



DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DO TESTE *REAL DRIVE EMISSIONS* NA REALIDADE BRASILEIRA

Airton Giongo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro

Junho de 2019

DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DO TESTE *REAL DRIVE EMISSIONS* NA
REALIDADE BRASILEIRA

Airton Giongo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Prof^a. Andrea Souza Santos, D.Sc.

Prof^a. Luciana Maria Baptista Ventura, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JUNHO DE 2019

Giongo, Airton

Desafios para a Implantação do Teste *Real Drive Emissions* na Realidade Brasileira / Airton Giongo – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVI, 112 p.; il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D’Agosto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 107-112.

1. Real Drive Emissions. 2. Emissões. 3. Euro VI.
I. D’Agosto, Márcio de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Dedico esse trabalho a Deus, à minha família e a todos os pesquisadores que buscam,
de alguma forma, ajudar a preservar o meio ambiente e deixar um legado virtuoso para
as próximas gerações.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que está sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus pais que com muito esforço me conduziram pelo melhor caminho.

À minha esposa Carina pelo apoio e pela paciência e pela torcida.

Aliás, agradeço aos meus filhos, à minha mãe e à minha mulher, que tantas vezes abriram mão do tempo com seu pai/filho/marido em favor desse trabalho, e que foram fonte de inspiração para manter a força até o fim.

Ao Professor Marcio de Almeida D'Agosto pelos ensinamentos e por acreditar, aceitando o desafio de orientar este trabalho.

A todos os professores do PET, que em suas disciplinas, transmitiram o melhor de seus conhecimentos com competência, paciência, sabedoria, humildade e muitas outras virtudes que os fazem ser referências importantes que se leva para a vida.

Ao PET, de forma particular ao corpo docente pela excelência no ensino, à Sra. Jane e à Sra. Helena pelo suporte administrativo e apoio.

Aos colegas do curso que de uma ou de outra forma trocaram experiências, ajudaram a sanar dúvidas, fizeram companhia nos estudos, enfim, amigos com quem tive o privilégio de compartilhar essa caminhada e trocar conhecimentos.

Às professoras convidadas Andrea Souza Santos e Luciana Maria Baptista Ventura, que aceitaram compor a banca de avaliação.

À Petrobras, que disponibilizou recursos, me incentivou, concedeu horários e proporcionou diversas condições favoráveis para que esse trabalho fosse desenvolvido. Em especial agradeço ao meu superior imediato, engenheiro Marcilio Mariano de Carvalho, aos colegas engenheiros Rogério Nascimento de Carvalho, Tadeu Cavalcante Cordeiro de Melo, Pedro Caffaro Vicentini, Antônio Carlos Scardini Villela e Márcia Figueiredo Moreira pelas críticas, sugestões, revisões e suporte.

A todos os familiares, amigos e colegas que diversas vezes dividiram seu conhecimento, tempo e paciência para ajudar.

A conquista também é de cada um de vocês.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DO TESTE *REAL DRIVE EMISSIONS* NA REALIDADE BRASILEIRA

Airton Giongo

Junho/2019

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

Na Europa se observou que muitos veículos homologados em laboratório apresentam emissões maiores no seu uso real nas ruas, excedendo em muito os limites de aprovação. Por isso a União Europeia demandou o desenvolvimento de testes de emissões em condução real (RDE) para representar melhor o uso normal dos veículos europeus e, desde 2016, os incluiu como parte da homologação veicular na norma Euro 6/VI. No Brasil, o PROCONVE incluirá o RDE na homologação veicular das próximas fases da regulação de emissões, P8 e L7, a partir de 2022. Porém, no início serão usados os procedimentos europeus que podem não representar bem o uso dos veículos no Brasil e não ser eficaz para uso no controle da poluição. Por isso, o PROCONVE já definiu que esses procedimentos serão mais tarde substituídos por outros brasileiros.

Esse trabalho se presta a auxiliar a definição de rotas RDE para que o teste seja efetivo no Brasil, baseado numa pesquisa bibliográfica para identificar os principais desafios para obter a representatividade e propor soluções. Está dividido nos tópicos: congestionamento, emissões características do Brasil, temperatura e altitude, combustíveis de homologação e condições que afetam a severidade da rota.

Entre as soluções propostas estão: aumentar a parcela urbana do teste, reduzindo a sua velocidade média, aumentar o peso da partida a frio, medir os poluentes próprios da frota a gasolina e etanol, inserir correções para os dados em condições estendidas e incluir correções para condições com diferentes severidades (aclives, declives, ventos). Muitas dessas soluções ainda dependem de dados a serem levantados por outras pesquisas complementares, como se sugere ao final da conclusão.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CHALLENGES ON IMPLEMENTING REAL DRIVE EMISSIONS TEST ON BRAZILIAN CONDITIONS

Airton Giongo

June/2019

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transportation Engineering

In Europe, it has been observed that many vehicles that were tested in laboratory for type-approval show higher emissions in its actual use on the streets, far exceeding approval limits. That is why the European Union has demanded the development of real drive emission tests (RDE) to better represent the real use of European vehicles and since 2016 has include them as part of the type-approval in Euro 6 / VI standard. In Brazil, PROCONVE will also include the RDE on the vehicles type-approval in next phases of its emissions regulation, P8 and L7, from 2022. However in the beginning will be used European procedures that may badly represent the Brazilian conditions and fail to be effective on pollution control. Due to this, PROCONVE has already defined that these procedures will be later replaced by Brazilian ones.

This work is aimed to help to define a RDE route to become the test effective in Brazil, based on a bibliographical research to identify the main challenges to achieve this representativeness and propose solutions. It is organized in the following topics: traffic congestion, characteristic Brazilian emissions, temperature and altitude, fuels for type approval tests and conditions that affect the route severity.

Among the proposed solutions are: to increase the urban portion of the test and reduce its average speed, increase the weight of the cold start, to measure the specific pollutants for the gasoline and ethanol fleet, to include corrections in the extended conditions and in conditions with different severities (climb and descent slopes). Many of these solutions still rely on data that need to be determined by other complementary surveys, as is suggested at the end of the conclusion.

Sumário

Sumário.....	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Justificativa	3
1.3. Contextualização.....	3
1.4. Metodologia	7
1.5. Resultados Esperados	7
2. Revisão bibliográfica.....	8
2.1. Emissões veiculares	9
2.1.1. Efeito das emissões sobre a saúde humana	13
2.1.2. Tecnologias de controle de emissões – ignição por centelha	16
2.1.3. Tecnologias de controle das emissões – ignição por compressão	20
2.2. A regulação de emissões no Brasil	23
2.2.1. As novas fases da regulação de emissões.....	26
2.2.2. Os resultados da regulação de emissões	28
2.3. Medição de emissões em laboratório.....	29
2.3.1. Os procedimentos e ciclos de laboratório tradicionais	29
2.3.2. Os novos procedimentos e ciclos de laboratório	30
2.3.3. Deficiências dos testes de laboratório	32
2.4. Medição de emissões em condução real - RDE.....	33
2.4.1. Diferenças entre o RDE e o laboratório.....	35
2.4.2. Divergências entre testes de laboratório e mundo real	37
2.4.3. Vantagens dos testes RDE.....	38
2.4.4. Deficiências dos testes RDE.....	39
2.5. O RDE no mundo	40
2.5.1. Balanço da regulação europeia.....	40
2.5.2. Comparando ciclos x RDE na Europa.....	48
2.5.3. A representatividade dos ciclos e dos testes RDE na Europa.....	52

2.5.4.	Testes RDE de caminhões na China.....	61
2.5.5.	Uso de testes de emissões em condução real nos EUA.....	66
2.5.6.	Comparações de medições em rotas de RDE e em ciclos - EUA.....	67
2.6.	O RDE no caso brasileiro	69
3.	Desafios para a implantação do RDE no Brasil	70
3.1.	Desafio 1: segmentos de condução e partida a frio.....	72
3.2.	Desafio 2: emissões características do Brasil	78
3.3.	Desafio 3: temperatura e altitude	80
3.4.	Desafio 4: combustível de homologação	86
3.5.	Desafio 5: condições que afetam a severidade da rota	86
4.	Soluções propostas	87
4.1.	Proposta 1: segmentos de condução e partida a frio	88
4.2.	Proposta 2: emissões características do Brasil.....	92
4.3.	Proposta 3: temperatura e altitude.....	94
4.4.	Proposta 4: combustível de referência de homologação	96
4.5.	Proposta 5: condições que afetam a severidade da rota.....	97
5.	Conclusão	101
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	105
6.	Bibliografia.....	107

Lista de Figuras

Figura 1: Taxa de motorização de países selecionados em 2008, em veículos por 100 habitantes (Carvalho, 2011).	10
Figura 2: Distribuição dos poluentes locais e globais veiculares no Brasil (ANTP, 2018).	11
Figura 3: Sistema de pós-tratamento de emissões para a fase Euro VI (Dziubiński, 2016).....	21
Figura 4: Sistema de pós-tratamento EGR (Ventura, 2009).	23
Figura 5: Evolução da frota e emissões de CO, NO _x e PM de 1992 a 2012, adaptado de MMA (2013).	28
Figura 6: Diagrama de instalação do PEMS em um veículo para teste RDE.....	34
Figura 7: Equipamento PEMS montado em um veículo.	35
Figura 8: Regimes de operação do motor nos ciclos NEDC, US06 e no RDE (AVL, 2018a)....	39
Figura 9: Emissões reais dos veículos x limites Euro para veículos leves (TE, 2018).....	41
Figura 10: Distribuição de velocidades e acelerações nos ciclos NEDC, WLTC e no RDE (Donateo e Giovinazzi, 2017).	49
Figura 11: Distribuição de velocidades nos ciclos NEDC, WLTC e no RDE (Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016).....	50
Figura 12: Distribuição dos pontos de operação do motor nos ciclos NEDC, WLTC, US06 e no RDE (Puphunwivat, 2015).	51
Figura 13: Efeito sobre as emissões de CO ₂ e NO _x em função da diferença entre ciclos e RDE (Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016).	52
Figura 14: Condições dinâmicas de contorno para validação do teste RDE (ICCT, 2017).	58
Figura 15: Emissões de NO _x por classe e tecnologia (Huo <i>et al</i> , 2012).....	65
Figura 16: Comparação entre a estimativa de autonomia EPA e a velocidade média do teste RDE (Rykowski <i>et al</i> , 2005).	68
Figura 17: Distribuição das viagens motorizadas na RMBH (Costa, 2018).	74
Figura 18: Tempo médio de viagens por porte do município e total em 2015 (ANTP, 2018)....	75
Figura 19: Distância média por viagem e modo por porte de município e total (ANTP, 2018). ..	75
Figura 20: Distância por viagem na Europa (EC, 2012).	76
Figura 21: Tempo diário de viagem na Europa (EC, 2012).	76
Figura 22: Temperaturas médias (máximas e mínimas) nas principais cidades brasileiras (AVL 2018a).....	82
Figura 23: Topografia do Brasil (Adaptado de AVL, 2018a).	84
Figura 24: Distribuição da frota brasileira de veículos (AVL, 2018a).....	85

Lista de Tabelas

Tabela 1: Quilometragem e idades para a realização dos testes ISC.	5
Tabela 2: População das principais regiões metropolitanas do Brasil, conforme senso de 2010, adaptado de IBGE (2010).....	13
Tabela 3: Efeitos nocivos dos poluentes locais. Adaptado de Beauboeuf (2010), Ristovski <i>et al</i> (2012), Arioli <i>et al</i> (2014), Omidvarborna <i>et al</i> (2015).	14
Tabela 4: Evolução dos limites das fases PROCONVE de emissões em veículos pesados. Adaptado de CONAMA (2008), MMA (2011).....	24
Tabela 5: Evolução dos limites das fases PROCONVE para veículos leves. Adaptado de CONAMA (2009), MMA (2011).....	25
Tabela 6: Limites da fase PROCONVE P8, em g/kWh (CONAMA, 2018a).	26
Tabela 7: Limites para veículos leves da fase PROCONVE L7, em g/km a partir de 2022 (CONAMA, 2018b).	27
Tabela 8: Contribuição dos grandes emissores de NO _x (TE, 2018).	45
Tabela 9: Veículos testados e tipos de rotas RDE (TE, 2018).	45
Tabela 10: Limites de emissões da norma Euro 6d temp (TE, 2018).	46
Tabela 11: Características das rotas RDE usadas (TE, 2018).	46
Tabela 12: Parâmetros dinâmicos do teste RDE para veículos leves (EC, 2016a).	57
Tabela 13: Condições de RDE conforme 2º pacote Euro 6d temp (adaptado de ICCT, 2017)... ..	59
Tabela 14: Tolerâncias admissíveis para validação do equipamento PEMS, adaptado de EC (2017c).	60
Tabela 15: Relação dos caminhões testados, cidades e tecnologias (Huo <i>et al</i> , 2012).	63
Tabela 16: Relação das principais cidades brasileiras e suas altitudes (AVL, 2018a).	82
Tabela 17: Critérios de filtragem para a determinação de fatores de emissões específicos situacionais (Franco et al, 2014).	98
Tabela 18: Critérios de filtragem combinados para a determinação de fatores de emissões específicos situacionais (Franco et al, 2014).	99

Lista de Abreviaturas

– número, contagem

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACEA – *The European Automobile Manufacturers' Association*

AES – *Auxiliary Emission Strategy*: Estratégia Auxiliar de Emissões

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ARLA-32 – Agente Redutor Líquido de NO_x Automotivo, reagente para sistemas SCR

ATCT – Ensaio de correção da temperatura ambiente (sigla em inglês)

CADC-MW130 – *Artemis driving cycles*, ciclo californiano de emissões, de até 130 km/h

CDmin – concentração mínima aceitável do reagente ARLA

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CO – monóxido de carbono, poluente atmosférico

CO₂ – dióxido de carbono, gás de efeito estufa (GEE)

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CH₄ – metano, o hidrocarboneto mais leve, poluente atmosférico

CHO – ou RCHO, aldeídos, poluentes originados da oxidação incompleta de alcoóis

CR – condução real, o mesmo que RDE

DF – *deterioration factor*, o mesmo de FD

DPF – *diesel particle filter*, filtro de partículas para motores de ciclo diesel

E100 – etanol hidratado

ECU – *electronic control unit*, unidade de controle do motor

ECR – o mesmo que RDE

EFM – *exhaust flow meter*, medidor de fluxo de escape

ELR – *european load response*, ciclo de ensaio de motor usado para medir opacidade

EPA – *Environment Protection Agency*, agência de proteção ambiental norte-americana

ESC – *european seady cycle*, ciclo estacionário de ensaio de emissões em motor

ETC – *european transient cycle*, ciclo transiente de ensaio de emissões em motor

EV – *electric vehicle*, veículo puramente elétrico

FD – fator de deterioração para correção de emissões, refere-se ao aumento de emissões devido à deterioração do sistema de controle de emissões pelo uso do veículo ou motor

FTP – *Federal Test Procedure*, procedimento de teste em ciclos de emissões norte-americano

FTP 75 – Ciclo de teste de emissões em dinamômetro pertencente ao procedimento FTP, dividido em três fases totalizando 1850 s de duração

g – grama, unidade de massa

GEE – gases de efeito estufa. São gases que retêm o calor na atmosfera terrestre, causando aumento da temperatura e clima globais.

GNV – gás natural veicular

GPF – *gasoline particle filter*, filtro de partículas para motores a diesel

GPS – *geo-positioning system*, sistema de geoposicionamento

h – hora, unidade de tempo

HC – Hidrocarbonetos não queimados, poluente atmosférico

HDV – *heavy duty vehicles*, veículos pesados

HEV – *hybrid electric vehicle*, veículo híbrido-elétrico

HWFET – *highway fuel economy test cycle*, ciclo de consumo em autoestrada

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ISC – *in service conformity*, ensaio de conformidade de emissões em serviço

ISO (*International Organization for Standardization*) – Organização Internacional de Normalização

IUPRS (*In-Use Performance Ratio*) – Índice de desempenho em uso

km – quilometro, unidade de comprimento ou distância, equivalente a 1000 m

kWh – quilo-Watt-hora, medida de trabalho, equivale a 3,6 Mega-Joules

LCVM – Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor

LDV – *light duty vehicles*, veículos leves

m – metro, unidade de distância

M – categoria de veículo automotor conforme classificação europeia: veículo que contém pelo menos quatro rodas, projetado e construído para o transporte de passageiros

M1 – veículos da categoria M, que comportem até 8 passageiros e um motorista e tenham uma massa máxima de até 5 t

M2 – veículos da categoria M, projetados e construídos para o transporte de passageiros, que contenham mais de 8 assentos, além do assento do motorista, e que tenham uma massa máxima de até 5t.

M3 – veículos da categoria M, projetados e construídos para o transporte de passageiros, que tenham mais de 8 assentos, além do assento do motorista, e que tenham uma massa máxima superior a 5t

mg – miligrama(s), medida de massa

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MP – material particulado, o mesmo que PM

NBR – norma brasileira

NEDC – *new european driving cycle*, ciclo de emissões europeu

N – categoria de veículo automotor conforme classificação europeia: veículo que contém pelo menos quatro rodas, projetado e construído para o transporte de cargas

N1 – veículos da categoria N, que tenham uma massa máxima de até 5 t

N2 – veículos da categoria N, que tenham uma massa máxima superior a 5 t, porém não superior a 16 t

N3 - veículos da categoria N, que tenham uma massa máxima superior a 16 t

N.A. – não aplicável

NH₃ – amônia, poluente atmosférico

NMHC – hidrocarbonetos, excluído o metano

NMOG – poluente, emissão veicular, gases orgânicos não-metano

NO – monóxido de nitrogênio, poluente atmosférico

NO₂ – dióxido de nitrogênio, poluente atmosférico

NO_x – óxidos de nitrogênio, poluente atmosférico, contém principalmente NO e NO₂

NP – número de partículas, o mesmo que PN

NTE – *not to exceed*, limites de emissão ou teste de emissão em que nenhum ponto pode exceder os limites

NYCC – *New York City Cycle*, ciclo de emissões veiculares original da cidade de Nova York

O₃ – ozônio a baixa altitude, gás oxidante, causa dano às células

OCE – *off cycle emission*, teste de emissões fora de ciclo, com pontos de operação sorteados, obedece aos limites NTE

OBD – *on board diagnosis*, diagnóstico do sistema de controle de emissões do veículo

PBT – peso bruto total, massa de um veículo com carga máxima

PEMS – *portable emissions measurement system*, equipamento portátil usado em ensaios RDE

PM – *particle matter*, o mesmo que PM, material particulado, em geral de 23 nm até 30 µm

PM_{0,1} – *particle matter*, material particulado com tamanho de partículas de até 0,1 µm

PM₁₀ – *particle matter*, material particulado com tamanho de partículas de até 10 µm

PM_{2,5} – *particle matter*, material particulado com tamanho de partículas de até 2,5 µm

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

ppm – partes por milhão, medida de concentração

RDE – *real drive emissions*, procedimento de ensaio de emissões veiculares em condução real

REM01 – ciclo de emissões do FTP, Spokane

REM05 – ciclo de emissões do FTP, Atlanta

SCR – *Selective Catalytic Reduction*, sistema de pós-tratamento de emissões de NO_x.

Smog – Contração de neblina + fumaça (do inglês), tipo característico de poluição por NO_x, O₃, CHO misturados a vapor d'água

SFTP-US06 – *Supplemental Federal Test Procedure*, ciclo de emissões, o mesmo que US06

UDDS – *Urban Dynamometer Driving Schedule*, ciclo de emissões do FTP, Baltimore

US06 – ciclo de emissões suplementar do FTP, versão com condução agressiva

VSP – *vehicle specific power*, potência específica veicular

TF – fator de transferência em função dos parâmetros de teste RDE

THC – hidrocarbonetos totais, poluente atmosférico

t – tonelada, unidade de massa: 1000 kg

W – Watt, unidade de medida de potência

WHDC – *world-wide harmonized heavy duty certification procedure*

WHSC – *world harmonized sationary cycle*, ciclo estacionário harmonizado mundialmente

WHTC – *world harmonized transient cycle*, ciclo transiente harmonizado mundialmente

WLTP – *worldwide harmonised light duty vehicle test procedure*

WNTE – *world harmonized not to exceed*, ciclo harmonizado mundialmente, não ultrapassar

1. Introdução

Com o aumento da preocupação com a poluição do ar devido às atividades humanas e seus efeitos sobre o meio ambiente ao redor do mundo, tornou-se cada vez mais importante o refinamento dos métodos de controle das emissões veiculares por parte dos órgãos governamentais competentes.

Ao longo das últimas décadas foram feitos diversos estudos sobre a poluição atmosférica em função do progressivo comprometimento da qualidade do ar e suas implicações sobre o meio ambiente e sobre a saúde humana. A situação é mais preocupante dentro das grandes cidades, onde a poluição local é intensificada pela concentração das atividades humanas e de veículos automotores. Mais de um quarto da frota brasileira se concentra nas 10 maiores cidades, que também detêm os maiores congestionamentos (AVL, 2018a; TomTom, 2018), com tráfego intenso que reduz a velocidade média e a eficiência dos motores (Heywood, 1988, Metrô, 2013, PlanMob BH, 2019) levando-as a uma proporção ainda maior na participação das emissões no país.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1986), na sua Resolução nº18 de 1986, reconhece que “a emissão de poluentes por veículos automotores contribui para a contínua degradação do ar, especialmente nos grandes centros urbanos” enquanto o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT, 2014) estima que cerca de 40% da poluição local urbana seja proveniente do transporte.

Devido principalmente à preocupação com a saúde humana, muitos países passaram a estabelecer políticas de controle da poluição do ar nas últimas 3 a 4 décadas, estipulando limites de emissões para os veículos automotores. Essas políticas exigem dos fabricantes os testes de homologação em emissões antes da comercialização dos veículos, de forma a comprovar que esses atendem aos limites definidos na lei.

Tais limites, cada vez mais restritivos, vêm estimulando a evolução tecnológica dos motores e dos sistemas de pós-tratamento de emissões nos veículos, num esforço para preservar a qualidade do ar, mesmo diante do contínuo aumento da frota.

Ao mesmo tempo, os métodos de teste de emissões também vêm evoluindo para se tornar cada vez mais próximos das condições reais de uso dos veículos. Entre os principais

avanços estão a adoção de ciclos mais representativos nas simulações de laboratório e o uso do teste de emissões em tráfego real, chamado de RDE (*Real Drive Emissions*), que faz a medição diretamente no veículo em meio ao tráfego real nas ruas.

O RDE já é usado na Europa desde 2017 na homologação dos veículos e será introduzido no Brasil nas próximas fases de regulação de emissões do PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) a partir de 2022 (CONAMA, 2018a; 2018b).

1.1. Objetivo

Diante do pouco tempo que resta até a entrada do RDE no Brasil e das muitas diferenças entre o uso dos veículos em relação à Europa, se faz necessário um trabalho de adequação para que esse teste cumpra a sua função de indicar o quanto os veículos estão poluindo a atmosfera em seu uso normal.

O objetivo desse trabalho é identificar os desafios e propor soluções para subsidiar a implantação do ensaio *Real Drive Emissions* na homologação dos veículos no Brasil e torná-la mais eficaz como ferramenta de medição para uso no controle da poluição por veículos automotores, através da rápida adequação dos principais parâmetros e procedimentos.

Os objetivos específicos são:

- Fazer um levantamento das informações existentes sobre o tema na bibliografia, relativo às ações e resultados durante a implementação do RDE na Europa;
- Levantar as observações, medições e sugestões de autores sobre o RDE na Europa e em outros países;
- Identificar os principais pontos críticos apontados pelos autores pesquisados;
- Identificar as características brasileiras que diferem da Europa;
- Relacionar as soluções propostas pelos autores pesquisados sobre os principais pontos críticos e relacioná-las às características do ambiente brasileiro;
- Produzir uma síntese combinando os desafios elencados e as soluções propostas, orientado para subsidiar a definição de parâmetros e procedimentos representativos do uso real para o RDE no Brasil.

Tendo em conta que as datas de implantação do RDE já foram estabelecidas pelo CONAMA (2018a, 2018b) para início em 2022, este trabalho poderá subsidiar as discussões para o RDE alcançar o mais rápido possível a representatividade do uso dos veículos brasileiros.

1.2. Justificativa

A entrada do RDE no Brasil está definida para acontecer a partir de 2022 para veículos leves e para os novos modelos de veículos pesados, e em 2023 para todos os veículos. Diante da proximidade dessas datas e da complexidade dos fatores envolvidos nos testes RDE, torna-se necessário se preparar para a implantação desse novo procedimento de teste pelos órgãos governamentais responsáveis e laboratórios no Brasil.

A preparação compreende a elaboração de procedimentos de teste nacionais e parâmetros de rota representativos das condições brasileiras, sempre tendo como base as condições brasileiras de uso dos veículos.

A implantação do teste RDE envolve grandes investimentos na aquisição de equipamentos, treinamentos, adequação de laboratórios e mudança de procedimentos. Tudo isso é voltado para se alcançar uma medição capaz de representar aquilo que é de fato emitido pelos veículos automotores durante o seu uso normal para permitir o controle das emissões por parte dos órgãos competentes. Portanto, a representatividade do uso real dos veículos é o quesito mais importante e o que justifica essa mudança. Assim, esse trabalho se propõe a ser mais um subsídio aos órgãos governamentais e aos laboratórios envolvidos no processo de implantação e aplicação do teste.

1.3. Contextualização

Devido aos indícios de falha dos métodos tradicionais de medição em laboratório em determinar as emissões reais dos veículos em uso, a União Europeia demandou o desenvolvimento um equipamento especial, chamado sistema portátil de medição de emissões, PEMS (*Portable Emissions Measurement System*), também conhecido como equipamento de emissões *on-board*. Esse equipamento é resultado de uma miniaturização dos equipamentos analisadores de emissões de laboratório, tornando-se pequeno e leve o bastante para ser instalado a bordo de um veículo leve de passageiros. Desse modo, pode

ser utilizado para medir as emissões gasosas e de material particulado no escapamento enquanto o veículo circula pelas ruas e rodovias comuns, em direção real, sem interferir na sua rodagem. Este tipo de teste de emissões, que utiliza o PEMS, ficou conhecido pela sigla RDE, do inglês *Real Drive Emissions* (Emissões em condução real) (EC, 2016a, Forcetto e Abrantes, 2017).

A elaboração desse trabalho foi feita na forma de uma pesquisa sobre os desafios para a implantação dos testes RDE nas condições brasileiras, partindo do modelo e das condições da Europa, cujo padrão está sendo tomado como base para a adoção dos ensaios RDE no Brasil. Para tanto, é preciso se conhecer sobre emissões, sobre os ensaios e sobre o equipamento de emissões usado nesse teste, para levantar quais são os principais parâmetros que podem influenciar os resultados do ensaio.

O ensaio RDE usando o PEMS foi desenvolvido por um grupo de trabalho que foi criado em janeiro de 2011 pela União Europeia e que publicou o Regulamento EC 427/2016 e o EC 646/2016, que definem as condições para o teste. Por essas regulações o teste deveria durar de 90 a 120 minutos que devem ser 34% urbano (15 a 30 km/h de v. média e até 60 km/h), 33% rural (entre 60 e 90 km/h) e 33% rodoviário (acima de 90 km/h). Cada parcela deve acumular ao menos 16 km e a altitude final deve estar no máximo a +/- 100 m da inicial. A altitude de teste deve estar abaixo dos 700 m e a temperatura entre 0 e 30°C. O teste deve ser feito em dia útil e fora do horário de pico (Forcetto e Abrantes, 2017).

O PEMS deve medir em tempo real, à taxa de pelo menos uma medição por segundo, as emissões gasosas e os parâmetros do veículo como velocidade, fluxo de escape, latitude, longitude, pressão e temperatura ambientes, entre outros. Os poluentes medidos para os veículos leves devem ser ao menos: NO_x (óxidos de nitrogênio) e PM (material particulado). Para os veículos pesados também devem ser incluídos: CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono), THC (hidrocarbonetos totais), NMHC (hidrocarbonetos não metano) e CH₄ (metano) (EC, 2011). Toda a energia para o sistema deve ser provida por baterias ou gerador (Forcetto e Abrantes, 2017).

A concepção do PEMS é fruto de uma demanda levantada pela comunidade europeia, ao notar que os níveis de poluição do ar nas cidades da Europa, especialmente para O₃ e NO_x, não estavam acompanhando a redução dos limites de emissões (Forcetto e Abrantes 2017). Sua construção é voltada principalmente para a medição de NO_x e PM, que são as

principais emissões dos motores diesel, comuns inclusive entre os veículos leves daquele continente.

O teste RDE é uma forma de obter resultados mais representativos das condições reais. É preciso notar que o teste de direção real é simplesmente uma amostragem das condições reais de uso dos veículos e, mesmo sendo realizado nas ruas, não é capaz de ser completamente representativo, pois as condições reais são muito complexas e abrangem uma gama muito ampla de condições de tráfego, clima, condições das vias, comportamento do condutor, etc.

Na Europa as regulações sobre as emissões veiculares se iniciaram há várias décadas, com cada país gerindo sua legislação. Na Inglaterra as primeiras normas surgiram em 1971. Entretanto, em 1991 a Comissão Europeia unificou os limites para os veículos no território da comunidade, na norma Euro, que hoje se encontra nas fases 6 e VI para veículos leves e pesados respectivamente. No Brasil esse controle é feito através do PROCONVE e a atual fase para veículos leves, L6, equivale à Euro 5, enquanto a atual fase P7, para pesados equivale à Euro V (Forcetto e Abrantes, 2017).

Conforme as Resoluções do CONAMA nº 490/2018 e 492/2018 (CONAMA, 2018a, 2018b), o ensaio RDE passará a ser usado no processo de homologação dos veículos nas próximas fases brasileiras, P8 e L7, seguindo o modelo europeu. Nestas resoluções, o RDE é chamado de emissões em tráfego real ou, ainda, definido pela sigla CR (condução real).

Ainda para os pesados, a respectiva resolução também trata da comprovação das emissões durante a vida útil do veículo, que deve ser aplicada a partir de 2027, e que deve ser feita através do ensaio RDE em um veículo com suficiente quilometragem ou idade acumulada, atendendo aos mesmos limites da homologação. Na Europa esse teste é designado pela sigla ISC (*in service conformity*) e, por isso, essa sigla costuma ser usada para se referir a esse teste, mesmo no caso brasileiro. Para os veículos pesados, as quilometragens acumuladas e idades estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Quilometragem e idades para a realização dos testes ISC.

