (s ou h);

v = velocidade instantânea do veículo (m/s ou km/h);

F_t = força de tração (kN);

η = eficiência ou rendimento do trem de força

É importante também analisar as forças atuantes em um veículo, com objetivo de buscar melhorias nestes fatores que influenciam diretamente no consumo energético.

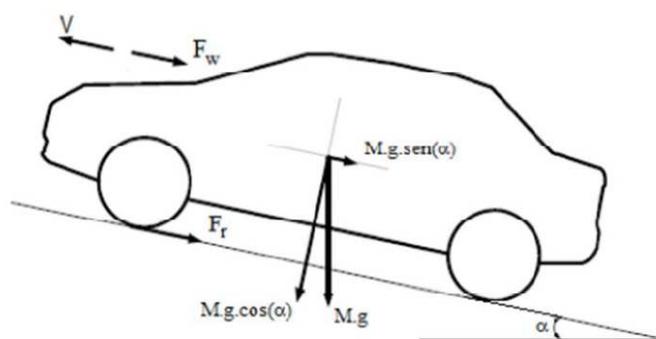


Figura 23 – Forças atuantes em um veículo (TAKATA, 2013)

Considerando o diagrama de forças atuantes indicado na Figura 23, é possível indicar que a força de propulsão de um veículo, deve superar a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica e o aplace, fornecendo a força necessária para movimentar a massa do veículo. A relação entre estes componentes pode ser calculada através da equação da força trativa definida por (CHEAH,2010).

$$\mathbf{F}_T = \mathbf{F}_{\text{ROLL}} + \mathbf{F}_{\text{ACC}} + \mathbf{F}_{\text{DRAG}} = (\mathbf{f} \cdot \mathbf{m}\mathbf{g}) + (\mathbf{m}\mathbf{a}) + \left(\frac{1}{2} \mathbf{C}_D \cdot \rho_{\text{AIR}} \cdot \mathbf{v}^2 \cdot \mathbf{A}\right) \quad (3.6)$$

Onde:

F_T = Força Trativa (N);

F_{roll} = Resistência ao Rolamento (N);

F_{acc} = Resistência à Aceleração (N);

F_{Drag} = Resistência ao Arrasto Aerodinâmico (N);

f = coeficiente de resistência ao rolamento (0,01 a 0,35) (TANAKA, 2013)

g = aceleração da gravidade (m/s²);

a = Aceleração do veículo (m/s²);

C_D ou C_x = Coeficiente de resistência aerodinâmica (0,15 a 0,5) (TANAKA, 2013);

ρ_{ar} = densidade do ar (kg/m³);

A = área frontal do veículo (m²);

v = velocidade instantânea do veículo (m/s);

3.4.1.2 – Perdas por arrasto

O arrasto aerodinâmico é proporcional ao quadrado da velocidade do veículo, dado pela expressão a seguir.

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}_D \cdot \mathbf{A} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \mathbf{V}^2 \quad (3.7)$$

Onde:

CD é o coeficiente adimensional de arrasto;
 A é a projeção da área frontal do veículo;
 ρ é a densidade do ar ambiente.

Portanto, conforme apresentado na Figura 24, a resistência ao movimento aumenta de forma quadrática em função da velocidade do veículo, liderado principalmente pelo arrasto aerodinâmico.

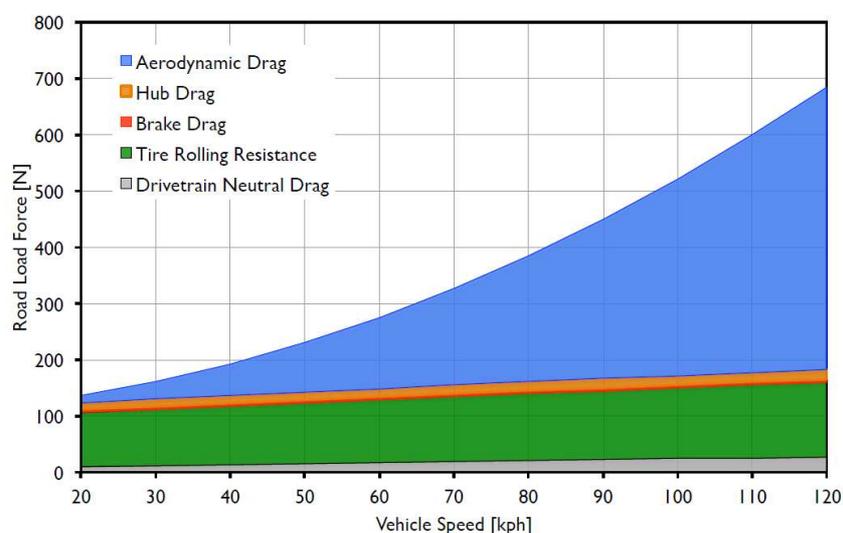


Figura 24 – Resistência ao movimento em Função da Velocidade (CARB, 2015)

As perdas por arrasto são influenciadas em especial por dois componentes principais, sendo o arrasto aerodinâmico (resistência aerodinâmica) e a resistência ao rolamento de pneus.

3.4.1.3 – Resistência aerodinâmica

A resistência aerodinâmica afeta diretamente o consumo de combustível e está relacionado ao movimento relativo entre o veículo e o fluido (ar). A melhoria da eficiência energética está associada à redução do arraste aerodinâmico, garantindo ao veículo a movimentar-se facilmente com o mínimo de resistência possível. Para entender as otimizações possíveis é necessário compreender inicialmente os diversos fatores que podem contribuir à resistência aerodinâmica (GILLESPIE, 1992):

- A resistência causada pela pressão do ar área frontal e traseira do veículo, que representa entre 55% e 60% da resistência aerodinâmica.
- Áreas de protuberâncias, tais como retrovisores, paralamas, bagageiros e acessórios representam de 12% a 18%.
- Passagem de ar pelo radiador frontal e capô está na ordem de 10% a 15%.
- Atrito entre a superfície externa e o ar representa de 8% a 10%.
- A diferença de pressão entre a parte superior e inferior do veículo representa de 8% a 10%.

3.4.1.4 – Tecnologias para melhorias aerodinâmicas

Dentre as tecnologias desenvolvidas nas últimas décadas, aquelas com resultados mais relevantes estão ligadas à redução da resistência pela área frontal, adição de defletores na parte inferior do veículo e redução do arrasto associado à passagem de ar pelo sistema de arrefecimento (HOWELL, 2012).

A introdução de defletores para cobrir as cavidades e protuberâncias da parte inferior da carroceria do veículo pode colaborar sensivelmente para redução do arraste aerodinâmico, pois a distribuição de pressão na superfície do carro corresponde à distribuição da velocidade do fluxo de ar em sua superfície. O fluxo de ar acelera na frente da parte inferior da carroceria devido à estrutura sem cavidades e por consequência a pressão diminui, sendo negativa neste estágio. Já na parte inferior do veículo existem muitas estruturas como por exemplo, sistema de escape, tanque de combustível e pneus sobressalentes, que são afetados pelo fluxo de ar de alta velocidade, gerando vórtices e contribuindo para o consumo de energia. Portanto estruturas como apresentada na Figura 25 são muito efetivas na redução do consumo (ZHIQUIN, 2017).

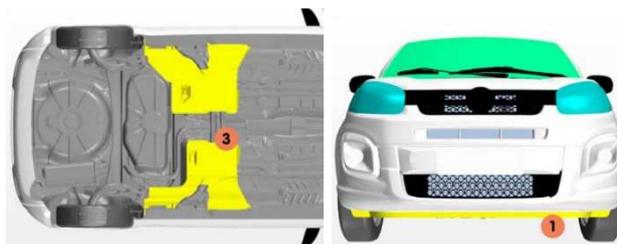


Figura 25 – Defletores para redução do arraste aerodinâmico (Quatro Rodas, 2017)

Melhorias em fluxo de ar para o sistema de arrefecimento também pode ser obtida através do sistema de grade frontal variável, onde um sistema eletrônico de acionamento controla a abertura e fechamento das aletas da grade, restringindo a entrada de ar para compartimento do motor quando não demandado pelo sistema de arrefecimento, conforme indicado na Figura 26.



Figura 26 – Grade frontal com acionamento eletrônico (Quatro Rodas, 2016)

3.4.1.5 – Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento dos pneus tem grande contribuição no consumo de combustível. Estudos indicam que uma redução de 10% na resistência pode gerar uma redução de consumo de combustível entre 0,5% e 1,5%. Os principais fatores que contribuem para a resistência ao rolamento são as perdas de energia em função da deflexão lateral e da

banda de rolagem do pneu, escorregamento dos pneus nas direções longitudinais e laterais e arraste aerodinâmico dentro e fora da banda de rolagem (BARBOSA, 2013).

A deformação do pneu tem a maior contribuição no aumento da resistência à rolagem seguida por resistência aerodinâmica e escorregamento, conforme indicado na Figura 27.

| What | Surface of tire and air | Tire tread | | | Sidewall and bottom part | | |
|--------------|---|---|---|-------------|--------------------------|------------|----------|
| How | Air circulation | Slippage on ground | Deformation hence dissipation of energy | | | | |
| |  |  | bending | compression | shearing | bending | shearing |
| Contribution | < 15% | | 60 to 70% | | | 20 to 30 % | |

Figura 27 – Principais contribuições para resistência ao Rolamento de um pneu (MICHELIN, 2020)

A deformação ocorre, pois, a borracha é um material viscoelástico, e faz com que parte da energia seja armazenada elasticamente enquanto outra parte é dissipada em forma de calor, definida como uma perda de energia por histerese.

Esta resistência pode ser definida como um parâmetro escalar de energia dissipada por distância percorrida como J/m, sendo simplificada para N, conforme apresentado na equação abaixo.

$$\mathbf{Froll} = \frac{\mathbf{força}}{\mathbf{velocidade}} \quad (3.8)$$

Também é utilizada a representação em RRC de forma adimensional, definido como coeficiente de resistência ao rolamento, sendo o Frr dividido pela carga.

$$\mathbf{RRC} = \frac{\mathbf{FRR}}{\mathbf{carga}} \quad (3.9)$$

Os coeficientes típicos para pneus estão entre 0,01 e 0,05 (AUTOMOTIVE COUNCIL, 2017).

Em função dos programas de eficiência energética, já abordados nesta dissertação, novas tecnologias foram introduzidas no mercado, tais como os Pneus Verdes, que conferem menor resistência ao rolamento, buscando equilíbrio com coeficiente de escorregamento, muito importante para a segurança de condução e redução de ruído de rodagem, relevante para o conforto.

Para viabilizar a redução do coeficiente de resistência ao rolamento (RRC) a indústria tem utilizado a sílica (Si) com elementos químicos de ligação como principal caminho tecnológico. Com a adição deste componente é possível gerar cadeias poliméricas mais curtas, criando compostos de borracha com baixa histerese em frequências menores. Isto confere melhor resistência ao rolamento e alta histerese em frequências maiores, melhorando o desempenho em frenagens. Assim, se atende o desempenho ideal em consumo energético e segurança, conforme demonstrado na Figura 28.

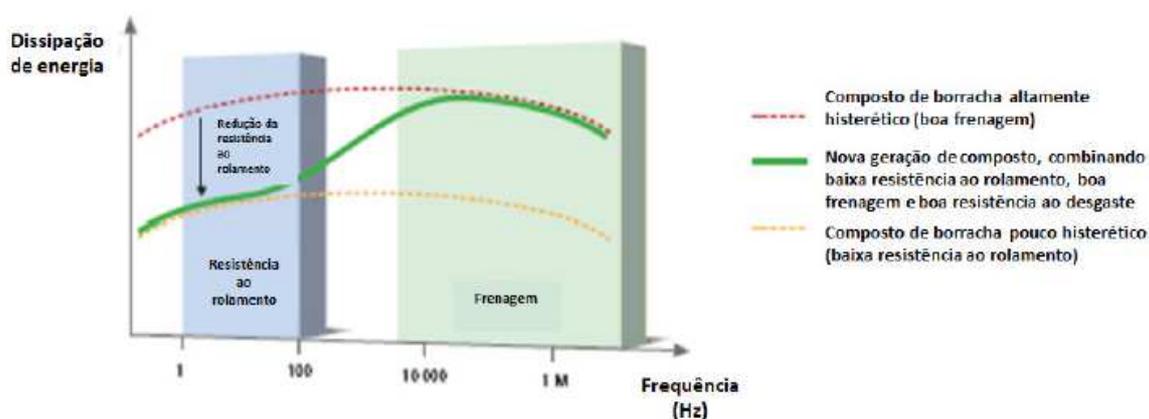


Figura 28 – Frequência(Hz) vs Dissipação de Energia (BARBOSA, 2013)

Com objetivo de classificar os pneus comercializados no mercado, o governo brasileiro criou o programa de avaliação da conformidade de pneus novos, conforme portaria n.º 544, de 25 de outubro de 2012, tomando como base a experiência europeia *EU Tyre Labelling Regulation 1222/2009*.

O programa brasileiro cria um selo de avaliação dos pneus comercializados conforme apresentado na Figura 29, onde o equilíbrio entre segurança, redução do consumo de combustível e conforto são avaliados através de testes normalizados para determinação de

resistência ao rolamento, frenagem no molhado e nível de ruído externo, sendo todos estes critérios informados através de um selo que está anexado ao pneu, auxiliando o consumidor no momento da compra.

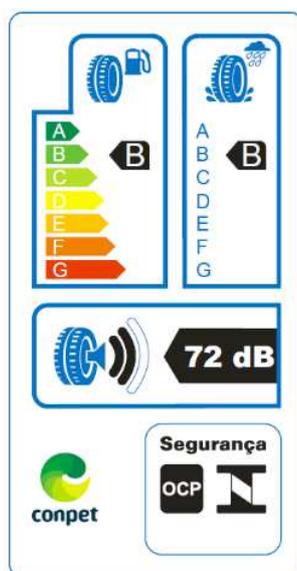


Figura 29 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (INMETRO, 2017)

A etiqueta aborda três parâmetros, sendo (SEC, 2008):

- Resistência ao rolamento: Dividida em sete classes, sendo G menos eficiente e A mais eficiente, e representa 7,5% de melhoria na eficiência energética entre as classes A e G.
- Frenagem no molhado: também é apresentada em 7 classes, sendo G (maior distância de frenagem) e A (menor distância de frenagem), A diferença entre as classes de forma geral pode representar 30% de redução de distância de frenagem entre as classes G e A.
- Ruído Externo: É apresentado o nível de ruído em dB(A), sendo o melhor desempenho a emissão de ruído <69,0 dB(A), com o aumento das barras na cor preta a cada 3 db(A) de acréscimo.

Novas tecnologias de pneus verdes foram introduzidas no mercado brasileiro em função do programa INOVAR AUTO, trazendo contribuição significativa para as montadoras alcançarem as metas estabelecidas.

3.4.1.6 – Redução de massa

A redução de massa é uma abordagem bem conhecida e muito eficaz na melhoria do consumo energético dos veículos, pois reduzindo a massa de um veículo, as forças inerciais que o motor deve vencer são menores, bem como a potência requerida para movimentar o veículo. Estudos indicam que a cada 100 kg reduzidos da massa de um veículo, reflete em benefícios de redução de consumo de combustível que podem ficar entre 4,5% e 8% (BANDIVADEKAR, 2008).

A forma mais efetiva de alcançar as reduções de massas, é considerar todos os sistemas do veículo, no momento do desenvolvimento do produto, com aplicação de novos materiais com resistência estrutural elevada e ao mesmo tempo menor densidade ou substituição de materiais metálicos por plásticos ou compósitos. Estes são os grandes elementos de contribuição para redução de massa em veículos. Técnicas para redução da quantidade de peças utilizadas nos sistemas veiculares ou a substituição de sistemas hidráulicos pesados por sistemas elétricos mais leves e eliminando interfaces também alcançam resultados positivos na redução de massa.

As principais restrições para aplicação de materiais mais leves são os requisitos de segurança veicular, especialmente o desempenho de alguns materiais leves no *Crash Test* e também os custos. Na sua grande maioria, os materiais mais leves são mais caros, como é o caso da fibra de carbono, onde há a redução de massa comparada ao aço em 50%, no entanto com custo elevado em 570% na mesma base de comparação, conforme indicado na Figura 30.

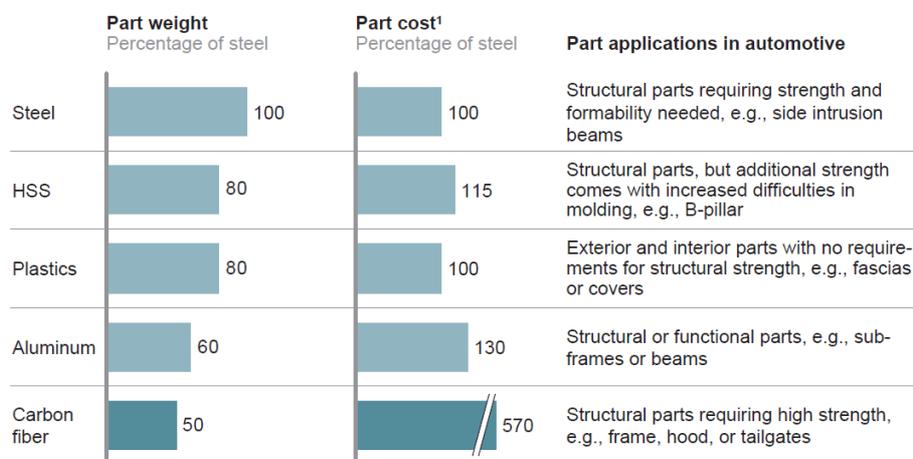


Figura 30 – Redução de massa versus custos de materiais (HEUSS, 2012)

No entanto, mesmo com os custos mais elevados em comparação ao aço, a produção em escalas maiores tem viabilizado a aplicação destes materiais em sua substituição ao aço. Tais substituições aumentaram significativamente nas últimas décadas, conforme é indicado na Figura 31.

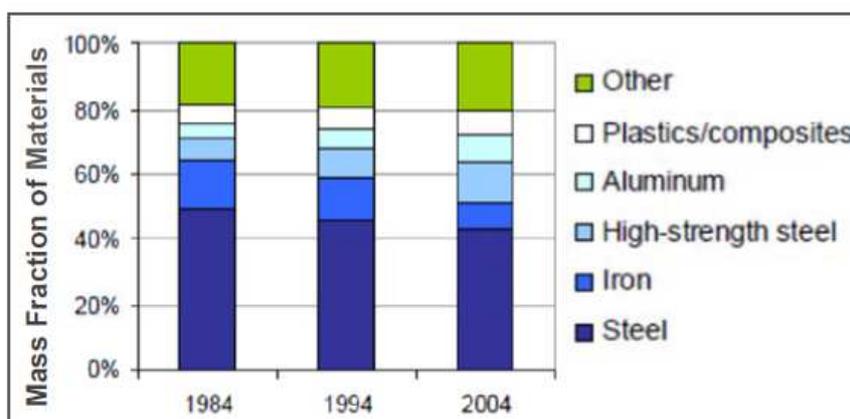


Figura 31 – Média da aplicação de materiais em veículos de passeio (AUTOMOTIVE COUNCIL, 2017)

Na estrutura veicular, o chassi (*frame construction*) e os componentes de acabamento ligados ao chassi (*body panel*), são dominados por materiais como aço e apenas alguns componentes em ligas de alumínio. No entanto, em função da necessidade de redução de massa e novos requisitos de segurança veicular, é esperado o aumento de conteúdo de novos

materiais com maior resistência estrutural, alongamento e amortecimento de vibrações, com adição de novas ligas ou estruturas poliméricas, como termoplásticos e compósitos (AUTOMOTIVE COUNCIL, 2017).

Quanto ao interior do veículo, reduções de massa em assentos automotivos através do uso inovador de materiais e geometrias já é uma realidade e podem reduzir até 11kg por veículo. Em relação aos isolamentos voltados à redução de ruído interno no veículo, também há evolução de material onde é possível substituir os materiais convencionais e pesados, por aplicação de materiais comprimidos e de baixa densidade, proveniente de resíduos têxteis, podendo reduzir o peso em até 25% dependendo da aplicação (GREEN CAR CONGRESS, 2020).

Ainda no interior do veículo, novos polímeros também são aplicados em painéis, com materiais feitos sob medida, como por exemplo, o polipropileno de fibra de vidro longa (LGF-PP), que em algumas aplicações pode reduzir o peso deste componente em 20%, conferindo melhor conformabilidade no processo de produção e ainda oferecer melhor resistência estrutural (GREEN CAR CONGRESS, 2020).

Na Tabela 2 é apresentado o resumo, comparando vantagens e desvantagens na aplicação de materiais leves.

Tabela 2 – Tabela comparativa de aplicação de materiais leves (BANDIVADEKAR, 2008)

| Material | Current use | Merits | Challenges |
|---|--|--|---|
| Aluminum | 130 kg/vehicle, 80% are cast parts e.g. engine block, wheels | - Can be recycled - Manufacturers familiar with metal forming | - High cost of Al - Stamped sheet is harder to form than steel - Softer and more vulnerable to scratches - Harder to spot weld, uses more labor-intensive adhesive bonding |
| High-strength steel | 180 kg/vehicle, in structural components e.g. pillars, rails, rail reinforcements | Makes use of existing vehicle manufacturing infrastructure; there is OEM support for near-term use | - More expensive at higher volume scale - Lower strength-to-weight ratio compared to other lightweight materials |
| Magnesium | 3.5 kg/vehicle, mostly thin-walled cast parts e.g. instrument panels and cross car beams, knee bolsters, seat frames, intake manifolds, valve covers | Low density, offering good strength-to-weight ratio | - Higher cost of magnesium components - Production of magnesium in sheet and extruded forms |
| Glass-fiber reinforced polymer composite | Some rear hatches, roofs, door inner structures, door surrounds and brackets for the instrument panel | - Ability to consolidate parts and functions, so less assembly is required - Corrosion resistance - Good damping and NVH control | - Long production cycle time, more expensive at higher volume scale - Cannot be recycled |
| Carbon-fiber reinforced polymer composite | Some drive shafts, bumpers, roof, beams and internal structures | Highest strength-to-weight ratio, offering significant weight-saving benefit | - As with glass fiber composites - High cost of fibers (\$17-22/kg) |

3.4.1.7 Perdas energéticas típicas em motores a combustão

O motor a combustão interna transforma a energia química do combustível em energia mecânica e esta, por sua vez, é convertida em trabalho útil.