Quilometragem	Idade	Passageiros	Carga
160 mil km	5 anos	$PBT \leq 5 \text{ t}$	
300 mil km	6 anos	$5 \text{ t} < PBT \leq 7,5 \text{ t}$	$3,856 \text{ t} < PBT \leq 16 \text{ t}$

700 mil km	7 anos	7,5 t < PBT	16 t < PBT
------------	--------	-------------	------------

Para os veículos leves, a durabilidade dos sistemas de controle das emissões é tratada pela determinação do fator de deterioração (FD), que é um multiplicador aplicado ao valor de emissão efetivamente medido de cada poluente para compensar o aumento esperado em razão da degradação dos sistemas de controle com o uso. Os FD devem ser determinados pelos fabricantes ou importadores através dos chamados testes de durabilidade, que são testes de longa duração feitos em motores e veículos para avaliar o efeito do uso sobre o desempenho dos sistemas.

Desde 1º de janeiro de 2022 até que seja possível a aplicação dos ensaios ISC, os fabricantes deverão seguir a tabela de deterioração do CONAMA (2018a, 2018b) ou usar fatores de deterioração determinados por ensaios de durabilidade em banco de prova.

Com a adoção do ensaio RDE para homologação de veículos, tomando como base a legislação europeia, torna-se necessário lançar uma atenção especial sobre esta legislação.

Além disso aparece a inclusão do procedimento de emissões fora de ciclo e limites “a não exceder” harmonizados mundialmente, OCE/WNTE (*Off Cycle Emission/World Harmonized Not To Exceed*), que consiste em testar as emissões em 15 pontos de operação que são determinados por sorteio, sem relação com o ciclo de teste.

A resolução da fase P8 também estabelece a medição de opacidade em aceleração livre conforme norma ABNT NBR 13037/2001, limitando a opacidade em 0,4 m⁻¹, em qualquer altitude.

Ficou estabelecido que o IBAMA deverá publicar os requisitos técnicos, os gases, as condições de contorno, os limites e data de entrada do RDE, até 31 de dezembro de 2019.

Os procedimentos e normas a serem publicados devem conter também os parâmetros a serem verificados nos ensaios de condução real, tais como: a distância e duração do teste, a porcentagem de trajeto urbano, rural e estrada, velocidade máxima, velocidade média, períodos de descanso, inclinação da pista, aceleração relativa, partida a frio e combustível.

1.4. Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste em fazer uma pesquisa bibliográfica para colher as experiências de outros pesquisadores sobre o mesmo assunto e associar estas informações, cruzando-as com dados das condições brasileiras para identificar os principais desafios que serão encontrados no processo de implantação do RDE.

A metodologia proposta consiste nas seguintes etapas:

- 1- Pesquisar trabalhos que tenham feito análises da implantação ou das condições e resultados do RDE;
- 2- Fazer comparações entre as condições europeias e as brasileiras;
- 3- Cruzar as informações que possam ser utilizadas para orientar a implantação no Brasil;
- 4- Identificar os principais desafios.
- 5- Fazer uma síntese didática a partir das informações levantadas, contendo recomendações e propostas de soluções para contornar os desafios.

A pesquisa bibliográfica também buscará obras que tenham informações sobre experiências com as medições RDE em outros países, mesmo que não se trate de implantação.

O avanço das normas com suas várias fases de implantação na Europa e as ações tomadas frente às dificuldades encontradas fornecem uma boa referência e serão exploradas no sentido não apenas de servir como base, mas também como lições aprendidas.

1.5. Resultados Esperados

Para atingir o objetivo de tornar a implantação do RDE mais rápida e eficaz, espera-se gerar um documento que contenha a identificação dos desafios para a implantação do RDE no Brasil e proponha soluções para orientar e facilitar a tomada de decisão de órgãos públicos e o trabalho de outros laboratórios na implantação do teste RDE. Para isso é necessária a definição de parâmetros adequados e dos pontos críticos para a definição da rota usada para o teste, levando à eficácia em representar as condições reais brasileiras de uso dos veículos o mais rápido possível a partir da entrada em vigor do teste RDE na homologação dos veículos, que ocorrerá nas próximas fases do PROCONVE, L7 e P8.

Com isso será possível poupar não apenas tempo, mas também esforço gasto no estabelecimento de parâmetros condizentes com o cenário brasileiro.

Esta pesquisa tem também o caráter de desenvolvimento tecnológico e informativo, subsidiando tecnicamente o país para receber as fases L7 e P8 do PROCONVE a partir de 2022, conforme definido pelo CONAMA (2018a, 2018b), e que exigirá o refinamento da tecnologia de medição e a adequação ao cenário brasileiro, onde o uso do equipamento PEMS é só mais uma peça na construção de uma regulação mais eficaz na proteção do meio-ambiente.

Nos próximos capítulos serão abordados aspectos de adequação do procedimento RDE no Brasil e ações para mitigar os desvios. Será tomada como base a implantação e seus resultados na Europa, visando apontar ações que permitam obter no Brasil resultados rápidos e eficazes. Isso equivale a dizer que se está buscando uma implantação do RDE que resulte no avanço da tecnologia usada nos veículos, levando à efetiva redução das emissões no transporte, o mais rápido possível após entrarem em vigor as próximas fases.

Para tratar destes assuntos, serão apresentados cinco capítulos: O primeiro, a introdução, com a definição do objetivo e da metodologia, e a explicação sobre o desenvolvimento da pesquisa. O segundo capítulo será o de pesquisa bibliográfica onde serão abordadas obras que mostrem como foi a implantação do ensaio RDE na Europa, além de trabalhos mostrando experiências e estudos envolvendo o RDE em outros países, incluindo o Brasil, terminando com uma análise da pesquisa. O terceiro capítulo faz a identificação dos desafios para a adequação do RDE no Brasil e o quarto elenca as soluções propostas para vencer tais desafios. O quinto capítulo traz a conclusão do trabalho, contendo as sugestões para trabalhos futuros, cruciais para o prosseguimento da empreitada de adequar o RDE às condições brasileiras. O sexto capítulo, que traz a bibliografia consultada, conclui o trabalho.

2. Revisão bibliográfica

A revisão sobre a bibliografia tem o objetivo principal de coletar as experiências de outros pesquisadores que utilizaram algum equipamento *on-board* para realizar testes em condução real. Uma outra função da pesquisa é obter ou fundamentar informações para

melhor explicar o que está sendo testado quando se usa um equipamento PEMS. A medição das emissões é um assunto complexo que envolve áreas diversas como a química, a física, o ambiente, a mecânica e a eletrônica. Para poder tratar das medições é preciso conhecer alguns fundamentos mínimos. Por vezes algumas obras selecionadas cumprem a função de trazer um conhecimento novo. Em outras vezes, a transcrição de alguns trechos pesquisados têm a função de auxiliar o leitor no entendimento do processo de medição e o porquê de algumas considerações. Assim, foram observados alguns critérios de escolha das referências:

- Relatar normas de medição de emissões;
- Abordar diretamente o teste de RDE;
- Abordar fatores que afetam a medição das emissões;
- Artigos sobre implantação dos testes;
- Envolver assunto relacionado às características das emissões e seus impactos;

Os testes RDE são procedimentos recentes em comparação aos outros modelos de testes. Mesmo assim vários trabalhos já foram publicados utilizando esta técnica. Entretanto poucos deles tratam da própria implantação dos testes. Por isso ainda pode ser necessário flexibilizar estes critérios em função das obras que estiverem efetivamente disponíveis, para se trazer o melhor possível em termos de contribuição.

As obras foram elencadas, lidas e as suas respectivas contribuições foram trazidas para este trabalho formando tópicos que são apresentados a seguir.

2.1. Emissões veiculares

As principais emissões tratadas neste estudo serão aquelas reguladas pela legislação brasileira, provenientes da descarga de motores a combustão, que são: CO, HC, NMHC (hidrocarbonetos não-metano), CH₄ (metano), NO_x, CHO (aldeídos), NH₃ (amônia), PM e opacidade (fumaça). Outros poluentes serão abordados em caráter informativo, como o CO₂, PN (contagem de partículas), NMOG (gases orgânicos não-metano), emissões evaporativas (legisladas, porém não são da descarga) e emissões de abastecimento, e também alguns poluentes secundários, que não são emitidos pelos veículos, mas contam com emissões veiculares como precursores, tais como: O₃ (ozônio) SO_x, (óxidos de enxofre).

O Brasil é um país predominantemente urbano, com mais de 80% da população vivendo em áreas urbanas (Carvalho, 2011) e com grande concentração da frota de veículos nas suas principais capitais (AVL, 2018a). Então é razoável que a maior parte das emissões de poluentes por veículos automotores venha dessas áreas.

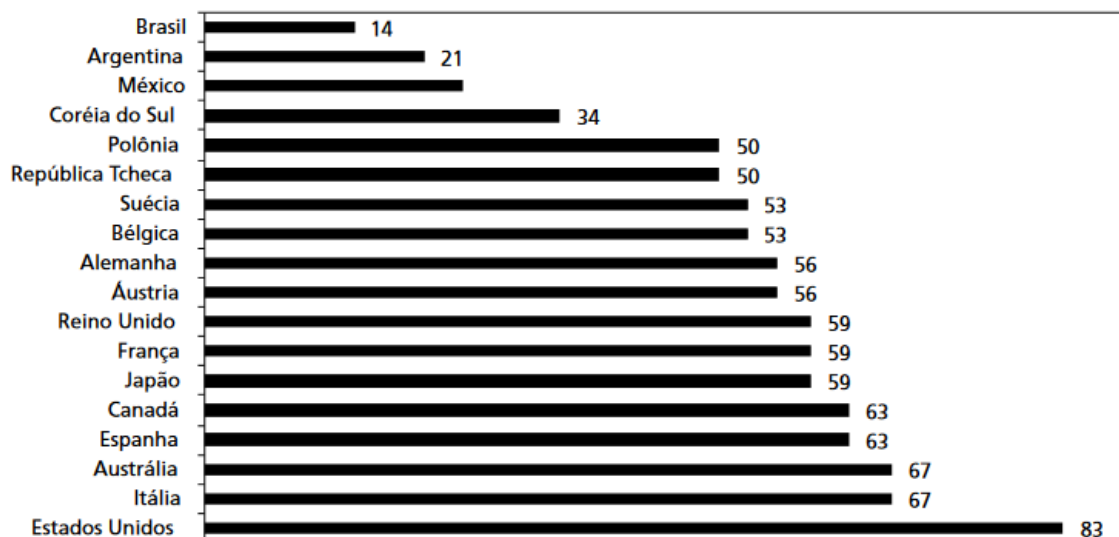


Figura 1: Taxa de motorização de países selecionados em 2008, em veículos por 100 habitantes (Carvalho, 2011).

Carvalho (2011) indica que o Brasil apresenta uma taxa de motorização muito inferior à de outros países, especialmente os países desenvolvidos. E apesar dos atuais problemas de mobilidade e poluição local no país, há uma grande margem para o aumento dessa taxa, levando ao aumento da poluição causada pelos veículos privados. Na Figura 1 fica ilustrada esta situação, exemplificando o ano de 2008, quando a taxa de motorização brasileira era de 14 veículos por 100 habitantes, ou seja, 14%, distante ainda de países como Argentina, México e Coreia de Sul. ACEA (2019) indica que em 2016 a média europeia ficou em 59% e Barros (2017) relata que a do Brasil subiu para 30% também em 2016, ou seja, praticamente dobrou em oito anos. E essa taxa continua a crescer um ritmo acelerado pois, segundo a Fenabrave (2018), houve crescimento nas vendas de veículos leves de 9,4% e da frota brasileira de 9,36% do ano 2016 para 2017.

As emissões veiculares podem ser divididas em dois tipos: as emissões locais e as emissões globais. As emissões globais são os gases de efeito estufa, normalmente representadas por CO₂-equivalentes, (CO_{2eq}). O CO₂ é um importante GEE (gás de efeito estufa) (Carvalho, 2011; MMA, 2019) e sua concentração na atmosfera é relacionada

diretamente com a tendência de aquecimento global. Mesmo assim, apesar de seus efeitos sobre o clima do planeta, nas concentrações usualmente encontradas no ar, esse gás não causa danos diretos à saúde humana (Carvalho, 2019). Por isso é considerado um poluente global.

Há outras emissões provenientes dos escapamentos dos veículos que afetam o aquecimento global, como o NO_x , mas que são chamados poluentes locais, pois o seu efeito é limitado à região onde são gerados, por conter as concentrações mais altas e normalmente são causadores de problemas de saúde (Carvalho, 2011).

Segundo a ANTP (2018), os veículos pesados são os maiores contribuintes para as emissões de poluentes locais, com 57% no setor de transportes, deixando os automóveis em segundo lugar com 32%.

Se forem analisadas apenas as emissões dos gases de efeito estufa, $\text{CO}_{2\text{eq}}$, a situação se inverte, ficando os ônibus com apenas 31% enquanto os automóveis contribuem com 65%, como se vê na Figura 2.

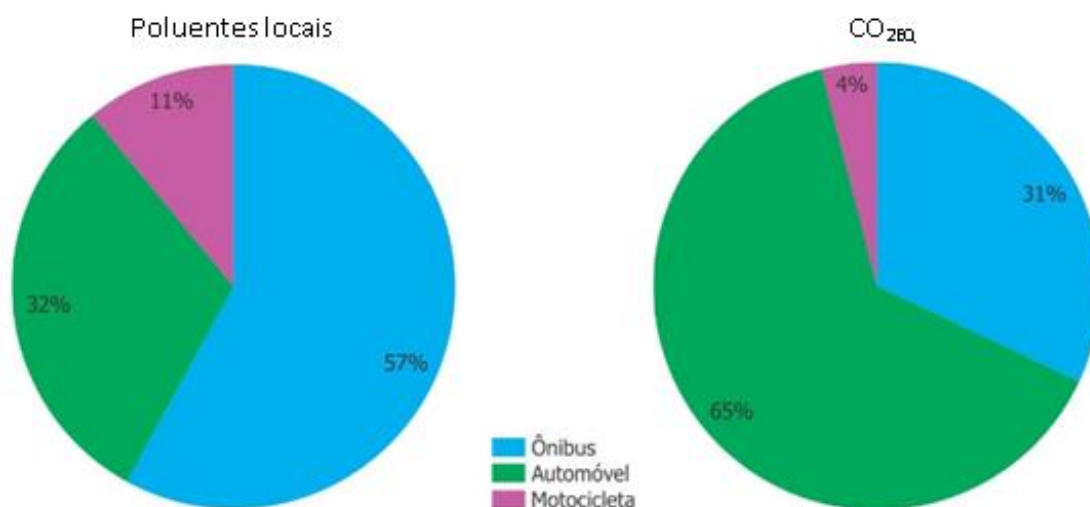


Figura 2: Distribuição dos poluentes locais e globais veiculares no Brasil (ANTP, 2018).

Para as emissões de CO_2 , Carvalho (2011), considera que o transporte público coletivo responde por cerca de 25% das emissões, mesmo sendo o meio escolhido em cerca de 60% das viagens, ao passo que os veículos leves respondem por quase 60% das emissões no transporte individual, mesmo sendo responsáveis por cerca de 35% das viagens motorizadas nos centros urbanos, incluídas as motocicletas. Já, os veículos utilitários a

diesel respondem por mais de 10% das emissões totais de CO₂, com cerca de 1% das viagens motorizadas.

Os dados de emissões de CO₂ são uma boa referência, pois os demais poluentes podem ser expressos por fatores de emissões, com base na emissão de CO₂ (g/kgCO₂), que por sua vez, está intimamente ligado ao consumo de combustível, que é outra forma de expressar as emissões (g/l), como acontece, por exemplo, no trabalho de Huo *et al* (2012), que parametrizaram suas medições assim para facilitar os levantamentos para inventários de emissões. Os fatores de emissão ainda podem ser em função da distância percorrida (g/km), como faz a legislação para veículos leves, ou em função de trabalho (g/kWh) como acontece com a legislação para veículos pesados.

Tendo em vista que os automóveis contribuem com a maior parte das emissões dos gases de efeito estufa enquanto os ônibus participam com menos de um terço, a melhor estratégia contra esse tipo de emissões é controlar melhor os veículos privados, que têm menor eficiência energética por passageiro transportado. Contudo, para os poluentes locais, que são alvo deste trabalho, as fontes de maior emissão são os veículos pesados, maiores responsáveis pelas emissões de poluentes locais dos transportes, sendo a melhor estratégia controlar os ônibus e caminhões (ANTP, 2018; Carvalho, 2011). Entretanto, ainda sobre os poluentes locais, é preciso levar em conta que os veículos leves no Brasil estão presentes em maior número. Por isso eles têm um grande potencial poluidor, podendo se tornar os principais emissores caso não sejam mantidos os cuidados com o controle.

Para comparação, em Paris, onde os veículos leves a diesel são comuns, a contribuição dos veículos leves é de 66% para os óxidos de nitrogênio e de 56% para o material particulado, com uma população metropolitana de cerca de 12 milhões de habitantes na área metropolitana (O'Sullivan, 2017), ou seja, próxima da população da Grande Rio de Janeiro, que já era de 11,8 milhões em 2010, porém muito menor que a população da Grande São Paulo no mesmo ano, com 19,7 milhões. Outras regiões metropolitanas do Brasil estão relacionadas na Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que contém dados do último censo do IBGE (2010), quando a população brasileira era de 191 milhões de habitantes. Como referência, pela projeção do próprio IBGE (2019), a população em 2019 é estimada em 210 milhões.

Tabela 2: População das principais regiões metropolitanas do Brasil, conforme senso de 2010, adaptado de IBGE (2010).

Posição	Região	População
1	Região Metropolitana de São Paulo	19.683.975
2	Região Metropolitana do Rio de Janeiro	11.835.708
3	Região Metropolitana de Belo Horizonte	5.414.701
4	Região do Distrito Federal e Entorno	3.717.728
5	Região Metropolitana de Porto Alegre	3.958.985
6	Região Metropolitana do Recife	3.690.547
7	Região Metropolitana de Fortaleza	3.615.767
8	Região Metropolitana de Salvador	3.573.973
9	Região Metropolitana de Curitiba	3.174.201
10	Região Metropolitana de Campinas	2.797.137

Contudo, o controle local das emissões não é o único fator determinante para a redução da poluição em uma dada região. A AEA (2017) considera que nem sempre a redução das emissões têm uma relação linear clara com as concentrações dos poluentes no ar atmosférico. E também considera que o transporte de poluentes de outros países do hemisfério norte, pelos ventos, tem contribuído cada vez mais com a poluição do ar na Europa.

2.1.1. Efeito das emissões sobre a saúde humana

O efeito das emissões de poluentes locais é dos mais relevantes para a saúde humana e a eles são atribuídas três milhões de mortes prematuras anuais no mundo. O PM, especialmente o PM_{2,5} (partículas menores que 2,5 µm) e os precursores de ozônio dos motores diesel estão associados a sérios problemas de saúde, como: morte prematura, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares além de asma, sintomas agudos respiratórios, bronquite crônica, problemas respiratórios agudos e câncer (Arioli *et al*, 2014, Beauboeuf, 2010, Omidvarborna *et al*, 2015).

Segundo Ristovski *et al* (2012), existem duas formas pelas quais a inalação de PM afeta a saúde do sistema respiratório: inflamatória e por estresse oxidante. A inflamação nos pulmões envolve um conjunto complexo de respostas celulares ao corpo estranho. A resposta imunológica tem papel importante neste processo, reagindo de forma similar à reação contra um invasor patogênico. Já a indução de estresse oxidante é característica da contaminação por PM e se desenvolve quando há um desbalanço entre radicais livres oxidantes e a disponibilidade das defesas antioxidantes. Um exemplo de radicais livres oxidantes são os radicais baseados em carbono, que se tornam mais reativos por conter oxigênio molecular. Por conterem diversos tipos de contaminantes, os compostos encontrados no PM são ainda mais reativos e produtores de radicais livres, causando reações nas células expostas a eles.

Os poluentes locais costumam ser diretamente ligados a danos à saúde, mas também possuem aspectos ambientais (Braga *et al*, 2001, Ristovski *et al*, 2011, Carvalho, 2011, MMA, 2019). Algumas características e problemas dos principais poluentes locais são descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Efeitos nocivos dos poluentes locais. Adaptado de Beauboeuf (2010), Ristovski *et al* (2012), Arioli *et al* (2014), Omidvarborna *et al* (2015).

Poluente	Impacto
CO	É formado da combustão incompleta. Mesmo em pequenas concentrações tem capacidade de saturar uma grande quantidade de moléculas de hemoglobina. Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após algum período de exposição, a depender da concentração.
NO _x	Altamente oxidante, causa agravamento da asma e problemas pulmonares. É um precursor do ozônio, da formação do <i>smog</i> (<i>smoke</i> + <i>fog</i>) fotoquímico e da chuva ácida. Também é GEE.
HC	Hidrocarbonetos são combustíveis não queimados ou parcialmente queimados. São compostos cancerígenos e precursores do ozônio e de <i>smog</i> . Podem ser divididos em metano e não-metano. O metano é um GEE e não é considerado um poluente local.

CHO	Aldeídos são compostos com um radical CO de dupla ligação na extremidade da sua cadeia. Suas principais formas são o formaldeído (H_2CO) e o acetaldeído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$). Emitidos principalmente pelos veículos a etanol, causam irritação, das mucosas, dos olhos, do nariz e das vias respiratórias. Podem causar crises asmáticas e são potenciais carcinogênicos.
SO _x	Precursor do ozônio, de PM ultrafino e de chuva ácida, degradando vegetação e imóveis, além de provocar uma série de problemas de saúde, como agravamento da asma e outros problemas respiratórios. O SO ₂ é altamente solúvel em água, formando os aerossóis ácidos mais comuns: sulfato (SO ₄ ⁻⁻) e bissulfato (HSO ₄ ⁻). O ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) é o ácido mais irritante para o trato respiratório. O ácido sulfúrico e seus sais de amônia constituem a maior parte das partículas finas.
O ₃	O ozônio troposférico (de baixa altitude) é um poluente secundário, formado a partir de precursores como NO _x e HC, entre outros fatores, na presença da luz solar. Pode atingir as porções mais distais das vias aéreas e é um potente oxidante, citotóxico (provoca lesão das células). Causa o agravamento de doenças pulmonares, asma e doenças cardiovasculares.
PM	É uma mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar. Dividem-se em partículas grandes, com diâmetro entre 2,5 e 30 µm e partículas finas, com diâmetro menor que 2,5 µm, que têm maior permanência no ar, maior acidez, reatividade e maior alcance, podendo atingir as porções mais inferiores do trato respiratório, prejudicando as trocas gasosas. Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite, câncer de pulmão e arteriosclerose. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte também são efeitos comuns. Entre seus principais componentes estão: carbono, vanádio, bromo e os óxidos de enxofre e de nitrogênio.

Alguns desses poluentes são gerados diretamente pelos motores, como o CO e o NO_x, enquanto outros dependem da emissão de compostos precursores e reações químicas no

ambiente, como o O_3 , que se forma a partir de reações químicas do NO_x , HC e CO sob a luz solar.

Omidvarborna *et al* (2015) afirmam que o PM é de grande relevância para a saúde humana e que tem os motores diesel como principal fonte. Explicam a influência do diâmetro de partícula sobre sua penetração nos pulmões, destacando que o $PM_{2,5}$ (diâmetro menor ou igual a $2,5\ \mu m$) é mais danoso que as partículas maiores. WHO *et al* (2012) afirmam que o particulado ultrafino, com diâmetro inferior a $0,1\ \mu m$ ($PM_{1,0}$) é ainda mais perigoso e que não há evidência de um nível seguro de exposição ao PM abaixo do qual não ocorram danos à saúde.

Segundo o site Mobilize (2019), o deslocamento da população por meios motorizados tem um custo de R\$ 6,8 bilhões associados à poluição atmosférica. Este custo não é percebido diretamente pela população, entretanto se reflete em tratamento de problemas de saúde, degradação de imóveis e outros bens.

Como foi visto acima, alguns poluentes tratados com ênfase na Europa, como o PM e o NO_x , causam danos muito importantes à saúde humana. Mas, no caso do Brasil, as emissões de HC e CO dos veículos leves são mais importantes (Forcetto e Abrantes, 2017). Portanto, adaptações do procedimento de homologação para melhor avaliar estes poluentes nos veículos constituem um ponto importante de adequação para implantação no Brasil.

2.1.2. Tecnologias de controle de emissões – ignição por centelha

A regulação ambiental, impondo limites cada vez mais restritivos em função da preocupação com a degradação do ar, estimula a indústria a buscar soluções tecnológicas para tornar os conjuntos motrizes dos veículos mais limpos.

Pelo mundo, os veículos leves a gasolina contam com diversas tecnologias voltadas para a redução das emissões e do consumo. Na maioria dos casos, são melhorias feitas sobre o tipo mais comum de motor, que é o de ciclo Otto naturalmente aspirado com injeção eletrônica de combustível a montante das válvulas de admissão, ou seja, PFI (*port fuel injection*).

Mamikoglu *et al* (2017) listam algumas das mais comuns, tais como *start-stop* (que desliga o motor quando o veículo está parado no trânsito), *downsizing* (usa um motor com cilindrada reduzida, compensada pelo uso do turbo compressor), tubocompressor, desativação de cilindros, ciclos Atkinson e Miller (superexpandido – têm a fase de expansão aumentada para se tornar mais eficientes em regimes de baixa carga no motor) e tração híbrida elétrica. Muitas vezes essas tecnologias são combinadas entre si e com o uso de catalisadores.

Mamikoglu *et al* (2017) realizaram um trabalho de comparação entre emissões de ciclos de laboratório e condução real para veículos leves, comparando oito diferentes tipos de motorização, através da simulação nos softwares GT-Suite (veículo) e GT-Power (*sistema motriz*).

Segundo os autores, apesar de muitas tecnologias mostrarem bons resultados nos testes oficiais, elas podem variar significativamente suas emissões nas condições reais de uso.

As tecnologias testadas foram: ciclo Otto aspirado, *Start-stop*, turbo-alimentado com *downsizing*, ciclo Miller, ciclo Miller turbo-alimentado, desativação de cilindro, híbrido elétrico paralelo (HEV) e elétrico puro (EV). Os testes foram conduzidos em sete ciclos padronizados e foram analisados o consumo e as emissões.

Os autores dizem que a preocupação ambiental, em conjunto com a regulação apertada, levou a indústria a buscar novas tecnologias para os conjuntos de motor e transmissão, alcançando resultados significativos na redução de CO₂ emitido. A meta de 130 g CO₂/km de emissão média da frota já foi atingida na Europa e alguns modelos já estão alcançando a meta de 95 g/km proposta para 2021.

As tecnologias mais usadas têm sido o *downsizing*, o ciclo Atkinson-Miller superexpandido e a tração elétrica. Mas apesar de estas tecnologias mostrarem bons resultados de consumo e emissões de CO₂ nas simulações em laboratório, muitos relatos de consumidores sugerem que os resultados não são tão bons quanto os divulgados, levantando suspeitas sobre os seus benefícios reais.

O trabalho aponta a diferença de perfil de condução como uma das principais causas das discrepâncias, pois o perfil dos usuários em geral é mais agressivo do que o dos ciclos de condução de teste. Além da menor potência exigida, a condução branda dos ciclos

também abre espaço para os fabricantes ajustarem seus motores para obter ótimos resultados apenas nesta situação, aumentando ainda mais a distância entre os resultados dos testes laboratoriais e as emissões no uso real.

Os autores apontam que ciclos globais que representem melhor a condução real podem contornar este problema. Mas dificilmente um único ciclo poderá representar bem um trânsito congestionado e uma condução em autoestrada. Segundo os autores, o caso que melhor se aproxima do ideal é o dos Estados Unidos da América, que utiliza 5 diferentes ciclos de testes, incluindo variações climáticas.

Para se fazer uma comparação entre as tecnologias, seria preciso testar todas elas num único veículo e sob diferentes ciclos que tentam representar as condições reais. Mas não existe um modelo de veículo disponível que ofereça todas as opções de tecnologia. Por isso Mamikoglu *et al* (2017) fizeram simulações de computador em um veículo compacto, inserindo neste as mais diversas opções de motorização e escolhendo motores com características construtivas o mais parecido possível entre si, como razão entre diâmetro e curso do cilindro, número de válvulas por cilindro e tipo de transmissão entre outras. Os conjuntos de motor e transmissão elétrico e híbrido tiveram um consumo extra de 400 W sobre a bateria para simular o consumo da eletrônica de potência.

Os autores apresentam os resultados de redução de consumo e emissões para todos os casos estudados, sempre tendo como referência o veículo com motor de combustão naturalmente aspirado. O maior destaque entre as tecnologias a combustível foi na comparação pelo ciclo NYCC, da cidade de Nova York (*New York City Cycle*), que simula uma condução em congestionamentos, onde a tecnologia que se saiu melhor foi a do HEV, com 48% a menos de emissões. O híbrido também se destacou por ter os melhores ganhos em todos os demais ciclos de condução. Entretanto, segundo os autores, o modelo utilizado não foi otimizado para todos os ciclos, o que explicaria porque em uns ciclos este modelo teve mais ganhos do que em outros. O maior ganho foi no NYCC e o mais tímido foi no *Artemis Driving Cycles* (CADC-MW130), ciclo californiano que é mais agressivo, seguido pelo *Highway Fuel Economy Test Cycle* (HWFET), que representa uma condição de autoestrada, usado para avaliação de consumo. Isso também serviria para explicar o porquê das diferenças significativas apuradas entre os ciclos de teste e a condução real.