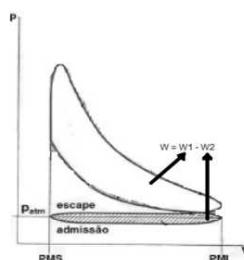


Figura 32 – Representação do trabalho em um ciclo real (TRIELLI, 2012)

Com a indicação de pressão nos cilindros durante o funcionamento do motor é possível calcular a transferência de trabalho do gás para o pistão, sendo o trabalho determinado pela integração da área interna do diagrama representado na Figura 32, conforme equação abaixo:

$$W = \int p dV \quad (3.10)$$

No trabalho indicado por ciclo bruto, é apenas considerado os ciclos de compressão e expansão. Já o trabalho por ciclo líquido é o entregue nos quatro ciclos, indicando as perdas por bombeamento presentes na admissão e exaustão.

Com este conceito definido, é possível estimar a potência efetiva de um motor, também chamada de potência útil, que é efetivamente o que se entrega no eixo do motor, podendo ser definida como a potência indicada subtraída das perdas associadas ao processo de conversão desta energia, tais como perdas por bombeamento dos fluidos, acionamento de acessórios do motor e atrito dos componentes móveis, conforme apresentado na Figura 33.

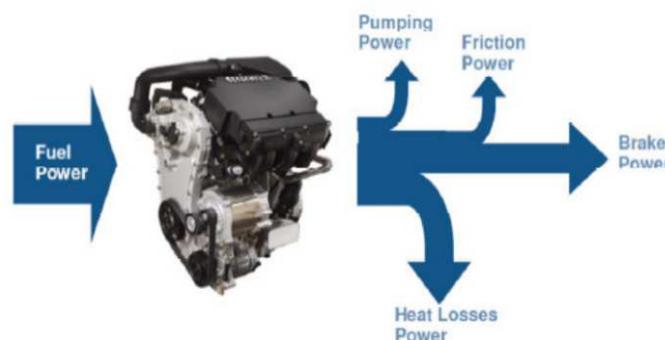


Figura 33 – Diagrama de Perdas de um Motor (SILVA, 2013)

As perdas por bombeamento estão associadas aos ciclos de admissão e escape do motor, já as perdas por atrito tem um espectro mais amplo, como detalhado a seguir (SILVA, 2013):

- Através do movimento relativo dos componentes móveis do motor, incluindo o atrito entre os anéis de pistão, saia de pistão e parede de cilindro, pinos, bronzinas e virabrequim, eixo comando, mecanismos de válvulas, engrenagens, polias e correias,

que conectam o virabrequim e os acessórios, através da resistência encontrada por um corpo para se movimentar sobre o outro.

- Através do acionamento de acessórios, tais como: ventiladores frontais, bombas de água, óleo e combustível, alternador, bomba de direção hidráulica e ar condicionado.

A Figura 34 detalha as perdas mecânicas de um motor a combustão, que incluem as perdas por atrito.

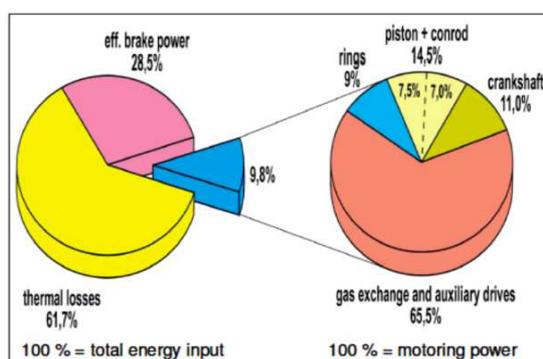


Figura 34 – Detalhamento das perdas mecânicas de um Motor (SILVA, 2013)

Buscando reduzir as perdas mecânicas dos motores, diversas tecnologias foram introduzidas nas últimas décadas e outras já desenvolvidas deverão ser introduzidas conforme a necessidade do mercado e/ou legislação.

3.4.1.8 Tecnologias para redução de atrito em componentes internos

O atrito é definido como a resistência física ao movimento relativo entre duas superfícies em contato (BOSCH, 2005). Alguns parâmetros físicos podem ser utilizados para descrever melhor o atrito, entre os quais:

- Força de atrito: é caracterizada como o módulo da força que resiste ao movimento.
- Coeficiente de atrito: também conhecido como fator de atrito, é determinado pelo força de atrito relativa à força normal
- Energia de atrito: determinado pela força de atrito e velocidade de deslizamento

Neste campo, os lubrificantes tem um papel importante, pois são utilizados para reduzir a força de atrito entre as superfícies. No entanto, em função da rugosidade de algumas superfícies, mesmo lubrificadas, não é possível prevenir completamente o contato por aspereza, onde ocorre o desgaste entre componentes.

Quanto às características do lubrificante, a mais importante é a viscosidade, pois fornece a resistência que o fluido tem ao escoamento e está diretamente ligada à sua densidade molecular. Portanto um ponto importante a se observar é a variação desta viscosidade em função da temperatura, o que é chamado de Índice de Viscosidade (VI). Para aplicações que trabalham em alta temperatura são necessários aditivos para melhorar o desempenho do óleo nestas regiões.

Os aditivos são utilizados para prolongar a vida do óleo lubrificante, através de detergentes, dispersantes, antioxidantes, redutores de desgastes e atrito, inibidores de corrosão, entre outros. Estes aditivos, seguem normas internacionais e são classificados conforme código API, que indicam o nível de aditivação do óleo, conforme Figura 35.

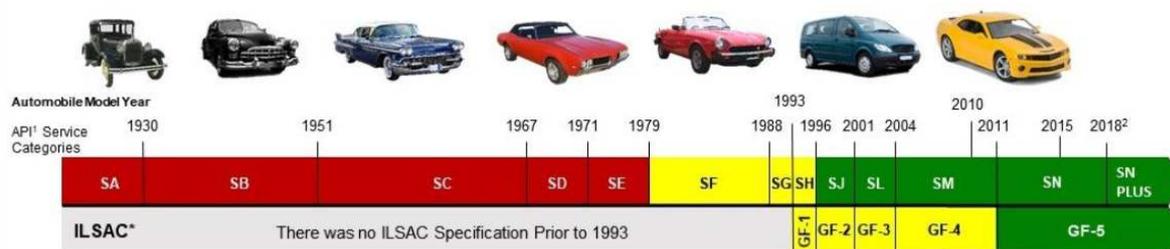


Figura 35. Evolução e Classes API dos Óleos Lubrificantes (PQIA, 2018)

No campo dos componentes de motores, o atrito está associado ao movimento destes componentes durante o funcionamento do motor à combustão interna, gerando as perdas por atrito. Em especial os pistões, anéis, virabrequim e eixo comando, são os conjuntos com maiores perdas, conforme indicado na Figura 34.

Nos pistões, os parâmetros que mais afetam o atrito são o perfil da saia, folga de montagem e massa do componente. Portanto os motores modernos aplicam a otimização destes parâmetros na busca da redução do consumo de combustível.

Os anéis de segmento também têm contribuição significativa no atrito e os parâmetros contribuintes são a força tangencial e a altura do componente. A otimização destes parâmetros, associados à redução das asperezas e deposição de camadas de cobertura de baixo atrito, como o DLC *Diamond Like Carbon*, contribuem para redução do atrito.

O formato e nomenclatura típica para estes componentes são apresentadas na Figura 36.

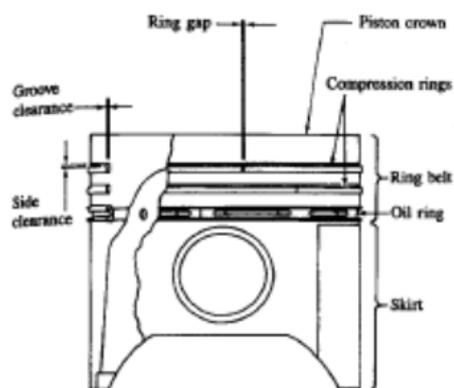


Figura 36: Construção e nomenclatura típica para pistões e anéis (HEYWOOD, 1988)

Outras perdas por atrito também estão presentes nos motores à combustão, como por exemplo, as perdas em mancais, associadas as bronzinas e buchas, instaladas no virabrequim, eixos de comando e bielas.

O carregamento inercial do pistão e da biela, associado à pressão proveniente da expansão dos gases de combustão, pode influenciar o valor e a direção do carregamento nas bronzinas e buchas sobre o virabrequim. Portanto, para um bom funcionamento do componente, um filme de óleo mínimo deve ser mantido durante o regime de trabalho do motor, que nesse caso é em grande parte hidrodinâmico, conforme demonstrado na Figura 37. Valores mínimos de espessura de filme de óleo adotados em projetos estão por volta de $2\mu\text{m}$ (HEYWOOD, 1988).

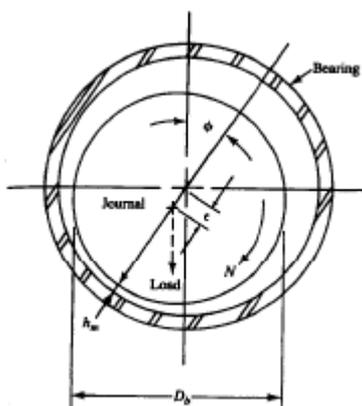


Figura 37: Bronzina em regime hidrodinâmico (HEYWOOD, 1988)

Em geral, estes componentes operam em diferentes regimes de lubrificação, sendo: Limite, Misto e Hidrodinâmico. No regime denominado Limite, o coeficiente de atrito é maior, pois, superfícies sólidas entram em contato direto, principalmente por asperezas da superfície. Já no regime misto, a carga é suportada por algum contato de aspereza das superfícies e por filme fino de lubrificante. Por ultimo, há o regime hidrodinâmico, onde o contato de aspereza é desprezível e a carga suportada principalmente por pressão hidrodinâmica, através de filme de lubrificante espesso, conforme apresentado na Figura 38.

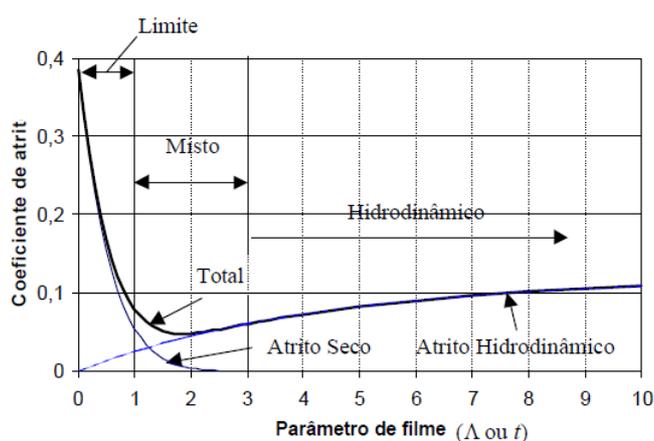


Figura 38: Diagrama de Stribeck para superfície radial (SILVA, 2013)

Portanto no desenvolvimento de um novo conjunto de componentes, as várias forças envolvidas e os diferentes regimes de lubrificação deve ser um ponto observado para se definir os melhores parâmetros de área, rugosidade e espessura de filme de óleo, para garantir um funcionamento adequado do sistema tribológico.

No trem de válvulas, conforme configuração demonstrada na figura 39, o sistema trabalha com alto carregamento, pois em condições de baixa rotação este carregamento é conferido pelas molas de válvulas e em alta rotação é pela força inercial de todo o sistema.

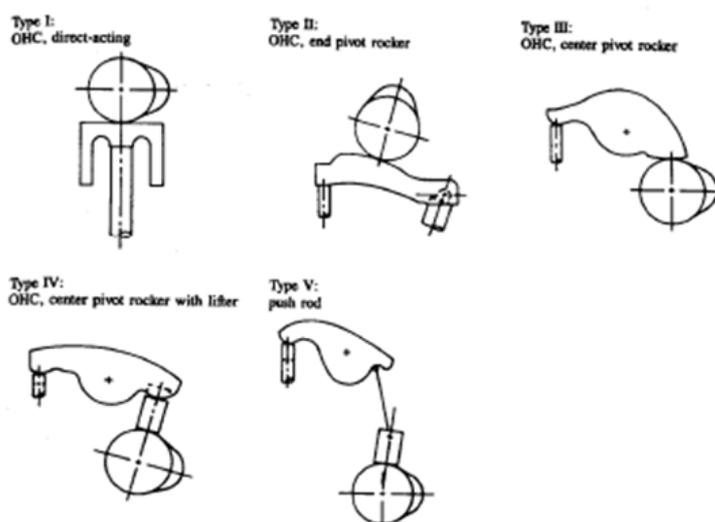


Figura 39: Diferentes sistemas de trem de válvulas (HEYWOOD, 1988)

O torque de acionamento do sistema de trem de válvulas é um bom indicativo do comportamento tribológico do sistema, a seguir é apresentado este valor para os diferentes designs apresentados na Figura 40.

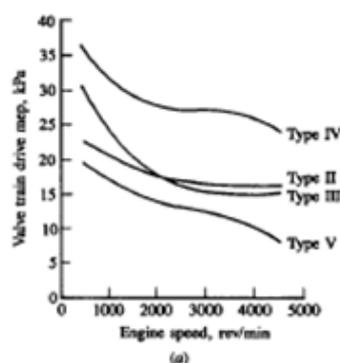


Figura 40: Pressão de atrito dos diferentes trem de válvulas aplicados no mercado (HEYWOOD, 1988)

Redução de massa das válvulas, com conseqüente redução do K das molas, aplicação de camadas de cobertura nas pontas das válvulas ou no came dos eixos comando, são parâmetros tecnológicos aplicados em motores modernos.

3.4.1.9 Tecnologias para redução de perdas em componentes auxiliares

Os componentes auxiliares, também conhecidos como acessórios, compreendem todos os equipamentos conectados ao motor que têm a função básica de acionar sistemas dos veículos através do funcionamento do motor à combustão, tais como, bombas de água e óleo, alternador, direção hidráulica, ventilador frontal, entre outros. Estes sistemas auxiliam nas funções básicas de funcionamento, conforto e segurança, no entanto, aumentam as perdas mecânicas, conforme indicado na Figura 41 em um exemplo de um veículo de passeio.

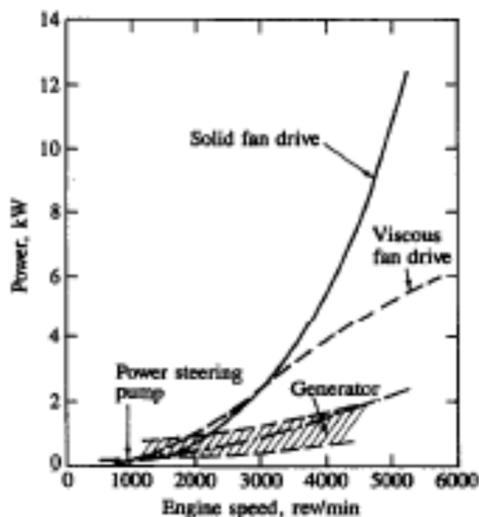


Figura 41: Consumo dos sistemas auxiliares motor SI (HEYWOOD, 1988)

Os valores de consumo energético são expressivos, portanto, novas tecnologias associadas à redução do consumo dos componentes auxiliares estão sendo empregadas em veículos modernos, tais como, bombas de fluidos elétricas, alternadores inteligentes que reduzem o carregamento do motor à combustão e compressores de ar-condicionado de volume variável. Todas estas tecnologias visam otimização do consumo energético de um sistema veicular, podendo contribuir em reduções significativas.

3.4.1.10 Tecnologias para redução de perdas por bombeamento

As perdas por bombeamento são parte das perdas mecânicas e contribuem em média 5% sobre as perdas totais em motores naturalmente aspirados.

Os tempos de admissão e escape são os maiores responsáveis por estas perdas em função das restrições no fluxo de ar, como segue:

- Admissão: Filtro de ar, válvula de aceleração, conhecido como corpo de borboleta e coletor de admissão.
- Exaustão: Coletor de exaustão, tubo de escapamento, catalisador e silencioso.

As otimizações nos sistemas indicados acima, passam por atenuação das restrições do sistema de fluxo de ar do motor, garantindo a entrada de maiores volumes de ar durante o processo de admissão bem como a redução das restrições de fluxo de gases de escapamento.

3.4.1.11 Outras tecnologias voltadas aos motores a combustão interna

As tecnologias voltadas aos motores à combustão interna estão em constante desenvolvimento. Além das indicadas anteriormente, a necessidade de aumento da potência específica dos motores [kW/l] denominada como *downsizing*, tem apoiado o lançamento de veículos mais eficientes com motores menores. Este conceito significa, de forma simultânea, a redução da cilindrada do motor, em geral com a redução dos números de cilindros e, ao mesmo tempo, o aumento da pressão média indicada através de sobrealimentação, mantendo o torque e potência em um menor deslocamento volumétrico, conforme indicado na Figura 42.

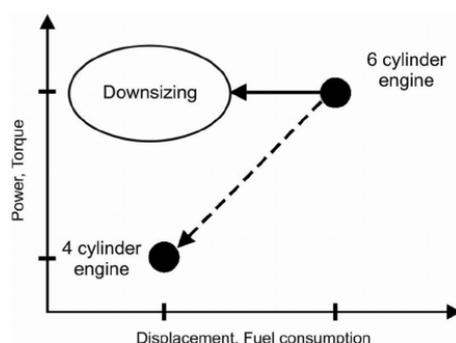


Figura 42. Princípios do conceito de downsizing (SCHUMANN, 2013)

Com foco em aumento de eficiência e redução das emissões gasosas, o sistema de injeção de combustível tem passado por grandes evoluções. Nos motores do ciclo Otto, o sistema tem migrado em diversas aplicações da configuração PFI (*port fuel injection*) ou injeção indireta, para a configuração de injeção direta, conforme Figura 43.

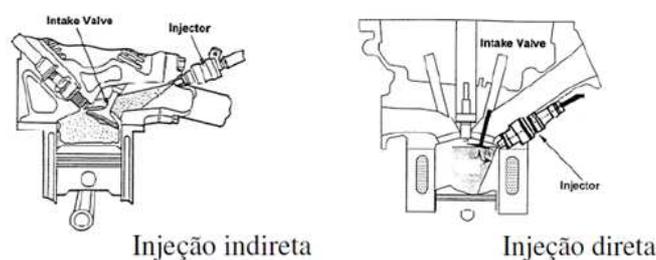


Figura 43 . Configuração dos sistemas de Injeção Direta e Indireta (BERTONCINI, 2014)

Diversas vantagens técnicas dos motores com injeção direta, em relação à indireta, podem ser elencadas, tais como, economia de combustível de até 25% (BERTONCINI, 2014), dependendo do ciclo de teste, associado à outras tecnologias como o turbo alimentador. Também é possível melhorar a resposta em regimes transientes em função do menor enriquecimento da mistura em acelerações e redução das emissões de hidrocarbonetos não queimados devido a partida à frio.

Há também desafios na aplicação da injeção direta, como maior complexidade de controle, alta formação de depósitos no injetor ou na câmara de combustão, formação de MP em operações de alta carga e maior desgaste do sistema de injeção devido à alta pressão de injeção e aumento do desgaste dos cilindros (BERTONCINI, 2014).

A eficiência volumétrica também é foco de desenvolvimento nos motores modernos. A adoção de turbo compressores e sistemas de eixo comando de válvulas variáveis têm colaborado com o aumento da eficiência.

A eficiência térmica colabora consideravelmente para a eficiência global dos motores. Uma das formas mais tradicionais de alcançar melhores níveis desta eficiência é através do aumento da taxa de compressão. No entanto, o aumento da taxa de compressão é vantajoso até certo ponto, pois a partir de um determinado nível as pressões de trabalho aumentam consideravelmente, afetando as perdas mecânicas e, por consequência, anulando os ganhos térmicos; além de exigir o uso de combustíveis com maior nível de octanagem para evitar os efeitos da detonação, que poderão trazer danos significativos ao motor. Na Figura 44 é demonstrado o aumento da eficiência térmica teórica em função da taxa de compressão.

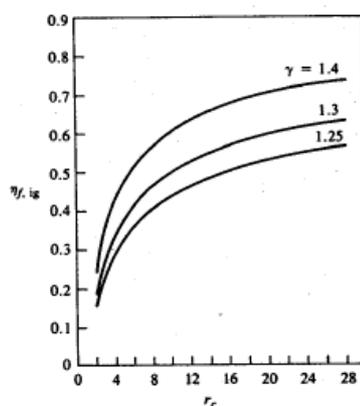


Figura 44 – Aumento da eficiência térmica em função da taxa de compressão (HEYWOOD, 1988)

Em resumo, as principais tecnologias aplicadas atualmente no horizonte até 2030 aos motores à combustão são indicadas na Figura 45.