Outro destaque foi o veículo elétrico (EV) cuja emissão por km rodado foi comparada à dos demais veículos com o uso do artifício de fazer a conversão da energia elétrica para a emissão de CO₂ considerada para a sua geração. Esta conversão depende do tipo de combustível e, portanto, não é uma constante. Para efeitos didáticos, foram considerados tanto o caso europeu (452g/kWh) quanto o caso estadunidense (547g/kWh), mas em ambos os casos o EV foi o mais eficiente em baixar as emissões dentre todas as tecnologias. Considerando a conversão em CO₂ europeia, o EV chegou a apenas 61 g/km no HWFET e 65 g/km no *New European Driving Cycle* (NEDC), ou seja, 54% e 42% dos valores para o aspirado naturalmente, respectivamente. A maior redução foi para o NYCC, emitindo apenas 29% dos 304 g/km do NASI. É a menor emissão entre todas as tecnologias apresentadas. Mas também apresentou emissão de 100 g/km no CADC-MW130, emitindo 60% dos 161 g/km, em sua pior performance. Isso demonstra que mesmo a mais eficiente das tecnologias sofre grande influência do ciclo, apresentando piores resultados em conduções mais agressivas.

O cálculo das emissões do EV com o uso da conversão de consumo elétrico em emissões de CO₂ poderia ter um resultado ainda melhor no caso brasileiro, onde a matriz energética é majoritariamente de geração hidrelétrica com nível de emissão de carbono menor que os dois casos calculados por Mamikoglu *et al* (2017), além de, em parte da geração termoelétrica, ser usado também o gás natural.

As considerações aplicadas pelos autores sobre as configurações dos veículos fazendo a maior quantidade de parâmetros dos motores constantes para todas as tecnologias pode ter sido uma desvantagem se considerarmos que cada configuração de motor e transmissão pode obter melhores resultados com configurações mais específicas, como o número de marchas da transmissão, formato de cilindro, número de cilindros, etc.

Esta obra demonstra que a maioria das tecnologias podem mostrar grandes variações dependendo do ciclo de teste, podendo chegar a mais de 4 vezes para a emissão de CO₂ e o consumo. Estas diferenças podem ser utilizadas como estimativas para as emissões, já que a proporção delas com o CO₂ tem variação moderada. Estes resultados podem ser extrapolados para a comparação entre ciclos padronizados e a condução real. Portanto este é um cuidado a ser levado em conta nos testes RDE, pois como estes testes não têm ciclos padronizados, as variações de condução podem afetar de forma dominante os

resultados, reforçando o entendimento que já existe de que os testes podem apresentar resultados diferentes de acordo com a cidade onde são realizados.

2.1.3. Tecnologias de controle das emissões – ignição por compressão

Ventura (2009) demonstra que os veículos pesados a diesel também passaram por grande evolução ao longo das fases de regulação de emissões, deixando para trás tecnologias como: combustão em pré-câmara, bomba de injeção mecânica e injeção de combustível em baixa, média e alta pressão (até 2000 bar). Mesmo antes da atual fase P7, os motores já contavam com sistemas como turbocompressor, resfriamento do ar de admissão, (*intercooler*), controle eletrônico de injeção de combustível a alta pressão (*common rail*) e injeção em altíssima pressão (até 3000 bar). Mesmo assim, para a fase atual, o autor explica que foi preciso baixar ainda mais as emissões e, para isso, novas tecnologias foram introduzidas:

- Sistemas de pós-tratamento dos gases do escapamento
- SCR (*SelectiveCataliticReduction*) Veículos maiores / longas distâncias
- EGR (*ExhaustGases Recirculation*) Veículos menores / Aplicação urbana
- Diagnóstico eletrônico de eventos – OBD (*On-bord Diagnose*)
- Redução do desempenho caso falhe o pós-tratamento
- Combustível Diesel de melhor qualidade
- Especialmente redução do teor de enxofre (S)

Para os motores diesel dos veículos pesados, desde a entrada da fase P7 no Brasil, equivalente à fase Euro V, já é utilizada a tecnologia SCR, que tem por principal finalidade abater as emissões de NO_x. Um exemplo típico de sistema de póstratamento dos gases de exaustão por SCR da fase P7 é apresentado na Figura 3.

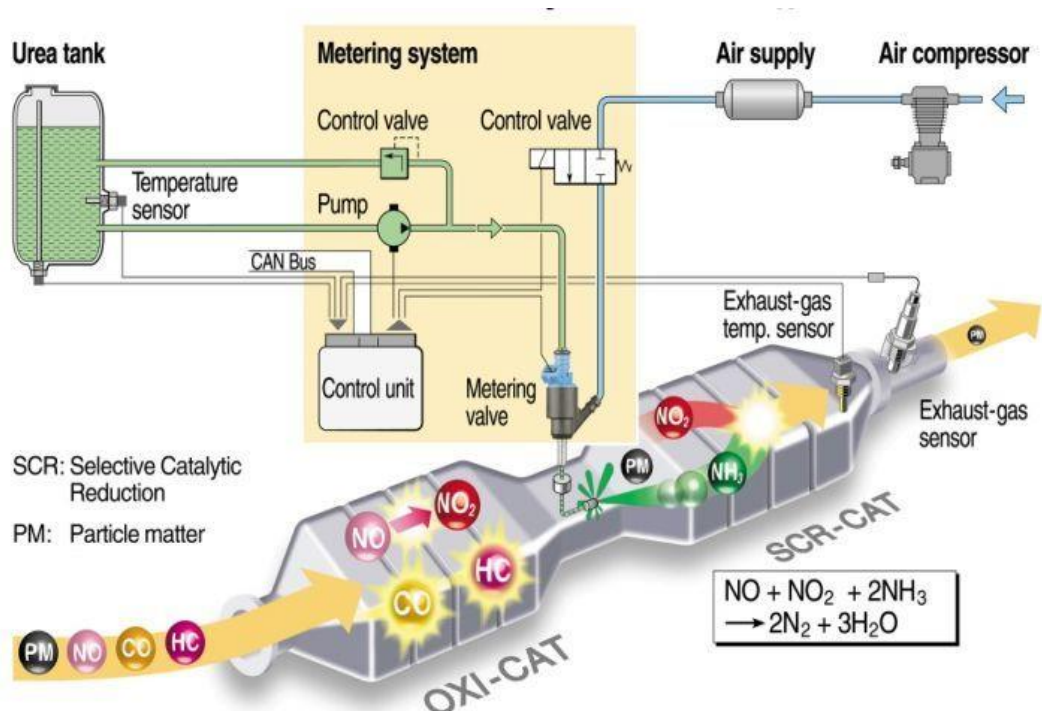


Figura 3: Sistema de pós-tratamento de emissões para a fase Euro VI (Dziubiński, 2016).

A tecnologia SCR de pós-tratamento envolve as seguintes transformações: duas de oxidação, uma de termo hidrólise e uma de redução (SCR propriamente dito) em três etapas de catalisadores.

A primeira etapa, é o DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) ou Oxi-Cat. Esse catalisador de oxidação está a montante do SCR e nele são oxidados hidrocarbonetos remanescentes e uma parcela do NO, CO e parte do PM (Giongo *et al*, 2012; Dziubiński, 2016) .

Após o DOC, acontece a injeção da solução de ureia que, na presença da alta temperatura dos gases de escapamento, se hidroliza resultando em amônia (NH₃), CO₂ e água. O SCR é a segunda etapa, onde a amônia é consumida na reação do NO₂, transformando-o em N₂ e água. Após o SCR está a terceira etapa, coposta pelo catalisador Slip-Cat ou Slip DOC, onde se oxidam os possíveis resíduos de amônia que não foram reagidos no SCR, seja por excesso de injeção desse composto ou por falta de eficiência do catalisador, transformando-os em N₂ e água (Giongo *et al*, 2012).

Exclusivamente para os veículos que usam o SCR, também é limitada a emissão de amônia (NH₃). A emissão de NH₃ ocorre quando alguma quantidade de amônia não

reagida no catalisador SCR passa também pelo Slip-Cat ou Slip DOC sem ser eliminada e acaba por ser liberada para a atmosfera.

Na fase P8 esse conjunto pode ser combinado com um DPF (*Diesel Particle Filter*), que retém com eficiência próxima de 99% o PM que não foi reagido na primeira etapa.

O seu funcionamento depende do abastecimento de um reservatório em separado com a solução de ureia, comercialmente conhecida como ARLA 32, e só passa a ser efetivo quando o catalisador ultrapassa a temperatura mínima de funcionamento, sendo que, quando opera na temperatura adequada, esse sistema pode ter uma eficiência de redução de NO_x superior a 80%. Outro cuidado é que o combustível deve ser de baixo enxofre, pois a presença do enxofre pode neutralizar a ação do catalisador de redução, inutilizando-o (Giongo *et al*, 2012).

Forceto e Abrantes (2017) explicam que existem ainda dispositivos que podem fraudar o sistema de pós-tratamento inibindo a injeção de ARLA 32, eliminando o gasto com o abastecimento do produto. Isso já foi detectado no Brasil, em caminhões da fase P7, e pode elevar as emissões de NO_x para níveis compatíveis com a fase Euro III ou P5.

Uma outra tecnologia que passou a ser usada ainda na fase P7 é a do sistema de tratamento de emissões do tipo EGR. Nesse sistema, uma parte dos gases do escapamento são desviados para uma etapa de refrigeração e, então reinjetados na admissão do motor, controlado por uma válvula que dosa a proporção ideal para cada regime de operação. A recirculação dos gases de escape na câmara de combustão reduz a disponibilidade de oxigênio durante o processo de combustão, propiciando a redução na formação de NO_x. Na Figura 4: **Sistema de pós-tratamento EGR (Ventura, 2009)**. está ilustrado um exemplo desse sistema.

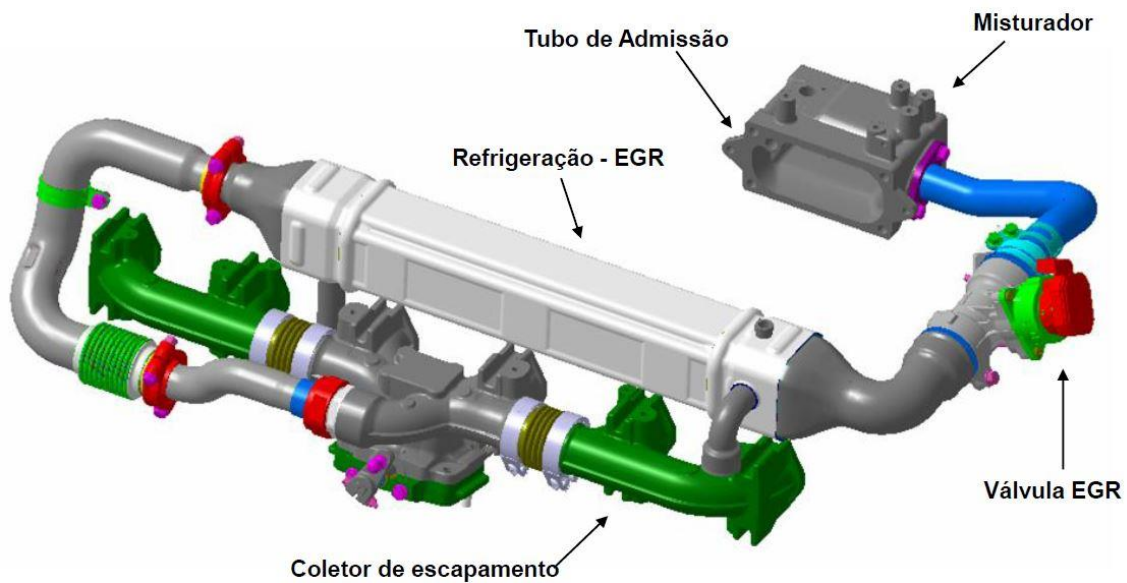


Figura 4: Sistema de pós-tratamento EGR (Ventura, 2009).

Esse sistema, assim como o SCR, age para reduzir a emissão do NO_x . Normalmente é usado em conjunto com um catalisador de oxidação, que pode estar ou não associado a um DPF, pois esse sistema por si só não é suficiente para atender aos limites de material particulado.

Para atingir os limites de emissões determinados pela fase P8, os novos sistemas de tratamento se tornarão ainda mais complexos do que na fase P7. É possível que sejam usadas as concepções que reúnem vários elementos que já faziam parte de sistemas atuais, combinando-os para, no conjunto, atingir as reduções requeridas.

2.2. A regulação de emissões no Brasil

A regulação de emissões por veículos automotores no Brasil é feita pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), um órgão do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), através do seu Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

Este programa se originou com a Resolução CONAMA nº18 de 1986, que instituiu pela primeira vez limites de emissões veiculares no país (CONAMA, 1986), criando aquela que seria a primeira de uma sequência de regulações que ficaram conhecidas como fases PROCONVE. Estas fases se dividem em duas séries, uma com as fases de veículos

pesados, designadas pela letra “P”, e outra das fases de veículos leves, designadas pela letra “L”, sendo cada letra seguida de um número sequencial. Atualmente o programa se encontra nas fases L6 e P7 (CONAMA, 2008).

Nos veículos pesados da frota brasileira são predominantes os motores de ciclo Diesel, compondo quase a totalidade do segmento. Por esta razão, nas próximas páginas, sempre que este trabalho tratar de veículos pesados, estará se referindo a veículos com este tipo de motor. Para estes, os poluentes regulados para efeitos de homologação em emissões são: CO, HC, NO_x e PM. Os dois últimos são as emissões mais relevantes nos veículos pesados e demandam maior esforço por parte dos fabricantes e sistemistas para o cumprimento dos limites, ao mesmo tempo que prejudicam a saúde humana.

Nos veículos leves, para efeito de homologação, as emissões reguladas na atual fase L6 são: CO, HC, NMHC, NO_x, CHO e PM, a depender do combustível e tipo de motor. Enquanto o NO_x e o PM são emissões mais importantes nos veículos com motores do ciclo Diesel, o CO e o HC são mais importantes para os que usam motores com ignição por centelha. Entretanto, quando esse tipo de motor usa a tecnologia de injeção direta de gasolina, combinação que começa a ganhar volume na frota de leves, também causa emissões de PM, que, na fase L7 passará a ser regulada por um limite próprio para esse tipo de motor. Ainda, para os modelos leves com ciclo Diesel, as próximas fases do CONAMA já publicadas prevêm também a limitação para a emissão de NH₃ no caso do uso de sistema de pós-tratamento com ureia, assim como ocorre nos veículos pesados.

Desde o seu início até as fases atuais, que vigoram desde 2012, o CONAMA já reduziu significativamente os limites de emissões. Para os veículos pesados, a fase P7 já computa, por exemplo, reduções de 87% em NO_x e 97% de PM, enquanto para os veículos leves houve redução de 95% em CO e 96% em NO_x (MMA, 2011). Estes números são compatíveis com os da Europa, que, por exemplo, registra reduções nas emissões de 92% de NO_x e de 96% de PM (ACEA, 2019). No caso brasileiro, pode-se ver a evolução a cada fase do PROCONVE para os veículos pesados na Tabela 4 e para os veículos leves na Tabela 5.

Tabela 4: Evolução dos limites das fases PROCONVE de emissões em veículos pesados. Adaptado de CONAMA (2008), MMA (2011).

Fase	EURO	CO	HC	NO _x	PM	Opac.	Data	Teor de enxofre (S)
------	------	----	----	-----------------	----	-------	------	---------------------

P1	-	14,00 ⁽³⁾	3,50 ⁽³⁾	18,00 ⁽³⁾	xxx ⁽³⁾	k=2,5	1989	
P2	Euro 0	11,2	2,45	14,4	0,60 ⁽³⁾	k=2,5	1994	3.000 a 10.000 ppm
P3	Euro 1	4,9 / 0,7 ⁽²⁾	1,23	9	0,4	k=2,5	1996	3.000 a 10.000 ppm
P4	Euro 2	4 / 0,15 ⁽²⁾	1,1	7	0,15		2000	3.000 a 10.000 ppm
P5	Euro 3	2,1	0,66	5,0	0,1	0,8	2006	500 a 2.000 ppm
P6 ⁽¹⁾	Euro 4	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5	2009	50 ppm
P7 ⁽¹⁾	Euro 5	1,5	0,46	2	0,02		2012	10 a 500 ppm

⁽¹⁾ Ensaio ESC / ELR.

⁽²⁾ Somente motores de ciclo Diesel.

⁽³⁾ estes limites não foram exigidos legalmente nas fases iniciais.

Tabela 5: Evolução dos limites das fases PROCONVE para veículos leves. Adaptado de CONAMA (2009), MMA (2011).

Fase	Tipo	CO	HC	NMHC	NO _x	CHO	CO % m.lenta	PM
L1: 1989	Pass	24	2,1		2,0		3,0	
L2: 1996	Pass	12	1,2		1,4	0,15	2,5	
	Com	24	2,1		2,0	0,15	3,0	
L3: 1997	Pass	2,0	0,3		0,6	0,03	0,5	
	Com	2,0	0,3		0,6	0,03	0,5	
	Com >1700	6,2	0,5		1,4	0,06	0,5	
L4: 2007	Pass	2,0	0,3 ⁽³⁾	0,16 ⁽³⁾	0,25 / 0,60 ⁽²⁾	0,03	0,5	0,05 ⁽²⁾
	Com	2,0	0,3 ⁽³⁾	0,16 ⁽³⁾	0,25 / 0,60 ⁽²⁾	0,03	0,5	0,08 ⁽²⁾
	Com >1700	2,7	0,50 ⁽³⁾	0,20 ⁽³⁾	0,43 / 1,00 ⁽²⁾	0,06	0,5	0,10 ⁽²⁾
L5: 2009	Pass	2,0	0,3 ⁽³⁾	0,05 ⁽³⁾	0,12 / 0,25 ⁽²⁾	0,02	0,5	0,05 ⁽²⁾
	Com	2,0	0,3 ⁽³⁾	0,05 ⁽³⁾	0,12 / 0,25 ⁽²⁾	0,02	0,5	0,05 ⁽²⁾
	Com >1700	2,7	0,50 ⁽³⁾	0,06 ⁽³⁾	0,25 / 0,43 ⁽²⁾	0,04	0,5	0,06 ⁽²⁾
L6: 2012	Pass	1,30	0,30 ⁽³⁾	0,05	0,08			0,025 ⁽²⁾
	Com	1,30	0,30 ⁽³⁾	0,05	0,08			0,030 ⁽²⁾
	Com >1700	2,0	0,50 ⁽³⁾	0,06	0,25 / 0,35 ⁽²⁾			0,040 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Veículos comerciais com massa de ensaio maior que 1700 kg.

⁽²⁾ Somente para motores de ciclo Diesel.

⁽³⁾ Somente para veículos a gás natural.

Na fase P7 brasileira e nas anteriores para veículos pesados, são usados os ciclos de teste de banco de motor europeus: o ESC (*european stationary cycle*), que é o ciclo estacionário europeu, o ETC (*european transient cycle*), que é o ciclo transiente europeu e o ELR (*european load response*) que é o ciclo europeu de resposta à carga. O ESC tem a função de representar a condução em estradas, o ETC a condução urbana e rural e o ELR é usado para a medição de opacidade (fumaça). Estes ensaios são descritos na norma brasileira NBR 15634 (ABNT, 2012).

2.2.1. As novas fases da regulação de emissões

O CONAMA já publicou as resoluções relativas às suas próximas fases da legislação de emissões para veículos pesados e leves, P8, L7 e L8, nas Resoluções 490/18 (CONAMA, 2018a) e 492/18 (CONAMA, 2018b).

Pela Resolução 490/18 (CONAMA, 2018a), na próxima fase, P8, no Brasil, a iniciar em 2022, será adotado o procedimento para homologação de veículos pesados harmonizado mundialmente, WHDC (*world-wide harmonized heavy duty certification procedure*). Esse procedimento usa o ciclo harmonizado mundialmente transitório, WHTC (*world harmonised heavy duty transient cycle*), para substituir o antigo ETC, e o ciclo harmonizado mundialmente estacionário, WHSC (*world harmonised heavy duty stationary cycle*), que é o ciclo estacionário a substituir o antigo ESC. Esses ciclos fazem parte do (CONAMA, 2018a).

Os limites das fases futuras podem ser vistos na Tabela 6, para veículos pesados e na Tabela 7 para os leves.

Tabela 6: Limites da fase PROCONVE P8, em g/kWh (CONAMA, 2018a).

Ciclo	CO	THC ⁽¹⁾	NMHC ⁽²⁾	CH ₄ ⁽²⁾	NO _x	NH ₃ ⁽³⁾ ppm	PM Massa	PN #/kWh
WHSC ⁽¹⁾	1,500	0,130	-	-	0,400	10	0,010	8,0 x 10 ¹¹
WHTC ⁽¹⁾	4,000	0,160	-	-	0,460	10	0,010	6,0 x 10 ¹¹
WHTC ⁽¹⁾	4,000	-	0,160	0,500	0,460	10	0,010	-
OCE (WNTE) ⁽¹⁾	2,000	0,220	-	-	0,600	-	0,016	-

CR / ISC	6,000	0,240	0,240	0,750	0,690	-	-	-
----------	-------	-------	-------	-------	-------	---	---	---

⁽¹⁾ Aplicável a motores de ignição por compressão

⁽²⁾ Aplicável a motores de ignição por centelha

⁽³⁾ Aplicável em veículos equipados com sistemas de pós-tratamento com agentes redutores ou veículos abastecidos a gás.

Tabela 7: Limites para veículos leves da fase PROCONVE L7, em g/km a partir de 2022 (CONAMA, 2018b).

Ensaio	CO	NO _x + NMOG	CHO ⁽³⁾	PM ⁽¹⁾	NH ₃ ⁽²⁾	Emissões evapor. ⁽⁵⁾	Emissões de abastecimento
Passageiros	1,00	0,080	0,015	0,006	Anotar	0,5 g/teste	50 mg/L ⁽⁶⁾
Comerciais ign. por centelha		0,140 ⁽³⁾		0,006 ⁽³⁾			
Comerciais Diesel		0,320 ⁽⁴⁾		0,020 ⁽⁴⁾			

⁽¹⁾ Aplicável a veículos equipados com motores de ignição por centelha e injeção direta de combustível ou motores do ciclo Diesel

⁽²⁾ Aplicável a veículos equipados com motores do ciclo Diesel com sistemas de pós-tratamento que utilizem agente redutor líquido

⁽³⁾ Aplicável somente a veículos equipados com motores com ignição por centelha

⁽⁴⁾ Aplicável somente a veículos equipados com motores do ciclo Diesel

⁽⁵⁾ Não aplicável nos ensaios em que os veículos utilizarem óleo diesel ou GNV

⁽⁶⁾ A ser implantado progressivamente de 2023 a 2025.

Ainda, fica definido o limite de 0,4 m⁻¹ para fumaça em aceleração livre conforme norma ABNT NBR 13037/2001, tanto nos veículos leves quanto nos pesados. Nos leves este limite se presta à homologação e fiscalização e nos pesados se presta à fiscalização e inspeção em uso.

Em 2025 se iniciará a fase L8, com metas corporativas e cujos limites máximos se reduzem gradativamente até 2031 (CONAMA, 2018b).

2.2.2. Os resultados da regulação de emissões

Fiebig *et al* (2016) reconhecem que a regulação ambiental tem fundamental importância como alavancadora da tecnologia de controle de emissões e da preservação do meio ambiente.

Observando a evolução dos limites e os avanços tecnológicos por eles estimulados, os resultados são animadores pois, segundo estimativas do MMA (2013), apesar de a frota brasileira ter aumentado 257% entre 1992 e 2012, houve queda das emissões totais de CO em 76%, de HC em 74% e de PM em 39% no mesmo período. Apenas as emissões de NO_x tiveram aumento, subindo 6%, como pode ser visto na Figura 5.

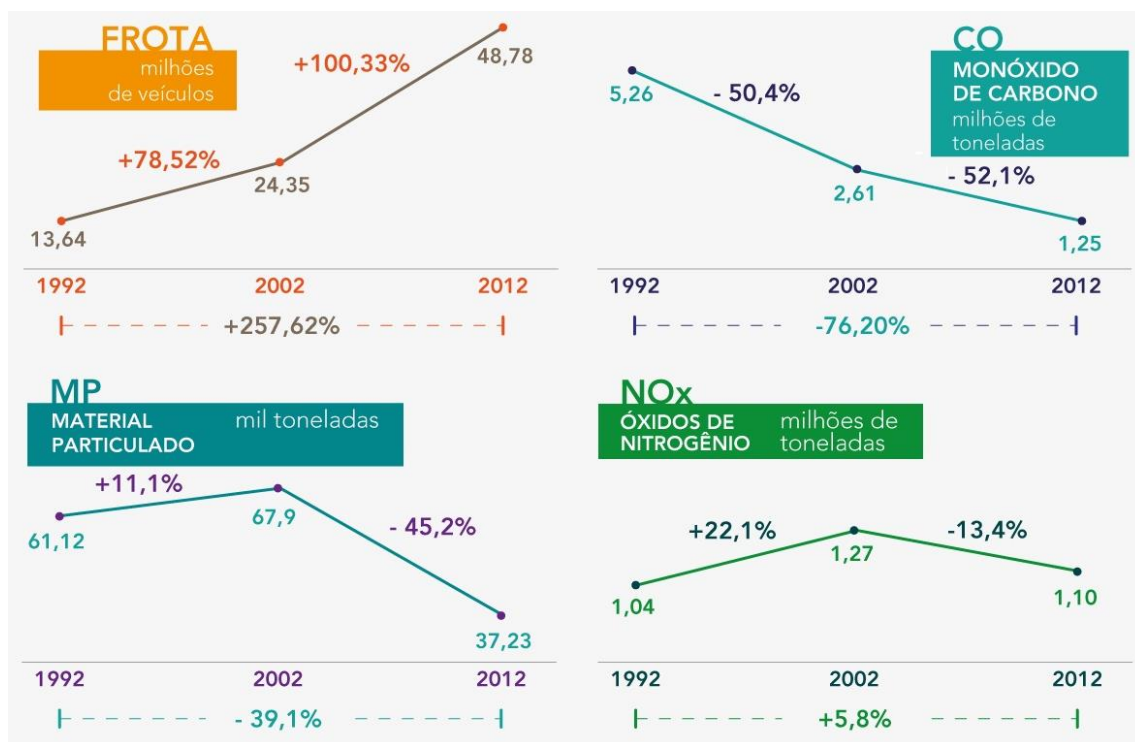


Figura 5: Evolução da frota e emissões de CO, NO_x e PM de 1992 a 2012, adaptado de MMA (2013).

Por outro lado, é preciso destacar que esses dados são de estimativas feitas com base em fatores de emissões obtidos a partir das medições em laboratório. Há dados de medições de concentrações de poluentes presentes no ar, principalmente da Europa, que indicam que a imposição de limites rígidos para a homologação dos veículos e motores pelos meios tradicionais não têm surtido o efeito esperado na qualidade do ar, mesmo

considerada a complexidade da relação entre as emissões veiculares e as suas concentrações na atmosfera, que é um sistema não controlado. Por essa razão, na busca da União Europeia pelas razões para os altos níveis de NO_x que se verificaram no ar, o controle de emissões feito pelos meios tradicionais, com auxílio da homologação em laboratório, sob ciclos de condução padronizados em dinamômetro, tiveram sua eficácia questionada. Segundo Mamikoglu *et al* (2017), mesmo para os veículos leves, que são testados no dinamômetro de rolo, apesar de muitas tecnologias mostrarem bons resultados nos testes oficiais, as emissões podem variar significativamente nas condições reais de direção.

2.3. Medição de emissões em laboratório

2.3.1. Os procedimentos e ciclos de laboratório tradicionais

Para os veículos leves no Brasil, a fase L6 exige que a comprovação do cumprimento dos limites de emissões para homologação seja feita através de ensaios em dinamômetro de chassi. Este método de laboratório é um dos ensaios mais comuns para verificação dos níveis de emissões de veículos leves ao redor do mundo. Neste ensaio, o veículo sob teste é posicionado com suas rodas de tração sobre um rolo que é ligado a um dinamômetro e simula as resistências que normalmente atuam sobre esse veículo quando em rodagem, com parâmetros dinâmicos previamente levantados em pista.

O *setup* do dinamômetro permite o cálculo do torque sobre as rodas do veículo a cada momento, levando em conta os parâmetros previamente programados, como a massa do veículo, aerodinâmica e arrasto de pneus. O ensaio usa ciclos de condução padronizados enquanto os equipamentos analisadores do laboratório medem as emissões.

Um ciclo de condução, propriamente dito, é uma sequência de pontos de velocidade que devem ser seguidos pelo condutor, formando um perfil de velocidades. Esta sequência de pontos também é resultado de um levantamento feito no mundo real, registrando os valores de velocidade de um trajeto realizado no trânsito normal em vias públicas e, depois, repetida na forma de ciclo, reproduzindo essa condução. Este é o ensaio de laboratório que mais se aproxima da condução real, já que nela se baseia, e ainda testa todo o conjunto do veículo, incluindo pneus, transmissão e demais periféricos. Em outras

palavras, este procedimento é, na origem, uma simulação do que acontece nas ruas, feita de maneira controlada e reprodutível dentro do laboratório.

O ambiente controlado da sala de testes e a elevada precisão dos equipamentos de medição conferem uma boa repetitividade e reprodutibilidade (R&R) ao ensaio, o que o torna ótimo para testes de comparação aos limites (Buchholz, 2017).

Para os veículos pesados brasileiros, a fase P7 também usa os ciclos padronizados para a homologação, porém os ensaios são feitos em dinamômetro de motor (ABNT, 2012), sem os demais itens que compõe o veículo. Os ciclos usados são o ESC, o ETC e o ELR, os mesmos usados nas fases anteriores da Europa. Estes ensaios são mais distantes da realidade do uso por não serem capazes de levar em conta as variações que ocorrem na aplicação, como transmissão, tipo de veículo, uso, carga etc., mas têm a R&R ainda melhor em relação ao dinamômetro de rolo.

A homologação dos veículos pesados adota os testes em dinamômetro de motor para simplificar o processo, já que para um mesmo motor pesado pode haver grande variação de aplicações e modelos de caminhões e ônibus e, se fossem testados os veículos seria necessário um grande número de testes. Também não há dinamômetros de chassi de grande porte disponíveis no Brasil, capazes de testar caminhões e ônibus. O seu elevado custo e o grande espaço físico demandado nos laboratórios são algumas das razões porque estes equipamentos são pouco comuns, mesmo fora do Brasil.

2.3.2. Os novos procedimentos e ciclos de laboratório

Na sua fase atual para veículos pesados, Euro VI, a Europa, que também faz homologação dos pesados em dinamômetro de motor, modernizou seus procedimentos para passar a usar os ciclos do procedimento harmonizado mundialmente para certificação de regime pesado, WHDC. Esse procedimento também será adotado na próxima fase de veículos pesados do Brasil, P8.

Da mesma forma, para os veículos leves, a Europa também já está fazendo a modernização dos seus procedimentos de homologação, deixando de usar o ciclo NEDC. O novo procedimento de teste de veículos leves harmonizado mundialmente é o WLTP (*worldwide harmonised light vehicle test procedure*) que, entre outras coisas, utiliza uma

massa do ensaio aumentada na configuração do dinamômetro. Também usa o ciclo de teste de veículos leves harmonizado mundialmente, WLTC (*world harmonized light-duty vehicles test cycle*), composto por quatro fases com velocidades máximas distintas, se tornando adaptável para atender a situações específicas de diversos locais. Os testes levam em conta equipamentos opcionais, pontos de troca de marcha e outros fatores (ACEA, 2019).

Donateo e Giovinazzi (2017) explicam que a substituição do ciclo NEDC pelo ciclo WLTC no processo de homologação ocorreu a partir de setembro de 2017. Os autores também reconhecem que o ciclo WLTC é melhor que o NEDC porque tem acelerações mais acentuadas e velocidades de cruzeiro maiores, ao passo que o NEDC ainda contém muito tempo de veículo parado em marcha lenta.

ACEA (2019) explica que o ciclo do WLTP, assim como o WHDC, parte de um movimento mundial e foi desenvolvido usando dados de condução coletados em diversos países, com o objetivo de unificar o padrão de medição, permitindo comparações entre os resultados de emissões veiculares de diferentes países. É um ciclo mais representativo das condições reais de uso, tem regime mais agressivo que os anteriores, maiores velocidades, acelerações e frenagens mais dinâmicas e utiliza valores de torque e potência mais distribuídos pelo mapa dos motores levando a maiores solicitações. Segundo ACEA (2019), além das melhorias sobre o ciclo, o procedimento WLTP também inclui melhor controle sobre a preparação do veículo para o teste, parâmetros de teste, considerações sobre equipamentos opcionais e estabelece a temperatura de teste em 23°C, que é adequada à média europeia.

Na Europa essa mudança foi feita principalmente porque o NEDC já é um procedimento antigo, que foi composto a partir de perfis teóricos de condução e, ainda segundo ICCT (2016), diversos pesquisadores já vinham observando que esse ciclo oferece uma representação muito pobre das condições reais. No Brasil, o ciclo usado até hoje é o FTP 75 (ciclo de emissões em dinamômetro), oriundo do procedimento federal de teste norte-americano.

O ciclo de condução WLTP é dividido em quatro partes com diferentes velocidades médias: baixa, média, alta e extra alta. Cada parte contém uma variedade de fases de condução, paradas, aceleração e de frenagem. Para um determinado tipo de carro, cada

configuração do conjunto de motor e transmissão é testada com o WLTP para a versão mais leve (mais econômica) e mais pesada (menos econômica) do carro (ACEA, 2019).

Entretanto, mesmo com todas as melhorias propostas pelos ciclos harmonizados mundialmente, os testes de laboratório não se tornarão totalmente representativos das condições reais de direção dos veículos seu pelos seus usuários, que é algo muito amplo para ser reproduzido. O laboratório não é capaz de considerar variáveis como o comportamento dos motoristas, condições de tráfego ou condições climáticas (ACEA, 2019).

2.3.3. Deficiências dos testes de laboratório

Weiss *et al* (2012) afirmam que, na Europa, os ensaios de homologação, para veículos leves a diesel da fase Euro 4 e Euro 5 não representam bem as condições de uso real dos veículos. Afirmam que a baixa carga durante os testes em ciclo de condução comprometem a representatividade do procedimento e deixa a possibilidade dos fabricantes calibrarem os seus motores para atender aos limites apenas durante o teste de homologação, podendo vir a emitir muito acima dos limites quando no seu uso real. Esta visão é reforçada por Franco *et al* (2014), principalmente para o NO_x e também por May *et al* (2014).

Wang *et al* (2018) destacam em seu trabalho que, na China, ao testar no ciclo WLTC veículos que foram homologados pelo ciclo NEDC, que é mais brando, foram medidas emissões de CO de até duas vezes o limite. Huo *et al* (2012) também afirmam que, devido às diferenças entre as condições de teste em dinamômetro e as do uso real no tocante à severidade, os fabricantes podem utilizar os recursos do controle eletrônico dos motores para ajustar o motor para respeitar os limites apenas nas condições mais brandas, que são comuns nos ensaios de laboratório, podendo emitir muito acima do limite nas condições que não são cobertas pelo teste. Essa estratégia é conhecida como *cycle beating* (vencer o ciclo – tradução livre). Isso é especialmente válido para veículos leves e médios a diesel (Forcetto e Abrantes, 2017).

Os usuários em geral utilizam os seus veículos de forma muito mais dinâmica do que os ciclos de laboratório e esta é considerada a maior causa das discrepâncias entre os

resultados dos testes e o consumo de combustível (entenda-se emissão de CO₂) em uso real que é percebido pelos usuários (Rykowski *et al*, 2005, Mamikoglu *et al*, 2017). As emissões também se tornam maiores, em função das acelerações e frenagens mais intensas (Donateo e Giovinazzi, 2017).

Quaisquer condições que afetem a carga sobre o motor, como aclives, influenciam o consumo e as emissões, e são difíceis de simular em laboratório. Os dados de testes com o ciclo FTP 75 são divulgados ao público no programa de etiquetagem veicular do Inmetro para orientar os usuários na escolha de suas compras. Mas Rykowski *et al* (2005) comparam resultados de autonomia de diversos veículos no ciclo FTP 75 com testes de rua e os dados mostram consistentemente uma menor autonomia no mundo real.

Ainda pior é a prática da fraude, utilizando programações fraudulentas capazes de reconhecer que o veículo está sob teste e controlar as emissões apenas neste momento. Tratam-se de artifícios que se valem do elevado poder computacional da central de controle do motor, ECU (*electronic control unit*), para reconhecer quando o veículo ou motor está sob teste, fazendo com que esta adote um mapa de controle específico para atender aos limites, apenas durante o teste. Ao identificar que o veículo está fora do laboratório, a central usa um mapa diferente, que não leva em conta as emissões, anulando completamente a eficácia do teste. Este tipo de artifício é conhecido como *defeat devices* (dispositivos de anulação – tradução livre) (Huo *et al* (2012), Forcetto e Abrantes, 2017).

2.4. Medição de emissões em condução real - RDE

A Europa implementou ao longo dos anos uma política bastante restritiva para as emissões veiculares mas, apesar disso, a Comunidade Europeia observou que, mesmo considerando a complexidade do sistema atmosfera e que a relação entre as emissões e a poluição não é necessariamente linear, o estreitamento dos limites não teve o efeito esperado sobre a melhoria da qualidade do ar. Por isso, essa comissão, identificando que poderiam existir falhas nos métodos de medição de emissões, voltou a atenção para a possível diferença entre os testes de laboratório e as emissões dos veículos em uso real.

De fato, uma vez concebidos o equipamento PEMS e o teste RDE, medições com este procedimento comprovaram que, na média, os veículos apresentam resultados de

emissões maiores em testes RDE do que quando testados nos ciclos de condução em dinamômetro, em laboratório, seguindo os procedimentos tradicionais de homologação (May *et al*, 2014), e se verificam até mesmo emissões que superam os limites em muitas vezes, especialmente para o NO_x (Franco *et al*, 2014).

Para tratar essas diferenças, as regulações de emissões europeias atuais passaram a incluir o RDE na homologação dos veículos (EC, 2018a). Nos Estados Unidos da América o teste RDE também é usado, não para a homologação, mas com fins de monitoramento, verificando se os veículos que estão em circulação estão demasiadamente afastados dos limites de homologação (Mamakos *et al*, 2013; Buchholz, 2017).

Na Figura 6 está ilustrada de forma simplificada a instalação do equipamento PEMS para um teste RDE em um veículo leve, mas esse esquema também é válido para o caso dos veículos pesados.

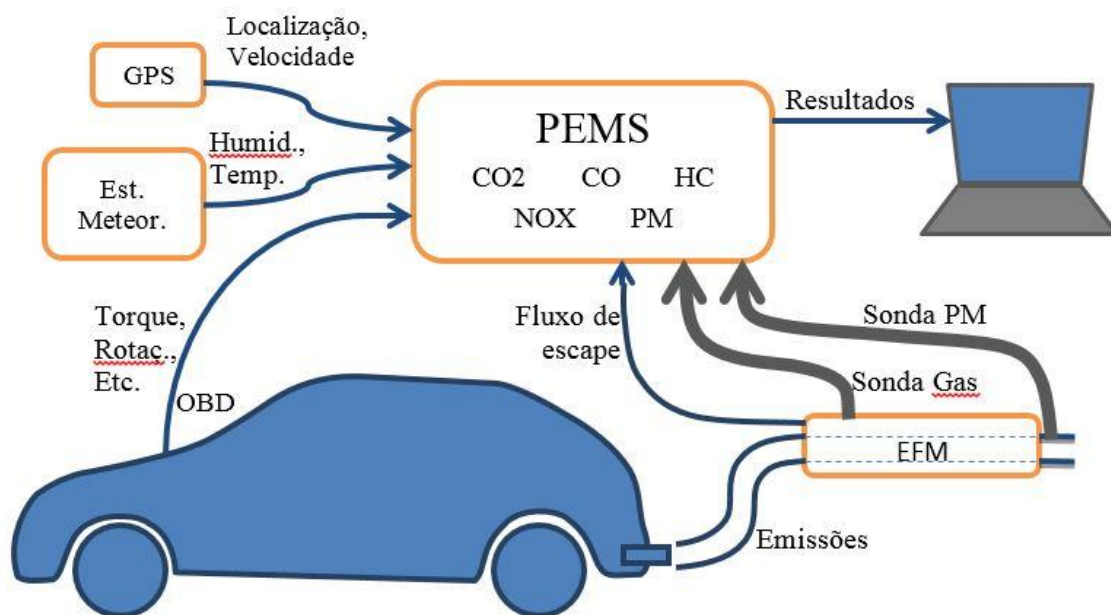


Figura 6: Diagrama de instalação do PEMS em um veículo para teste RDE.

Uma imagem da montagem de um equipamento PEMS em um veículo utilitário leve a diesel é mostrada na Figura 7.



Figura 7: Equipamento PEMS montado em um veículo.

No Brasil o ensaio RDE passará a fazer parte do processo de homologação tanto para veículos pesados como para leves, nas próximas fases da regulação. As respectivas resoluções já foram publicadas e adotarão o padrão europeu para o procedimento de teste CONAMA (2018a, 2018b).

2.4.1. Diferenças entre o RDE e o laboratório

A literatura aponta que os resultados do RDE se mostram maiores que os do laboratório porque o RDE apresenta maior severidade por circular nas ruas, comportamento mais agressivo do condutor, maior inércia (massa do veículo) de teste, maior carga imposta pelas variações de relevo e problemas de sincronismo de medição do fluxo de escape no PEMS (Forceto e Abrantes, 2017).

Segundo Bielaczyc (2015), entre os principais motivos para o RDE ser mais severo estão os aclives e declives, pois suas emissões não se compensam mutuamente, e ao final são

maiores do que no terreno plano. Neste aspecto deve-se levar em conta que os ciclos de teste no dinamômetro não simulam aclives e declives.

ACEA (2019) compara os testes de laboratório, não ao teste RDE, mas ao uso real. Também reconhece estes fatores e ainda cita as diferenças de carga, fatores climáticos e estado de manutenção como causas das diferenças.

AVL (2018b) considera a influência dos ventos e da altitude nas emissões ao ar livre. Em seus dados são reportados aumentos importantes na potência demandada em certas condições de ventos e turbulências, para a mesma velocidade. Também se reportam aumentos de NO_x com o aumento da altitude.

Heywood (1988), que detalha o funcionamento dos motores, diz que os motores de combustão interna têm sua melhor eficiência nas condições de plena carga e em rotações próximas à de torque máximo. Isso reforça o fato de que as condições de uso interferem no desempenho dos veículos. Também pode ser relacionado ao fato de que as condições de menor solicitação, como os congestionamentos, são as que resultam nos maiores consumos. Entretanto, para os motores a diesel, as altas temperaturas na câmara de combustão, típicas das condições de plena carga, também favorecem a maior formação de NO_x. Tal fato faz aumentar as diferenças, especialmente para NO_x, como denunciado pela literatura, entre os ensaios em ciclos no dinamômetro, que são brandos, e o ensaio em condução real, que é mais agressivo.

A importância dos ensaios RDE foi reforçada por Mamikoglu *et al* (2017), que relatam que, mesmo para veículos leves, que são testados em dinamômetro de rolo, há dúvidas constantes entre os consumidores sobre a fidelidade dos resultados de eficiência energética dos ciclos padronizados, normalmente utilizados para os testes em laboratório, em representar as condições reais de uso dos veículos. Assim, é de se esperar que a determinação das emissões sofra as mesmas imperfeições. Há comparações que apontam diferenças significativas entre os dois modos.

A Europa, que está na sua fase Euro 6, já adota o ensaio RDE na homologação dos leves. Essa ação, além de aprimorar a medição de emissões no que se refere à representatividade do uso real, também visa dificultar o uso de práticas como o *cycle beating* para se adaptar especificamente para passar nos ensaios ou até mesmo o uso dos *defeat devices* para

burlar as medições. Um exemplo disso é o que foi divulgado recentemente no caso conhecido como *Dieseldgate*, envolvendo a Volkswagen, nos Estados Unidos.

2.4.2. Divergências entre testes de laboratório e mundo real

Na homologação, o veículo sob teste roda um ciclo pré-determinado em dinamômetro de rolo, em condições controladas e com combustível de referência (especial). São testes bastante repetitivos mas pouco representativos pois, entre outras razões, os testes são feitos com ciclos que têm acelerações brandas em relação ao mundo real, simulando a rodagem numa pista reta e plana. Além disso, a temperatura dos testes fica entre 20 e 30°C enquanto no mundo real ela pode variar muito mais. Ainda, de acordo com a CETESB, os fatores de deterioração (FD) considerados no momento da homologação são dados escassos e imprecisos (Forcetto e Abrantes, 2017).

Uma vez que os limites de emissões são muito restritivos e os ensaios de laboratório são brandos e pouco representativos, é comum entre os fabricantes recorrerem ao *cycle beating*, ou pior, criarem os chamados “*defeat devices*”, causando diferenças ainda mais graves, com emissões muito maiores no uso real. Infelizmente o problema ocorre com mais de um fabricante. Pequenas alterações no ciclo NDEC mostraram aumento de emissões de NO_x de 2 a 25 vezes em outros veículos (Forcetto e Abrantes, 2017).

Forcetto e Abrantes (2017) listam as principais estratégias para burlar os testes:

- Atuar somente na faixa de temperatura de 17 a 35°C, que é a faixa de temperatura do laboratório.
- Atuar apenas em partida a frio ou a menos de 70°C. Não funciona no FTP 75, porque há uma partida quente durante o ensaio.
- Atuar apenas nos primeiros 22 minutos de operação, que é a duração máxima dos testes.
- Reconhecimento de teste: existe uma forma legal que se refere ao modo de dinamômetro, para evitar problemas com o controle de tração durante os testes. O problema é que esse recurso pode ser usado de forma fraudulenta: quando reconhece que o veículo está sob teste, a ECU alterna para outra calibração que reduz emissões. Porém, quando a ECU detecta que o veículo está em uso normal,

retorna para a calibração básica, que não controla as emissões ou permite emissões maiores. Neste caso as emissões em uso real podem ser até 40 vezes maiores que os limites, como no caso do *Dieseldgate*.

Sobre as emissões em direção real, desde a publicação da fase Euro 5 a Comunidade Europeia estava preocupada em melhorar a metodologia de homologação para veículos leves utilizando procedimentos mais representativos (Forcetto e Abrantes, 2017).

2.4.3. Vantagens dos testes RDE

As vantagens do PEMS são que as medições são mais representativas das situações reais de uso e dificultam as fraudes, já que o veículo roda em ambiente real, com comportamento aleatório, com janela de temperatura maior e com duração variada (Forcetto e Abrantes, 2017). O teste RDE representa as condições de uso do mundo real muito melhor que os testes de laboratório e seu procedimento resulta em uma robustez superior contra o *cycle beating* e contra as fraudes. Isso porque é mais difícil criar artifícios capazes de identificar quando o veículo está sob teste, seja pelas condições de uso, ou seja, pela faixa de temperatura.

A gama de pontos de operação cobertos pelo teste RDE é muito mais ampla do que a de qualquer ciclo de simulação em laboratório e por isso o ensaio RDE é mais representativo do que os ensaios de laboratório. Na Figura 8 pode-se observar a comparação entre os regimes de operação dentro do mapa do motor, para três testes: o NEDC (ciclo de teste adotado pelos laboratórios europeus), o US06 (ciclo de teste adotado pelos laboratórios norte-americanos) e o RDE. O mapa do motor tem sua área muito mais representada pelo ensaio RDE do que pelos ciclos.

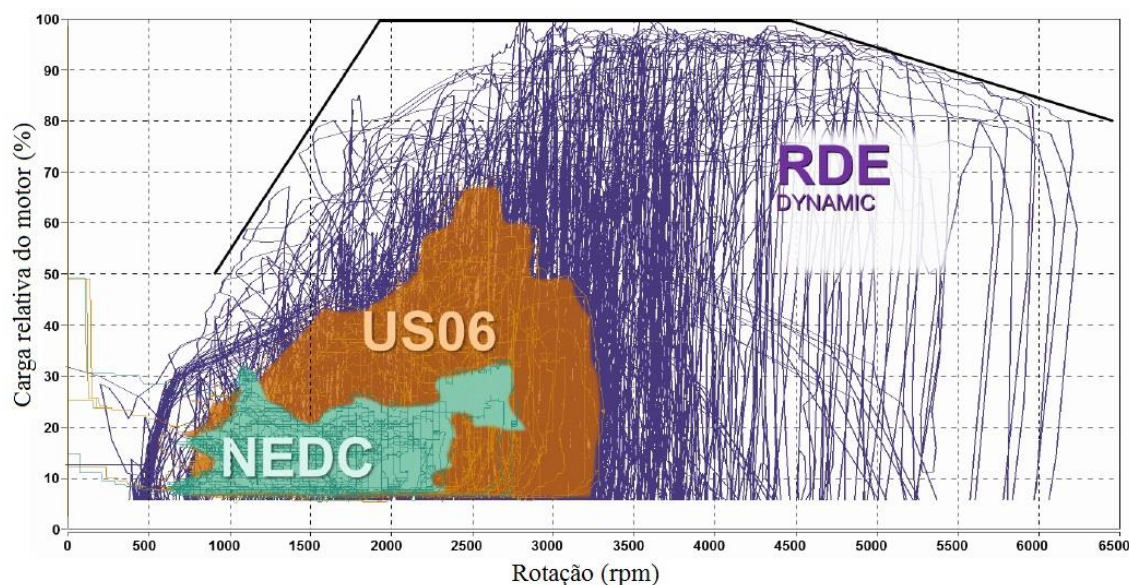


Figura 8: Regimes de operação do motor nos ciclos NEDC, US06 e no RDE (AVL, 2018a).

2.4.4. Deficiências dos testes RDE

Ainda que este ensaio tenha uma representatividade do mundo real melhor do que os demais, um teste RDE é apenas uma amostra do mundo real propriamente dito. Entre outras razões, porque conta com condições de contorno que limitam os fatores de ambiente e de carga e sofre alguma influência do condutor, que quando está realizando o teste tenderá a se controlar mais do que um usuário comum. Também é um ponto de melhoria a variabilidade das medições e a falta de partida a quente. A proporção do teste que se roda com o motor frio é muito pequena, já que o procedimento determina uma duração mínima de 90 minutos. Outra desvantagem é a variabilidade dos testes devido ao ambiente não controlado, além do teste ser contínuo não permitindo a verificação da estratégia de partida a quente, e as emissões nos primeiros minutos, com motor frio, não são levadas em conta. Também, o equipamento ainda é um tanto volumoso e pesado, sendo difícil de instalar em veículos compactos e impossível de acoplar em motocicletas (Forcetto e Abrantes, 2017).

Para o caso específico brasileiro, deve-se considerar também que, no caso da Grande São Paulo, uma viagem típica dura 31 minutos (Forcetto e Abrantes, 2017). Isso é muito menos do que os 90 a 120 minutos do teste RDE. E também se sabe que nos ciclos de

teste de laboratório, a maior parte do HC é emitido nos primeiros minutos, antes do catalisador atingir sua temperatura ideal. Então, numa viagem típica essa condição terá uma proporção maior do que no teste RDE.

Entretanto, conseguir acumular a distância adequada em cidades de grande porte, como São Paulo, por exemplo, pode não ser possível. Devido às baixas velocidades médias que são usuais nessa cidade, pode ser difícil até mesmo atingir a marca de 16 km mínimos em 30 a 40 minutos, que seria o recomendável para cumprir o tempo de teste. A norma prevê para este segmento 26 a 53 minutos. Nos estudos anteriores com testes RDE conduzidos na cidade, o segmento urbano levou 36 minutos para um percurso de 17 km (Forcetto e Abrantes, 2017).

2.5. O RDE no mundo

2.5.1. Balanço da regulação europeia

A norma Euro 6 para veículos leves começou a vigorar em 01 de setembro de 2015 para os modelos novos de veículos leves na Europa, limitando as emissões de NO_x em 80 mg/km para os veículos diesel e 60 mg/km para os veículos a gasolina (ICCT, 2017). Foi nessa fase que também passaram a serem utilizados os testes RDE para a homologação (EC, 2016b).

O relatório do European Federation for Transport and Environment AISBL publicado em setembro de 2018 pela Transport & Environment (TE, 2018), faz um balanço da situação da regulação europeia, três anos após o escândalo *Dieselgate*, da Volkswagen, que trouxe à discussão a eficácia dos testes de homologação.

Segundo TE (2018), em 2015 havia 29 milhões de carros a diesel muito poluidores na Europa e, em 2018, três anos depois, o número continuou aumentando, de forma que as estimativas passaram para 43 milhões de carros que emitem muito acima dos limites em circulação na Europa. A maior parte está na França, Alemanha e Inglaterra. Afirma ainda que se nada for feito esses veículos “sujos” serão exportados para outros países e continuarão a poluir o ar por décadas ao redor do mundo, encurtando a vida das pessoas.

Apesar dos avanços das regulações de emissões nos últimos 25 anos, os progressos na redução das emissões de veículos diesel foram mínimos para NO_x . A emissão média desse poluente pelos veículos de Euro 2 até Euro 5 estiveram em torno de 1 g/km a 1,15 g/km (TE, 2018).

Com a entrada da fase Euro 6, em setembro de 2014, essas emissões reduziram para menos da metade, com 450 mg/km em média, mas isso ainda equivale a cinco vezes o limite permitido. Isso indica que não adianta apenas retirar os veículos antigos de circulação. Os veículos novos Euro 6 podem emitir tanto quanto um Euro 2 em condução rodoviária, e 10% dos piores veículos Euro 6 na estrada contribui com 25% da poluição de toda a frota Euro 6 (TE, 2018).

Na Figura 9 pode-se ver uma ilustração de quanto os veículos emitem segundo o levantamento de TE (2018) e quanto é o limite de cada fase para NO_x . O texto esclarece que uma pequena porção dos veículos Euro 6 são limpos, especialmente quando são dirigidos pelos proprietários de forma suave e em estradas.

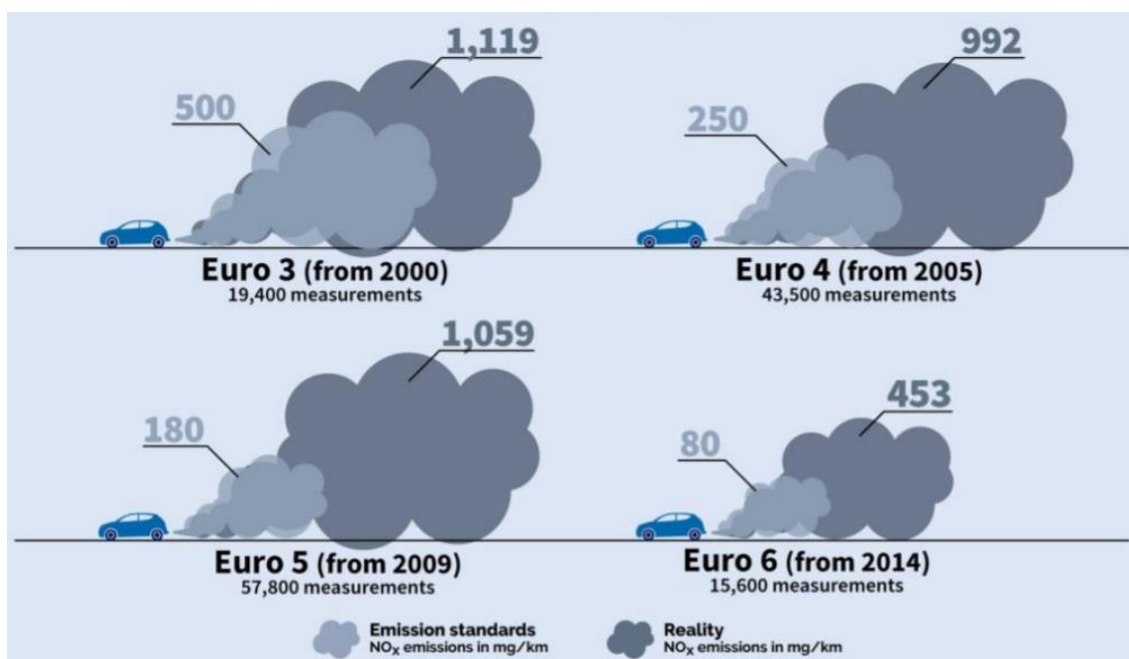


Figura 9: Emissões reais dos veículos x limites Euro para veículos leves (TE, 2018).

Os testes conduzidos por TE (2018) foram realizados com três veículos em rotas RDE e foram encontrados números de emissões muito superiores aos limites da norma, apesar

dos mesmos terem sido aprovados nos testes de homologação. Os modelos utilizados para os testes foram:

- Opel Adam PFI de ciclo Otto a gasolina – veículo com o motor considerado o mais comum dentre os três, com ciclo Otto naturalmente aspirado, alimentado por injeção eletrônica de combustível PFI e catalisador de três vias (oxidação, redução e sensoreamento de O_2) para abatimento de HC, CO e NO_x .

- Ford Fiesta G7 de ciclo Otto com GDI a gasolina – usa o sistema de alimentação GDI, pode ser considerado uma evolução do sistema PFI, com a diferença de que a injeção do combustível é feita diretamente dentro da câmara de combustão. Daí o seu nome, injeção direta de gasolina. Entretanto pelo fato dessa tecnologia apresentar emissão de material particulado, usa um filtro de particulados de gasolina (GPF). Também possui um catalisador de três vias.

- Honda Civic G10 a diesel – esse veículo usa um catalisador do tipo LNT (*Lean NO_x Trap*), que tem a capacidade de acumular o NO_x durante os períodos em que o motor opera na condição pobre, para depois fazer a sua redução, ou seja, se regenerar, usando o poder redutor dos próprios produtos da combustão durante os períodos de operação rica.

No veículo a diesel e no de alimentação por GDI é esperada uma emissão relevante de material particulado. Mas no veículo com alimentação do tipo PFI esse poluente não costuma ser problemático. Em parte isso é explicado por Heywood (1988), que nos seus estudos aprofundados sobre a combustão nos motores, identificou que o material particulado tende a ser formado no processo de queima por difusão. Isso acontece porque, quando entra na câmara, logo antes do início da combustão, o combustível não está homogeneamente misturado ao ar. Ao contrário, está na forma de gotículas que são oxidadas em superfície à medida em que entram em contato com as moléculas de oxigênio. Esse processo tende a oxidar primeiramente os radicais de hidrogênio, em detrimento da fração de carbono. Essa, por vezes, não é totalmente reagida no processo dando origem a aglomerados de carbono que são nucleadores de partículas.

Dessa forma, a injeção indireta de gasolina, PFI, que mistura o combustível ao ar antes mesmo de entrar na câmara, permite que esse se vaporize e crie uma mistura mais homogênea, minimizando a formação de PM. Por outro lado, o caso dos motores GDI,

em que a gasolina é injetada próximo ao momento da ignição, da mesma forma que no ciclo Diesel, perde-se em homogeneização, o que dá margem à queima difusiva, ocasionando maior formação de PM.

As rotas RDE utilizadas por TE (2018) nos testes foram três: uma chamada de RDE suave, onde foi utilizado um estilo de direção suave, totalmente enquadrado na regulação. A segunda rota utilizada foi chamada RDE dinâmica, exatamente na mesma rota do RDE suave, porém com um estilo de condução mais dinâmico, com acelerações mais fortes e velocidades finais maiores, mais compatíveis com o modo usual de dirigir da maioria dos motoristas. A terceira rota é chamada RDE estendido, em que se utilizou uma rota fora das condições moderadas como definidas na regulação, principalmente excedendo em altitude de realização do teste e em ganho cumulativo de altitude. Todos os carros foram testados nas três rotas e sempre com partida a frio.

Todos os modelos usados nesses testes são Euro 6d-temp, o que significa que a homologação é feita com medição dos poluentes HC, CO, NO_x, PM e PN em laboratório no procedimento WLTP e mais o teste RDE testando apenas NO_x e PN. O segmento “temp” indica que está sendo usado o fator de conformidade temporário de 2.1 para NO_x e a margem de 0,5 para o PN (TE, 2018). Apesar de a emissão de CO não ser regulada para os testes RDE para fins de homologação na Europa, o CO foi incluído nos testes desse estudo.