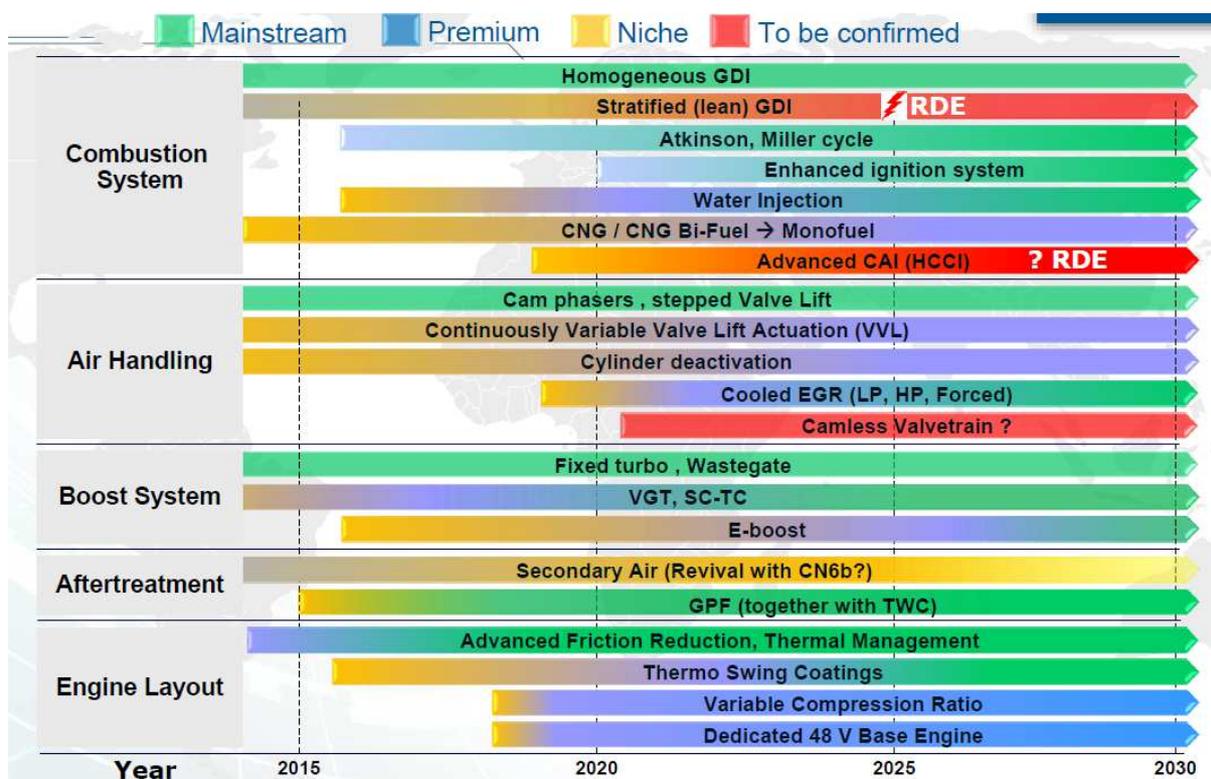


Figura 45 – Tendências Tecnologias para motores à combustão Interna (AVL, 2018)

3.4.1.12 Tecnologias para aumento da eficiência energética – transmissões

As transmissões têm um papel importante no consumo de combustível de um veículo, pois este sistema deve explorar as zonas de maior eficiência do mapa do motor à combustão. Os projetos de transmissão consideram duas condições de contorno importantes, sendo a primeira uma relação de alta redução para o máximo torque de saída no caso de uma demanda de tração; e a segunda, disponibilizar relações de alta desmultiplicação para as baixas rotações em altas velocidades, comumente chamadas de overdrives.

As transmissões buscando as condições de overdrives têm oferecido cada vez mais um número maior de marchas, partindo da comum 5 velocidades, ou 5 marchas, para até 9 velocidades em aplicações mais modernas. Também houve significativo avanço no desenvolvimento das engrenagens e design das transmissões modernas, permitindo ultrapassar a faixa de 89% de eficiência para 94% (HEYWOOD, 2007).

Câmbios automáticos com tecnologia CVT (*continuously variable transmission*) transmitem o torque do motor por um par de polias motrizes acionadas por uma correia de aço, obtendo infinitas relações de transmissão através do ajuste do diâmetro das duas polias e permitindo a utilização das zonas de maior eficiência do motor de forma mais precisa. Em função da necessidade contínua de redução do consumo de combustível, essa tecnologia tem se tornado cada vez mais comum (BERTONCINI, 2014).

3.4.2 Tecnologias – emissões gasosas

3.4.2.1 Melhoria na qualidade do combustível comercial

O combustível tem um papel importante na formação das emissões veiculares, pois o gás de escapamento é um produto da queima deste combustível. As necessidades de redução das emissões veiculares exigidas pelo PROCONVE, como já explorado nesta dissertação, apoiou a introdução no mercado brasileiro de combustíveis de melhores características, exercendo um importante papel nos resultados alcançados até o momento.

A introdução do etanol combustível, pelo programa pró-álcool foi fundamental para redução das emissões de carbono, chumbo e óxidos de enxofre. No entanto, vale ressaltar que o propósito inicial da introdução deste biocombustível não foi reduzir as emissões, mas sim a

substituição da gasolina em função da crise do mercado de petróleo, ocorrida na década de 70 (CARVALHO, 2011).

Houve grande instabilidade de oferta de etanol, influenciada pelo mercado de açúcar e o programa quase acabou na década de 1990. No entanto, visando manter o biocombustível como parte da matriz energética brasileira, em função dos já apresentados benefícios ambientais, o governo adotou a exigência da mistura de etanol anidro na gasolina, atualmente em 27% em volume na gasolina comercial, o que proporciona a redução de 18% das emissões de CO₂eq nos veículos otto utilizando gasolina. A partir de 2003, com a oferta de veículos *flex-fuel*, a instabilidade de oferta foi resolvida, e esta tecnologia de veículos flex dominou o mercado, conforme apresenta a Figura 46 (CARVALHO, 2011).

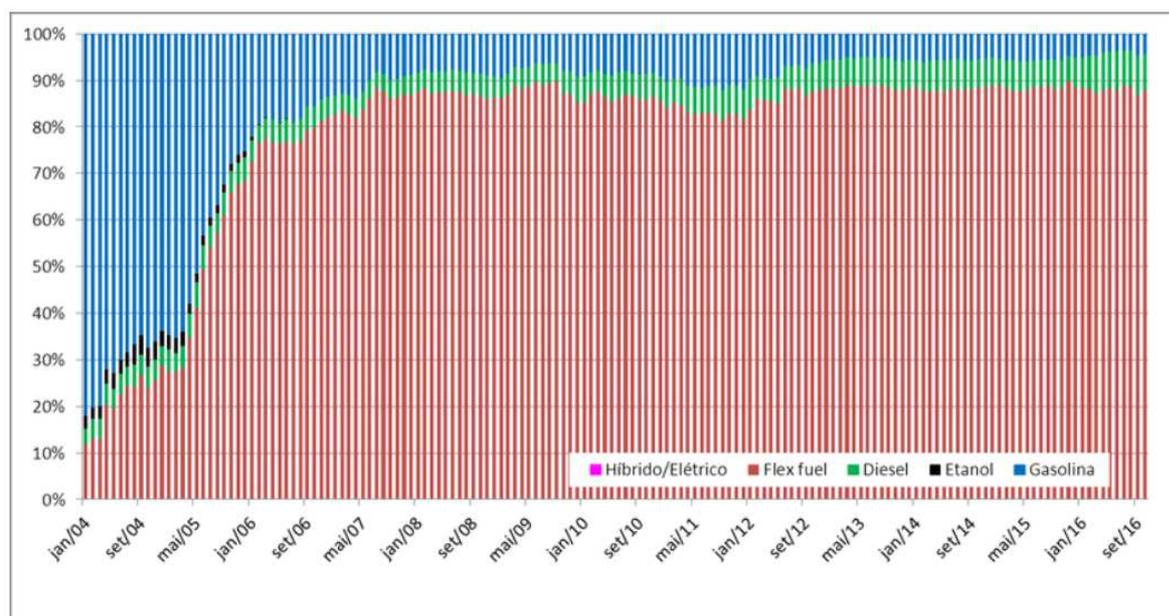


Figura 46 – Evolução da participação em vendas dos veículos flex fuel. (ANFAVEA, 2017)

Na gasolina comercial também houve avanço na especificação. Primeiro foi a retirada do chumbo, utilizado como promotor da resistência à detonação (octanagem), sendo substituído pelo etanol, que tem atributo similar. Em relação à redução do nível de enxofre, a gasolina brasileira em 2018 continha 800 mg/kg e passou em 2019 para 50 mg/kg, sendo importante para os sistemas de pós tratamento, pois o enxofre desativa quimicamente a

capacidade de conversão dos catalisadores. Outra alteração relevante foi a redução dos hidrocarbonetos aromáticos e oleofínicos que contribuem também para a redução das emissões de poluentes (PETROBRAS, 2014).

Em relação ao Diesel combustível, houve também grande evolução. Os problemas relacionados às emissões de SO_x, que também influenciam consideravelmente na emissão de MP, houve ações de redução da quantidade de enxofre no combustível, saindo do patamar de mais de 2000ppm para os atuais 10ppm de enxofre, permitindo a introdução de novas tecnologias de motores e sistemas de pós tratamento, melhorando de forma considerável a qualidade do ar.

O Biodiesel desde 2005, já está introduzido no mercado, iniciando com a mistura de 2% no Diesel com previsão de alcançar 15% de mistura até 2023, conforme plano apresentado na Figura 47.



Figura 47 – Evolução da participação do Biodiesel no Diesel (EPE, 2017)

O aumento do teor de biodiesel é um importante avanço na redução das emissões locais, como de MP, bem como possibilita a redução das emissões globais de CO₂eq, em função de ser um combustível renovável.

3.4.2.2 Sistemas de pós-tratamento

Os sistemas de pós-tratamento de gases são aplicados em veículos como recurso para a redução e controle das emissões de poluentes tóxicos, em complementação as artificios utilizados para evitar formação de poluentes no processo de combustão. Esta aplicação ocorre

pela necessidade de atender aos limites de emissões gasosas estabelecidos pelos programas de controle, no caso do Brasil, o PROCONVE (PAIXÃO, 2013).

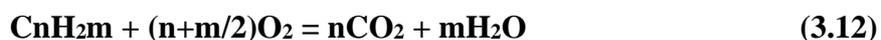
Há diferentes tecnologias disponíveis de sistemas de pós tratamento e classificados conforme a aplicação, sendo alguns direcionados para motores do ciclo Otto e outros para o ciclo Diesel.

No ciclo Diesel, os principais gases que necessitam de controle, conforme já indicado neste trabalho, são o Nox e o MP. Os sistemas mais típicos são do DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) ou catalisador de oxidação Diesel, o SCR (*Selective Catalyst Reduction*) ou catalisador de redução seletiva, e o DPF (*Diesel Particulate Filter*) ou filtro de particulado, detalhados a seguir.

O DOC é um dispositivo para redução das emissões gasosas em veículos Diesel através de processo de oxidação dos gases da combustão, utilizando oxigênio que está presente em grande quantidade na exaustão dos motores Diesel. O processo de oxidação age sobre o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxido nítrico (NO).

Os mecanismos de reação do DOC são explicados pela presença de metais nobres, que são catalisadores ativos, na superfície da cerâmica por onde passam os gases de escapamento. Esse sistema tem a capacidade de gerar reações químicas em altas temperaturas e converter os gases tóxicos em gases não nocivos à saúde (DIESELNET, 2020).

A reação do CO, ocorre da seguinte forma:



Já a reação para o NO resulta em NO₂, que é um produto importante para suportar o funcionamento do sistema SCR como será descrito a seguir.





Figura 48 – Sistema DOC em corte (BASF)

Os sistemas de pós tratamento SCR são focados na redução das emissões de NO_x, através do processo de reação química com amônia. Este sistema é largamente utilizado na indústria automotiva moderna, presente na maioria dos veículos Diesel que atendem os níveis Proconve P7 (equivalente EUV) e Proconve P8 (equivalente EUVI).

O funcionamento do sistema consiste na injeção de agente redutor líquido (ARLA32) composto por 32,5% de uréia em uma solução aquosa. Uma porção desta solução de uréia é injetada no fluxo de gases de escapamento em temperatura superior a 170°C que, em contato com vapor da água, se transforma em amônia (NH₃) através do processo conhecido como hidrólise. Esta amônia, somada ao NO₂ do sistema de DOC, ajudará no sequestro do NO e na conversão destes gases em N₂ e H₂O, conforme indicado na Figura 49.

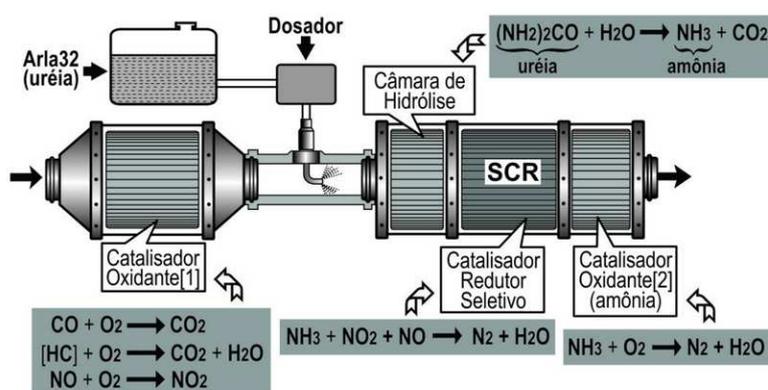


Figura 49 – Sistema SCR (MTE THOMSON, 2020)

A recirculação de gases de escapamento, denominada como EGR, também é uma tecnologia utilizada para redução da formação de NO_x durante a combustão. Esta técnica consiste em direcionar uma parcela dos gases de exaustão para a admissão do motor, alterando as propriedades físicas e químicas da mistura gasosa que nele entra. Vale ressaltar que o principal fator de geração de NO_x é a alta temperatura na câmara de combustão, portanto, a entrada de gases de exaustão e por consequência inertes, provocam redução da concentração de oxigênio por efeito de diluição e da temperatura da combustão e, por consequência do NO_x. No entanto, há aumento das emissões de MP, que pode ser compensado pela aplicação de DPF (Filtro de Partículas Diesel) no escapamento (WERONKA, 2015).

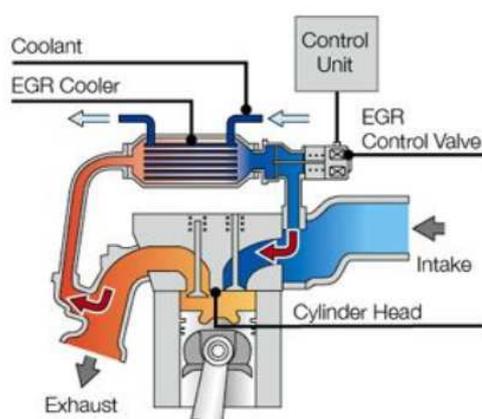


Figura 50 – Sistema EGR em motores Diesel (WERONKA, 2015)

Para redução das emissões de MP, o sistema DPF é em geral associado aos sistemas DOC e SCR. A necessidade de redução de MP tem se tornado um dos principais focos de desenvolvimento de tecnologias para motores com sistemas de injeção direta, em especial os movidos a Diesel. O filtro de material particulado usa tecnologia de *wall-flow*, ou em livre tradução, fluxo pelas paredes, onde uma cerâmica porosa permite a passagem de fluxo de gases, retendo as partículas sólidas, conforme Figura 51 (MTE THOMSON, 2020).

O filtro acumula uma determinada quantidade de partículas filtradas na superfícies das paredes da cerâmica, gerando um aumento da restrição de escapamento, o que pode comprometer o desempenho do motor. Portanto a regeneração periódica do filtro é necessária.

Este processo de regeneração consiste em aumentar a temperatura do sistema DPF com objetivo de oxidar o carbono presente através das reações indicadas a seguir.

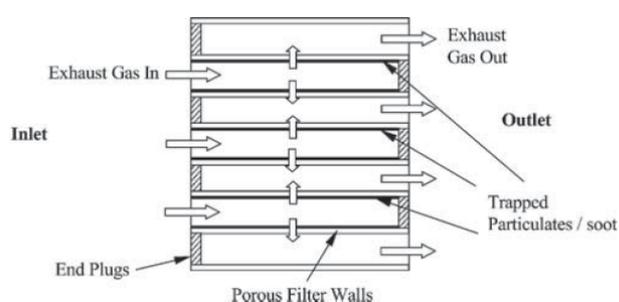


Figura 51 – Visão em corte do Sistema DPF (AECC,2017)

Para o ciclo Otto, as principais tecnologias de pós tratamento aplicadas são os catalisadores de oxidação denominados como catalisadores três vias. Para os motores mais modernos de injeção direta também há a aplicação de filtros de partículas, conhecidos como GPF (Gasoline Particle Filter).

O conversor catalítico de três vias, apresentado na Figura 52, é definido como conversor químico composto de substratos cerâmicos ou metálicos, que são impregnados, assim como o DOC, com metais nobres, neste caso do grupo da Platina (Platina, Paládio e Ródio). Instalados no sistema de exaustão do veículo, estes sistemas atuam na redução das emissões de THC, CHO e CO, através do processo de oxidação, bem como a reação de redução do NOx.



Figura 52 – Conversor Catalítico de 3 vias (AECC,2017)

As principais reações do catalisador de três vias estão descritas abaixo, sendo as equações (3.17) e (3.18) associadas ao processo de oxidação na presença do oxigênio e a equação (3.19) ao processo de redução, focada especialmente na redução da emissão de NOx.



Com a necessidade de redução do consumo energético dos veículos de passeio, a adoção de sistemas de injeção direta tem se tornado cada vez mais comum. Com a introdução destes sistemas, a morfologia do material particulado é similar ao ciclo Diesel, gerando a necessidade de adoção de sistemas para redução do material particulado. Neste sentido o GPF tem sido aplicado com tecnologia similar às aplicadas no DPF, a tecnologia *wall-flow*. É importante ressaltar que a quantidade de massa de material particulado emitido pelo ciclo Otto é menor que no ciclo Diesel, portanto, os períodos de regeneração nos veículos Otto são menos frequentes que no Diesel (LYONS, 2015).

Os requisitos atuais na legislação brasileira para durabilidade do sistema e atendimento de emissões é de 80.000 km para veículos de passeio e, para a próxima fase do PROCONVE L7, serão exigidos 160.000 km, o que irá requerer sistemas mais robustos.

Todos os sistemas de eletrônica e controle de emissões embarcados necessitam de garantia de funcionamento durante a utilização do veículo para efetivar sua função. Portanto, o controle deste funcionamento é realizado pelo sistema denominado OBD (*On Board Diagnosys*), em tradução livre, Diagnóstico Embarcado. O sistema utiliza informações disponíveis dos sensores no veículo para quantificar o desempenho do sistema e atuar caso algum destes sistemas apresentem defeitos, ou em caso de alguma fraude nos sistemas eletrônicos, podendo esta atuação ser uma simples indicação no painel para manutenção até o corte de desempenho do veículo até que o defeito seja solucionado (LYONS, 2015).

3.4.3 Tecnologias – energia e GEE

Para a redução efetiva das emissões de GEE, além da melhoria da eficiência energética do veículo, já explorada neste trabalho no capítulo anterior, uma forma adicional é reduzir as emissões no ciclo completo do combustível, ou seja, desde a produção até a sua utilização, chamado de poço à roda ou em inglês *well to wheel*, conforme apresentado na Figura 53.

3.4.3.1 – Conceito poço à roda

Analisar a cadeia completa permite atuação em todo o processo, favorecendo a implementação de combustíveis alternativos que reduzam a pegada de carbono, melhorando a eficiência dos processos produtivos dos combustíveis, bem como o transporte, e por fim, melhorando a eficiência da queima. Todas estas otimizações somadas no conceito poço à roda resultarão em uma emissão menor de GEE para uma mesma utilização em km rodados de um veículo.

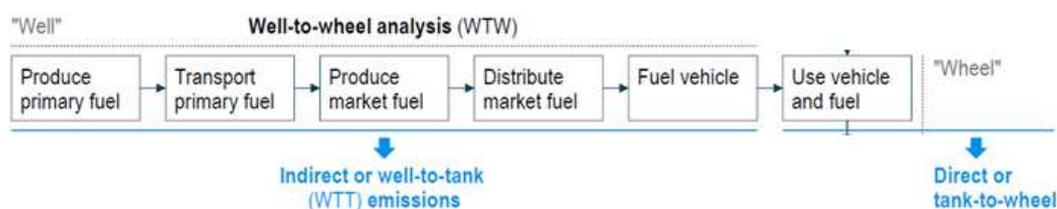


Figura 53. Conceito Poço à Roda (Roland Berger, 2016)

Os desenvolvimentos realizados nas últimas décadas com foco no aumento da eficiência energética dos motores e veículos, passam principalmente pela melhoria da eficiência global dos motores à combustão interna, bem como pela aplicação de conceitos híbridos e puramente elétricos. Nestes últimos os esforços estão totalmente voltados na melhoria do armazenamento em baterias e uso desta energia. Outras alternativas, como o hidrogênio, também tem ganhado espaço nos mapas tecnológicos futuros, no entanto, o sucesso destes desenvolvimentos passam pela aceitação do mercado em adotar tais tecnologias (ROLAND BERGER, 2016).