O Honda Civic a diesel, com condução suave, ficou abaixo dos limites de NO_x de 80 mg/km. Mesmo quando conduzido de maneira mais dinâmica, ficou logo abaixo do limite especificado para o RDE, de 168 mg/km. Mas quando dirigido em uma rota fora dos padrões da norma RDE, em estradas com mais subidas, acelerações mais fortes e com velocidades que são mais representativas, compatíveis com aquelas usualmente utilizadas pelos consumidores, as emissões aumentaram em um fator de 9 vezes. Quando ocorreu a regeneração do catalisador, as emissões aumentaram mais 40% (indo para 2.025 mg/km). O PN também aumentou 16 vezes durante a regeneração, porém, por um pequeno período de tempo (TE, 2018). O Ford Fiesta GDI mostrou a eficiência do seu catalisador de três vias e do GPF ficando bem abaixo dos limites de NO_x, entre 20 e 40 mg/km. Mesmo nas condições de RDE dinâmico (condução mais severa), o particulado ficou logo abaixo do limite de 9×10^{11} partículas por quilômetro, nas rotas padrão. Mas nas condições

estendidas, o PN aumentou para 19 a 25 x 10¹¹ partículas por quilômetro, ou seja, duas a três vezes acima do limite RDE. Os valores de CO ficaram muito abaixo do limite que é 1000 mg/km, ficando em 4 a 26 mg/km nas rotas RDE padrão. Mas na rota estendida esse poluente aumentou muito para entre 469 e 1028 mg/km. É importante lembrar que o CO é um poluente importante para os veículos de ciclo Otto (TE, 2018).

O terceiro modelo testado por TE (2018) o Opel Adam, por ser um PFI, não é obrigado a medir PN nos testes RDE, mas mesmo assim essa medição foi feita nesse estudo. Suas emissões de CO foram entre 492 e 735 mg/km nas rotas padrão. Mas na rota estendida os números aumentaram muito, ficando entre 2323 e 2814 mg/km, ou seja, quase três vezes o limite.

Como era de se esperar, esse veículo apresentou emissões de PN muito abaixo do limite. Também foram baixas as emissões de NO_x, que ficaram de 11 a 20 mg/km nas rotas padrão e de 18 a 27 mg/km na rota estendida (TE, 2018).

Isso indica que os veículos a gasolina são bastante sensíveis à variação de altitude e carga do motor quando se consideram as emissões de CO e particulados, enquanto o veículo a diesel se mostrou mais sensível à variação de rota para emissão de NO_x (TE, 2018).

TE (2018) também considera que as definições para a construção de uma rota RDE segundo a norma Euro não garante a representatividade das condições reais de uso dos veículos pelos seus proprietários.

O documento de TE (2018) propõe algumas ações para tornar os veículos mais limpos, dirigidas à Europa. Uma das ações seria reformular a regulação dos testes RDE para tornar os testes mais representativos da maneira como os seus proprietários dirigem, indicando que, mesmo na Europa, onde foram desenvolvidos e ambientados os procedimentos desse teste, não foi atingido um bom patamar de representatividade. TE (2018) pondera que as condições de contorno excessivamente restritivas podem ser uma causa disso.

TE (2018) também mostra, por dados de emissões tomadas remotamente de diversos carros, que há uma grande variação para o excesso de emissões entre diferentes veículos de uma mesma fase, especialmente para Euro 5 e Euro 6 a diesel. Estes emitem desde duas ou três vezes até 19 vezes acima do limite. Os modelos de maior emissão contribuem desproporcionalmente com uma grande fatia do NO_x emitido na Europa. A partir de uma

comparação onde são classificados como grandes emissores os 10% de veículos mais poluentes, foi formado o quadro da Tabela 8, onde se pode observar o peso dos grandes emissores na média da frota. Nesta tabela os resultados estão separados por fase da Euro e são destacados os grandes emissores.

Tabela 8: Contribuição dos grandes emissores de NO_x (TE, 2018).

Fase	Proporção de <i>outliers</i> acima na amostra	Contribuição dos <i>outliers</i> nas emissões totais de NO _x	Quantas vezes em média os <i>outliers</i> emitem acima do limite de NO _x	Quanto a mais os <i>outliers</i> emitem em relação à média da amostragem
Euro 4	12%	20%	6,4	61%
Euro 5	9%	15%	9,5	63%
Euro 6	11%	25%	12,6	124%
Total	10%	18%	-	73%

Fica denotado que, mesmo aprovados nos testes de homologação, incluindo o teste RDE, alguns veículos emitem valores desproporcionalmente altos, reduzindo a eficácia do programa de controle de emissões (TE, 2018).

A Tabela 9 mostra os três modelos de veículos testados nas três diferentes condições de RDE. As rotas são classificadas em suave, dinâmica e estendida, da mais branda para a mais agressiva.

Tabela 9: Veículos testados e tipos de rotas RDE (TE, 2018).

	Rota RDE suave		Rota RDE dinâmica		Rota RDE estendida	
	NO _x (mg/km)	PN (#/km)	NO _x (mg/km)	PN (#/km)	NO _x (mg/km)	PN (#/km)
Ford Fiesta VII	17	8,0 x 10 ¹¹	24	9,1 x 10 ¹¹	30 – 40	19,4 – 24,8 x 10 ¹¹
Honda Civic X	68	0,28 x 10 ¹¹	162	0,35 x 10 ¹¹	1449 – 2025	0,37 – 6,1 x 10 ¹¹
Opel Adam I	11	1,3 x 10 ¹¹	20	2,7 x 10 ¹¹	18 - 27	1,2 – 1,7 x 10 ¹¹

Na Tabela 10 estão apresentados os limites de emissões para os testes RDE conforme a norma Euro 6. Destacam-se os fatores de conformidade (CF) para aplicação nos testes RDE, que nas fases até a Euro 6d temp, foram definidos em CG = 2,1 (TE, 2018). Estes fatores foram introduzidos pela União Europeia para compatibilizar os resultados obtidos

nos testes RDE, reconhecidamente maiores que os dos ciclos de laboratório, aos limites norma (EC, 2016b).

Tabela 10: Limites de emissões da norma Euro 6d temp (TE, 2018).

Poluente	Diesel		Gasolina	
	Limite Euro 6	Para teste RDE	Limite Euro 6	Para teste RDE
NO _x (mg/km)	80	168 (CF = 2,1)	60	126 (CF = 2,1)
PN (#/km)	6 x 10 ¹¹	9 x 10 ¹¹ (CF=1,5)	6 x 10 ¹¹	9 x 10 ¹¹ (CF=1,5)
CO (mg/km)	500	N.A.	1000	N.A.

A Tabela 11 mostra a composição das rotas usadas por TE (2018), comparadas aos limites ditados na norma Euro 6. Nota-se que, para a distância rodada em cada parcela, a rota estendida tem uma proporção maior na urbana do que na rural e autoestrada, em comparação às rotas suave e dinâmica. Tendo em vista que o uso de acelerações e frenagens é mais intenso na condução urbana, essa situação ganha mais peso no resultado final. Além disso, na rota em condições estendidas a média de velocidade urbana é menor e a média de velocidade em autoestrada é maior, o que contribui para rota ser mais severa.

Tabela 11: Características das rotas RDE usadas (TE, 2018).

QUESITO	CONDIÇÃO	LIMITES DEFINIDOS NA NORMA EURO 6	ROTAS RDE, CONDUÇÃO SUAVE E DINÂMICA	ROTA RDE, CONDIÇÕES EXTENDIDAS
Distância	Urbano	> 16 km	27 km	27 km
	Rural	> 16 km	27 km	20 km
	Autoestrada	> 16 km	21 km	17 km
Composição da rota	Urbano	29 – 44 % do percurso total	36%	43%
	Rural	23 – 43 % do percurso total	36%	31%
	Autoestrada	23 – 43 % do percurso total	28%	26%
Velocidade média	Urbano	15 – 40 km/h	28 km/h	17 km/h
	Rural	60 – 90 km/h	75 km/h	75 km/h
	Autoestrada	> 90 km/h	106 km/h	123 km/h
Peso bruto total		≤ 90% do peso máximo do veículo	Atendido (condutor + PEMS)	Atendido (condutor + PEMS)
Altitude	Condições moderadas	0 – 700 m	7 – 122 m	-

	Condições estendidas	700 – 1300 m	-	35 – 894 m
Diferença de altitude		≤ 100 m	54 m	1 m
Ganho de altitude cumulativo		1200 m/100 km	594 m/100 km	2255 m/100 km
Temperatura ambiente	Condições moderadas	0 – 30°C	-	22 – 30°C
	Condições estendidas	-7 – 0°C ou 30 – 35°C	25 – 32°C	-
Tempo parado (%)		6 – 30 % do tempo urbano	21%	3,5%
Velocidade máxima (km/h)		145 (permitido até 160 por 5 min.	133	150

A altitude da rota estendida varia de 35 a 894 m, ou seja, ultrapassa os limites na rota regular conforme a norma Euro 6, enquanto as passagens suave e dinâmica ficaram entre 7 e 122 m, ou seja, dentro das condições chamadas moderadas. Também o ganho de altitude cumulativo da rota estendida ficou em 2225 metros por 100 km, ultrapassando o limite de 1200 m por 100 km, especificado na norma. O percentual de tempo parado da rota estendida também ficou abaixo do limite 16 a 30% se situando em 3,5%, e sua velocidade máxima foi de 150 km/h, frente aos 133 km/h das outras duas passagens, mas sem exceder o limite de 145 e momentâneo de 160 km/h (TE, 2018).

Segundo TE (2018), para os veículos leves o problema do excesso de emissão de NO_x com relação à norma para os veículos de ciclo Otto (ignição por centelha) é bem menor do que para os veículos a diesel (ignição por compressão) pois o pior carro a gasolina da fase Euro 6 apresentou emissões três vezes maior do que o limite, enquanto o pior caso do diesel emitiu quase 19 vezes o limite. Isso leva a crer que, na condição brasileira, onde a maioria dos veículos é do ciclo Otto ou suas variações, como Atkinsons e Miller, o problema de excesso de emissões de n NO_x é muito menos grave do que na Europa.

Por outro lado, a análise de TE (2018) mostra que na Europa há indícios de que as emissões de NO_x aumentam com o envelhecimento da frota de gasolina, que usa os catalisadores de três vias desde a fase Euro 2, mesmo com a entrada da injeção direta de gasolina. Essa observação causa uma certa preocupação porque a frota europeia de veículos leves, segundo a ACEA (2017) já era de 11,1 anos em 2017. No caso do Brasil

a preocupação é ainda maior, pois a frota de leves tinha idade média de 14.2 anos em 2017 (Fenabrave, 2018) e de 14,4 anos em 2018 (Fenabrave, 2019b), e usa os mesmos recursos para controle de emissões.

2.5.2. Comparando ciclos x RDE na Europa

A União Europeia usou por muitos anos o ciclo NEDC por ser um método fácil, com boa repetitividade e reprodutibilidade. As principais características deste ciclo são a temperatura ambiente entre 20 e 30 graus centígrados, velocidade média de 33 km por hora, aceleração máxima de $1,2 \text{ m/s}^2$, tempo na condição parada de 25% do de teste. Apesar de suas vantagens, esse teste é muito brando e utiliza apenas uma pequena fração da potência do motor do veículo (ICCT, 2017).

Mas devido às diferenças de severidade que vinham sendo apuradas, nos testes com PEMS em relação ao laboratório, aliadas à incerteza dos equipamentos PEMS, antes mesmo da introdução dos testes RDE na homologação dos veículos, a União Europeia decidiu, em outubro de 2015, por definir o fator de conformidade para o NO_x , CF, que compreenderia essas discrepâncias. O fator foi adotado desde o início da implantação, em duas etapas: a primeira começando a vigorar na entrada dos testes RDE, em setembro de 2017, com o valor de $\text{CF} = 2,1$, chamado de temporário; e a segunda, a partir de janeiro de 2021, chamado definitivo, com o valor de $\text{CF} = 1,5$, o qual, neste caso, representa um $\text{CF} = 1$, somado a uma margem de 0,5 por conta de possíveis incertezas de medição.

A EC (2016b) também estabelece que a variação admissível de 0,5 possa ser revista anualmente após 2021, para acompanhar o refinamento dos equipamentos PEMS (EC, 2016b; Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016; ICCT, 2017). Como referência, o Centro de Pesquisa da Comissão Europeia, JRC (*Joint Research Centre*), em 2017 já considerava que a incerteza na correlação entre o equipamento portátil e o laboratório era de 30% para NO_x (ICCT, 2017).

As diferenças encontradas entre os testes de laboratório e o RDE são atribuídas não somente às diferenças entre equipamentos, mas principalmente ao fato de os ciclos serem muito brandos, ao passo que as rotas, por terem melhor representatividade da condução real, são mais severas.

Donateo e Giovinazzi (2017) analisaram quatro opções de rotas para copor um teste RDE e observam que as acelerações em baixa velocidade são representativas das condições de paradas e arrancadas, nas inserções ou sinais de trânsito, enquanto as acelerações que ocorrem em alta velocidade são típicas de ultrapassagens. As acelerações também sofrem influência do estilo de condução do motorista que pode ser mais brando ou mais agressivo. Um motorista mais agressivo tende a utilizar acelerações mais acentuadas dispendendo maior energia sobre os freios, elevando de forma significativa o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

As ocorrências do RDE estão mais concentradas em velocidades próximas de 40, 75, 95 e 105 km/h. Mas o maior destaque é para a maior aleatoriedade do RDE. Donateo e Giovinazzi (2017) concluem que a probabilidade relativa dos pontos de velocidade entre 30 e 90 km/h na rota escolhida é maior do que no ciclo WLTC, o que significaria que esse tem a velocidade média urbana menor do que o RDE (Donateo e Giovinazzi, 2017).

Donateo e Giovinazzi (2017) apresentam a ilustração da distribuição de velocidades dos ciclos NEDC, WLTC e do ensaio RDE, reproduzida na Figura 10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, demonstrando que a rota RDE tem velocidades e acelerações mais distribuídas pela área da figura do que os ciclos.

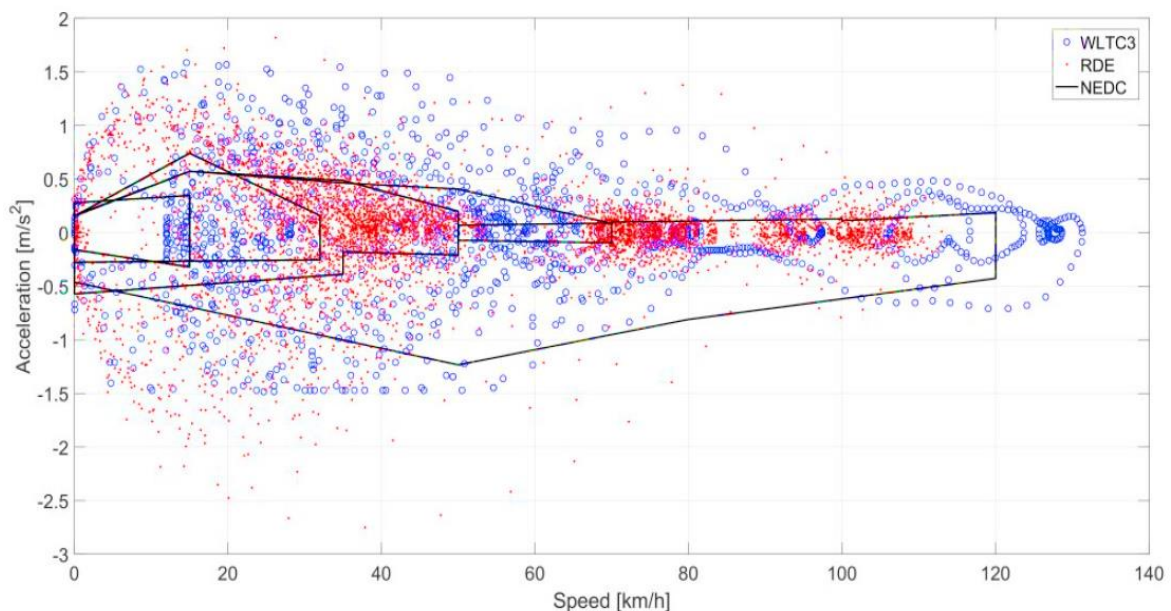


Figura 10: Distribuição de velocidades e acelerações nos ciclos NEDC, WLTC e no RDE (Donateo e Giovinazzi, 2017).

Também observam que sob o tráfego intenso obtém-se menores velocidades médias e maior tempo em marcha lenta, com o veículo parado. Entretanto, isso pode não ser um problema já que a norma exige tempo de parado maior que 10% no trecho urbano.

A Figura 11 mostra uma comparação gráfica entre o NEDC, WLTC e RDE com condução normal, elaborada por Blanco-Rodriguez e Holderbaum (2016).

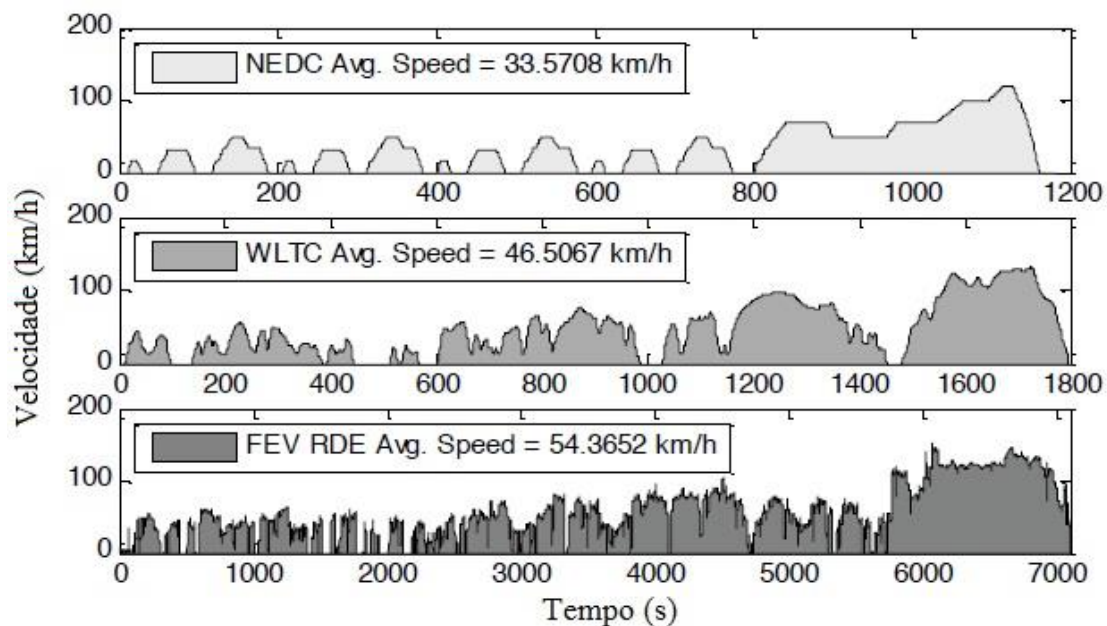


Figura 11: Distribuição de velocidades nos ciclos NEDC, WLTC e no RDE (Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016).

Os autores também mostram que há diferenças entre a distribuição dos pontos de operação nos ciclos e no RDE. O WLTC tem pontos de plena carga até as baixas rotações, com mais emissões de CO_2 e NO_x do que o NEDC. Mas o RDE é ainda mais severo, pois tem pontos de operação em quase todas as áreas do mapa do motor, com carga média superior às dos dois ciclos estudados, o que implica em emissões consideravelmente maiores (Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016). Na Figura 12 pode-se a distribuição da operação do motor na área do gráfico de carga x rotação para os ciclos NEDC, WLTP e US06. O RDE é o teste que mais tem regimes de operação distribuídos pelo gráfico apesar de que, como a própria Comissão Europeia reconhece em EC (2016), os percursos RDE podem não corresponder totalmente às condições de condução da utilização normal dos veículos.

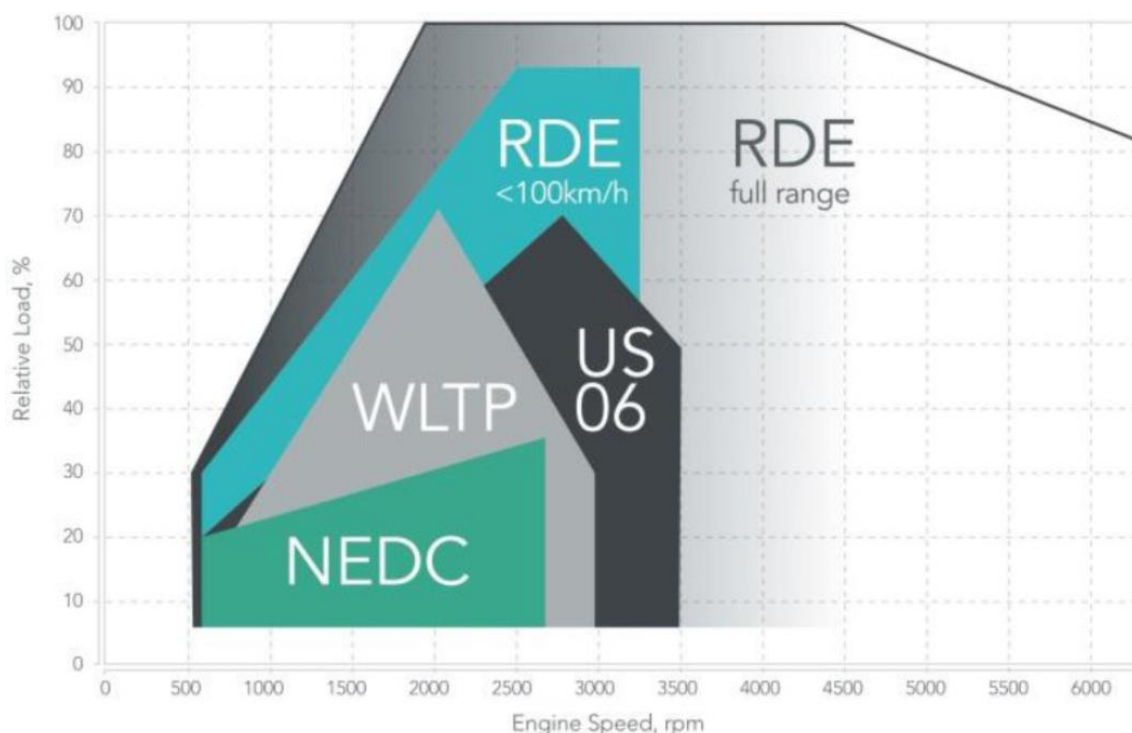


Figura 12: Distribuição dos pontos de operação do motor nos ciclos NEDC, WLTC, US06 e no RDE (Puphunwivat, 2015).

Blanco-Rodriguez e Holderbaum (2016) mostram o quanto as emissões e o consumo podem variar entre os testes de laboratório e o RDE e, mesmo entre testes RDE com diferentes estilos de condução, nomeadamente RDE Drv1 (condução normal) e RDE Drv2 (condução agressiva), foram observadas diferenças significativas.

Para o WLTP, os autores testaram duas versões de um mesmo modelo de veículo leve de passageiros, sendo uma delas a com menor massa e melhor aerodinâmica (TM_L) e a outra com a maior massa e pior aerodinâmica (TM_H). A Figura 13 mostra o efeito dessa diferença sobre consumo e emissões assim como a comparação entre todos os testes realizados. As medições foram feitas em dois pontos, um entre a saída das câmaras de combustão (*engine out*), identificado como EO, e o outro na saída do escapamento, após os sistemas de abatimento de poluentes (*tail pipe*), identificado como TP. Nas barras suspensas é mostrado o aumento do consumo durante a regeneração do LNT (FP)

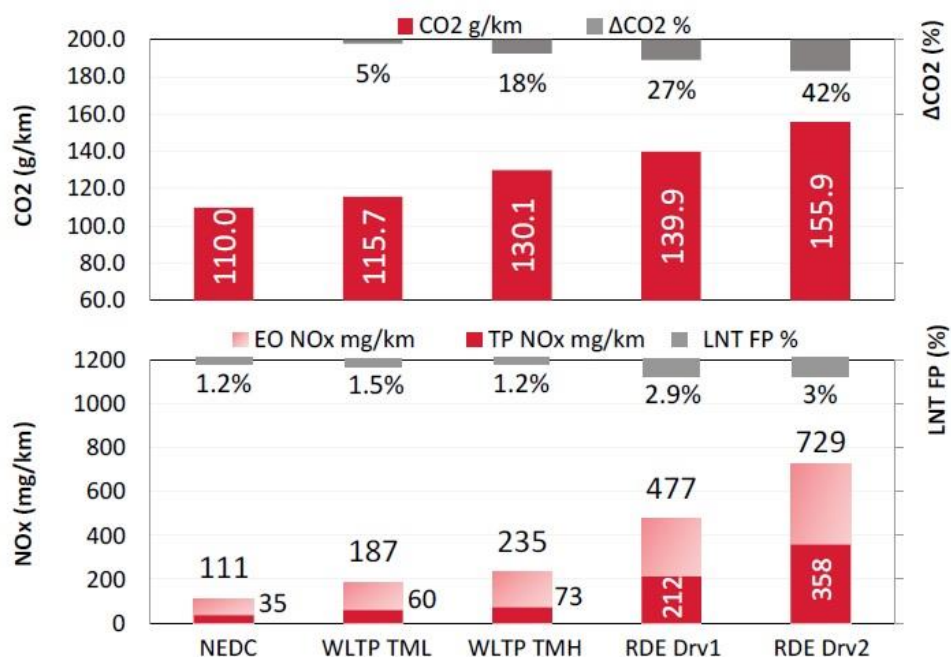


Figura 13: Efeito sobre as emissões de CO₂ e NO_x em função da diferença entre ciclos e RDE (Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016).

Tomando o ciclo NEDC como referência, o aumento de CO₂ é de 5% no WLTP com a versão TM_L e 18% no WLTC com a versão TM_H. No RDE com condução normal o aumento foi de 27% mas, no RDE com condução mais agressiva, o aumento foi de 42%. Para NO_x a variação nos testes causou aumentos ainda mais expressivos, chegando a 71% no ciclo WLTC (TM_L) e a mais de 10 vezes no RDE mais agressivo para medições no escapamento (*tailpipe*), ou seja, já considerando o pós-tratamento (Blanco-Rodriguez e Holderbaum, 2016). No RDE com condução normal, o fator de conformidade ainda foi de 2,65, ainda distante do fator de 2,1 da primeira fase, Euro 6d temp. Isso demonstra que há uma significativa diferença entre os ciclos de laboratório e os testes em condução real, dada a grande sensibilidade das emissões em função do tipo de teste, modo de condução e da carga sobre o motor.

2.5.3. A representatividade dos ciclos e dos testes RDE na Europa

Um dos desafios para a implantação do RDE no Brasil é a definição de rotas de teste que sejam representativas das condições próprias do país. O trabalho de Donateo e Giovinazzi (2017) faz um apanhado das condições de contorno para propor um método para a para otimizar a definição de uma rota RDE, apresentando um trabalho que toma como

referência a fase Euro 6d da norma, que engloba as normas que conduziram a implantação do RDE na Europa.

Segundo Blanco-Rodriguez e Holderbaum (2016), a representatividade dos ciclos de teste com relação ao uso real também era uma das maiores preocupações presente na comunidade europeia quando o teste RDE foi incluído na homologação dos veículos, pois os testes RDE apresentavam divergências em relação aos ciclos de laboratório, que eram a referência até então.

Esses autores destacam que o estilo de condução tem alto impacto nas acelerações assim como nas emissões. Um condutor mais agressivo fará acelerações mais fortes e frequentes e, ao mesmo tempo, usará os freios mais vezes e com mais força. Com isso a carga média sobre o motor será mais alta, o que deve elevar o consumo e as emissões. Por isso, os autores testaram o RDE com dois diferentes estilos de condução, para comparação e concluíram que esse parâmetro tem grande influência nos resultados.

Donateo e Giovinazzi (2017) observaram também que, mesmo tendo probabilidades de ocorrência semelhantes, as acelerações são mais acentuadas no RDE, levando a crer que o WLTC, mesmo sendo mais adequado do que o NEDC, deve apresentar menores emissões de poluentes do que o RDE e que não reflete bem o estilo real de condução dos veículos no trânsito, pelos seus usuários.

ICCT (2017) destaca alguns elementos-chave da legislação RDE:

- Os dados devem ser coletados a cada segundo pelo PEMS.
- Os dados coletados precisam ser analisados por duas diferentes ferramentas de validação para aceitação.
- O teste RDE deve ser realizado como parte dos requisitos de aprovação na homologação em emissões.
- O RDE deve ser realizado em vias públicas, usando o PEMS.
- No primeiro momento, apenas o NO_x e a contagem de particulados foram incluídos nos limites de emissões.
- Com a publicação do texto regulatório no início de 2016, um período de monitoramento entrou em vigor. Neste período, os fabricantes de veículos

automotores precisaram rodar testes RDE, mas sem as obrigações de respeitar os limites.

- Os resultados do RDE precisaram ser disponibilizadas publicamente. Com isso, a intenção foi permitir aos fabricantes, serviços técnicos e autoridades homologadoras se tornassem familiares com o novo procedimento.
- As condições do teste RDE são desenhadas para ser representativas das condições de direção normalmente encontradas nas estradas europeias.
- Foram adotados limites para as condições de ensaio para excluir certos tipos de condições.
- Não há evidência quantificada para estimar a parcela dos eventos do tráfego real que vão estar incluídos nos testes RDE.
- Foram criadas as famílias de veículos para testes RDE com o propósito de reduzir o número de testes a serem feitos por cada fabricante e os critérios chave para definição dessas famílias estão relacionados com a configuração do sistema de pós-tratamento.
- A conexão entre o equipamento PEMS e a central eletrônica de controle do veículo é autorizada mas não compulsória.
- A legislação recomenda realizar testes de validação usando o dinamômetro de chassis para ter certeza de que o equipamento PEMS funciona corretamente.
- A legislação que implementou o teste, o Regulamento EC 692/2008 (EC, 2008) foi aditada para incluir a exigência para os fabricantes dos veículos declararem as estratégias de controle de emissões para os serviços técnicos e para as autoridades homologadoras. Esta ação tem a função de melhorar a transparência e tornar possível para as autoridades identificar estratégias de controle de emissões potencialmente inapropriadas antes da sua introdução no mercado.

Apesar dessas medidas, TE (2018), que trata as falhas do RDE e demais testes de homologação usados no controle das emissões na Europa, considera que os atuais testes RDE, com limites de velocidade baixos e realizados em terreno plano, podem estar falhando em analisar as reais emissões, pois as fábricas de veículos podem estar usando o *cycle beating*.