Para escolha de uma determinada tecnologia com baixa intensidade de carbono no conceito do poço à roda é necessária a comparação de diversas relações de tecnologias e combustíveis. Nesta análise os combustíveis alternativos “bio” tem uma grande vantagem, pois absorvem boa parte das emissões de CO₂ da queima do combustível durante o crescimento da matéria prima do combustível, pelo processo de fotossíntese, conforme demonstrado na Figura 54.

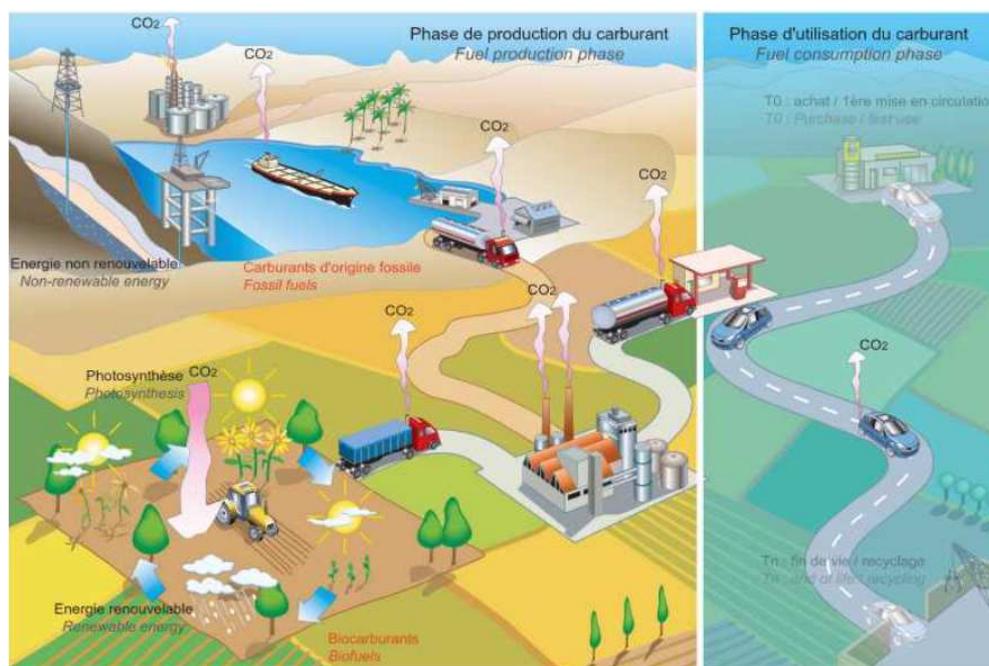


Figura 54. Ciclo do Carbono (RENAULT)

Durante o processo de produção de um combustível, existem diversas etapas que emitem CO₂, sendo a colheita e transporte da matéria prima, a produção e distribuição do combustível e por fim, a queima para movimentar os veículos. No caso do biocombustível, boa parte deste CO₂ emitido é capturado no processo de crescimento da matéria prima, processo que não é possível nos combustíveis fósseis. Por isso, os biocombustíveis tem grande vantagem sob o aspecto ambiental, em especial na mitigação dos efeitos dos GEE no aquecimento global. Na Figura 55 é possível comparar tecnologias e combustíveis sob o aspecto de emissão de GEE.

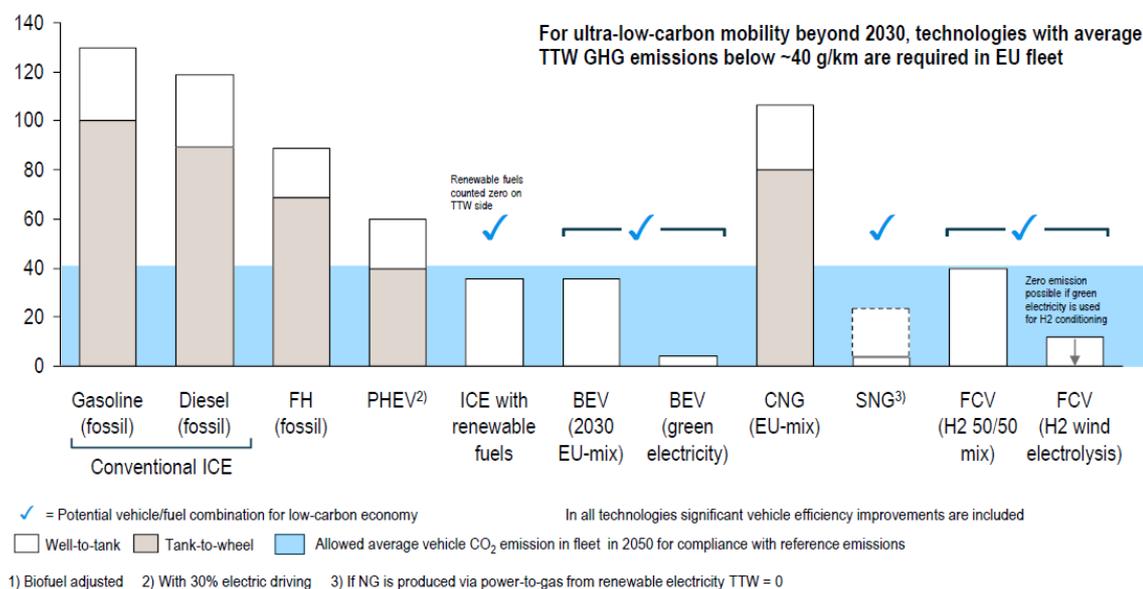


Figura 55. Emissão de CO₂eq de diferentes tecnologias e combustíveis (Roland Berger, 2016)

A Figura 55 compara diferentes tecnologias e combustíveis aplicados em um veículo de passeio convencional. Nesta base, o veículo abastecido com gasolina fóssil tem o pior resultado. É possível observar que o veículo abastecido com combustível renovável tem emissões tão baixas quanto o veículo elétrico com a base de geração de energia elétrica europeia em 2030 ou mesmo um veículo à célula de hidrogênio. No entanto, sem a necessidade de implementação de novas tecnologias, pois o biocombustível é totalmente aplicável nos veículos abastecidos com combustível fóssil, necessitando apenas pequenas adaptações, já conhecidas e aplicadas no mercado.

3.4.3.2 – Combustíveis alternativos e suas tecnologias

Outros combustíveis alternativos podem ser aplicados na matriz de transporte, como por exemplo, o hidrogênio, que não é considerado uma fonte de energia, mas sim um vetor energético que deve ser extraído de algum composto, tais como fontes fósseis (petróleo e gás natural) com certa limitação pelos elevados níveis de emissões destas fontes, mas também podendo ser obtido de fontes renováveis, como a biomassa (LOPES, 2005).

Para utilização do hidrogênio de forma eficiente, nota-se que há esforço de engenharia em desenvolver soluções viáveis, como por exemplo a célula a hidrogênio, indicada como alternativa de baixa emissão de GEE na Figura 55.

A tecnologia de célula à combustível pode ser definida com um dispositivo eletroquímico que transforma energia química em eletricidade, sendo similar a uma bateria. Utilizando hidrogênio e oxigênio, produz energia elétrica, calor e água em processo de eletrólise reversa, contando com eficiência superior aos sistemas tradicionais, como o motor à combustão.

Atualmente existem várias tecnologias de célula à combustível, no entanto, a célula à combustível de membrana de troca de prótons opera em vários níveis de pressão e abaixo dos 100°C, o que confere a característica de partida rápida e sem a necessidade de eletrólito, colocando esta tecnologia como a principal opção para geração de energia em automóveis (LOPES, 2005).

Diferente de um veículo elétrico à bateria, o veículo equipado com célula à combustível tem autonomia estendida, similar ao movido por motor à combustão, pois a energia depende apenas da disponibilidade de hidrogênio, que através de um processo de oxidação, gera energia elétrica. Durante o processo de reação, os íons de hidrogênio reagem com os átomos de oxigênio formando água (Fuel Cell Today, 2012).

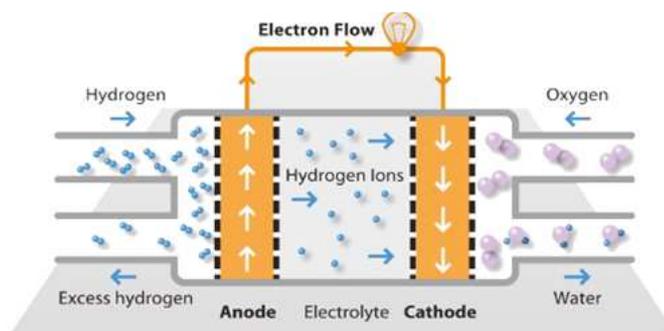


Figura 56. Célula Combustível de Membrana de Troca de Prótons (Fuel Cell Today, 2012)

A disponibilidade de hidrogênio pode ocorrer de duas formas, sendo em cilindros sob alta pressão ou a reforma catalítica a bordo, sendo esta última, solução introduzida pela Nissan Motors, muito promissora, em especial para utilização com etanol, conforme apresentado na Figura 57.

Na reforma a bordo, ou reforma a vapor, a extração do hidrogênio ocorre através da conversão endotérmica e catalítica de hidrocarbonetos leves com vapor de água. Neste

processo o combustível aquecido e vaporizado é injetado com vapor de água em uma câmara de reação, normalmente usando catalisadores à base de níquel, podendo ser utilizado hidrocarbonetos leves e pesados (LOPES, 2005).

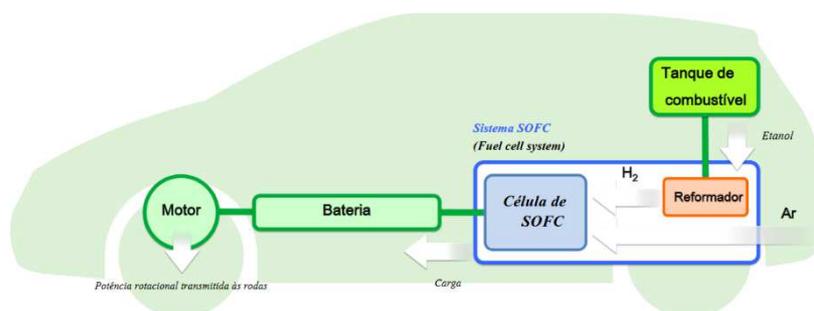


Figura 57. Tecnologia célula a combustível com reforma a bordo (Nissan, 2018)

O hidrogênio também tem colaborado para geração de combustíveis sintéticos, denominados *synfuels* ou *e-fuels*, através da captura do CO₂ antropogênico sintetizando em hidrocarbonetos líquidos e gasosos. O processo mais conhecido de transformação do combustível sintético é o *power-to-liquid* ou *electrofuel* que captura CO₂ e utiliza energia elétrica para geração de hidrogênio, produzindo combustíveis *drop-in* como Diesel, gasolina, metanol, entre outros hidrocarbonetos, que podem ser usados em veículos, aviões ou navios.

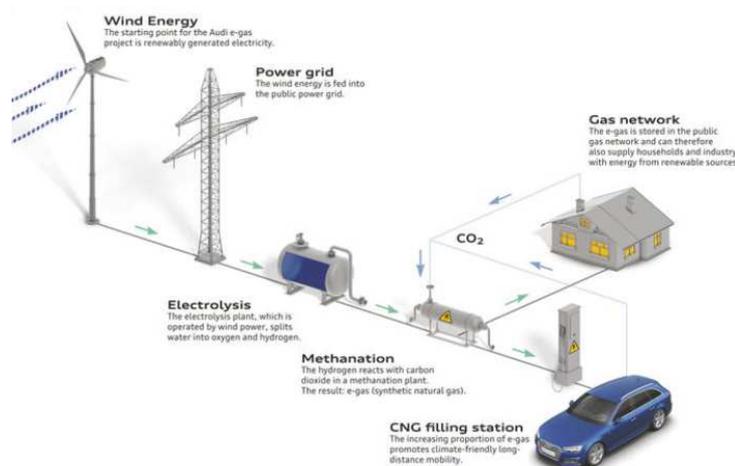


Figura 58. Projeto Audi e-gas – geração de Synfuel (Audi)

3.4.3.3 – Matriz energética e veículos elétricos

Na matriz energética elétrica global, os combustíveis fósseis têm predominância, em especial o carvão e o gás natural, resultando em grande emissão de GEE por kWh de energia gerada. Já o Brasil tem grande participação de energia renovável em sua matriz energética, com aumento projetado nos próximos anos, conforme apresentado na Figura 59, o que confere uma posição muito favorável à baixa emissão de GEE por kWh.



Figura 59. Matriz Energética Elétrica Brasileira (EPE,2020)

3.4.3.4 – Veículo elétrico

Os veículos elétricos não são uma tecnologia recente. Historicamente está associado à invenção da bateria de chumbo ácido, por volta de 1860. Sua disseminação foi dificultada em função da baixa densidade energética das baterias, não permitindo grande autonomia do veículo. Com a necessidade de redução das emissões locais em grandes centros, desde 1960, por diversas vezes vários governos criaram programas de incentivo à introdução de veículos elétricos, porém sem sucesso devido às limitações das tecnologias de baterias, preço competitivo e disponibilidade do petróleo (BARAN, 2012).

Mais recentemente, após 2015, com a informação pública sobre o escândalo do Dieselgate, os veículos elétricos novamente ganharam força como solução viável para aplicação em grandes centros com objetivo de atenuação das emissões locais, dada ausência de emissões provenientes da combustão neste tipo de veículo.

Sobre o aspecto de emissões de GEE, para que o veículo elétrico tenha vantagens sobre o veículo convencional a combustão, é muito importante considerar a fonte de geração de energia elétrica, pois, sendo de origem fóssil, os benefícios podem ser anulados. Deve-se analisar o ciclo completo de emissão de CO₂eq, considerando a fabricação do veículo, levando em conta a produção dos sistemas de trem de força e a bateria.

A Figura 60 demonstra um cenário de emissões de CO₂eq cumulativas de uma aplicação de veículo de passeio em 10 anos de utilização, com diferentes combustíveis. A referência para esta análise é o veículo utilizando gasolina que acumulará ao final de 10 anos de utilização a emissão de 31ton CO₂eq, incluindo a fabricação deste veículo que é de 5ton CO₂eq. Também nesta análise foi comparado um veículo elétrico à bateria com autonomia entre 300km e 400km e um a combustão movido a Etanol (MAHLE, 2018).

Nesta análise, o veículo elétrico foi abastecido com duas fontes de energia elétrica, sendo a brasileira que tem em sua matriz grande parte a hidroelétrica com emissão média de 64gCO₂eq/kWh, e em outro extremo a matriz boliviana com grande parte gerada por gás natural com emissão de 528gCO₂eq/kWh.

É possível observar que o veículo à bateria abastecido com a energia boliviana emitirá ao final de 10 anos de utilização mais CO₂eq que o veículo a combustão movido a gasolina, por outro lado, o veículo à combustão movido a Etanol tem o melhor resultado sob os aspectos de emissão de CO₂eq.

Tal análise demonstra o grande potencial do biocombustível na redução das emissões de GEE, que inclusive pode ser associado ao veículo elétrico, gerando conceito denominado Bioelettrificação, como o conceito da reforma de H₂ a bordo, mencionada neste trabalho ou mesmo o veículo híbrido a etanol.

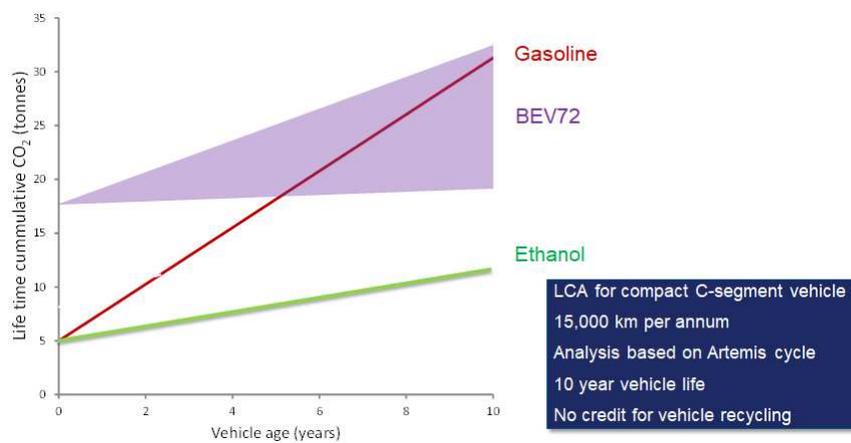


Figura 60. Comparação de Emissões de CO₂eq de diferentes tecnologias (MAHLE, 2018)

No próximo capítulo será realizada análise e discussão sobre os cenários de aplicação de tecnologia futura no cenário brasileiro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Programas globais e comparação com o cenário brasileiro

Como observado no capítulo anterior, as legislações de emissões e eficiência energética avançaram consideravelmente nas últimas décadas, em especial nos mercados de maior volume de comercialização de veículos e, por consequência, houve aumento do conteúdo tecnológico dos veículos para atender às metas estabelecidas. Aproximadamente 80% dos veículos atualmente vendidos no mundo estão atendendo algum tipo de legislação de emissões gasosas ou eficiência energética (ICCT, 2017).

Mesmo com grandes progressos em termos de redução das emissões gasosas, estudos recentes indicaram grandes discrepâncias entre os resultados obtidos nas certificações em laboratório e o desempenho na utilização real do veículo. Como exemplo, as emissões de NOx para um veículo de passeio enquadrado na norma EURO6 em laboratório tem suas emissões amplificadas por 7 vezes na utilização real. Estes estudos ficaram conhecidos como o escândalo “Dieselgate” após sua divulgação (ICCT, 2017).

A mesma situação ocorre sobre as emissões de GEE, em especial o CO₂, pois é conhecida a diferença entre as emissões medidas nas certificações em laboratório em comparação às emissões reais na utilização do veículo. Estas diferenças podem alcançar valores na ordem de 40% e estão atribuídos ao método de ensaio em laboratório que não reproduz integralmente as condições de utilização do veículo, especialmente sobre a carga utilizada no veículo e temperaturas de trabalho (ICCT, 2017).

Para mitigar os riscos relacionados ao atendimento das legislações vigentes, algumas medidas podem ser adotadas, como segue:

- Estabelecer uma entidade legal para fiscalizar a introdução.
- Alinhar a missão da entidade legal ou agência com as metas regulatórias, quebrando qualquer possível acordo entre as agências e fabricantes.

- Disponibilizar recursos necessários para entidade legal para garantir o cumprimento da regulamentação.
- Realizar testes confiáveis durante a produção do veículo, bem como durante seu uso.
- Garantir penalidades em caso de problemas identificados.
- Garantir a transparência da informação ao público.
- Criar visão de longo prazo, com definição antecipada de fases futuras dos programas.

Com base nas medidas estabelecidas acima, uma análise dos principais países com legislação vigente foi realizada, indicando o nível de atendimento destas práticas, como visto na Tabela 3.

Tabela 3. Avaliação do atendimento das medidas de efetividade dos programas de emissões e eficiência energética nos maiores mercados de veículos (ICCT, 2017)

| Region/country | | Best Practices | | | | | | |
|----------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|---|------------------------|--|--|
| | | Establish clear legal authority | Avoid conflicts of Interest | Obtain the necessary resources | Conduct reliable testing and checks at all stages of production and use | Use corrective actions | Prioritize data and information transparency | Create a roadmap for program development |
| Asia | China | ●++ | ●+ | ●+ | ●++ | ●+ | ● | ●+ |
| | India | ●+ | ●+ | ●+ | ●+ | ● | ● | ●+ |
| | Japan | ●++ | ●++ | ●+ | ●++ | ●++ | ● | ●+ |
| | South Korea | ●++ | ●++ | ●++ | ●++ | ●++ | ●+ | ●+ |
| Europe | EU | ● | ●+ | ●+ | ● | ●+ | ● | ●+ |
| | France | ●+ | ● | ●+ | ●+ | ●+ | ● | ●+ |
| | Germany | ●+ | ● | ●+ | ●+ | ●+ | ● | ●+ |
| | UK | ●+ | ● | ●+ | ●+ | ●+ | ●+ | ●+ |
| North America | California | ●++ | ●++ | ●++ | ●++ | ●++ | ●+ | ●+ |
| | Canada | ●+ | ●++ | ●+ | ●++ | ● | ● | ●+ |
| | Mexico | ●+ | ●+ | ● | ● | ● | ● | ● |
| | U.S. | ●++ | ●++ | ●++ | ●++ | ●++ | ●+ | ●+ |
| South America | Brazil | ●++ | ●+ | ●+ | ● | ●+ | ● | ● |
| | Chile | ●+ | ●+ | ●+ | ●+ | ● | ●+ | ●+ |

● The country does not sufficiently meet any criteria for this practice.
 ●+ The country meets some criteria for this practice.
 ●++ The country meets all criteria for this practice.

A Ásia, em especial Japão e Coreia do Sul, tem seus programas bem estruturados, com forte suporte legislativo e penalidades severas ao não cumprimento da legislação. Importante indicar que China e Índia, mesmo tendo adotado mais recentemente com os programas, em

função da baixa qualidade do ar nestas regiões, estão realizando grandes avanços em seus programas em um curto espaço de tempo, em especial com foco nos grandes centros.

Na Europa, as regulamentações são definidas por comissões da União Europeia, ou seja, as regras valem para todos os países membros da comissão. No entanto, a fiscalização não é centralizada e, portanto, realizada por agências individuais ligadas a cada país. Os altos níveis de NOx e MP, especialmente dos veículos de passeio Diesel, têm criado discussão acerca de novas tecnologias a serem introduzidas com objetivo de mitigar esses problemas.

Na América do Norte, em especial nos Estados Unidos, a existência de programas para controle de emissões há mais de cinco décadas, faz com seja considerado o país mais avançado em termos de experiência e resultados acumulados. O programa é conduzido por agência com missão bem definida e tem apoio de órgãos com especialistas. Há penalidades severas para o não atendimento das normas, criando condições em que o custo da não conformidade é mais alto que o custo da conformidade.

Na América do Sul, o Brasil é o maior mercado do continente, contando com programas estabelecidos e regras claras. Os principais fabricantes de veículos no Brasil são multinacionais, em especial norte americanas e europeias e, portanto, o Brasil tem suas legislações baseadas nas legislações internacionais. Em resumo, para veículos leves boa parte da legislação é baseada no EPA norte-americana; e para veículos pesados a base é a norma europeia. O controle dos programas é gerenciado por órgão ligados ao ministério do meio ambiente do governo federal e conta com apoio de agências estaduais para realização dos testes e análises. Os testes de conformidade são realizados apenas em veículos novos para certificação do modelo ou acompanhamento da produção, mas não há acompanhamento durante a utilização do veículo, o que pode ser considerado uma falha do programa.

As legislações de eficiência energética entraram em vigor após as legislações de emissões, motivadas pelas necessidades de redução dos GEE. As bases para definição das metas de eficiência energética foram os programas de etiquetagem estabelecidos no final de década de 1970 na Inglaterra e Estados Unidos e adotados por outros países ao longo das últimas décadas, conforme indicado na Figura 61.

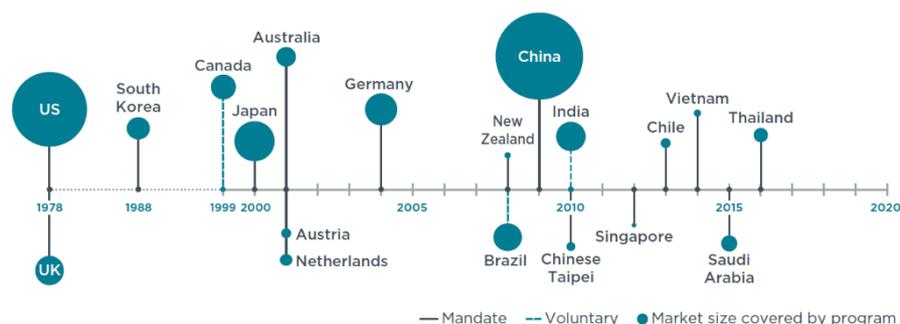


Figura 61. Introdução dos programas de etiquetagem globais (ICCT, 2017)

Estes programas de etiquetagem criaram banco de dados robusto, permitindo a definição de metas de eficiência energética com bom nível de fundamentação e possibilidade de atingimento, levando em consideração as particularidades de cada mercado, pois existem diferenças significativas no perfil da frota entre países, seja deslocamento volumétrico e potência dos motores, massa ou área projetada dos veículos. A Tabela 4 indica as principais diferenças características entre os mercados. É possível observar a singularidade do Brasil, onde não há comercialização de veículos de passeio movidos a Diesel e a totalidade é representada por outros, que nesse caso é caracterizado por tecnologia *flex-fuel*. Os 6% de volume de vendas indicados em gasolina se refere aos veículos importados, que no território nacional utilizam gasolina comercial brasileira.

Tabela 4. Comparação das características dos veículos leves em diferentes regiões (ICCT, 2017)

| Passenger car fleet | Brazil (2013) | China (2014) | EU-28 (2015) | India (2015) | Japan (2011) | Mexico (2014) | Saudi Arabia (2012) | South Korea (2014*) | U.S. (2015) |
|--|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------|
| Sales (million) | 3.0 | 20.7 | 13.7 | 2.8 | 3.5 | 0.7 | 0.4 | 1.4 | 7.5 |
| Engine displacement (L) | 1.4 | 1.7 | 1.6 | 1.3 | 1.4 | 1.8 | 2.3 | 2.0 | 2.4 |
| Engine power (kW) | 76 | 98 | 93 | 59 | 78 | 95 | 120 | 120 | 149 |
| Curb weight (metric tons) | 1.1 | 1.4 | 1.4 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
| Footprint (m ²) | 3.7 | 4.1 | 4.0 | 3.5 | 3.7 | 3.8 | 4.2 | 4.2 | 4.3 |
| Fuel consumption - NEDC (l/100km) | 6.8 | 7.3 | 5.1 | 5.3 | 5.8 | 6.3 | 6.8 | 6.4 | 6.8 |
| CO ₂ emission - NEDC (g/km) | 154 | 171 | 120 | 123 | 136 | 147 | 158 | 148 | 158 |
| Petrol | 6% | 98% | 44% | 47% | 86% | 99% | - | 51% | 94% |
| Diesel | 0% | 2% | 52% | 50% | 0% | 1% | - | 39% | 1% |
| Hybrid-electric | 0% | 0% | 2% | 0% | 13% | 0% | - | 0% | 5% |
| Others | 94% | 0% | 2% | 3% | 1% | 0% | - | 10% | 0% |
| Manual transmission | 83% | 49% | 75% | 92% | 1% | 56% | - | 2% | 6% |
| Automatic transmission | 17% | 51% | 25% | 8% | 99% | 44% | - | 98% | 95% |

* South Korea footprint reflects 2011 fleet, engine power reflects 2013 fleet
Data sources: (Marklines, 2016; Mock, 2016), additional ICCT internal databases

Estes programas na maioria das regiões permitem uma boa flexibilidade para os fabricantes de veículos para atingimento das metas, como por exemplo, considerar médias corporativas, onde a média de eficiência da montadora é uma ponderação entre o volume de vendas e os valores individuais de consumo energético de cada modelo, permitindo incentivos no *mix* de vendas para buscar o atingimento das metas, ou a adoção de créditos para modelos que adotam tecnologias *offcycle* ou super créditos para veículos movidos a biocombustível ou elétricos, conforme detalhado no Capítulo 2.

A medida que as metas são estabelecidas e ficam mais restritivas, as tecnologias aplicadas nos veículos também tornam-se mais complexas e o custo associado à fabricação do veículo aumenta consideravelmente, portanto, a busca pelo melhor custo-benefício das tecnologias aplicadas deve ser observada nos projetos.

4.2 Veículos leves

Em função dos programas citados neste trabalho, o conteúdo tecnológico para veículos leves aumentou consideravelmente nos últimos anos, como apresentado na Figura 62

No que tange as emissões gasosas, diversas tecnologias foram introduzidas para permitir a evolução dos limites, como a introdução da injeção eletrônica, sistemas de injeção direta, pré-aquecimento da mistura e controle das emissões evaporativas através da tecnologia de canister, todas estas tecnologias voltadas para redução das emissões antes do processo de combustão.

Durante o processo de combustão, tecnologias de modificações geométricas como, taxa de compressão de motores, mudanças no perfil da câmara de combustão, alterações no perfil das válvulas e anéis, bem como o controle de mistura também colaboraram para o atingimento das metas.

Mesmo com todas as tecnologias antes e durante a combustão, a queima do combustível ainda gera níveis de emissões que necessitam ser reduzidos, portanto, sistemas auxiliares pós-combustão, tais como conversores catalíticos, recirculação de gases de escape e filtros de partículas, também foram introduzidos (ANFAVEA, 2009).



Figura 62. Tecnologias introduzidas para redução de emissões em veículos leves (ANFAVEA, 2009)

Em relação à eficiência energética, conforme demonstrado na Figura 63, entre os anos 2000 e 2020 houve redução significativa, na ordem de 30% das emissões de CO₂ em função do consumo de combustível e haverá necessidade contínua de redução nos próximos anos para todos os países que adotaram programas desta natureza, incluindo o Brasil.



Figura 63. Tecnologias introduzidas para redução de emissões em veículos leves (ICCT, 2017)

4.2.1 – Emissões veiculares e eficiência energética veículos leves – visão Brasil

Para o Brasil a evolução das normas colocou desafio considerável, pois garantir o atendimento aos limites de emissões e as metas de eficiência energética sem encarecer demasiadamente o veículo, foi o grande desafio da indústria automotiva em especial nas primeiras etapas do PROCONVE e no INOVAR AUTO.

As estratégias para atendimento aos limites de emissões também causam grande influência na eficiência energética do veículo, portanto, é necessário estabelecer um compromisso entre a aplicação das tecnologias para atender as duas necessidades. Mais especificamente nos últimos anos, com a introdução das últimas fases de emissões para leves PROCONVE L7 e eficiência energética ROTA2030, os veículos receberam pacote tecnológico que elevou o nível dos veículos locais, aproximando ao patamar global.

Em relação às emissões gasosas, com foco no atendimento ao PROCONVE L6, foi necessária a introdução de novas tecnologias para atender as reduções de emissões de CO, NOx e partida a frio, como segue (FGV, 2018):

- Novos materiais para os sistemas de pós-tratamento.
- Adoção de sistemas de aquecimento do combustível para auxiliar na partida a frio do veículo com foco em reduzir as emissões de hidrocarbonetos.
- Aplicação de sonda de oxigênio adicional ao escapamento, para auxiliar no controle da mistura.
- Otimizações no sistema de diagnóstico a bordo, denominado OBDBR2, que auxilia no controle do funcionamento dos dispositivos citados anteriormente, garantindo a manutenção dos níveis de emissões durante a utilização do veículo.
- Alterações na especificação do combustível, em especial da gasolina comercial, que recebeu redução significativa na quantidade de enxofre de 800ppm para 50ppm, o que contribuiu significativamente para evitar a degradação do sistema de catalisador, garantindo a manutenção dos níveis de emissões.

Para o atendimento das metas de eficiência energética definidas pelo INOVAR AUTO, as montadoras de veículos, conhecendo os valores médios de suas frotas, na época 2,07MJ/km para veículo de referência com massa de 1121kg e sabendo da necessidade de alcançar no mínimo 1,82MJ/km, ou seja 12% de melhoria na eficiência, definiram suas estratégias buscando tecnologias com a melhor relação de custo/% de redução de consumo. A Figura 65 mostra uma análise do custo das tecnologias em função do custo de implementação.

Comparando a eficiência energética dos modelos comercializados em dezembro de 2014 no Brasil com os veículos comercializados em setembro de 2017, conforme apresentado na Figura 64, é possível observar uma clara melhora dos veículos, em especial nos veículos mais leves, que equipados com motores à combustão modernos, alcançam consumo energético em (MJ/km) ao mesmo nível de veículos híbridos e elétricos.

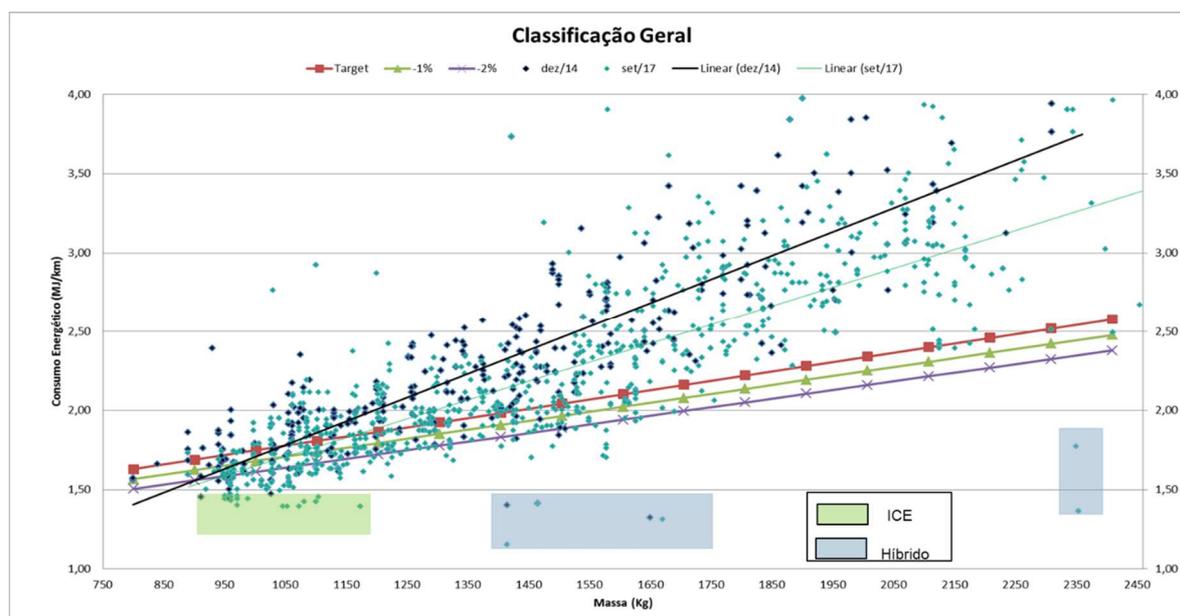


Figura 64. Comparação consumo energéticos modelos Brasileiros Dez/14 e Set/17 (Elaboração Própria, Dados CONPET, 2018)

As principais tecnologias implantadas nos novos modelos nestes últimos anos, com foco no atendimento do programa, seguiu lógica de análise de custo de aplicação e potencial de redução de consumo energético.

Com base nos dados do CONPET é possível verificar que os modelos mais eficientes, receberam em sua maioria as seguintes tecnologias:

- Óleos de baixa viscosidade com foco na redução do atrito hidrodinâmico.
- Pneu verde para redução da resistência ao rolamento.
- Redução de massa dos veículos.
- Comando de válvulas variável e 4 válvulas por cilindro.
- Aumento da potência específica através de introdução de motores turbo e injeção direta.
- Alterações na transmissão (aumento de número de marchas ou CVT).
- Bomba de direção elétrica.
- Indicador de troca de marchas.
- Monitoramento de pressão dos pneus.
- Sistemas de *Start-Stop*

É possível observar que a maioria das tecnologias introduzidas nos veículos leves para atendimento ao INOVAR AUTO são as que possuem as melhores relações entre custo e redução de consumo, sendo possível observar na Figura 65 pelo ângulo de inclinação do gráfico.

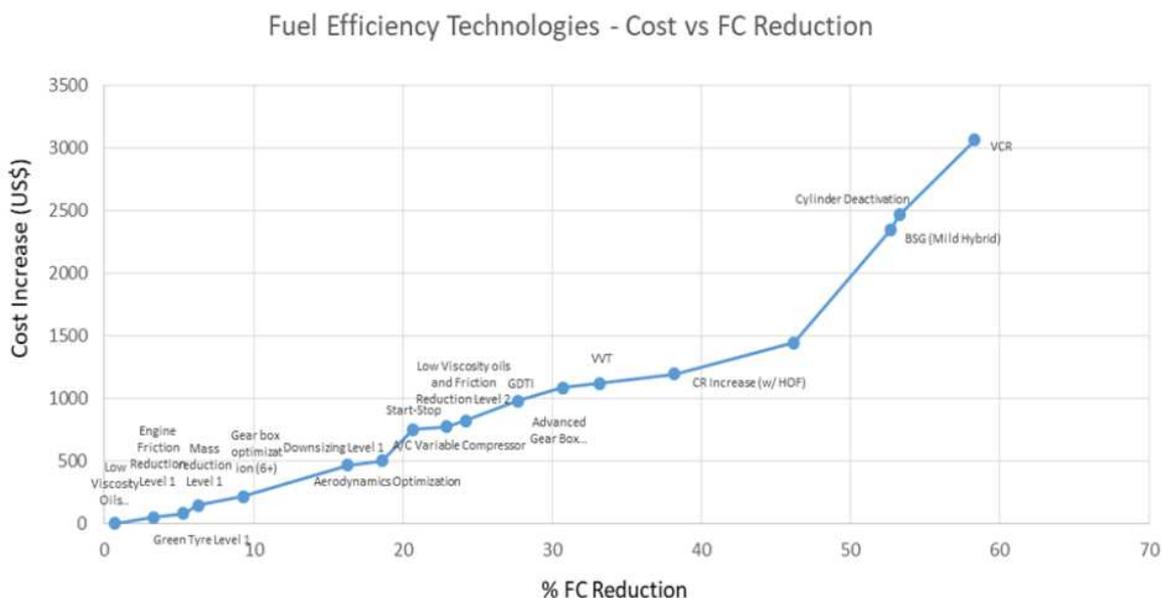


Figura 65. Relação cumulativa de redução de consumo de combustível e custos de tecnologias (Elaboração Própria, Dados *National Academy of Sciences*, 2015)

4.2.2 – Visão futura - tendências tecnológicas brasileiras para veículos leves

Para atendimento da próxima meta de eficiência energética, que será a fase 1 do programa ROTA2030, com atendimento em final de 2022, as montadoras necessitarão de veículos mais eficientes, pois a média corporativa ponderada deverá melhorar no mínimo 11%, em comparação à meta estabelecida no INOVAR-AUTO. Isso exigirá a ampliação da aplicação de tecnologias já existentes, como:

- Motores turbos com Injeção Direta.
- Motores três cilindros (*downsizing*).
- Sistemas *Start-Stop*.
- Transmissões CVT ou com mais marchas com foco em *downspeed*.
- Redução de massa dos veículos mais vendidos.
- Adoção de tecnologias *offcycle*, como o compressor de ar-condicionado variável.
- Otimizações aerodinâmicas.
- Eco créditos (aumento da taxa de compressão para beneficiar Etanol e introdução de veículos híbridos / elétricos)

Em especial, o item redução de massa corporativa da montadora é um grande desafio, uma vez que os veículos de modelos SUV tiveram sua oferta e venda ampliada nos últimos anos, por consequência, algumas montadoras tiveram sua massa média aumentada em função do *mix* de vendas, conforme apresentado na Figura 66.

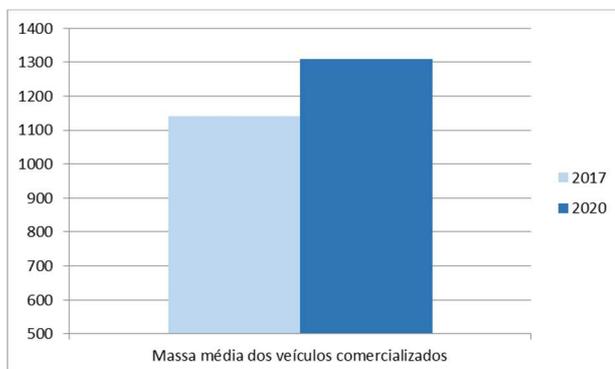


Figura 66. Evolução da massa média em kg da frota brasileira entre 2017 e 2020 (Elaboração Própria, Dados CONPET, 2021)

4.2.3 – Proposta para programas já definidos e futuros

Portaria nº 2.202-SEI, de 28 de dezembro de 2018, estabelece a regulamentação complementar sobre eficiência energética para veículos leves no programa ROTA 2030, indicando os critérios para a primeira fase do programa entre 2022 e 2026. Novas fases são previstas, sendo em 2027 e 2032 e devem estabelecer novas metas para eficiência energética.

Na fase prevista em 2027, ainda não há indicações sobre as novas metas, no entanto, tomando como base as evoluções realizadas desde o início do INOVAR AUTO, onde houve entre 2012 a 2018 melhorias de 12% na eficiência média dos modelos comercializados (2,07MJ/km para 1,82MJ/km) e é previsto para o ciclo 2018 a 2022 melhora adicional de 11% (1,82MJ/km para 1,62MJ/km), com tecnologias existentes sendo aplicadas é possível prever em 2027 níveis adicionais de melhoria de 10% buscando a meta de 1,45MJ/km e novamente adição de 10% em 2032, alcançando nível de 1,31MJ/km para massa de referência de 1121kg (Figura 67).

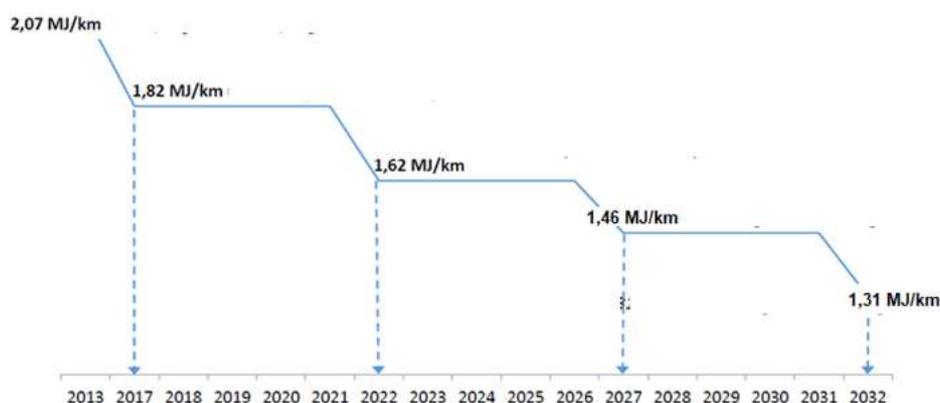


Figura 67. Possível Evolução das Metas de Eficiência Energética (Elaboração Própria)

O atingimento da possível meta indicada em 2027 será alcançado com a ampliação dos quantidade de modelos equipados com:

- Motores turbo / motores três cilindros (downsizing), com ciclo Miller e Atkinson com alta taxa de compressão.
- Sistemas de Injeção Direta avançada (estratificação, mistura pobre, pré camara).

- Sistemas *Start-Stop*.
- Sistemas *Mild Hybrid* 12V / 48V.
- Transmissões inteligentes com foco em *downspeed*.
- Redução de massa dos veículos mais vendidos.
- Ampliação das tecnologias *offcycle*.
- Otimizações aerodinâmicas avançadas.