A Comissão Europeia, desde que determinou a inclusão do RDE na homologação dos veículos, também vem tomando as providências à medida em que a implantação evoluía

e alguns problemas são detectados. Assim foram publicados regulamentos que ficaram conhecidos como os quatro atos da implantação do RDE na Europa.

O primeiro ato, votado em maio de 2015 e publicado no Jornal Oficial da União Europeia (*Official Journal of the European Union*) em março de 2016 como o Regulamento EC 427/2016, (EC, 2016a) incluiu as definições básicas do teste RDE, como caracterização da rota, conceitos de família de veículos, ferramentas de avaliação de dados e requisitos do PEMS (ICCT, 2017). Também definiu as condições de ambiente, número de paradas, velocidade máxima e altitude.

No Regulamento 427/2016 (EC, 2016a), os Apêndices 5 e 6 do Anexo III-A estabelecem as duas ferramentas para o processamento e validação dos dados. Essas ferramentas foram desenvolvidas e incluídas nesta publicação, sendo a primeira ferramenta chamada de Janelas de Médias Móveis (*Moving Average Windows*), descrita no Apêndice 5, e a segunda ferramenta chamada de Quantização¹ dos Valores de Potência (*Power Binning Method*), descrita no apêndice 6. Os dois métodos podem trabalhar com potências ou com emissão de CO₂ e podem corrigir cada situação particular de teste para cima ou para baixo de acordo com as condições de condução. O objetivo é controlar, ao menos parcialmente, a variabilidade das condições de operação encontradas no RDE. Pela norma Euro, para um teste RDE ser aceito ele precisa ser processado e validado por pelo menos um desses métodos (ICCT, 2017).

O Apêndice 7 trata da seleção de veículos para o teste RDE (EC, 2016a). Para facilitar o trabalho de testes e reduzir o número de veículos testados a União Europeia estabeleceu as famílias de testes RDE. Nesta definição, podem ser agrupados numa mesma família os veículos de um mesmo fabricante que tenham características semelhantes, como tipo de propulsão, configuração do trem de força, tipo de motor e cilindrada semelhante. Cada família é designada pelo seu modelo de maior cilindrada. No caso das famílias em que a maior cilindrada dos motores é abaixo de 1500 cc, os modelos com cilindradas até 32% menor podem ser agrupados. Nas famílias em que a cilindrada é acima de 1.500 cc, podem ser agrupados modelos com cilindrada até 22% abaixo. Mas, mesmo assim, é preciso

¹ Quantização é uma tradução livre do termo original em inglês “binning”. Quantizar significa converter uma leitura de uma grandeza contínua em valores discretos (quantum).

testar pelo menos um motor de cada tamanho na família, sendo que cada veículo da família deve ser equipado o mesmo sistema de controle de emissões. A critério da entidade homologadora, podem ser requeridos testes separados quando houver diferenças de câmbio, cilindradas acima da faixa, número de rodas com tração e relação entre peso e potência (EC, 2016a).

No anexo III-A do Regulamento 427/2016, nos artigos da sessão 3.1.3 de 2 a 4, os fabricantes são obrigados a publicar os resultados dos testes RDE além de outros detalhes do relatório em caso de ser requerido, com interesse justificado, sem ônus. As autoridades certificadoras também terão que disponibilizar as informações sob um custo razoável (ICCT, 2017).

O **segundo ato**, votado em outubro de 2015 e publicado no Jornal Oficial da União Europeia em abril de 2016 como o Regulamento EC 646/2016, (EC, 2016b), definiu parâmetros como elevação positiva cumulativa de até 1.200 m a cada 100km, passou a excluir condições que fossem consideradas muito amplas ou muito agressivas de condução.

Nesse regulamento, os limites definidos para testes RDE, que usam como referência os limites NTE (*not-to-exceed*), passam a seguir a fórmula prescrita em revisão ao anexo III-A do Regulamento EC 692/2008 (EC, 2008), que é mostrada na Equação 1 (EC, 2016b; ICCT, 2017).

$$NTE_{poluente} = CF_{poluente} \times TF(p_1...p_n) \times EURO-6 \quad (1)$$

em que:

- $NTE_{poluente}$ = limite de emissão “não exceder” do poluente;
- $CF_{poluente}$ = fator de conformidade do poluente;
- $TF(p_1...p_n)$ = fator de transferência em função dos n parâmetros de teste;
- EURO-6 = limite do poluente conforme a norma Euro 6.

O CF se refere à diferença de severidade entre o teste RDE e os ciclos de laboratório e à margem de incerteza de medição do equipamento PEMS (ICCT, 2017).

O TF, fator de transferência, foi criado para uniformizar os testes para facilitar a comparação. Mas o Regulamento EC 646/2016 (EC, 2016b), estabeleceu o valor do TF =

1, anulando sua função, ou alternativamente, que a média da função de transferência para todos os parâmetros considerados seja equivalente à unidade, desde que mantida a garantia de que não haverá impactos ambientais negativos.

O Regulamento 427/2016 (EC, 2016a) estabelece os parâmetros da rota de teste para o RDE, como velocidades, duração, etc. O Regulamento 646/2016 (EC, 2016b) trata da dinâmica do teste, com os requisitos quantitativos (Donateo e Giovinazzi, 2017).

Pelo segmento ‘d’, que foi a revisão do procedimento divulgada em setembro de 2016, a rota de um teste RDE deve obedecer a uma sequência de segmentos definida, sendo o primeiro urbano, seguida do rural e depois o de estrada, com duração total entre 90 a 120 minutos, em temperatura entre 0 e 30 °C. A velocidade do veículo a cada momento define em qual segmento o veículo está rodando. O segmento urbano engloba velocidades de 0 a 60 km/h, o segmento rural engloba velocidades acima de 60 e até 90 km/h e o segmento de autoestrada engloba velocidades acima de 90 e até 145 km/h. Adicionalmente, a velocidade no segmento de autoestrada deve permanecer acima de 100 km/h por pelo menos 5 minutos. Cada teste deve ter mais de 10 paradas e a variação máxima de elevação do início para o fim do teste tem que ser e até 100 metros (Donateo e Giovinazzi, 2017).

Esta revisão ainda inclui outros parâmetros, e uma síntese é apresentada na Tabela 12. **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

Tabela 12: Parâmetros dinâmicos do teste RDE para veículos leves (EC, 2016a).

Parâmetro	Urbano	Rural	Estrada
Velocidade (km/h)	0 a 60	>60 a 90	>90 a 145
Distância mínima (km)	16	16	16
Distância, faixa (% do total)	29 a 44	33 +/-10	33 +/-10
Velocidade média (km/h)	15 a 40	-	-
Número de paradas	>10	-	-
Tempo de <i>idle</i>	10%	-	-
Variação de elevação (m)	100 (max)		
Altitude inicial máx. (m)	700		

Ainda, para que um teste seja válido é preciso que seu resultado esteja contido dentro de dois limites sendo um deles o limite superior, determinado por uma linha definida pelo 95º percentil do resultado da multiplicação da velocidade pela aceleração, enquanto o parâmetro mínimo é determinado por um valor chamado aceleração relativa positiva

(RPA), que é a média dos valores de aceleração maiores que $0,1 \text{ m/s}^2$ que são registrados durante o teste (ICCT, 2017). Portanto ficam definidos os parâmetros conforme segue:

- métrica de máxima: 95º percentil do produto $v * a$ (velocidade x aceleração),
- métrica de mínima: média da RPA (aceleração positiva relativa),
- os três segmentos do teste devem estar contidos entre as curvas da Figura 14,
- os sistemas auxiliares são de uso livre.

Dessa forma, se um ponto qualquer do teste cair fora desses limites o teste todo deve ser descartado (ICCT, 2017). Estas são chamadas as condições dinâmicas de contorno.

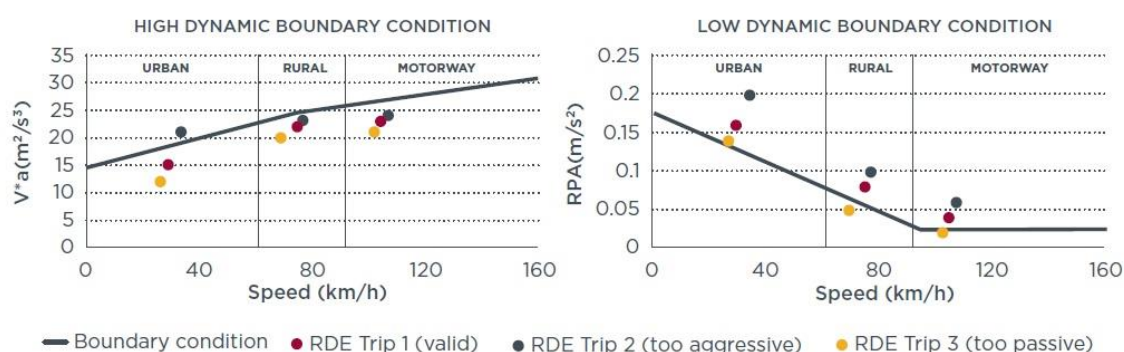


Figura 14: Condições dinâmicas de contorno para validação do teste RDE (ICCT, 2017).

O Regulamento 646/2016 traz os requisitos constitutivos, calculando, para cada faixa, os valores de velocidade média, o produto da velocidade pela aceleração ($v.a$) e a aceleração positiva relativa (RPA). Cada segmento tem que contar com ao menos 150 Pontos de aceleração positiva.

Também são consideradas duas condições distintas, uma normal e outra estendida, de acordo com os parâmetros de temperatura e altitude. A condição normal compreende uma faixa de temperaturas de 0 a 30 graus centígrados e altitude de 0 a 700 m. A condição estendida abrange as temperaturas de - 7 até 0°C e de 30 a 35°C e altitudes que ultrapassam os 700 m, até 1300 m.

Este **segundo ato**, que foi publicado logo após o escândalo da Volkswagen com o *Dieseldgate*, se prestou a melhorar a confiabilidade e a transparência do RDE. Entre outras providências, obriga os fabricantes a disponibilizarem maiores informações sobre sistema de controle de emissões as estratégias e os resultados dos testes RDE, tornando-os públicos. Também determinou os fatores de conformidade e incluiu a sua revisão anual a

partir de 2023, relativo à margem de incerteza do equipamento, e o cronograma de implantação do RDE. Limitou o ganho de altitude e determinou condições de contorno dinâmicas de validação do ensaio, pelo RPA e V*a (ICCT, 2017).

Seus principais parâmetros são:

- carga do motor maior que 90% do máximo do veículo,
- altitude normal de 0 a 700 m e estendida de 700 a 1300 m
- variação de altitude máxima entre o início e o fim do teste de até 100 metros
- temperatura ambiente moderada de 0 a 30 graus centígrados e estendida de -7 a 0 e de 30 a 35 graus centígrados
- tempo de veículo parado entre 6 e 30% do trecho urbano
- velocidade máxima de 145 km/h e até 160 km/h durante 3% do tempo em autoestrada

Outras especificações de composição da rota RDE podem ser vistas na Tabela 13.

Tabela 13: Condições de RDE conforme 2º pacote Euro 6d temp (adaptado de ICCT, 2017).

QUESITO		UNID.	VALORES
Duração total do teste		min.	90 a 120
Distância mínima	Urbana	km	16 km
	Rural	km	16 km
	Rodoviária	km	16 km
Composição da rota	Urbana	%	34 +10/-5
	Rural	%	33 ±10
	Rodoviária	%	33 ±10
Velocidade média	Urbana	km/h	15 a 40
	Rural	km/h	60 a 90
	Rodoviária	km/h	> 90*

* Deve ser mantida a velocidade acima de 100 km/h durante pelo menos 5 min.

O trabalho de ICCT (2017) reconhece que a tecnologia dos equipamentos portáteis está avançando e já existem sistemas pesando cerca de 70 kg, o que é uma grande redução frente aos 200 kg dos primeiros equipamentos. São ainda esperados para os próximos anos avanços no sentido de tornar a interface mais amigável ao usuário e melhorar a confiabilidade e a acurácia das medições.

Entretanto o trabalho ainda destaca que apesar dos testes RDE representarem o que há de mais próximo das condições reais de condução de um veículo, seus resultados podem variar significativamente, mesmo respeitando as condições impostas pela regulação. Dessa forma, a diferença entre uma repetição mais favorável e uma menos favorável é o que determina o limite da repetibilidade do equipamento. Por isso é preciso assegurar que os veículos não sejam testados somente na condição mais favorável, já que o fabricante realiza até 50% dos testes e poderia utilizar esta variação, escolhendo a repetição que mais lhe interesse para facilitar a aprovação dos seus modelos (ICCT, 2017).

Os dois primeiros pacotes de regulação do teste RDE trataram das definições de rota, condições de teste, dinâmicas e de contorno. Já, o **terceiro ato**, votado em Dezembro de 2016 foi publicado no Regulamento 1154/2017, (EC, 2017c) da Comissão Europeia e reconhece que uma parcela importante das emissões ocorre logo após a partida a frio. Por isso estabeleceu sua inclusão nos testes RDE, e também a inclusão dos eventos de regeneração dos sistemas de tratamento de emissões. Ainda mais, inclui também a exigência de 6% a 30% do tempo da condução urbana na condição de marcha lenta. É reafirmada a faixa de temperatura moderada sendo de 0 a 30°C.

Nesse pacote, a EC (2017c) estabelece que a Comissão Europeia examinará anualmente as disposições do procedimento RDE para adequá-los ao avanço tecnológico dos veículos e dos equipamentos de medição. Também inclui disposições para o procedimento da contagem do número de partículas no teste com fator de conformidade de 1,5 de maneira definitiva. Traz, ainda, adequações do teste para veículos híbridos.

Entre outras providências, essa regulação determina novas tolerâncias admitidas para os equipamentos PEMS, conforme organizado por ICCT (2017) na Tabela 14.

Tabela 14: Tolerâncias admissíveis para validação do equipamento PEMS, adaptado de EC (2017c).

PARÂMETRO [unidade]	TOLETÂNCIAS PERMISSÍVEIS
Distância [km] ⁽¹⁾	250 m da referência de laboratório
THC ⁽²⁾ [mg/km]	15 mg/km ou 15% da referência de laboratório, o que for maior
CH ₄ ⁽²⁾ [mg/km]	15 mg/km ou 15% da referência de laboratório, o que for maior
NMHC ⁽²⁾ [mg/km]	20 mg/km ou 20% da referência de laboratório, o que for maior

PN ⁽²⁾ [# /km]	1.10 ¹¹ p/km ou 50% da referência de laboratório ⁽³⁾ , o que for maior
CO ⁽²⁾ [mg/km]	150 mg/km ou 15% da referência de laboratório, o que for maior
CO ₂ ⁽²⁾ [mg/km]	10 mg/km ou 10% da referência de laboratório, o que for maior
NO _x ⁽²⁾ [mg/km]	15 mg/km ou 15% da referência de laboratório, o que for maior

⁽¹⁾ aplicável somente se a velocidade do veículo é determinada através da ECU; para atingir a tolerância permissível é permitido ajudar a medição de velocidade veicular da ECU com base no resultado do teste de validação

⁽²⁾ parâmetro mandatório somente se a medição for requerida pelo ponto 2.1 do anexo III-A do regulamento R 1154/2017 da Comissão Europeia

⁽³⁾ sistema PMP

Aprovado em 03 de maio de 2018, o **quarto ato** foi publicado pela Comissão Europeia no Regulamento 1832/2018 (EC, 2018b). Essa aumenta ainda mais a transparência dos testes, estabelece que as entidades homologadoras devem testar a conformidade em serviço (“*in-service conformity*”) dos veículos em circulação a cada ano e ainda abre a possibilidade de testes por laboratórios independentes, que podem ser reconhecidos oficialmente. As autoridades poderão testar anualmente as emissões dos veículos homologados. O valor do coeficiente de conformidade definitivo para NO_x foi reduzido de 1,50 para 1,43 ao mesmo tempo em que o valor do CF para PN, que ainda estava em aberto, foi definido em 1,5. Foi definida uma nova metodologia, mais simples, transparente e robusta para validação dos testes RDE (EC, 2018a).

2.5.4. Testes RDE de caminhões na China

Segundo Huo *et al* (2012), os caminhões a diesel são a maior fonte de NO_x na China tendo chegado a 20% das emissões do país em 2006. Sua participação na cidade de Beijing foi de 60% e 66% nos anos de 2007 e 2008, respectivamente.

Os autores relatam que a frota de caminhões na China dobrou de 7 milhões em 2000 para 15 milhões em 2010 fazendo com que as emissões aumentassem apesar da entrada das regulações equivalentes a Euro I, II, III e IV para pesados.

Apesar desse aumento, não houve preocupação entre as autoridades ambientais porque os inventários vêm sendo feitos com base em estimativas a partir das bases de dados dos veículos europeus ou americanos, que podem não refletir as condições locais de performance dos veículos. Na China, os primeiros estudos são baseados apenas em testes de motores individuais e de alguns poucos caminhões que pouco ajudaram no entendimento das emissões totais da frota de caminhões. Isso só pode ser remediado fazendo medições locais de emissões (Huo *et al*, 2012).

Huo *et al* (2012) citam estudos mais recentes e com melhores técnicas, sobre um número maior de amostras, que resultaram em fatores de emissão para diversos poluentes em cidades como Beijing, Chongqing e outras, nos anos 2007 a 2010. Estes estudos com grandes números de caminhões foram muito úteis para determinar a média nacional de emissões, mas são difíceis de extrapolar para outros anos porque a frota chinesa é composta por várias tecnologias e sua distribuição varia muito ano a ano. Mas eles são importantes para orientar a regulação chinesa, porque é preciso conhecer os impactos negativos das emissões de NO_x sobre saúde da população, especialmente neste cenário onde a China impôs uma meta agressiva de reduzir 10% as emissões de NO_x de 2010 a 2015 no seu vigésimo plano quinquenal 2011-2015 (Huo *et al*, 2012).

O estudo de Huo *et al* (2012) realizou medições *on-board* em 175 caminhões diesel de 2007 a 2011, em cinco cidades chinesas: Beijing, Xi'an, Shenzhen, Jinan e Yichang. Foram feitas medições de CO, HC, NO_x e PM_{2.5}, que resultaram em fatores de emissão para cada tipo de caminhões diesel. Estes números foram comparados com aqueles usados nos últimos inventários.

Na fase experimental foram utilizados os equipamentos Semtech DS e DMM230. O primeiro é usado para medir misturas gasosas e o segundo mede massa de particulados, pelo sistema de carga de partículas com impactador de 6 estágios, cobrindo partículas de até 1,2 µm. O sistema é complementado pelo diluidor FPS 4000 da Decati para o particulado. As rotas tiveram de 23 a 53 km, incluindo rodovias, vias urbanas principais, e vias urbanas secundárias (Huo *et al*, 2012).

Os modelos testados por Huo *et al* (2012) incluíram 87 caminhões leves com tecnologias de Euro 0 a Euro III, 26 caminhões médios, de Euro 0 ao Euro III, e 62 caminhões pesados de Euro 0 até o Euro IV, com fabricação entre o ano 1996 e 2010. Estes três tipos de

caminhões representaram cerca de 40% do HC e 30% do CO na China em 2009. A distribuição destas amostras pode ser vista em detalhe na Tabela 15.

Tabela 15: Relação dos caminhões testados, cidades e tecnologias (Huo *et al*, 2012).

Cidade		Total	Beijing	Xi'na	Shenzhen	Jinan	Yichang
Testado em:			Jun/2007 a mai/2009	Mai/2008	Out/2008	Abr/2011	Mai/2010
LDDT <4500 kg	Euro 0	5	1	4			
	Euro I	36	9	18	2	1	6
	Euro II	42	15	18	6	1	2
	Euro III	4				4	
	Total LDDT	87	25	40	8	6	8
MDDT 4500 – 12000 kg	Euro 0	7				1	6
	Euro I	11	2		3		6
	Euro II	4	4				
	Euro III	4	4				
	Total LDDT	26	10	0	3	1	12
HDDT > 12000 KG	Euro 0	1					1
	Euro I	23	4		8	2	9
	Euro II	13	6		1	3	3
	Euro III	23	15			8	
	Euro IV	2				2	
	Total HDDT	62	25	0	9	15	13
Total		175	60	40	20	22	33

Como resultados dos experimentos foram encontradas reduções significativas de emissões para as fases mais adiantadas de tecnologia dos caminhões sendo que os caminhões Euro III podem reduzir o HC de 53% a 84% e o CO de 60% a 72%, comparado com os Euro 1.

Segundo Huo *et al* (2012), a medição de HC não foi conclusiva para os veículos Euro 4 devido a problemas nas medições e ao baixo número de veículos testados dessa tecnologia: apenas dois caminhões. Sobre o NO_x os autores supõem que, devido ao

catalisador de redução seletiva que trata este poluente, as emissões dessa fase são irrelevantes diante das demais tecnologias presentes no contexto chinês.

Huo *et al* (2012) geraram os fatores de emissão com base no consumo de combustível porque, para efeito de inventário ambiental, é mais fácil tomar esse parâmetro do que fatores em base de quilometragem rodada.

O consumo de combustível foi medido através do balanço de carbono, tomando as emissões de CO₂, HC e CO.

Os fatores de emissão de NO_x recebem destaque porque têm sido assunto de debates não apenas por causa de seus efeitos na saúde e na formação de ozônio, mas também porque, apesar dos limites cada vez mais restritos da regulação, o trabalho de Huo *et al* (2012) mostra que, ao contrário de outros poluentes como HC e CO, eles parecem não estar diminuindo ou, ainda, piorando com o avanço de algumas fases.

Huo *et al* (2012) citam que na Europa há outros estudos reportando que os testes nos veículos diesel em RDE apresentaram emissões de NO_x maiores que as dos testes de laboratório e que não houve redução significativa na emissão de NO_x nos 13 anos compreendidos desde o Euro 1/I até o Euro 3/III. Uma das explicações para isso seria que as diferenças de severidade entre os ciclos de teste e o uso real permitem que os fabricantes calibrem seus motores para reduzir o NO_x apenas no ciclo de teste, emitindo níveis muito acima dos limites durante o seu uso real.

Um dos estudos citados por Huo *et al* (2012), do ano 2000, realizou testes de dinamômetro de chassi em 250 diferentes veículos e indicou que as médias de PM, CO e HC dos pesados a diesel, acima de 3,5 t, nos Estados Unidos se reduziram durante duas décadas de 1977 a 1997, período equivalente à implementação das fases Euro I a Euro III na Europa. Mas as emissões de NO_x neste período não mudaram levando a entender que as regulações cada vez mais apertadas não tiveram efeitos para reduzir o NO_x em uso real. Essa conclusão foi confirmada por outros estudos mais recentes com sensoriamento à distância e medições em túneis, que concluíram que não aparece tendência clara de redução da média de emissão de NO_x na frota entre 1997 e 2008.

Segundo Huo *et al* (2012), esse efeito pode ser resultado de uma ação dos fabricantes ajustando os motores para emitir baixos níveis de NO_x durante as condições

características do ciclo de teste mas, quando o motor está operando em condições diferentes das do ciclo de testes, em uso normal, a eletrônica se ajusta para operar em uma condição de maior economia de combustível, que resulta em emissões de NO_x consideravelmente maiores.

Huo *et al* (2012), apresentam resultados coletados de outros estudos na China demonstrando os resultados de testes de emissões em condução real em função do tipo de caminhão, que é ilustrado na Figura 15, onde pode-se observar, por exemplo, que os caminhões pesados e leves da fase Euro II tiveram emissões de NO_x até 6% maiores do que a fase Euro I.

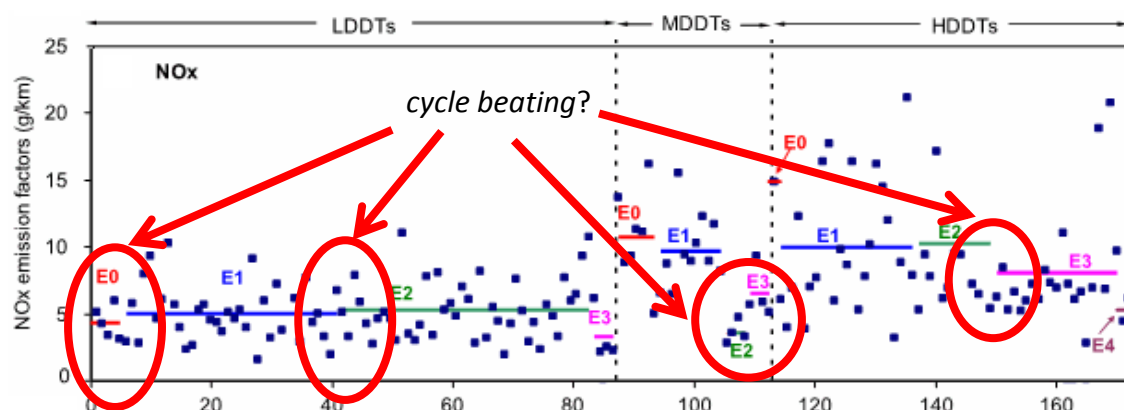


Figura 15: Emissões de NO_x por classe e tecnologia (Huo *et al*, 2012).

Na Europa esse comportamento também é apontado por Forcetto e Abrantes (2017) e a não redução das emissões de NO_x em condução real, apesar da restrição da regulação, é atribuída à estratégia de *cycle beating* (Forcetto e Abrantes, 2017; TE, 2018).

Entretanto as significativas reduções de emissões de NO_x obtidas na passagem da tecnologia Euro III para a Euro IV, especialmente em veículos pesados, de 35% em NO_x, é coerente com ICCT (2017), que aponta 30% de redução, e com TE (2018), que aborda veículos leves e também mostra reduções tímidas entre as tecnologias Euro 2 e Euro 6. Para Huo *et al* (2012), isso deixa claro que a melhor estratégia para redução de NO_x é o pós-tratamento com catalisador de redução.

Sobre os particulados, Huo *et al* (2012) indicam que mais de 80% da emissão veicular de particulados finos na China em 2007 foram oriundos dos caminhões a diesel, e mostram que há uma tendência de redução de PM conforme avança a regulação. Nos caminhões

de tecnologia Euro III os números apresentam uma redução de 60% em relação aos Euro II e de 65% em relação aos Euro I.

Huo *et al* (2012) ainda mostram uma comparação entre os fatores de emissão utilizados nos inventários de emissões da China para PM e NO_x de 1994 a 2010 e conclui que entre 2006 e 2009 os fatores utilizados para PM são praticamente o dobro do que indicam as medições desse e de outros estudos, possivelmente devido ao uso de fatores de emissão obtidos das condições europeias ou norte-americanas. Mas os autores consideram que os inventários para o NO_x parecem estar mais consistentes com as medições deste estudo, sendo que podem estar um pouco subestimados após 2006.

2.5.5. Uso de testes de emissões em condução real nos EUA

Buchholz (2017) relata em sua matéria publicada na revista SAE International, que os testes RDE estão sendo aplicados também nos EUA, com a finalidade de avaliar a consistência entre o que se mede no laboratório e o encontrado na condução real para emissões e consumo.

No artigo, o fundador e CEO da Emissions Analytics baseada no Reino Unido, Nick Molden, diz que o laboratório é ótimo para testes definidos e com boa repetitividade, mas não mede a experiência em ruas de verdade. E os testes em condução nas ruas fornece medições vitais de performance. Diz também que está trabalhando para criar uma “etiqueta de mundo real” que apenas classifica em graus de desempenho, não servindo como para fins de homologação ou regulação. Segundo ele, pode-se fazer o melhor possível para simular a condução no mundo real, mas isso não é o mesmo que a direção no mundo real. Quaisquer condições que modifiquem a carga sobre o motor afetam consumo e emissões e são difíceis de simular, especialmente aclives. Ainda segundo Molden, os RDE adicionam uma camada extra de proteção contra fraudes.

De acordo com o trabalho de Buchholz (2017), a EPA (*Environment Protection Agency*) usa os PEMS nos EUA para caracterizar as emissões em uso e sinalizar picos de emissões que podem indicar um dispositivo de anulação do controle de emissões ou outro problema de atendimento aos limites. O EPA não está criando um fator de conformidade em

serviço, mas sim usando os testes para confirmar que os RDE estão consistentes com os resultados dos testes oficiais de laboratório.

O Emissions Analytics já testou mais de 1600 veículos leves na Europa desde 2011. Buchholz (2017) também cita informações de que uma outra iniciativa privada iniciou os testes nos U.S. em 2013 com motoristas treinados para reproduzir o estilo de condução média de motoristas reais e já testou mais de 500 veículos nos U.S. desde compactos até *pick ups* de 1 t.

Segundo Buchholz (2017), os testes da Emissions Analytics se compõem de 100 milhas divididas entre 55% urbanas e 45% rodoviárias, com temperaturas entre 5 e 25°C. O equipamento utilizado atualmente pesa apenas cerca de 100 kg e mede o consumo, CO₂, CO, NO e NO₂, além de registrar outros parâmetros como o uso do ar condicionado. Entre os veículos testados estão incluídos também modelos elétricos e híbridos.

2.5.6. Comparações de medições em rotas de RDE e em ciclos - EUA

O trabalho de Rykowski *et al* (2005) testou 15 veículos com quilometragens entre 40 e 150 mil km e mediu seus consumos em uso com equipamento PEMS, nas ruas, comparando em seguida com as estimativas de consumo através de ciclos em dinamômetro.

Rykowski *et al* (2005) utilizaram vários ciclos de condução em dinamômetro, pertencentes ao procedimento federal de teste (FTP) norte-americano. Alguns dos mais relevantes são o FTP 75 (ciclo urbano com paradas frequentes, derivado do UDDS) e o SFTP-US06 (ciclo suplementar do FTP, com condução mais agressiva). Os ciclos foram ponderados para melhor representar a realidade. Durante os teste foram monitoradas diversas variáveis como ar condicionado, condições ambientais, etc., sendo que os veículos foram conduzidos pelos próprios usuários.

O SFTP é um procedimento que foi criado pela agência norte-americana de proteção ao meio-ambiente, EPA (*Environment Protection Agency*), visando representar melhor as condições reais para medição de consumo. Para isso foi somado ao FTP 75 um conjunto de três ciclos, medidos em três cidades: Baltimore (UDDS), Spokane (REM01) e Atlanta (REM05). O UDDS corresponde à condução em uma rota específica de Los Angeles em

1970. Destes o REM05 é o ciclo mais agressivo, e o REM01 é um complemento que não faz parte dos outros ciclos. Já o ciclo US06 é do início dos anos 90 e, segundo os autores, é duas vezes mais agressivo que o REM05 (Rykowski *et al*, 2005).