É importante indicar que a possível meta de 2027 já é praticamente alcançada por alguns modelos em 2020, conforme indicado na Tabela 5, que apresenta dados de emissões gasosas, autonomia e consumo energético de um modelo popular, em comercialização no Brasil. Este modelo tem motor três cilindros aspirado, com massa reduzida e pneu verde, onde é possível observar que o valor de consumo é de 1,43MJ/km e 1,45MJ/km, dependendo da versão, indicando que, com a aplicação destas tecnologias é possível alcançar os valores sugeridos para as próximas fases pós 2022.

Tabela 5.Exemplo de Eficiência Energética para veículo de passeio (CONPET, 2020)

| Categoria | Marca ^(?) | Modelo ^(?) | Motor | Versão | Transmissão Velocidades (nº) | Ar Cond. | Direção Assistida | Combustível | Emissões no Escapamento | | | | | Quilometragem por Litro ^(?) | | | | Consumo Energético (MJ/km) | Classificação PBE | | Selo CONPET de Eficiência Energética | |
|--------------|----------------------|-----------------------|--------|-----------|------------------------------|----------|-------------------|-------------|--------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------|
| | | | | | | | | | Poluentes ^(?) | | | Gás Efeito Estufa ^(?) | | Etanol | | Gasolina / Diesel | | | Comparação Relativa na Categoria | Comparação Absoluta Geral | | |
| | | | | | | | | | NMHC (g/km) | CO (g/km) | NOx (g/km) | Redução Relativa ao Limite | Etanol CO ₂ fóssil (g/km) | Gasolina / Diesel CO ₂ fóssil (g/km) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | | | | | | |
| | | | | | | | | | Manual (M) | Automática (A) | Automática Dupla Embreagem (DCT) | Automatizada (MTA) Contínua (CVT) | Sim (S) | Não (N) | Mecânica (M) | Elétrica (E) | Eletro-hidráulica (E-H) | | Hidráulica (H) | Elétrico (E) | | Gasolina (G) |
| SUB COMPACTO | FIAT | Mobi | 1.0-6V | Drive | M-5 | S | H | F | 0,028 | 0,380 | 0,020 | B | 0 | 88 | 9,7 | 11,5 | 13,8 | 16,4 | 1,43 | A | A | S1H |
| SUB COMPACTO | FIAT | Mobi | 1.0-8V | Drive GSR | M-5 | S | H | F | 0,025 | 0,469 | 0,024 | B | 0 | 89 | 9,5 | 11,3 | 13,7 | 15,9 | 1,45 | B | A | S1H |

Para as possíveis metas de 2032, haverá a necessidade de aumento dos quantidade de modelos híbridos e elétricos no *mix* de vendas da montadora, pois em função dos valores de eficiência energética destes modelos apresentados na Tabela 6, e seus fatores de multiplicação já definidos no Eco-Créditos apoiarão a redução da média da montadora.

Tabela 6.Exemplo de Eficiência Energética para veículo híbrido e elétrico (CONPET, 2020)

| Categoria | Marca ^(?) | Modelo ^(?) | Motor | Versão | Transmissão Velocidades (nº) | Ar Cond. | Direção Assistida | Combustível | Emissões no Escapamento | | | | | Quilometragem por Litro ^(?) | | | | Consumo Energético (MJ/km) | Classificação PBE | | Selo CONPET de Eficiência Energética | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------------|-----------------------|---------|-----------------|------------------------------|----------|-------------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------|--|----------------|--------------|--------------|----------------------------|-------------------|----------|--------------------------------------|------------|--------------------------|-----------|------------|--------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|---|---|----|------|-----|------|------|------|
| | | | | | | | | | Manual (M) | Automática (A) | Automática Dupla Embreagem (DCT) | Automatizada (MTA) Contínua (CVT) | Sim (S) | Não (N) | Hidráulica (H) | Mecânica (M) | Elétrica (E) | | Gasolina (G) | Flex (F) | | Diesel (D) | Poluentes ^(?) | | | Etanol | Gasolina / Diesel | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | Comparação Relativa na Categoria | Comparação Absoluta Geral | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NHMC (g/km) | CO (g/km) | NOx (g/km) | | | | | | | | Redução Relativa ao Limite | Etanol CO ₂ fóssil (g/km) | Gasolina / Diesel CO ₂ fóssil (g/km) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,008 | 0,057 | 0,001 | A | 0 | 84 | 10,9 | 9,9 | 16,3 | 14,5 | 1,38 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GRANDE | TOYOTA | Corolla | 1.8-16V | Altis Premium H | CVT | S | E | F | 0,008 | 0,057 | 0,001 | A | 0 | 84 | 10,9 | 9,9 | 16,3 | 14,5 | 1,38 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GRANDE | TOYOTA | Corolla | 1.8-16V | Altis HV | CVT | S | E | F | 0,008 | 0,057 | 0,001 | A | 0 | 84 | 10,9 | 9,9 | 16,3 | 14,5 | 1,38 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Categoria | Marca ^(?) | Modelo ^(?) | Motor | Versão | Transmissão Velocidades (nº) | Ar Cond. | Direção Assistida | Combustível | Emissões no Escapamento | | | | | Quilometragem por Litro ^(?) | | | | Consumo Energético (MJ/km) | Classificação PBE | | Selo CONPET de Eficiência Energética | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------|--------------|------------------------------|----------|-------------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------|--|----------------|--------------|--------------|----------------------------|-------------------|----------|--------------------------------------|------------|--------------------------|-----------|------------|--------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|---|---|---|---|---|------|------|------|
| | | | | | | | | | Manual (M) | Automática (A) | Automática Dupla Embreagem (DCT) | Automatizada (MTA) Contínua (CVT) | Sim (S) | Não (N) | Hidráulica (H) | Mecânica (M) | Elétrica (E) | | Gasolina (G) | Flex (F) | | Diesel (D) | Poluentes ^(?) | | | Etanol | Gasolina / Diesel | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | Comparação Relativa na Categoria | Comparação Absoluta Geral | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | NHMC (g/km) | CO (g/km) | NOx (g/km) | | | | | | | | Redução Relativa ao Limite | Etanol CO ₂ fóssil (g/km) | Gasolina / Diesel CO ₂ fóssil (g/km) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | Cidade Estrada (km/l) | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 58,4 | 47,1 | 0,39 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SUB COMPACTO | RENAULT | Twizy | Elétrico | Intense | A | N | M | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 58,4 | 47,1 | 0,39 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MÉDIO | RENAULT | Zoe NR | Elétrico | Intens | A | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 35,3 | 27,5 | 0,65 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MÉDIO | RENAULT | Zoe NR | Elétrico | Life | A | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 35,3 | 27,5 | 0,65 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MÉDIO | RENAULT | Zoe LR | Elétrico | Intens LR | A | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 34,9 | 27,8 | 0,65 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MÉDIO | RENAULT | Zoe LR | Elétrico | Life LR | A | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 34,9 | 27,8 | 0,65 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MÉDIO | RENAULT | Zoe LR | Elétrico | ULT LR | A | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 34,9 | 27,8 | 0,65 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GRANDE | NISSAN | Leaf | Elétrico | TEKNA | AUTO | S | E | G | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 38,7 | 31,9 | 0,58 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EXTRA GRANDE | JAGUAR | I-Pace | Elétrico | E400 SE | A-1 | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 29,2 | 26,8 | 0,72 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EXTRA GRANDE | JAGUAR | I-Pace | Elétrico | E400 HSE | A-1 | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 29,2 | 26,8 | 0,72 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EXTRA GRANDE | JAGUAR | I-Pace | Elétrico | E400 S | A-1 | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 29,2 | 26,8 | 0,72 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EXTRA GRANDE | JAGUAR | I-Pace | Elétrico | E400 FIRSTED | A-1 | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 29,2 | 26,8 | 0,72 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| UTILITÁRIO ESPORTIVO COMPACTO | JAC | IEV 40 | Elétrico | | A | S | E | E | 0,000 | 0,000 | 0,000 | A | \ | 0 | \ | \ | 37,5 | 34,8 | 0,56 | A | A | SIH | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

As tecnologias híbridas e elétricas são interessantes em termos de eficiência energética, no entanto, como indicado na Figura 60, sob o aspecto de emissões de GEE, pode não ser a melhor solução dependendo da matriz de geração de energia que alimenta o veículo durante sua vida útil. Por outro lado, o biocombustível se apresenta como solução viável na mitigação da emissão de GEE, com cadeia de distribuição já disponível, não necessitando grandes investimentos em infraestrutura. Portanto, a rota do biocombustível, deve ser ainda mais incentivada nas próximas etapas do programa ROTA2030.

Como recomendação desta dissertação, a inserção da análise da emissão de CO₂ do poço à roda deve ser considerada, gerando crédito de eficiência para veículos que utilizam Etanol ou outro biocombustível no sentido de criar oportunidade de competitividade a esta tecnologia. Este incentivo poderá viabilizar novos investimento em desenvolvimento e aplicação de produtos, valorizando a engenharia nacional e garantindo a utilização dos investimentos já realizados no passado.

Como já indicado neste trabalho, o combustível passou por alterações em suas características físico químicas, em especial nos últimos anos, para apoiar a redução das

emissões gasosas. No entanto, ainda existe a necessidade de melhoria na especificação da gasolina comercial, para que seja possível obter melhor desempenho do veículo *flex fuel*. A gasolina comercial atual tem o nível de Octanas RON em 93, enquanto o Etanol Hidratado, tem nível em torno de 110 (Bizzo, 2013), esta diferença significativa, prejudica o compromisso de desempenho de um veículo *flex fuel* com os dois combustíveis, pois se o veículo tem motor com taxa de compressão mais baixa, favorável à gasolina, o desempenho no Etanol ficará prejudicado, por não explorar todo seu potencial anti-detonante. O contrário também é válido, pois o veículo equipado com motor com taxa de compressão mais alta, que favorece o desempenho com Etanol, será prejudicado quando utilizando gasolina, em função da sua baixa capacidade anti-detonante. Com isso, fica evidente a necessidade da melhoria substancial da Octanagem RON da gasolina comercial, sendo que valores próximos de RON100 poderia apoiar o veículo *flex fuel* obter bom desempenho com ambos os combustíveis.

Para evidenciar esta análise, um experimento foi realizado no centro de tecnologia da empresa MAHLE Metal Leve S/A em Jundiaí-SP, utilizando um veículo *flex fuel*, em condições de utilização em ciclo real na metodologia RDE (*Real Drive Emission Cycle*) passando por situações de trânsito urbano, interurbano e rodoviário. Para uma análise próxima a utilização real, o nível de carregamento foi simulado com lastros, reproduzindo 4 ocupantes e a temperatura ambiente média dos ciclos foi em torno de 25°C, sendo uma temperatura representativa para as condições brasileiras. O ciclo foi executado na cidade de Jundiaí-SP e tem 70 km de percurso, conforme apresentado na Figura 68.

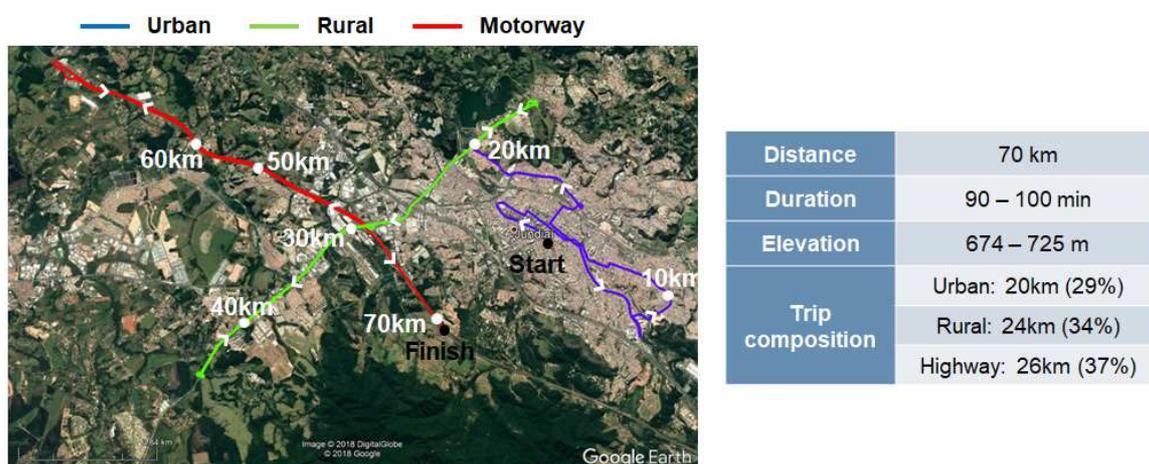


Figura 68.Ciclo RDE MAHLE Jundiaí (MAHLE, 2020)

As medições de consumo foram realizadas com sistema de medição volumétrico, conectado diretamente ao sistema de injeção do veículo e os dados de posição de pedal e avanço de ignição, retardo por detonação e velocidade do veículo foram adquiridos pela OBD em tempo real.

Três combustíveis foram avaliados, com objetivo de realizar análise de desempenho comparativo, conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Características dos combustíveis utilizados

| | Etanol Hidratado | Gasolina Comercial E27 | Gasolina Comercial Alta Octanagem |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Densidade [kg/m ³] | 809 | 750 | 767 |
| Etanol [% Vol] | 95 | 27 | 25 |
| Poder Calorífico [MJ/kg] | 26,4 | 39,4 | 39,8 |
| RON | 110 | 93 | 102 |

É importante indicar que todos os combustíveis são comerciais, sendo possível encontrar em pontos de revenda, espalhados pelo país.

O veículo testado foi um modelo convencional *flexfuel* com boa participação nas vendas no mercado brasileiro, sendo um bom representante da frota brasileira mais moderna. Na Tabela 8 estão disponíveis as características do veículo.

Tabela 8. Características do veículo utilizado no experimento (MAHLE, 2018)

| | Vehicle |
|-------------------------------|-------------------------|
| Engine | 1.6L 16V |
| Engine type | Naturally aspirated |
| Compression ratio | 11,5:1 |
| Displacement | 1,6l |
| Bore / Stroke | 76,0 mm / 86,9 mm |
| Rated power (Ethanol / Gas.) | 88 / 81 kW @ 5750 rpm |
| Rated torque (Ethanol / Gas.) | 165 / 155 Nm @ 4000 rpm |
| Specific power output | 55 kW/l |
| Gear box | Manual (6 speeds) |
| Weight | 1105 kg |

Para garantir uma boa confiabilidade dos resultados, cada combustível foi testado três vezes e as dispersões entre resultados foram analisadas. É importante indicar que as dispersões ficaram em um nível baixo e portanto, é possível avaliar as diferenças entre os testes.

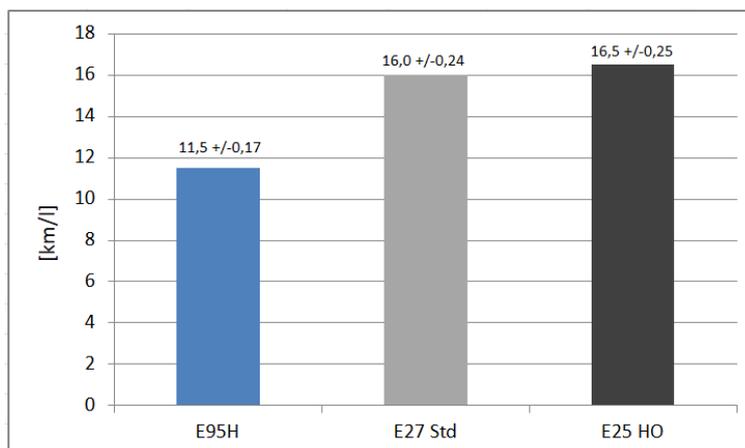


Figura 69. Resultados de Consumo de Combustível do Experimento (MAHLE, 2018)

Conforme apresentado na Figura 69, nos resultados gerais de consumo de combustível, é possível notar uma melhora na ordem de 3% para a gasolina de alta octanagem se comparada à gasolina comercial comum. Esta diferença está associada a dois fatores principais, sendo primeiro o nível de octanas RON maior da gasolina (HOF) que permitiu o veículo otimizar o

avanço de ignição durante o funcionamento em função da menor quantidade de eventos de detonação, como apresentado no gráfico da Figura 70 e o segundo fator o maior poder calorífico da gasolina HOF comparada com a convencional, uma vez que possui 2% a menos de etanol em sua mistura.

Na Figura 70 estão apresentados os resultados comparativos entre a gasolina comum e a gasolina de alta octanagem (HOF), durante o teste em campo. O perfil de velocidade média do ciclo, posição de pedal de acelerador e temperatura de admissão do motor, tiveram comportamentos similares durante os ciclos, no entanto, é possível observar na variável *spark retarding by knocking* [$^{\circ}$], que no teste com a gasolina comum, ocorreram vários eventos de retardo do avanço de ignição, indicando que o motor apresentou detonação durante o funcionamento, isto ocorreu com menor frequência com o veículo abastecido com HOF, indicando que a octanagem do combustível é um fator fundamental para a melhoria do desempenho do veículo.

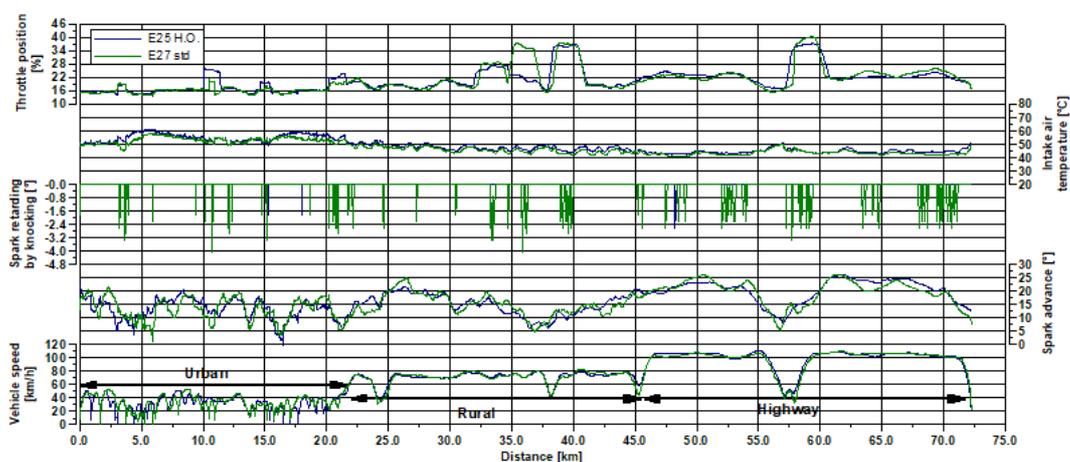


Figura 70. Parâmetros comparativos do veículo entre Gasolina Convencional e Gasolina de Alta Octanagem (MAHLE, 2018)

Em particular pode ser citado trabalho publicado em 2016 pelo *Oak Ridge National Laboratory* mostrando que em um motor moderno, turbo, de alto desempenho, o aumento de 10 RON no combustível (de 91 para 101 RON) proporcionou uma melhora de 5,7% em economia de combustível no ciclo de alto carregamento US06, mesmo sem nenhuma alteração no motor.

Estes resultados demonstram a necessidade de melhoria na especificação da gasolina, em especial no nível de Octanas como elemento habilitador de melhor desempenho de veículos *flex fuel*, permitindo melhoria do desempenho de novas tecnologias como o *downsizing*.

Para os programas de controle de emissões gasosas locais, esta dissertação recomenda atenção especial ao controle de número de partículas para os motores injeção direta em motores do ciclo Otto, pois as normas L7 e L8 contemplam apenas o controle de emissão do material particulado em massa [mg/km]. No entanto, independente da massa, o número de partículas é importante parâmetro, em especial para as partículas extremamente pequenas, até 23nm, muito comum nestes tipos de motores.

Estas partículas são extremamente pequenas, não visíveis a olho nu e podem ficar em suspensão, o que facilita a aspersão para o sistema respiratório. Na figura 71 é possível observar o tamanho destas partículas comparadas a um fio de cabelo humano e a um grão de areia.



Figura 71. Comparação do tamanho de partículas em relação ao fio de cabelo humano e grão de areia. (MAHLE, 2019)

Há varios estudos demonstrando o efeito negativo na saúde deste tipo de emissão de partículas. Em especial as partículas ultrafinas <100nm tem impacto mais agressivo à saúde, e por este motivo a União Européia definiu limite de emissão máxima de 6×10^{12} partículas durante o ciclo de medição de emissões WLTC na fase EURO 6b e 6×10^{11} a partir da fase EURO 6d.

A deposição destas partículas ocorre principalmente em três regiões do sistema respiratório, que são as vias áreas superiores (extratorácica) formadas pelas fossas nasais,

faringe e laringe, a região da traqueia e o pulmão em si, nos brônquios, bronquíolos e alvéolos, sendo esta última região a mais crítica em termos de deposição de partículas.

Na Figura 72 é apresentada a fração de deposição das partículas em função do seu tamanho. Portanto, é possível observar que as partículas entre 10nm e 100nm são as mais críticas para deposição na região do pulmão e portanto são estes diâmetros controlados pela normativa européia.

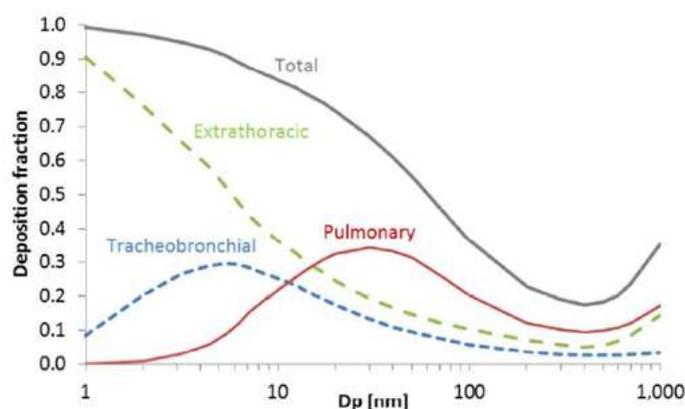


Figura 72. Fração de deposição de partículas sólidas em diferentes pontos do sistema respiratório humano em função do tamanho da partícula (Joint Research Center, 2014)

Em função do impacto negativo das partículas sólidas na saúde, este trabalho recomenda também a avaliação e adoção de medidas para redução das partículas sólidas de outros processos não relacionados à queima do combustível, como sistemas de freios e desgaste de pneus.

Estudos recentes demonstram que as emissões de partículas sólidas relacionadas a sistemas de freios e pneus têm contribuição similar aos processos de queima de combustíveis, assim como resuspensão de partículas já depositadas no solo, podendo ter sua contribuição classificada como (Joint Research Center, 2014):

- Partículas provenientes do desgaste do sistema de freios (16 a 55%)
- Partículas provenientes do desgaste dos pneus (5 a 30%)
- Resuspensão de partículas do solo (28 a 59%)

As partículas de freio têm contribuição muito maior nos grandes centros se comparado a rodovias. A Figura 73 apresenta a distribuição da emissão de partículas entre o tráfego urbano (esquerda) e o tráfego em rodovia (direita), incluindo as emissões de escapamento. Vale ressaltar que neste estudo específico, realizado na Europa, as emissões do desgaste de pneus estavam incluídas na parcela de resuspensão.

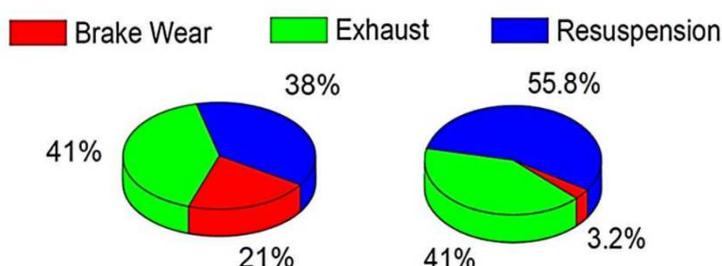


Figura 73. Contribuição de diversas fontes para emissões de partículas em trechos urbanos (direita) e trechos rodoviários (esquerda) (Joint Research Center, 2014)

As partículas, em especial dos sistemas de freios e resuspensão, são constituídas de diversos componentes químicos, Fe, Cu, Zn entre outros e portanto, em algumas condições, são mais críticas à saúde que as partículas formadas pelo Carbono da combustão. Em função das contínuas quedas das emissões de particulados dos processos de combustão, é esperado o aumento da contribuição relativa destas emissões relacionadas a desgaste do sistema de freios e pneus.

Como já citado neste trabalho, para alcance das metas estabelecidas em especial para eficiência energética, a partir de 2022 deverá haver um aumento considerável de modelos equipados com sistema de injeção direta de combustível. Portanto, é indicado o estabelecimento de limite para emissão de número de partículas além da massa e que também seja avaliada e determinada política sobre o controle das emissões relativas ao desgaste dos sistemas de freio e pneus.

As novas fases do PROCONVE prevêem o controle do NMOG com foco especial na redução da formação de ozônio troposférico. Pois nas camadas altas da atmosfera terrestre o gás (O₃) é um filtro contra raios solares nocivos. Já quando gerado próximo a superfície e

respirado é um oxidante que potencializa inflamações do aparelho respiratório. Todos os combustíveis aplicados comercialmente no Brasil para veículos de passeio, tem potencial de formação de ozônio em diferentes proporções conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Índice de máximo incremento em massa de ozônio de determinados compostos orgânicos (IBAMA IN 22/20)

| | NONMHC | | | NMOGA22 |
|---|------------|---------------|------|------------|
| | Gasool A22 | Gasool A11H50 | EHR | Gasool A22 |
| Máxima reatividade (g de O ₃ /g composto orgânico) | 4,70 | 3,93 | 3,16 | 4,86 |

Uma das formas de reduzir consideravelmente as emissões de NMOG, é atenuar as emissões de hidrocarbonetos não queimados através da introdução de tecnologias de partida a frio, pois a grande parte da emissão destes gases ocorre na fase fria de funcionamento do veículo. É um ponto de atenção para o desenvolvimento dos novos veículos flex.

4.3 Veículos pesados

4.3.1 – Emissões veiculares e eficiência energética veículos pesados – visão Brasil

O Brasil implementou as normas de emissões PROCONVE P7, equivalente à EUROV em 2012, revogando o PROCONVE P5, equivalente ao EUROIII. Esta etapa foi um salto tecnológico considerável, reduzindo significativamente as emissões locais, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP).

As principais tecnologias introduzidas foram os sistemas de pós tratamento, tais como DOC, DPF, SCR e sistema de recirculação de gases (EGR), já explorados nesta dissertação. Melhorias significativas no combustível, como a redução do nível de enxofre e adoção de OBD para garantir o funcionamento destes sistemas (ICCT, 2019).

Juntamente com a adoção do Proconve P7, o governo brasileiro aumentou os esforços para redução dos GEE implementado o aumento gradual de biodiesel misturado ao Diesel comercial, conforme descrito no capítulo 2. Vários testes foram realizados pelos fabricantes de autopeças,

motores e veículos, indicando que há barreiras técnicas consideráveis para a adoção de misturas acima de 15%, dentre os quais:

- **Oxidação do Combustível:** Em função do biodiesel ser um combustível oxigenado, possui baixa resistência à oxidação causando deterioração das propriedades do combustível, formação de borra e verniz nos componentes do sistema de injeção, causando em casos mais sérios o entupimento do sistema (Silva, 2019).
- **Higroscopia:** A absorção de água presente na atmosfera é uma das características do Diesel Comercial. A concentração de água no combustível facilita a proliferação de culturas microbianas especialmente em misturas com combustível renovável, favorecendo a oxidação em componentes metálicos em contato com o combustível.
- **Degradação do óleo lubrificante:** O biodiesel aumenta a acidez e o consumo da reserva alcalina do óleo lubrificante, altera a viscosidade, prejudicando a lubrificação do motor, aumentando o desgaste das partes móveis. Aumenta a formação de depósitos nos componentes e promove oxidação das partes metálicas



Figura 74. Componentes do sistema de injeção de um motor diesel após funcionamento com mistura de biodiesel acima de 15% (SILVA, 2019)

Os sistemas de pós tratamento, como DOC e SCR, também sofrem redução da eficiência de conversão dos gases em função da presença de elementos da composição do biodiesel, como

Na(Sódio)+K(Potássio), Ca(Cálcio)+Mg(Magnésio) e P(Fósforo) (Automotive Business, 2020).

Quanto à eficiência energética, não houve antes da entrada do programa ROTA2030, previsão para metas voltadas aos veículos pesados. No entanto, sempre houve grande atenção do mercado no quesito consumo de combustível, pois este tem impacto direto no custo operacional do veículo.

A partir de entrada do ROTA2030, limites serão definidos para veículos pesados, que deverão entrar em vigor em 2032, conforme já descrito no capítulo 3 desta dissertação.

4.3.2 – Visão futura - tendências tecnológicas brasileiras para pesados.

Com a entrada do PROCONVE P8 no início de 2022, houve novas reduções significativas nas emissões de NO_x e MP, bem como a introdução da contagem de partículas e a verificação das emissões em condições reais de tráfego, gerando a necessidade de introdução de tecnologias adicionais já estabelecidas na fase PROCONVE P7.

Uma das necessidades evidentes é a introdução da tecnologia denominada *extended SCR*, que é um sistema integrado de DOC, DPF e SCR em um único componente, garantindo a otimização dos custos e eficiência do produto, conforme demonstrado na Figura 75.



Figura 75. Sistema de pós tratamento Proconve P8 - EURO VI (LODETTI, 2018)

Para algumas aplicações mais críticas em termos de emissão de NO_x, a tecnologia de recirculação de gases de escapamento (EGR) integrado com sistema de arrefecimento dos gases (*cooler*) também deverá ser implementada.

Com todos estes dispositivos para apoiar a redução das emissões locais, o sistema de OBD passará por evolução nesta nova fase, realizando o diagnóstico contínuo de funcionamento destas tecnologias garantindo a manutenção dos níveis de emissões.

Para eficiência energética, os novos limites entrarão em vigor somente em 2032, no entanto, os veículos equipados com os motores nível PROCONVE P8, serão a base para determinação deste limite, uma vez, que a partir de 2022 os fabricantes deverão informar o nível de emissão de CO₂ e consumo específico em [g/kwh]. Com esta informação através do software VECTO, será possível determinar o consumo energético das aplicações.

Neste sentido várias otimizações são possíveis buscando melhoria da eficiência energética dos veículos comerciais. Programas realizados recentemente nos Estados Unidos e Europa determinaram um mapa de tendência tecnológicas possíveis de serem aplicadas neste segmento e são divididas em três categorias, sendo elas, motores, transmissões e carrocerias/carretas.

Analisando o estudo realizado pelo ICCT sobre tecnologia, apresentado na Figura 76, no campo motor é possível observar que ainda há espaço para melhorias no atrito e perdas mecânicas em especial no conjunto de acessórios, mas a tecnologia com maior potencial relacionada ao motor de combustão é o aproveitamento da energia de escapamento através de *turbocopounding* e sistemas de *waste heat recovery*. Estes são sistemas que utilizam o fluxo de gás de escapamento dos motores para gerar energia adicional ao veículo, seja acoplando o sistema ao virabrequim do motor para geração de potência adicional, ou a um gerador para disponibilização de energia elétrica aos sistemas veiculares.

No campo das transmissões, a integração com motores elétricos em sistemas híbridos pode gerar aumento considerável de eficiência em até 8%. No campo da aerodinâmica estão as maiores oportunidades, pois melhorias em pneus reduzindo à resistência a rolagem e otimizações aerodinâmicas podem trazer reduções de consumo acima de 8%.

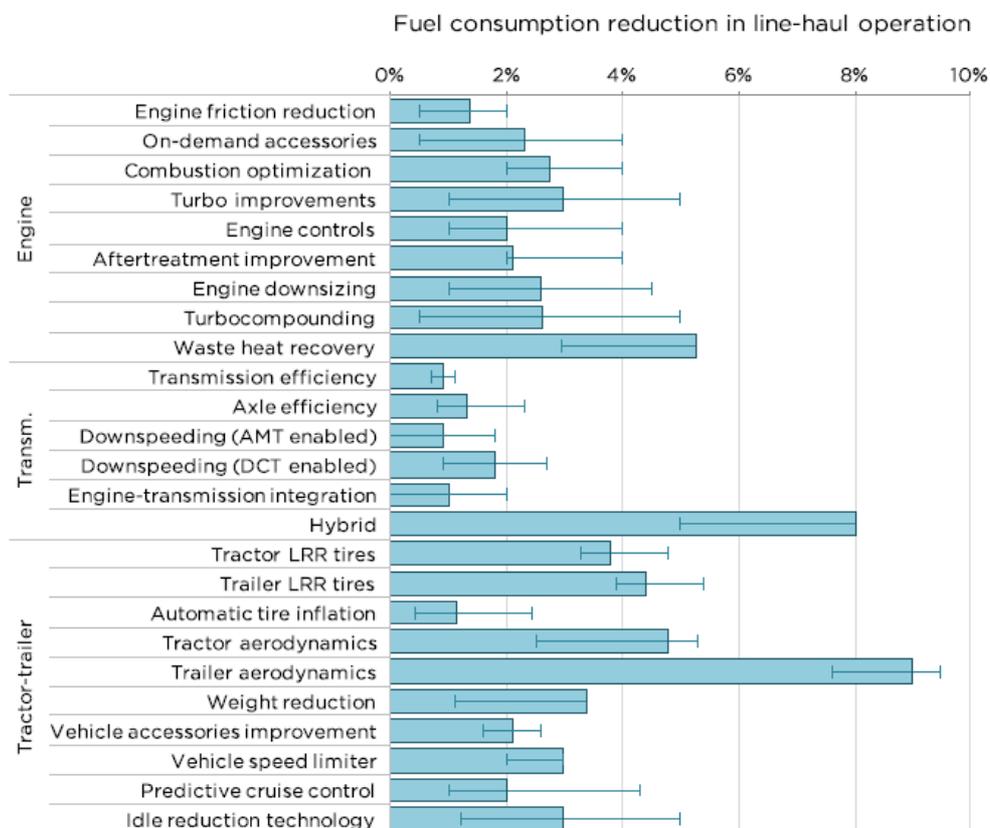


Figura 76. Tecnologias para melhoria da eficiência energética em veículos pesados (ICCT, 2017)

Nos veículos comerciais, sejam ônibus, caminhão ou máquinas, uma grande parcela do custo operacional são os gastos com combustível. Portanto, reduções nos níveis indicados anteriormente podem viabilizar a introdução destas tecnologias, pois o usuário terá a possibilidade de amortizar esta implementação pela redução do consumo. Associado a isso, estão as emissões de GEE, gerando assim no todo, benefício econômico e ambiental.

4.3.3 – Proposta para programas já definidos e futuros

A Fase P8 do PROCONVE permitirá ao Brasil reduzir as distâncias tecnológicas de outros países, no que se refere ao controle de emissões, ao possibilitar a avaliação dos veículos em condições de laboratórios e seu desempenho em uso.

No entanto, ainda existe uma falha no controle das emissões locais, pois não há fiscalização sobre os veículos em uso. Mesmo havendo previsão legal sobre os programas de

inspeção e manutenção, os governos, sejam no âmbito estadual ou municipal não lograram sucesso na implementação destes programas, pois esbarram nos custos associados. No entanto, diversos estudos indicam não fazer sentido desenvolver um veículo que atenda os níveis de emissões quando novos e não garantir a manutenção dos níveis de emissões durante a vida útil, pois continuarão a ter impacto direto na saúde humana. De acordo com a U.S Environmental Protection Agency, estes problemas de saúde causados pelas emissões locais, refletem em custos públicos e privados diretos, como a perda de produtividade, atividades restritas ou morte prematura e despesas médicas. (Miraglia, S. Gouveia, N., 2014).

Com base nisso, é recomendada a implementação do programa de inspeção e manutenção de veículos comerciais, especialmente, os operados em centros urbanos.

O incentivo ao aumento do percentual de biocombustível misturado ao combustível fóssil convencional já é uma realidade, pois conforme descrito neste trabalho, o governo federal já decretou o aumento gradativo de biodiesel no diesel até o limite de 15%. No entanto, em função de restrições técnicas, níveis acima deste percentual podem prejudicar o funcionamento dos motores. Uma possível solução é a adoção da mistura por HVO (*hydrogenated Vegetable Oil*). Neste conceito o óleo vegetal ou gordura animal, é transformada em um hidrocarboneto com características similares ao Diesel fóssil, sendo considerado um combustível *drop-in*, não contendo oxigenados em sua composição, o que garante boa resistência à oxidação e total aderência em mistura com o Diesel fóssil, auxiliando da mesma forma na redução das emissões de GEE.

Conforme pesquisas realizadas pelo grupo Daimler, o HVO poderia substituir até 100% do Diesel fóssil. Testes realizados indicam uma redução no consumo de combustível na ordem de 3% no ciclo de emissões estacionário (ESC) e 2% no ciclo de emissões transiente (ETC), em motor diesel modelo OM926LA, conforme apresentado na Figura 77. Este resultado é atribuído ao maior índice de cetano do HVO em comparação ao diesel comercial.

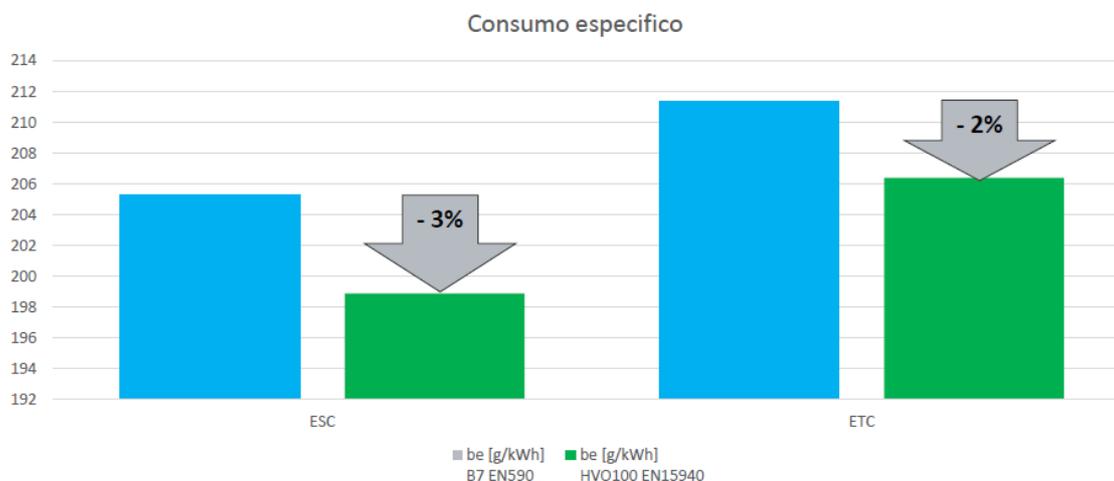


Figura 77. Consumo específico comparativo entre combustível HVO e Diesel B7Europeu (AEA, 2018)

Além da capacidade de redução dos GEE, as emissões locais também são reduzidas com a aplicação deste combustível. É possível observar reduções na ordem de 16% na emissão de NO_x, 20% na emissão de CO e até 30% no material particulado, conforme apresentado na Figura 78. Esses valores podem variar dependendo da aplicação e características do sistema de pós tratamento, no entanto, são valores expressivos, especialmente quando se considera emissões em grandes centros.

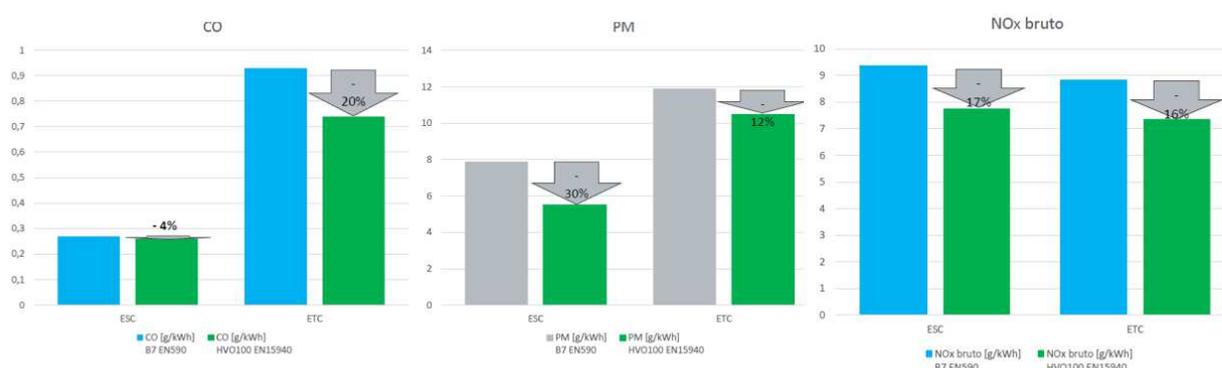


Figura 78. Comparativo de emissões e consumo entre combustível HVO e Diesel B7 Europeu (AEA,2018)

Quanto à eficiência energética para veículos pesados, conforme já indicado neste trabalho, o ROTA2030 prevê somente em 2032 a definição de meta para esta classe de veículos.

Uma recomendação deste trabalho é a indicação de metas desafiadoras para que de fato sejam aplicadas no mercado tecnologias que apoiem a redução dos custos operacionais e a redução das emissões de GEE. Seria adequado seguir as metas definidas na Europa, onde haverá a exigência de que os veículos comerciais vendidos em 2030 sejam 30% mais eficientes que os veículos comercializados em 2019 (União Europeia, 2019). Sendo assim é possível indicar para o Brasil que os veículos comercializados em 2032 sejam 30% mais eficientes que os vendidos em 2022, que atendem PROCONVE P8, equivalente ao EUROVI.

Tal meta é possível, considerando os estudos realizados pelo ICCT (Figura 79), tomando como base um caminhão acoplado com carreta modelo 2015, aplicando tecnologias existentes, tem potencial para reduzir o consumo de combustível em até 43% (ICCT, 2017).