Na comparação dos ciclos com as medições de rua, com o PEMS, a estimativa da EPA se mostrou a mais acertada, segundo Rykowski *et al* (2005), mas os autores dizem que devido à pouca amostragem isso pode ser uma coincidência, impulsionada pelo fato também coincidente de a velocidade média de todos os testes em uso ter sido praticamente igual à média ponderada dos testes de dinamômetro.

Rykowski *et al* (2005) pontuam que há uma discrepância entre os resultados oriundos dos testes de emissões FTP 75 e as constatações dos clientes, relatando uma razão de 90% em autonomia. Para autoestrada, comparada à “fase quente” do ciclo, a razão observada foi de 78%. Pesa o fato de que os testes de laboratório são feitos com ar condicionado desligado. Os autores também relatam que os motoristas atuais dirigem mais rápido e mais agressivamente do que nos ciclos de teste. Outro fator é a adição de etanol, que tem cerca de 67% da energia da gasolina em base de volume, reduzindo a autonomia em comparação aos ciclos padrão quando estes são testados com gasolina.

Para a autonomia, uma interessante relação entre a estimativa dada pelo método da EPA e a do teste de RDE, em função da sua velocidade média, é apresentada na Figura 16.

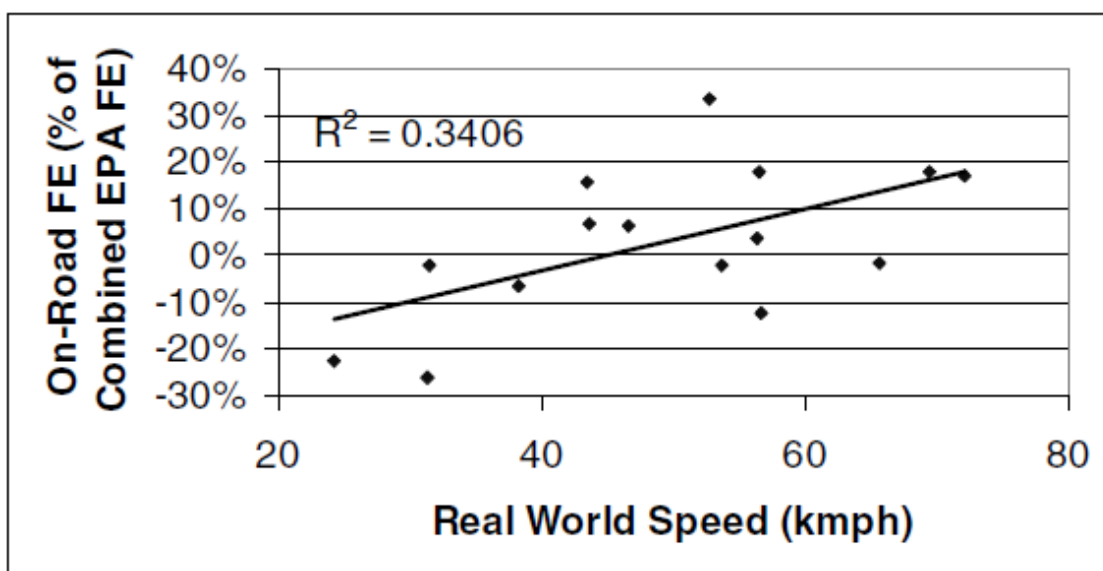


Figura 16: Comparação entre a estimativa de autonomia EPA e a velocidade média do teste RDE (Rykowski *et al*, 2005).

Apesar da grande dispersão e poucas amostras dos dados, pode-se notar que existe uma influência da velocidade média sobre o consumo, onde as menores velocidades comprometem o consumo enquanto as velocidades mais altas o privilegiam, sendo que há equivalência em torno de 45 km/h. Os autores atribuem a dispersão à variabilidade que é observada nos testes RDE, que também é apontada por ICCT (2017).

Os ciclos foram analisados através da técnica de potência específica veicular, uma técnica de análise baseada nas medições instantâneas, conhecida pela denominação em inglês, *vehicle specific power* (VSP), em que a potência a cada momento é medida e dividida pela massa do veículo, para que as medições de todos os veículos possam ficar na mesma base. Os valores são levantados com o auxílio de um equipamento PEMS, que registra as emissões a cada instante e relaciona com a potência específica, segundo a segundo.

Após a descrição dos ciclos em termos de perfil de VSP, estes foram comparados com os perfis de condução dos 15 veículos testados na rua. Assim, foi observado que estes tiveram diferentes comportamentos de condução, alguns se assemelhando à agressividade do ciclo US06 até outros correspondendo mais à direção suave do ciclo FTP 75 (Rykowski *et al*, 2005).

O trabalho de Rykowski *et al* (2005) reforça a importância de estabelecer alguns controles sobre as condições de teste de RDE, destacando a influência da velocidade média durante o teste. O teste feito com equipamento *on-board* não é conhecido pela sua repetitividade. Isso implica em um risco ao se incluir este tipo de teste na aprovação de veículos para a homologação, pois dependendo dos critérios, veículos com emissões semelhantes podem ser testados em momentos ou locais diferentes e obter resultados diferentes.

2.6. O RDE no caso brasileiro

Tendo em conta tudo o que já foi visto sobre a falta de representatividade dos ensaios de laboratório com relação ao uso real, a adoção do RDE representa uma grande evolução na legislação brasileira para o controle das emissões no transporte. Entretanto, será necessário considerar que a frota brasileira tem características diferenciadas em relação à Europa, com maior participação dos motores de ignição por centelha para os veículos leves, além de utilizar variações de combustíveis que abrangem a gasolina com 27% de

etanol e o etanol hidratado, admitindo até mesmo o gás natural veicular (GNV). Então é coerente que sejam necessárias adequações no procedimento para que ele seja representativo da realidade local e traga os resultados esperados em termos de redução de emissões.

Ao mesmo tempo, a frota de ônibus do transporte público, movida a óleo diesel, também tem suas características próprias de uso e configuração e responde por uma importante parcela da poluição dos grandes centros urbanos, contribuindo com cerca de 57% dos poluentes locais no setor de transportes (ANTP, 2018), que incluem as emissões de CO, HC, NO_x, PM e SO_x (óxidos de enxofre). Essa participação atesta a necessidade do estabelecimento de requisitos próprios para os veículos pesados brasileiros.

Segundo Forcetto e Abrantes (2017), em São Paulo, o ozônio troposférico é o principal problema de poluição do ar. Ele é formado a partir de NO_x, CO e HC em reações que ocorrem na presença dos raios UV. Para resolver esse tipo de problema, que é característico das grandes cidades, o Brasil adota regulações sobre emissões veiculares, com as sucessivas reduções dos limites no tempo.

3.Desafios para a implantação do RDE no Brasil

Com base nas obras analisadas, nas características do ensaio RDE europeu, nas dificuldades que a União Europeia tem encontrado em relacionar os resultados do RDE aos resultados de laboratório, algumas considerações precisam ser feitas para a implantação do RDE no Brasil, levando em conta o atual estágio da tecnologia do equipamento PEMS, e as características próprias brasileiras. Considera-se que a implantação do RDE no Brasil enfrentará alguns problemas semelhantes aos enfrentados durante a implantação na Europa, como, por exemplo, a variabilidade do ensaio.

O RDE é um ensaio mais robusto que os ciclos de laboratório e mais representativo para a determinação das emissões durante o uso real dos veículos. Entretanto alguns cuidados devem ser tomados para evitar que as variações intrínsecas do procedimento afetem a confiabilidade do ensaio como um todo.

As próximas fases publicadas pelo CONAMA (2018a, 2018b) determinam o uso do ensaio de RDE para homologação dos veículos leves e pesados, ambos a partir de 2022.

No início da implantação, para veículos pesados, será utilizado o procedimento das Nações Unidas, definido na regulação da União Europeia (Regulamento UN.49/2013) até que seja escrito um procedimento nacional. Este é um bom começo, mas o fato daquele regulamento ter sido concebido para uma realidade diferente da brasileira pode exigir alguns ajustes.

No Brasil existem algumas peculiaridades que dizem respeito ao clima, relevo, trânsito e tipo de frota, entre outras, de modo que a simples reprodução dos procedimentos e parâmetros europeus pode ser insuficiente para permitir a avaliação eficaz para o controle das emissões no transporte brasileiro por parte dos órgãos competentes. Por isso, neste capítulo são propostas questões sobre a representatividade dos testes RDE no país. As respostas aos desafios serão tratadas no capítulo seguinte, “Soluções propostas”, que aborda o que é necessário se fazer para ajustar o modelo do RDE para o caso brasileiro.

Forcetto e Abrantes (2017) deixam claro que o procedimento RDE é um grande avanço nos procedimentos de homologação porque é mais realístico que os testes de dinamômetro e mais robusto contra fraudes por testar no mundo real.

Entretanto, TE (2018) considera que, mesmo na Europa, onde o RDE foi criado, as definições da norma Euro 6d para a construção da rota não garantem que as condições reais de uso dos veículos sejam bem representadas.

Além disso, pelo padrão europeu, o teste é mais focado em NO_x e PM e precisa passar por alguma adaptação no sentido de se aproximar mais da realidade brasileira, melhorando a representatividade do teste.

As pesquisas de AVL (2016, 2018a) sugerem que o Brasil adote novas condições de teste RDE, com diversos pontos de mudança com relação à norma vigente na Europa. As proposições visam tornar o teste mais representativo da maneira como os usuários brasileiros realmente dirigem os seus veículos, além de incluir a partida a frio.

Segundo Forcetto e Abrantes (2017), no Brasil o HC e o CO são mais relevantes que o NO_x e o PM e os veículos são utilizados em velocidades menores do que as praticadas na

Europa, além de rodarem sob condições climáticas mais quentes. Certamente serão necessários grupos de trabalho em fóruns competentes o mais rápido possível para discutir tais adequações a tempo de auxiliar as definições de rotas RDE até a entrada das próximas fases P8 / L7 ou, ao menos, até a produção dos procedimentos nacionais para o teste.

3.1. Desafio 1: tipos de condução e partida a frio

As 10 principais cidades brasileiras concentram 27% da frota de veículos leves do país. São elas, pela ordem de população, da maior para a menor: São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Belo Horizonte (MG), Brasília (DF), Porto Alegre (RS), Fortaleza (CE), Salvador (BA), Recife (PE), Curitiba (PR) e Campinas (SP). Todas estas cidades são conhecidas pelos seus problemas de congestionamento, sendo Recife considerada o pior caso (AVL, 2018a).

Segundo estatísticas da TomTom (2019), o Brasil tem seis cidades entre as 100 mais congestionadas do mundo, no *ranking* cuja última edição se baseia em dados de 2016. Nesse levantamento, o Rio de Janeiro ocupa a 8ª posição na classificação, que também relaciona Salvador, Recife, Fortaleza, São Paulo e Belo Horizonte.

Também em outra pesquisa conduzida por uma cooperação entre a Castrol e a TomTom (Exame, 2016), que avaliou quais cidades têm o pior trânsito, São Paulo foi classificada como a 15ª pior no mundo, com uma média de 22.920 paradas e partidas anuais por carro. Para interpretar esse número, é preciso ter em conta que, para uma mesma velocidade média, quanto maior esse número, maior o tempo de marcha lenta, mais numerosas e mais fortes são as acelerações, maior é a energia dissipada nos freios e menor é o tempo de velocidade constante. Em outras palavras, o uso real é mais severo na medida em que esse indicador aumenta.

Segundo Silva (2017), A cidade de São Paulo já apresentava velocidade média de trânsito dos veículos de 27 km/h em 2012, o que já era 35% menor que em 2002. Ainda mais preocupantes são os números de Metrô (2013) sobre as viagens de táxi na cidade no ano de 2012, que tiveram tempo médio das viagens de 37 minutos e distância média de 7 km

cada, de onde se pode calcular um indicador de 11,4 km/h, mesmo tendo o privilégio de circular pelos corredores exclusivos do transporte coletivo.

É esperada uma tendência de aumento dos tempos com o passar dos anos, a exemplo do que ocorreu de 2007 a 2012, quando o número de viagens passou de 102 mil para 158 mil, com um aumento de 55% na região metropolitana da capital paulista. O crescimento da frota de 18% nesse período, chegando a 4,2 milhões (Metrô, 2013), pode ter impulsionado esse aumento e, neste caso, os números atuais podem ser ainda piores. Como referência, a frota nacional de veículos era de 29,8 milhões em 2007, aumentou para 42,7 milhões em 2012 e terminou o ano de 2018 com 54,7 milhões (DENATRAN, 2019).

Sobre a cidade de Belo Horizonte, segundo PlanMob BH (2019), a velocidade operacional dos ônibus coletivos em 2014 foi de 15,9 km/h e, nos veículos individuais, a duração média de viagens na cidade foi de 30 minutos em 2012, já incluídos os motociclos, que pressionam o tempo para baixo.

Na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), tempo médio de viagem para o transporte individual passou de 23 minutos em 2002 para 32 minutos em 2012 e no transporte coletivo esse tempo passou de 42 para 62 minutos. Enquanto isso, o número de viagens dobrou no mesmo período. A proporção das viagens que ocorreram durante os horários de pico ficou em 62% em 2002 e em 55% em 2012 (Costa, 2018).

Costa (2018) demonstra que as viagens em 2012 já apresentavam uma tendência de concentração no centro de Belo Horizonte, conforme ilustrado na Figura 17, onde se pode constatar que a pequena área central, com coloração mais escura, representa mais viagens do que a soma das demais áreas.

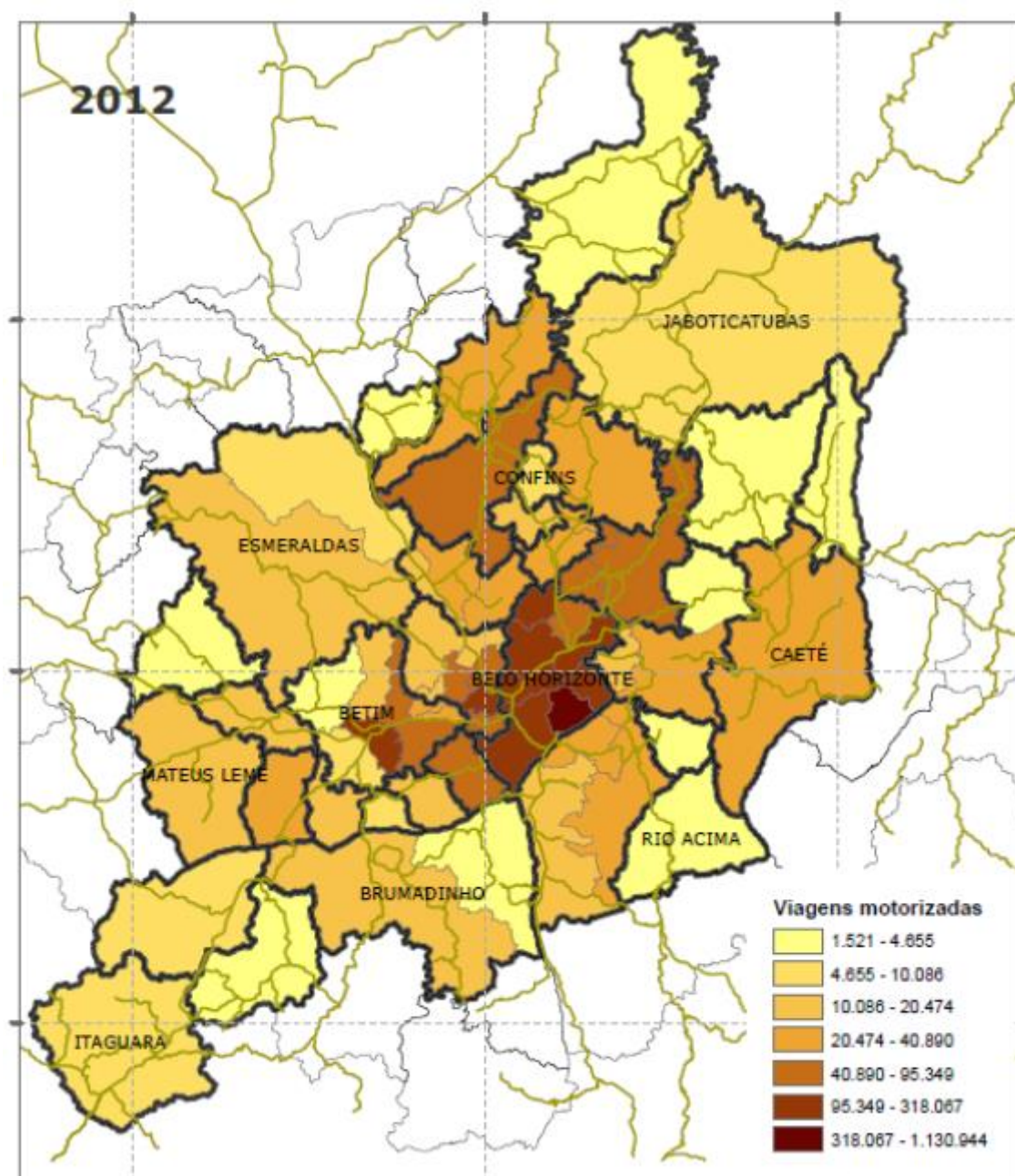


Figura 17: Distribuição das viagens motorizadas na RMBH (Costa, 2018).

A ANTP (2018) indica que o tempo médio de viagens por transporte individual motorizado no país é de 24 minutos e, se forem consideradas apenas as cidades com mais de um milhão de habitantes, esse número sobe para 30 minutos. Esses tempos são ilustrados na Figura 18. A distância média de cada viagem de carro nas grandes cidades é de 8,8 km, enquanto a média no Brasil é de 7,6 km, segundo ANTP (2018), conforme ilustrado na Figura 19. Cruzando estes dados, chega-se a uma velocidade média de no máximo 19 km/h ou, tomadas apenas as grandes cidades, 17,6 km/h, que são números baixos por serem médias nacionais.

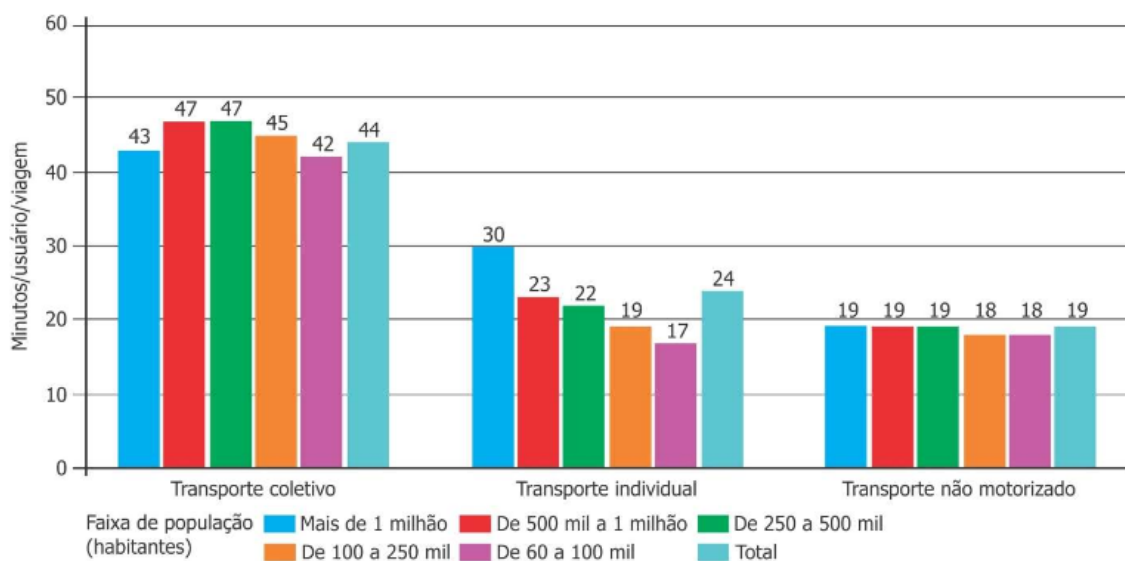


Figura 18: Tempo médio de viagens por porte do município e total em 2015 (ANTP, 2018).

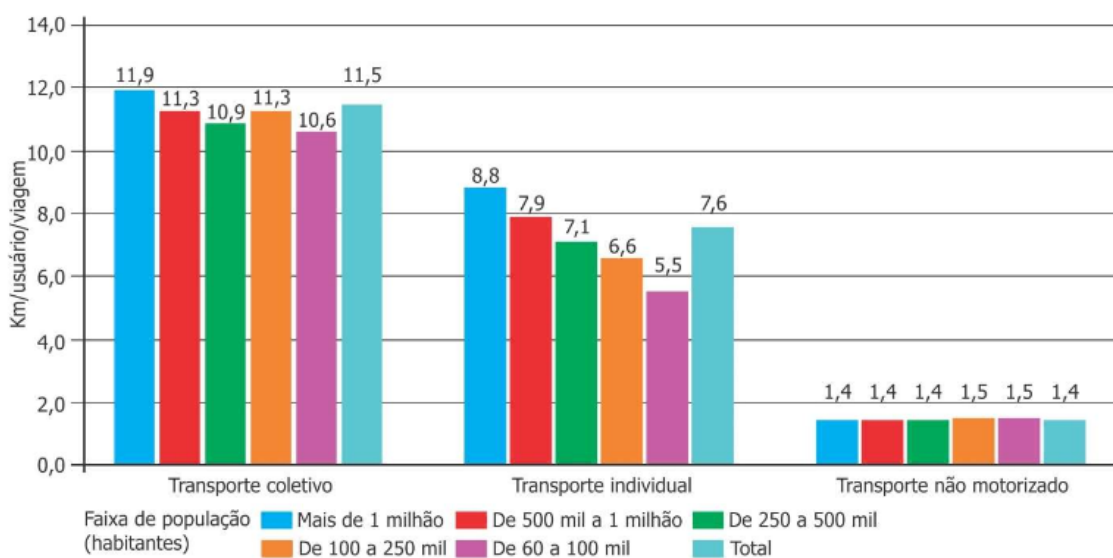


Figura 19: Distância média por viagem e modo por porte de município e total (ANTP, 2018).

As estimativas de distâncias de 7,6 a 8,8 km e de velocidades médias de 17,6 km/h a 19 km/h representam um percurso menor do que o exigido na parcela urbana do teste RDE, que é de 16 km, e uma média de velocidade ainda próxima ao limite inferior da recomendada na parcela urbana, que é de 15 a 40 km/h. Portanto, no caso do trânsito brasileiro, fica ainda mais acentuada a parcela que o veículo roda antes de atingir a temperatura normal do motor e do catalisador.

Comparado com a Europa, a concentração urbana brasileira é maior, com mais de 80% (Carvalho, 2011) contra cerca de 67% (EC, 2011a) e a velocidade média não se altera muito. Porém, as distâncias percorridas nas viagens médias europeias são maiores e, consequentemente, o tempo médio também. As distâncias percorridas em cada viagem em uma seleção de países europeus para os dias úteis, de acordo com EC (2012), podem ser vistas na Figura 20.

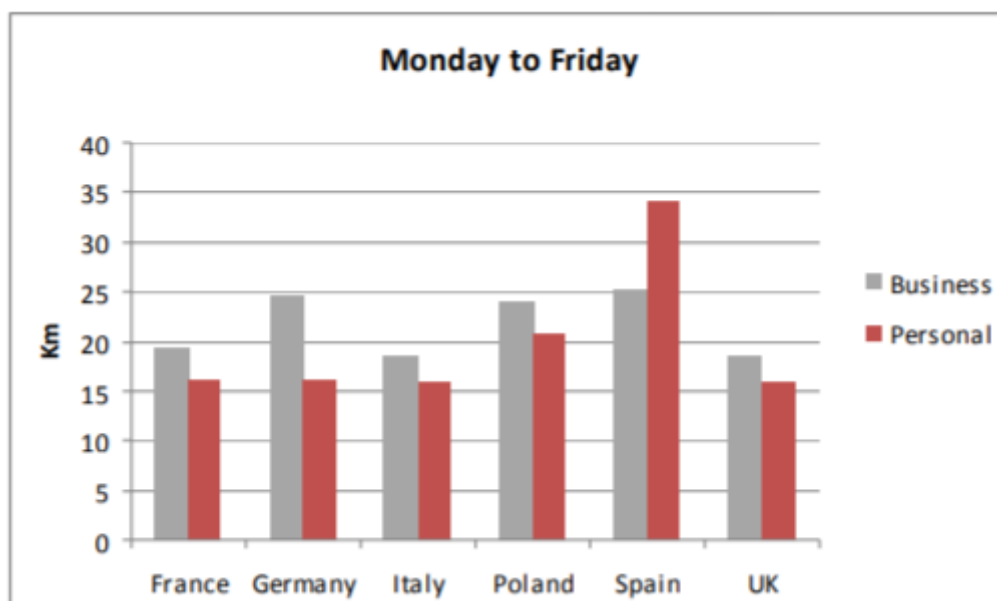


Figura 20: Distância por viagem na Europa (EC, 2012).

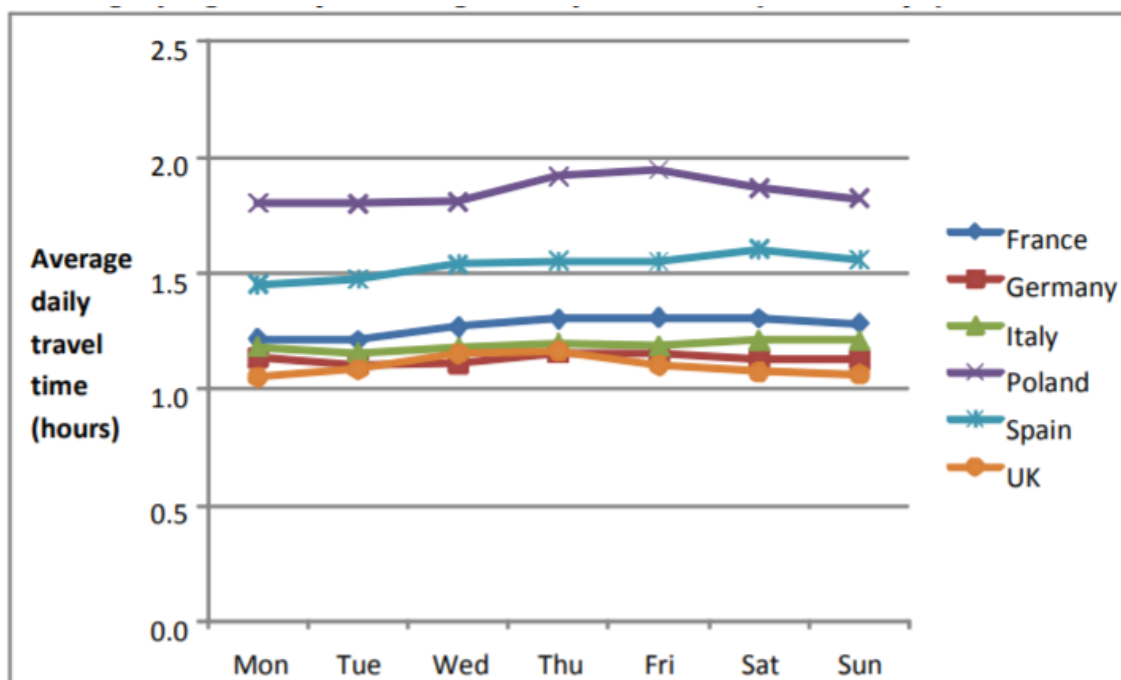


Figura 21: Tempo diário de viagem na Europa (EC, 2012).

Ao se observar a Figura 21 com os tempos diários de viagem na Europa, deve-se levar em conta que cada jornada diária é composta em média por 2,5 a 3 viagens diárias, a depender do país (EC, 2012), resultando em faixas de tempo aproximado entre 21 a 26 minutos nos melhores casos (Reino Unido e Alemanha) até 39 a 46 minutos no pior caso (Polônia).

Segundo a União Europeia, o cidadão europeu médio gasta quase 10 horas por semana em transportes e percorre uma distância média de 34,7 km por dia (EC, 2017).

As condições de contorno dos ensaios devem ser adaptadas à realidade do Brasil tanto no tocante às diferenças de motorização quanto nas questões culturais e do uso do transporte. No caso dos veículos pesados, entende-se que sua utilização é comercial e, portanto, podem ser de dois tipos: a) de uso urbano – ônibus urbanos e caminhões de entrega – que fazem diversas viagens consecutivas ao longo do dia, passando pouco tempo com o motor desligado sem que haja tempo para esfriar; b) de uso rodoviário – caminhões e ônibus rodoviários – fazem viagens longas, predominantemente em estradas, com poucas partidas diárias. Tanto no caso dos veículos urbanos comerciais quanto nos rodoviários, são feitas poucas partidas a frio, normalmente no início de cada jornada e em paradas para alimentação, não havendo, portanto, sentido em avaliar o tempo e a distância das viagens, já que em geral, se passam longos períodos com o motor já aquecido e, mesmo que existam paradas, essas são breves e as partidas são a quente, minimizando a influência da parcela rodada com o motor frio.

Para exemplificar de forma prática, quando um usuário do transporte coletivo se desloca da sua residência para o trabalho/lazer/estudo, bem como no momento do seu retorno, horas depois, ao entrar em um ônibus ele não demanda uma nova partida a frio, independentemente da distância que percorrerá. Mas se esse mesmo cidadão fizer uso de transporte individual para fazer a mesma viagem, isso certamente envolverá uma partida a frio ao sair de casa e outra no seu retorno, que normalmente acontece horas depois, quando o motor já perdeu temperatura. Portanto, para os veículos leves é importante observar a duração e distância das viagens porque, quanto mais curtas elas são, mais significativa é a fase fria para emissões.

A duração das viagens no transporte individual é uma das características brasileiras que diferem do caso europeu. De acordo com ANTP (2014), em 2012 o motorista brasileiro

médio das cidades com mais de 1 milhão de habitantes já rodava 9,4 km por viagem, ou seja, menos do que os cerca de 18 km por viagem do europeu (EC, 2012). Portanto a adequação do RDE ao Brasil também precisa levar em conta essa característica do trânsito brasileiro.