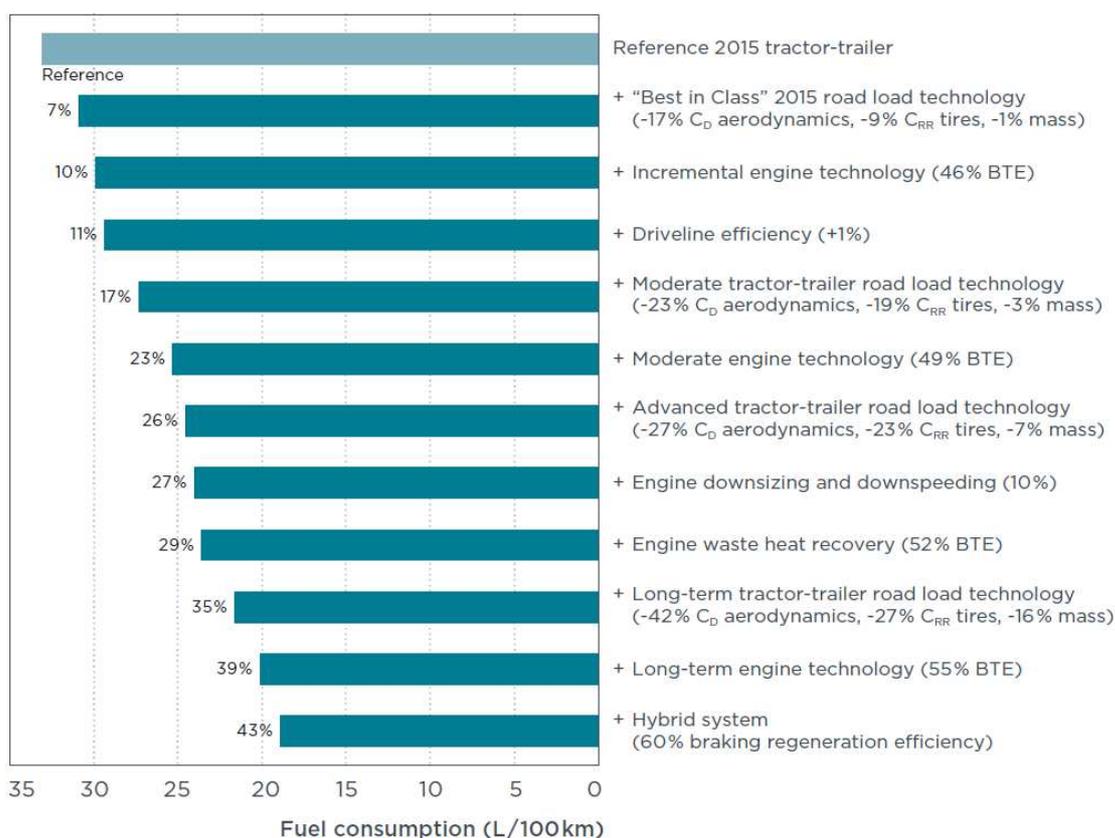


Figura 79. Potencial de redução de consumo em uma aplicação de caminhão com implemento (ICCT,2017)

Além das metas de eficiência energética, é importante considerar a adoção do conceito poço à roda. Isto conectará o programa ROTA2030 com o RENOVABIO, apoiando a redução efetiva das emissões de gases de efeito estufa e diminuição da dependência de combustíveis fósseis.

4.4 Sumário – cenário brasileiro (médio – longo) prazo.

A adoção de uma única rota tecnológica para todos os segmentos do transporte é algo que não faz sentido, pois a aplicação tecnológica depende das condições regionais de disponibilidade de recursos e em especial das necessidades ambientais e econômicas de cada segmento. Analisando a realidade brasileira, com foco no médio e longo prazo, as rotas tecnológicas julgadas adequadas para o Brasil, são a seguir apresentadas:

4.4.1 – Aplicações urbanas

A adoção de tecnologias como veículos híbridos e elétricos podem trazer reduções significativas das emissões de NO_x, MP e HC que são os principais causadores dos problemas associados à poluição nas grandes cidades.

Para o transporte urbano, o metrô se destaca pela sua capacidade de unir pontos estratégicos da cidade com a menor distância entre trajetos e evitando a criação de engarrafamentos, mas o custo por metro do investimento inicial é muito alto e há outras alternativas já implementadas como os corredores de ônibus que tem necessidade de investimento menor. Neste segmento a adoção de ônibus para transporte coletivo movido por sistemas híbridos a biocombustível é uma solução ambientalmente adequada e com custo de propriedade possível de realizar no médio prazo.

Ônibus puramente elétricos, sejam os já existentes trólebus, como na cidade de São Paulo, ou mesmo os elétricos à bateria ou célula combustível, são soluções adequadas para redução das emissões locais em grandes cidades Brasileiras que, associado à baixa emissão de CO₂eq da matriz energética brasileira, pode colaborar também com a redução das emissões de GEE.

Nesta mesma linha, veículos utilitários de carga e veículos de passeio que realizam percursos diários curtos (<200km), poderão adotar tecnologias híbridas movidas à

biocombustível, elétricos à bateria ou mesmo a célula a combustível, contribuindo da mesma forma que os ônibus urbanos à redução das emissões locais.

Em especial para as aplicações urbanas, com objetivo de reduzir os impactos das emissões locais na saúde pública, é recomendada a adoção de programa de inspeção e manutenção de veículos em uso, pois experiência recente com a adoção deste programa na cidade de São Paulo demonstrou a redução do impacto ambiental dos veículos enquanto o programa estava ativo. Resultados demonstraram que os veículos desde o primeiro ano de uso, necessitam ser inspecionados, pois estão susceptíveis a variações de grande amplitude nas emissões em caso de problemas, elevando as emissões de dez à vinte vezes superiores aos níveis normais (Branco, G. 2013).

Na Figura 80 é possível observar os benefícios claros da inspeção na garantia da conformidade dos veículos aos seus níveis de emissões. Esse exemplo é referente aos resultados do programa de I/M da cidade de São Paulo, apresentando as médias de emissões dos veículos aprovados, dos veículos reprovados e destes reinspecionados após manutenção, sendo enquadrado em conformidade.

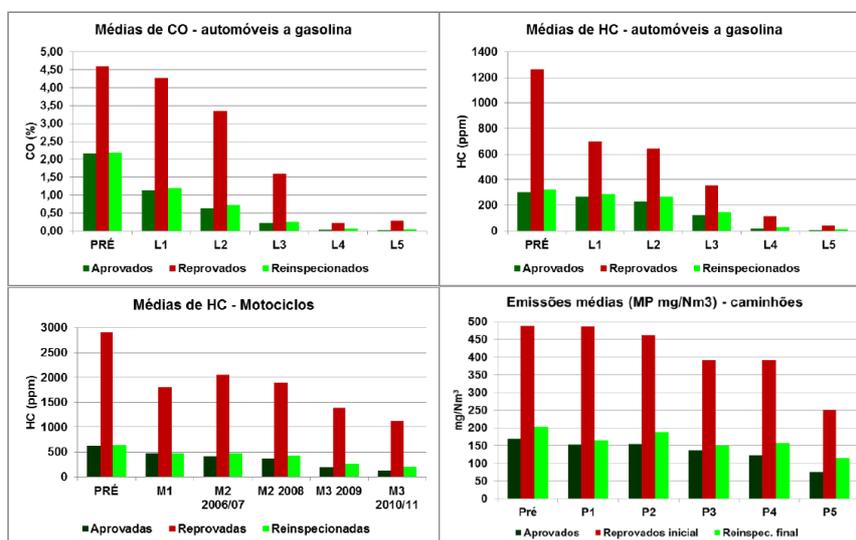


Figura 80. Média das Emissões dos Veículos por Tecnologia, tipo e resultado da inspeção (Branco, G. 2013)

4.4.2 – Aplicações rodoviárias.

Para as aplicações rodoviárias com foco em longas distâncias, os sistemas convencionais a combustão tem ótimo custo-benefício associado à disponibilidade de infraestrutura de

abastecimento e não há problemas associados às emissões locais, pela baixa densidade demográfica em torno das rodovias e baixo tempo de permanência do veículo em um mesmo local.

Neste segmento, a maior contribuição pode estar associada apenas a redução dos GEE. Neste caso a ampliação da oferta e aplicação de biocombustível, como já indicado neste trabalho é o melhor caminho para um transporte sustentável, pois a adoção de veículos elétricos necessitará grandes de investimentos em infraestrutura de recarga. Estima-se um custo médio para construção da infraestrutura de recarga na faixa entre US\$ 1.000,00 à US\$ 2.000,00 por veículo (EPE, 2018).

5 CONCLUSÃO

As emissões de GEE entre o período de 1950 a 2011 quadruplicaram em relação ao período de 1750 a 1950, indicando que as mudanças relacionadas ao crescimento econômico nas últimas décadas têm impacto direto nestas emissões e como consequências, o aumento da temperatura combinada dos oceanos e continentes.

As emissões locais também contribuem para redução da qualidade de vida nos grandes centros, em especial as emissões de Material Particulado, Óxidos de Nitrogênio e gases reativos à formação de Ozônio.

O setor de transporte tem contribuição significativa para as emissões locais e GEE, portanto há grande esforço na implementação de legislações automotivas com avanços consideráveis nas últimas décadas, garantindo a evolução tecnológica dos veículos a cada nova etapa, possibilitando reduções significativas destas emissões através da implementação de novas tecnologias para os veículos ou combustíveis.

Em especial, a última fase da legislação automotiva brasileira alterou de forma significativa o modelo adotado de curta previsibilidade, pois com a definição do ROTA2030 e a última fase do PROCONVE, houve definição de visão de longo prazo, garantindo planejamento para o governo no campo da infraestrutura e para a indústria com o desenvolvimento e introdução de novas tecnologias. No entanto, ainda é necessário criar integração entre os programas, PROCONVE, ROTA2030 e RENOVABIO, reduzindo o distanciamento tecnológico dos veículos brasileiros em relação aos países desenvolvidos e em especial agregando valor as tecnologias relacionadas ao biocombustível.

Estes programas indicados acima têm foco em veículos novos, no entanto, não há programas vigentes de inspeção e manutenção de veículos em uso (I/M) nos grandes centros, reduzindo consideravelmente a efetividade das novas tecnologias em contribuir na redução das emissões locais. Portanto esta dissertação recomenda a adoção destes programas com objetivo de garantir os benefícios provenientes das tecnologias na melhoria da qualidade do ar, beneficiando a sociedade, resultando na redução dos gastos com saúde pública, revertendo para o subsídio destes programas.

Este trabalho também recomenda a inclusão do controle de emissões de números de partículas provenientes da combustão para veículos leves dotados de tecnologia injeção direta,

baseado na legislação europeia e elaboração de estudos dos impactos de partículas provenientes do desgaste do sistema de freios e pneus, pois esta emissão contribui consideravelmente com a queda da qualidade do ar.

Em relação aos combustíveis, para veículos do ciclo Otto recomenda-se a introdução de combustíveis de alta Octanagem, com nível RON próximo a 100 em função da melhora significativa do desempenho em condições de campo, habilitando novas tecnologias e reduzindo o consumo da frota.

Para os veículos do ciclo Diesel, para garantir a introdução contínua de matriz renovável em substituição à fóssil, o HVO pode ser implementado como complemento ao Biodiesel em níveis acima de 15% de mistura de Biodiesel, pois é um combustível *drop-in* ao Diesel fóssil não necessitando investimentos em novas tecnologias.

Para apoio na redução dos gases de efeito estufa, através da ampla aplicação de biocombustíveis, este trabalho recomenda a introdução do conceito da análise da emissão de CO₂ poço à roda, considerando a produção, transporte e uso dos combustíveis, com metas estabelecidas junto à eficiência energética em 2027.

Em relação às metas de eficiência energética em veículos pesados, recomenda-se a aplicação do conceito europeu, fixando meta em 2032 de redução do consumo em 30% em relação ao consumo reportado para veículos pesados em 2022, sendo esta meta possível de ser alcançada em função das tecnologias disponíveis para o conjunto motor, transmissão e otimizações aerodinâmicas.

Para veículos leves, a adoção de nova meta em 2027 com redução de consumo de -11% em relação a 2022 garantirá a continuidade da introdução de novas tecnologias apoiando a competitividade tecnológica do veículo brasileiro.

Por fim, a introdução de novas tecnologias ocorrerá de acordo com as necessidades impostas por legislações, mas levando em consideração o custo de aplicação. Com isso, fica evidente a criação das novas legislações baseadas em análises da necessidade de cada segmento, separando veículos que operam em grandes centros dos que operam em longas distâncias, levando em consideração a infraestrutura existente e a disponibilidade de alternativas como o biocombustível, garantindo obter transporte sustentável e com custo acessível à sociedade.

Considerando essa dissertação poderá evoluir para futuros estudos, algumas sugestões são indicadas:

- Explorar o impacto da introdução das fases PROCONVE L7 e P8 na qualidade do ar dos grandes centros brasileiros, com objetivo de indicar os melhores caminhos para as futuras legislações.
- Analisar o potencial de combustíveis renováveis provenientes de novas fontes de biomassa e sua aplicação como fator para neutralização das emissões de GEE do transporte.
- Estudar o potencial de utilização do hidrogênio verde e sistemas de captura de carbono para geração em larga escala de combustível sintético com baixa pegada de carbono.
- Explorar potencial de melhoria nas características dos combustíveis atuais com objetivo de gerar impacto imediato na redução das emissões gasosas locais e globais da frota brasileira de veículos.
- Analisar o ciclo de vida de diferentes tecnologias automotivas, visando quantificar o real impacto na emissão de GEE, permitindo comparação direta entre elas.

Referências

- Automotive Council UK, Lightweight Vehicle and Powertrain Structures Roadmap, 2017
- Association for Emissions Control by Catalyst. Gasoline Particle Filter (GPF), 2017.
- Almeida Filho, Gilberto. PROGRAMA INOVAR-AUTO: Atendimento das metas de eficiência energética e suas externalidades / G. Almeida Filho – Versão Corr. – São Paulo, 2018.
- Bandivadekar, A. Et all. On the Road in 2035, Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions. Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- Barbosa, Tatiane Aparecida Fernandez – Pneu Verde – Desafios para equilibrar conforto, segurança e baixo consume de combustível. São Caetano do Sul, SP, CEUN-CECEA, 2013.
- BLASING, T.J. Recent Greenhouse Gas Concentrations. CDIAC – Carbon Dioxide Information Analysis Center – Oak Ridge National Laboratory, 2018.
- Brunetti, Franco. Motores à combustão Interna VOL I e II, São Paulo - Blucher, 2012
- Branco, G. Benefícios Ambientais e Resultados do Programa de Inspeção e Manutenção de São Paulo, SIMEA, 2013.
- Baran, Renato A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação do Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade / Renato Baran. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.
- Bertoncini, Rafael Bruno. Estudo de melhoria da eficiência energética de um veículo flex fuel no contexto do Inovar-Auto. Centro Universitário FEI, 2014.
- Bizzo, W. Geração, Distribuição e Utilização de Vapor, UNICAMP - EM 722, 2013.
- Board on Energy and Environmental Systems · Division on Engineering & Physical Sciences. Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles, June 2015
- Carvalho, Carlos H. EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE, IPEA, 2011.
- CARB, Technical Analysis of Vehicle Load Reduction Potential for Advanced Clean Cars, 2015.
- Carvalho, Carlos H. Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros. IPEA, 2011

CETESB. Emissões veiculares no estado de São Paulo, 2015.

CONAMA. Resolução 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.

DRUMM, Fernanda C, et all. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

Duchiade, Milena P. Poluição do ar e doenças respiratórias: uma revisão. Departamento de Epidemiologia e Métodos Quantitativos em Saúde da Escola Nacional de Saúde Pública, 1992.

Empresa de Pesquisa Energética. Estudos de Longo Prazo, Eletromobilidade e Biocombustíveis, 2018.

European Comission Impact Assesment SEC (2008) 2860 – When measured according to the test methods sets out in regulation EC 1222/2009.

Freire de Mello, L.; Hogan, D J. População, consumo e meio ambiente. In: Hogan, D J. (org). Dinâmica populacional e mudança ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro. Campinas: NEPO-UNICAMP, 2007.

Fuel Cell Today. Fuel Cell Electric Vehicles: The Road Ahead, 2013.

GILLESPIE, T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 1.ed Warrendale: SAE International, 1992.

Giechaskiel, Barouch & Manfredi, Urbano & Martini, Giorgio. Engine Exhaust Solid Sub-23 nm Particles: I. Literature Survey. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2014.

Green Car Congress. *Lear Announces New Seating System with 25lb Weight Savings* <http://www.greencarcongress.com/2010/05/lear-20100520.html> - Acessado Abril 2020

Green Car Congress. *Lighter Weight Automotive Sound Insulation for Improved Fuel Economy.* <https://www.greencarcongress.com/2007/10/lighter-weight-.html> - Acessado Abril 2020

Green Car Congress. *Borealis Nopol PP Aids BMW's Lower Weight Dashboard.* <http://www.greencarcongress.com/2010/03/nopol-20100316.html> - Accessed Abril 2020.

Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.

Heuss,Ruth. Et All. Lightweight, heavy impact. Mackinsey, 2012.

J.P. Howell, Sustainable Vehicle Technologies, 2012

Joint Research Center. Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM, 2014.

ANFAVEA. O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil, 2021.

Junior, O., Souza, M. A regulamentação como indutora de tecnologias ambientais para a redução de emissões tóxicas em veículos leves no Brasil. FGV, 2018.

IBAMA, Instrução Normativa IBAMA 22/2020 - Regulamenta a determinação das emissões de gases orgânicos não metano (NMOG) provenientes do escapamento de veículos rodoviários leves de passageiros e leves comerciais, 2020.

ICCT, Compliance & Enforcement Programs for Vehicle Emissions and Energy Efficiency, 2017.

ICCT, G20 Regulations Impact Analysis, 2017.

ICCT, Status of policies for clean vehicles and fuels in select G20 countries, 2015.

ICCT, Impacts of World-Class Vehicle Efficiency and Emissions Regulations in Select G20 Countries, 2017.

ICCT, Light Duty Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards, 2017.

ICCT, Deficiências no Programa Proconve P-7 Brasileiro e o caso para normas P-8, 2017.

ICCT Heavy-duty vehicle fuel efficiency potential in the EU, 2017.

ICCT, Global Baseline Assessment of Compliance and Enforcement Programs for Vehicle Emissions and Energy Efficiency, 2017.

International Energy Agency IEA, making cars more fuel efficient, 2017.

IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014.

INMETRO, Portaria n.º 365, de 22 de julho de 2015.

Lopes, Daniel Gabriel. Determinação dos parâmetros térmicos de um sistema de purificação de hidrogênio para aplicação em células a combustível. Campinas, SP, 2005.

Lyons, Allen. On-Board Diagnostics (OBD) Program Overview. CARB, 2015.

LINDSEY, Rebecca. Atmospheric Carbon Dioxide. NOAA – National Centers for Environmental Information, 2020.

Lodetti, J. Cenários futuros da legislação de emissões e soluções tecnológicas para atendimento dos novos limites. SAE Brasil Fórum Diesel, 2018.

MDIC, Portaria nº74 de 26/03/2015 - Estabelece regulamentação complementar do Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVARAUTO, regulamentado pelo Decreto nº 7.819, de 3 de outubro de 2012, e dispõe sobre procedimentos a serem observados para o cumprimento da meta de eficiência energética.

Miraglia, S., Gouveia, N. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras, USP, 2014.

Molina, Mario. Molina, Luisa. Megacities and Atmospheric Pollution, Journal of the Air & Waste Management Association, 2004.

MOLIN, Luiz C. Aquecimento Global: Uma Visão Crítica. Revista Brasileira de Climatologia, Maceió Universidade Federal de Alagoas. 2008.

MOLIN, Luiz C. Desmitificando o Aquecimento Global. Artigo. Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, 2008.

Paixão, Edson Vieira. Inspeção veicular: Contribuição do catalisador, UNICAMP, 2013.

Petrobras. Manual Técnico Gasolina S50, 2014.

Rodrigues, Thiago M. “Downsizing” em motores de combustão interna: uma abordagem de inovação tecnológica. São Caetano do Sul, SP, 2014.

Roland Berger. Integrated Fuels and Vehicle Roadmap to 2030+, 2018.

Santana, Simone Simões de Mello. Emissões gasosas de combustão diesel e de biodiesel utilizando motor EuroV e sistema de pós-tratamento SCR em dinamômetro de bancada – Curitiba, 2015.

Samaras, Z, Vouitsis, I, Future automotive efficiency and exhaust emissions challenges - Emphasis on nanoparticle Real Driving Emissions - Aristotle University of Thessaloniki, 2005.

Silva, Everton L., Propostas para Otimização do Consumo Energético em Motores de Combustão Interna do Ciclo Otto Através da Redução das Perdas por Atrito. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade de São Paulo, 2013.

Silva, Everton L., Combustão ou Eletrificação, perspectiva do Poço à Roda. Salão do Automóvel, 2018.

Silva, Everton L., Biodiesel Application – Systemic Overview. 2º Workshop da Rede de Biocombustíveis (RBIOCOMB), 2019.

Schumann, Florian, Sarikoc, Fatih, Buri, Stefan, Kubach, Heiko, Spicher, Ulrich, Potentials of Spray-Guided Gasoline Direct Injection for Reduction of Fuel Consumption and Simultaneous Compliance with Stricter Emission Regulations. International Journal of Engine Research, 2013.

Shirawa, N. Resultados de uso do HVO em veículos na Europa. Workshop HVO - AEA, 2018.

The European Parliament. Regulation (EU) 2019/1242 setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of and Council Directive 96/53/EC.

TRIELLI, M. **Motores de Combustão interna**. Especialização em Engenharia Automotiva, 2012, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Não Publicado.

Weronka, Fernando Marcos. Inventário da emissão do material particulado e gasoso proveniente de motores euro V: Eficiência dos sistemas de pós-tratamentos EGR e SCR – Curitiba, 2015.

Zhiqun Yuan, Yiping Wang. Effect of underbody structure on aerodynamic drag and optimization. 1Xiamen University of Technology, 2017.

<https://thetiredigest.michelin.com/michelin-ultimate-energy-tire> - Michelin, Ultimate energy tire - acessado em Abril, 2020.

https://dieselnet.com/tech/cat_doc.php, acessado em Abril, 2020.

<https://www.mte-thomson.com.br/noticias/scr-catalisador-seletivo-redutor/>, acessado em Março, 2020.

<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, acessado em Maio 2020.

<https://www.automotivebusiness.com.br/noticia/30668/biodiesel-ameaca-elevar-emissao-de-poluente-em-motor-euro-6>, acessado em Junho, 2020.

<http://www.oica.net/category/sales-statistics/>, acessado em 03 de Janeiro de 2022.