Até mesmo a Europa já inclui a partida a frio nos testes RDE, mas apenas no seu quarto ato, o último divulgado, com efeito em 2019, reconhecendo a importância desse fator.

Por isso as definições do teste RDE no Brasil demandam parâmetros de teste específicos para levar em conta a baixa velocidade, o maior tempo em marcha lenta, além da maior proporção de tempo de aquecimento dos motores e catalisadores. É preciso que o procedimento tenha o cuidado de levar em conta a partida a frio com um peso adequado e considerar o tempo de marcha lenta, que deve ser maior do que no RDE europeu, estabelecido em até 10%.

Devido à duração de um teste RDE no padrão europeu, com pelo menos 90 minutos, ser maior que a duração média das viagens de carro no Brasil, o peso dos primeiros momentos, logo após a partida a frio, fica reduzido nas medições, perdendo representatividade em relação ao uso real (Forcetto e Abrantes, 2017).

3.2. Desafio 2: emissões características do Brasil

Forcetto e Abrantes (2017) ponderam que a aplicação do RDE no Brasil deve considerar as diferenças de frota entre Europa e Brasil e suas consequências sobre a poluição do ar. No Brasil os motores dos veículos leves são majoritariamente do ciclo Otto, que são fabricados para consumir gasolina, etanol e suas misturas, com emissões de CO e HC como as mais importantes. Esses modelos apresentam baixos níveis de NO_x e níveis irrelevantes de particulados, à exceção dos modelos a diesel e os com injeção direta de gasolina, que são minoria. Fenabreve (2019a) complementa essa informação, relatando que a frota brasileira de veículos leves é quase totalmente equipada com motores do ciclo Otto, abastecidos com combustíveis que variam da gasolina com 25% de etanol anidro até o E100 (100% etanol hidratado), além do GNV.

Os veículos leves respondem por uma parcela menor das emissões de NO_x e PM porque essas são oriundas principalmente dos motores de ciclo diesel, que equipam os veículos

pesados e uma pequena parcela de veículos leves. Além disso, as emissões evaporativas da gasolina e do etanol são maiores que as do diesel e se somam ao HC (Forcetto e Abrantes, 2017).

Segundo a Fenabrave (2019a), no seu levantamento que considera os veículos na condição em que são produzidos pelos fabricantes, no Brasil os veículos a diesel representam cerca de 40% do segmento de comerciais leves que, por sua vez, representam cerca de 22% da frota de veículos leves, ou seja, esse combustível participa com cerca de 10% entre os leves. Do restante, cerca de 95% é do tipo *flex* (etanol e gasolina). Essa distribuição é muito diferente da condição europeia, onde os veículos leves a diesel contribuem com uma parcela significativa das emissões de NO_x e partículas, que são poluentes de maior preocupação com relação às emissões do transporte na Europa.

ACEA (2019) reporta que na Europa os motores a gasolina têm participação de aproximadamente 56% enquanto a dos movidos a diesel, com cerca de 41%, ainda está crescendo nos novos carros. Naquele continente, segundo Forcetto e Abrantes (2017), a presença massiva dos modelos a diesel tornam o NO_x e o PM as emissões mais relevantes.

Forcetto e Abrantes (2017) lembram que as motocicletas têm uma proporção de 15% do fluxo de tráfego em São Paulo. Essas são reguladas em emissões desde 2003, sendo que na fase atual, M4, os limites são de 2.000 mg/km para CO e de até 560 mg/km (para motos com velocidade máxima menor que 130 km/h) (CONAMA, 2011), ou seja, admitem 54% a mais de CO e 87% mais HC que os veículos leves de passeio. Porém, na fase M5, que entrará em vigor a partir de 2023, o limite de CO se iguala e o de HC fica apenas 25% maior acima dos veículos leves (CONAMA, 2019).

A atmosfera em São Paulo é rica em NO_x, que juntamente com o HC tem papel importante no complexo mecanismo da formação de ozônio e *smog*. Neste ambiente, os veículos leves e motocicletas produzem apenas 22,4% do NO_x, mas produzem 74,3 do HC. Portanto a principal fonte de NO_x nos centros urbanos são os veículos pesados, principalmente os ônibus do transporte público, abastecidos com óleo diesel.

Por ter sido concebido para medir NO_x e número de partículas, o padrão de teste europeu privilegia estes poluentes. No Brasil, o problema dos poluentes locais, nos grandes centros urbanos, incluem CO e HC, emissões características dos veículos com motores

de ignição por centelha. Ainda por estar voltada para motores diesel, no padrão europeu os primeiros minutos de emissões não são considerados, o que pouco afeta os resultados de NO_x, mas afeta muito a medição de HC e CO, que têm sua emissão mais intensa logo após a partida, quando o catalisador ainda está frio, não podendo ser negligenciadas (Forcetto e Abrantes, 2017).

3.3. Desafio 3: temperatura e altitude

As temperaturas no Brasil podem atingir níveis significativamente acima ou abaixo daquelas recomendadas como condições normais para os testes RDE na Europa, de 0 a 30°C, podendo levar a diferenças nos resultados. É importante destacar que nos primeiros movimentos da Comissão Europeia para a implantação do RDE na Europa, a faixa de temperatura considerada normal era de 7 a 30°C. Mas no seu quarto ato, estabeleceu a nova faixa de temperaturas normais como 0 a 30°C.

ACEA (2019) explica que até mesmo os novos procedimentos de laboratório, WLTP, foram concebidos para reproduzir as condições médias da Europa, como a temperatura de teste de 23°C, representativa daquela região.

Em algumas regiões brasileiras, as temperaturas abaixo da faixa moderada do RDE podem ocorrer durante boa parte do ano, como é o caso do inverno nas cidades da região sul, como a região metropolitana de Curitiba, o sul de Santa Catarina e o interior do Rio Grande do Sul. Em outras regiões, acima do trópico de Capricórnio, são comuns as temperaturas acima dos 30°C durante o verão, como nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro, Fortaleza, Salvador, Recife e até mesmo em cidades litorâneas da região Sul, como Porto Alegre.

Ainda, devido ao posicionamento geográfico e às dimensões do Brasil, que cobrem desde acima do equador até os 33° Sul, passando pelo trópico de Capricórnio e devido à característica de ocupação do país, uma grande parte das maiores cidades se desenvolveu em regiões de relevo acidentado com altitudes próximas dos 1000 m, enquanto outras se estabeleceram apenas em regiões de baixa altitude, no litoral. Estes fatos fazem com que a população e, conseqüentemente a frota nacional, estejam distribuídas em uma larga faixa de altitudes e longitudes.

As variações de altitude são especialmente importantes segundo AVL (2018b), que reporta aumentos de até três vezes na emissão de NO_x quando se passa da altitude de 150 m para 3000 m.

Os testes de TE (2018) também indicaram que os veículos a gasolina são muito sensíveis às variações de altitude para CO e PN, chegando a apresentar aumento de CO de mais de quatro vezes e de PN (no modelo GDI) de quase três vezes. Por outro lado, Wang *et al* (2018), em seus testes que variaram desde o nível do mar até cerca de 2300 m, não indicaram sensibilidade à altitude para as emissões de particulados.

Com 27% da frota de veículos leves concentrada nas 10 principais cidades brasileiras (AVL, 2018a), como já foi dito, e sabendo que cada grande cidade possui uma região metropolitana com condições semelhantes, é aceitável considerar que os grandes centros urbanos são representativos das condições nacionais.

Estas cidades possuem uma larga faixa de condições climáticas e altitude, de modo que as temperaturas se enquadram facilmente nas condições estendidas pela definição europeia. Na Figura 22 pode-se ver a relação das 10 principais cidades com suas temperaturas médias mensais máximas e mínimas. Tendo em conta que as temperaturas diárias podem variar muito mais do que os valores médios, se nota que Rio de Janeiro, Porto Alegre, Fortaleza e Recife ultrapassam facilmente o limite de 30°C durante o verão.

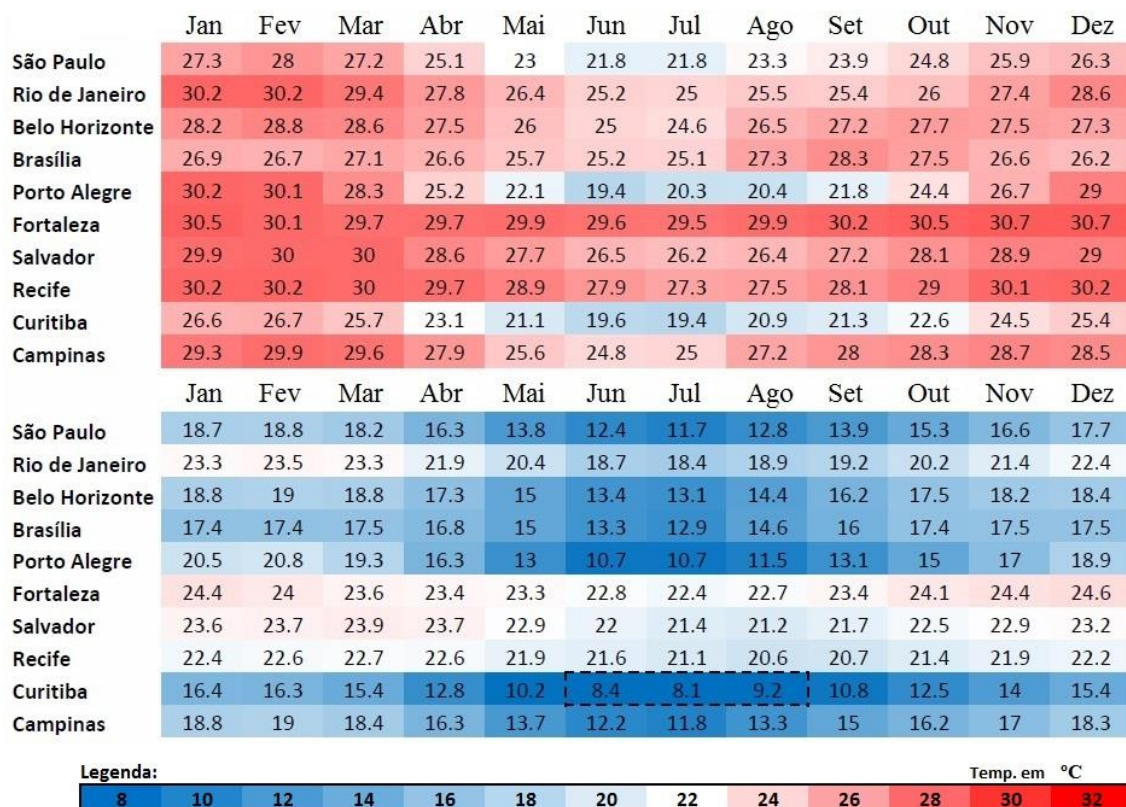


Figura 22: Temperaturas médias (máximas e mínimas) nas principais cidades brasileiras (AVL 2018a).

Deve-se considerar ainda que estas são temperaturas médias de cada mês, ou seja, há alguns dias com temperaturas mais amenas e outros em que são atingidos níveis ainda mais extremos.

Além das temperaturas, também a altitude de algumas destas cidades ultrapassa os 700 m, estabelecidos como máxima altitude nas condições normais do RDE europeu, configurando por si só uma condição estendida. Na Tabela 16 pode-se ver que estão neste caso as cidades: São Paulo (SP), Belo Horizonte (MG), Brasília (DF) e Curitiba (PR). Campinas está em uma altitude limiar e Goiânia, que não está entre as dez maiores cidades por três posições, é mais um exemplo acima do limite.

Tabela 16: Relação das principais cidades brasileiras e suas altitudes (AVL, 2018a).

Posição	Estado	Cidade	População	Altitude (m)
1º	SP	São Paulo	21.242.939	770
2º	RJ	Rio de Janeiro	12.330.186	0
3º	MG	Belo Horizonte	5.873.841	860
4º	DF	Brasília	4.291.577	1090

5°	RS	Porto Alegre	4.276.475	0
6°	CE	Fortaleza	4.019.213	0
7°	BA	Salvador	3.984.583	0
8°	PE	Recife	3.940.456	0
9°	PR	Curitiba	3.537.894	900
10°	SP	Campinas	3.131.528	700
11°	AM	Manaus	2.568.817	40
12°	SP	São José dos Campos	2.475.879	600
13°	GO	Goiânia	2.458.504	780
14°	PA	Belém	2.422.481	0
15°	SP	Sorocaba	2.066.986	560

Legenda:

	altitude abaixo de 700 m
	altitude de 700 m
	altitude estendida, acima de 700 m
	altitude estendida, acima de 1000 m

Na Figura 23 pode-se observar que não somente estas cidades, mas também está acima dos 700 m uma grande parcela da região Sul e Sudeste do Brasil, as duas das regiões mais ativas economicamente e onde se concentram as maiores frotas de veículos, relacionadas na Figura 24.



Figura 23: Topografia do Brasil (Adaptado de AVL, 2018a).

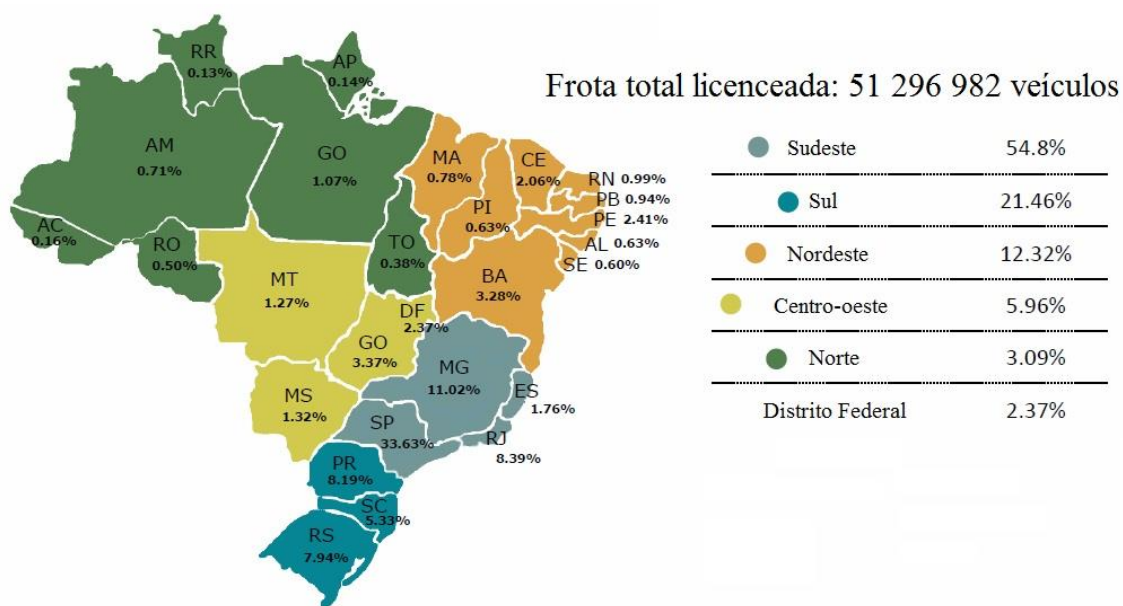


Figura 24: Distribuição da frota brasileira de veículos (AVL, 2018a).

Então, se as duas regiões que contém a maior parte da frota nacional possuem uma parte significativa de seu território em altitudes fora das condições de teste RDE, esse precisa de adequações de altitude e temperatura para que seja representativo.

Além da própria altitude, o relevo impõe variações de cota dentro das rotas RDE. Isso se traduz em aclives e declives com efeito sobre as emissões.

Para tratar essa questão, tanto para veículos leves quanto para os pesados, os trajetos devem incluir variações locais de relevo, que são representativas das condições em diversas cidades brasileiras. Esta condição produz cargas elevadas para o motor, o que leva a níveis muito diferentes de emissões em relação à condição em terreno plano. O peso da parcela de aclive pode ser determinado com base no percentual de cidades com relevo acidentado entre os principais centros urbanos brasileiros. Essa adequação pode ser tratada estabelecendo-se um valor mínimo taxa de ganho de altitude acumulado, que hoje é regulada apenas em valor máximo de 1200 m/100 km. Segundo AVL (2017), o critério de altitude máxima da rota também precisa ser revisto para aplicação no Brasil, sugerindo que, para a condição normal, o limite deveria ser aumentado para 1000 m e, acima disso, seria preciso definir uma forma de correção através de estudos específicos.

3.4. Desafio 4: combustível de homologação

Tanto os veículos leves quanto os pesados são homologados com combustível de referência de homologação, que atende a características especiais. Mas no seu uso real, circulam com os combustíveis comerciais, que podem ter sua composição diferente.

No caso dos veículos leves, cuja maioria é do tipo *flex*, usando etanol e gasolina, a Resolução 492/2018 (CONAMA, 2018b) determina que a homologação seja feita usando os combustíveis de referência definidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A gasolina “A” e o etanol hidratado foram definidos na Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018 (ANP, 2018). O termo gasolina “A” significa que ela se encontra da forma que é produzida na refinaria, sem adição do etanol e a gasolina de referência é a mistura da gasolina “A” de referência com 22% de etanol de referência. Isso difere do combustível comercial oferecido ao consumidor final, que é a gasolina “C”, ou seja, que contém um teor de etanol que atualmente é ditado em 27%.

Para os veículos pesados, predominantemente a diesel, bem como para os leves a diesel, a Resolução 490/2018 (CONAMA, 2018a) determina que os testes de homologação devem ser realizados usando um óleo diesel de referência de homologação conforme especificação ANP. Esse combustível é especificado pela ANP (2018) com 7% de biodiesel. Entretanto, os veículos, em seu uso real, circularão com o combustível comercial, com um teor de biodiesel que atualmente está definido em 10% e que pode ainda ser aumentado para valores que, na prática, podem se aproximar de 20%, que é uma espécie de *limite seguro* apontado pela comunidade científica envolvida.

3.5. Desafio 5: condições que afetam a severidade da rota

“It is unrealistic to expect that a vehicle certified to a certain emission standard will stay below the certified limits under all driving conditions.” (Franco et al, 2014)

Segundo TE (2018), os atuais testes RDE, com limites de velocidade baixos e realizados em terreno plano, podem estar falhando em analisar as reais emissões da mesma forma que os ciclos de laboratório, pois as fábricas de veículos podem estar calibrando seus carros para passar no RDE, mas permitindo que estes emitam muito acima dos limites em condições não contempladas no ensaio. O trabalho ainda explica que os veículos novos

Euro 6 podem emitir tanto quanto um Euro 2 na estrada, e 10% dos piores veículos Euro 6 na estrada contribui com 25% da poluição de toda a frota Euro 6.

Ainda segundo TE (2018), os veículos a gasolina são bastante sensíveis à variação de altitude e carga do motor quando se consideram as emissões de CO e particulados (específico para os motores GDI), enquanto veículos a diesel são mais sensível à variação de rota e de altitude para emissão de NO_x. O estudo afirma que as definições para a construção de uma rota RDE segundo a norma Euro não garante a representatividade das condições reais de uso dos veículos.

Os aclives e declives não são uma característica exclusiva do Brasil, mas segundo Bielaczyc (2015) são determinantes das emissões. Até agora a norma europeia se limita a especificar a taxa de elevação máxima para as rotas RDE (EC 2016a). Mas isso tem o efeito contrário ao de representar os aclives e declives encontrados naturalmente em algumas regiões. Entretanto, se os testes forem feitos em rotas com poucos ou nenhum aclive, não haverá nenhuma garantia de que os veículos mantenham suas emissões dentro dos limites durante o seu uso normal.

AVL (2018b) evidencia a importância da influência dos ventos e da altitude nas emissões ao ar livre. Em seus dados são reportadas diferenças de até 45% na potência demandada em certas condições de ventos e turbulências.

O comportamento dos motoristas é outro fator de grande importância. A diferença entre dois testes feitos em uma mesma rota, sendo um com direção branda e outro com direção dinâmica (com acelerações e frenagens mais intensas) podem ser de grande importância.

4. Soluções propostas

Com base nos problemas identificados no capítulo 3 – Desafios para a implantação do RDE no Brasil e utilizando as informações obtidas na literatura, descrita no capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, é possível fazer uma análise que resulta em propostas para atingir o objetivo deste trabalho, descrito no capítulo 1 – Introdução.

4.1. Proposta 1: tipos de condução e partida a frio

O maior efeito dos congestionamentos é o aumento das emissões e do consumo dos veículos causado pelo baixo rendimento dos motores quando submetidos às menores cargas, típicas dessa condição, associadas ao uso de marchas reduzidas, maior tempo em marcha lenta, especialmente com o ar condicionado ligado, e uso constante dos freios.

Segundo Heywood (1988), o melhor rendimento para os motores Otto acontece nas condições de acelerador no máximo (carga máxima) e rotação próxima à de torque máximo. Para os motores a diesel também o melhor rendimento é obtido nas rotações próximas à de torque máximo, aproximadamente na metade da rotação de potência máxima do motor, com uma tolerância maior em relação à carga máxima do que nos Otto.

Para que o teste RDE possa ser representativo das condições brasileiras, submetidos ao maior tempo em congestionamentos em relação à Europa, é preciso que a condição de aceitação de uma rota RDE no Brasil tenha uma menor velocidade no segmento urbano do teste, incluindo um tempo de marcha lenta e um número de paradas e arrancadas maior do que o caso europeu.

Considerando que o dado de Exame (2016) indica que um motorista médio da cidade de São Paulo tem que fazer quase 23 mil paradas e partidas no trânsito por ano e considerando que essa é a maior cidade do Brasil, concentrando cerca de 9% da população brasileira e mais de 10% da frota de veículos leves (DENATRAN, 2019), se faz necessário considerar a representatividade desse município e até mesmo da sua região metropolitana. Portanto, para que um teste RDE tenha representatividade com relação às condições do país, precisa levar em conta o elevado nível de congestionamento das maiores cidades brasileiras.

Portanto sugere-se que a parcela urbana da rota seja realizada especificamente na região central de uma cidade com mais de um milhão de habitantes, escolhendo vias onde se constate uma velocidade média igual ou menor que 20 km/h, e que contenha semáforos, que ocasionam paradas frequentes, para criar uma rota tão severa para consumo e emissões quanto a condição real de uso dos veículos predominante nos grandes centros urbanos.

Entretanto, essa sugestão se presta apenas a ser uma ação inicial, melhor do que simplesmente seguir os critérios europeus. Isso porque apesar da cidade de São Paulo por si só representar uma parcela significativa da frota e de Exame (2016) indicar um valioso número de paradas e partidas em São Paulo, são necessários trabalhos específicos para levantar uma média estatística desse indicador, ao menos nas dez principais capitais, para determinar uma rota representativa, atualizando os parâmetros adotados assim que for possível.

AVL (2016, 2018a) também propõe uma nova proporção entre as parcelas de condução urbana, rural e autoestrada, majorando a distância urbana para melhor avaliar a condição de trânsito congestionado e evitar reduzir a influência da partida a frio. Pela fase atual da norma Euro 6, a distância em trecho urbano deve ser de 14 km mínimos, e a duração de pelo menos 30 minutos.

Segundo Forcetto e Abrantes (2017), devido ao maior impacto das emissões do trecho urbano nas emissões totais do teste, sua proporção de participação na rota RDE, obedecendo ao que se observa no uso normal, é determinante para a representatividade do teste. Por isso, para aplicação nos veículos leves no caso brasileiro, os autores sugerem uma mudança em relação à composição prevista no procedimento europeu, passando de 34% urbano, 33% rural e 33% rodoviário, para as proporções: 50% urbano, 25% rural e 25% rodoviário.

Essa medida, associada à menor velocidade média na condução urbana, como proposto acima, deve causar um aumento no tempo de teste, extrapolando o limite de 120 minutos. Dessa forma, seguindo a norma europeia, cada parcela de condução deve respeitar uma distância mínima de 16 km. Mas ao adotar a divisão proposta por Forcetto e Abrantes (2017) de 50% urbana, 25% rural e 25% rodoviária, então a distância mínima a percorrer na condução urbana será de 32 km. E se for considerada a velocidade média urbana de 20 km/h, tem-se um tempo de 96 minutos apenas nessa parcela.

Se a parcela rural for conduzida a uma velocidade média de 75 km/h e a rodoviária à média de 100 km/h, o que é bastante realista, pode-se ter um tempo total de duração do teste conforme a Equação 2, proposta por Singh (2019), que totaliza 118 minutos e 24 segundos. Então, considerando que os testes não percorrerão apenas a distância mínima, a proposta é adotar um aumento no tempo máximo de teste, a exemplo do que foi feito na

Índia (Singh, 2019), oferecendo uma margem de 30 minutos, ou seja, limitando o teste em 150 minutos.

$$t_{rde} = 60 \times \left(\frac{d_{urb}}{Vm_{urb}} + \frac{d_{rur}}{Vm_{rur}} + \frac{d_{rod}}{Vm_{rod}} \right) \quad (2)$$

em que:

t_{rde} = tempo total em minutos

d_{urb} = distância da condução urbana mínima

Vm_{urb} = velocidade média da condução urbana

d_{rur} = distância da condução rural mínima

Vm_{rur} = velocidade média da condução rural

d_{rod} = distância da condução rodoviária mínima

Vm_{rod} = velocidade média da condução rodoviária

Os veículos pesados podem ser concebidos para ser do tipo urbano ou rodoviário, principalmente no caso dos ônibus. Por isso devem ser consideradas até três rotas distintas para o teste RDE, de acordo com a aplicação do veículo.

Para os caminhões urbanos de pequeno porte, conhecidos como VUC (veículo urbano de carga), cuja carga útil pode chegar até mais de 10 toneladas, considera-se a utilização majoritariamente urbana, mas ocasionalmente esses veículos são vistos em percursos rodoviários. Então, na ausência de dados detalhados, sugere-se que esses sejam testados com uma rota composta por 70% de condução urbana, 15% rural e 15% rodoviária.

Para os ônibus urbanos, cuja operação não costuma se desviar do seu ambiente, a proposta desse trabalho é que a rota seja composta apenas pelos segmentos urbano e rural, tendo em vista que esses veículos raramente circulam em rodovias. Para o início da aplicação, sugere-se uma composição da rota com 70% de condução urbana e 30% rural, que é a indicação de EC (2013).

Já, para os caminhões pesados a partir de 16 toneladas e ônibus rodoviários, que operam majoritariamente nas rodovias, com menor proporção dentro das cidades, a rota deve contemplar os três segmentos, porém são sugeridas proporções iniciais que privilegiam a condição a que se destinam, da seguinte forma: 15% urbano, 15% rural e 70% rodoviário.

É importante destacar que as sugestões de composição da rota RDE são indicadas apenas para o início da implantação, enquanto não se dispõe de dados mais detalhados. Dessa forma, a composição definitiva deve ser baseada em medições em uso normal de ônibus urbanos, VUCs além de caminhões e ônibus rodoviários, respeitadas as suas participações na frota e percursos anuais.

Sobre as emissões de partida a frio, a menor duração das viagens do brasileiro médio em relação ao teste RDE, especialmente considerando o aumento da parcela urbana de condução, leva a um desbalanço entre o que se apura durante o teste e o que se verifica no uso real.

No Brasil, sugere-se, desde o início, rodar duas condições de RDE, sendo uma com partida a frio, na parcela de condução urbana, e outra com partida a quente, na parcela rural ou autoestrada. Dessa forma, em uma única rota poderão ser avaliadas as estratégias de emissões para as duas condições de partida: a frio e a quente. No caso da partida a frio, considera-se, ainda uma ponderação, com peso diferente para a fase em que o motor ainda não atingiu a sua temperatura normal de operação.

Por isso, a proposta desse trabalho é que o RDE se inicie sempre com uma partida a frio e, durante a análise dos resultados sejam identificadas as emissões de motor frio, ou seja, aquelas que foram medidas durante a fase de aquecimento do motor, e as emissões de motor quente, ou seja, as emissões medidas após a fase de aquecimento do motor. O ponto de corte sugerido para dividir o período de aquecimento da fase quente é o momento em que a temperatura do líquido de arrefecimento atingir 10°C abaixo da primeira inflexão (momento após a partida em que a temperatura inicia a primeira redução por ação do sistema de resfriamento).

As emissões totais devem ser ponderadas a partir das emissões de motor frio e das emissões de motor quente, conforme a Equação 3.

$$E_t = E_f \times FPF + E_q \times (1 - FPF) \quad (3)$$

em que:

E_t = Emissões totais do teste

E_f = Emissões de motor frio

E_q = Emissões de motor quente

PFP = Fator de partida a frio

O valor de FPF representa a proporção de tempo que o motor do veículo sob teste leva na fase de motor frio em relação ao tempo médio de viagem do motorista brasileiro, para cidades com mais de 1 milhão de habitantes. O cálculo desse fator demanda estudos específicos para prover dados atualizados.

Na falta de informações atualizadas, sugere-se usar a proporção a partir do tempo médio de viagem dado por ANTP (2018), para as cidades com mais de um milhão de habitantes, que é de 30 minutos, e o cálculo do FPF deve ser na forma da Equação 4.

$$FPF = T_f \div T_m \quad (4)$$

em que:

T_f = Tempo até o motor atingir a condição de motor quente no teste

T_m = Tempo médio de viagem nas cidades com mais de 1 milhão de habitantes

Para avaliar a partida a quente, deve-se interromper o funcionamento do motor durante a condução rural ou rodoviária sem interromper a leitura de dados do PEMS. Para tanto, a ignição do veículo deve permanecer desligada por um intervalo de pelo menos um minuto e no máximo dez. Então é dada a partida e prossegue-se o teste. O tempo de ignição desligada não deve ser contabilizado para fins de tempo máximo de teste.

4.2.Proposta 2: emissões características do Brasil

Para os veículos leves, considerando que a participação de motores Otto e suas variações no Brasil é muito maior do que na Europa, chegando praticamente à totalidade, a proposta é que o teste RDE seja conduzido considerando as emissões características deste tipo de motor. Neste caso, devem ser medidas emissões de CO e HC, que são as mais problemáticas. Segundo Wang *et al* (2018), as emissões de CO são muito influenciadas pelo estilo de condução e, portanto, tende a ser majorada durante o RDE. Para os modelos com injeção direta de gasolina, deve-se incluir também a contagem de partículas, PN. Para os modelos abastecidos com diesel, devem ser controladas as emissões de NO_x e PM, como se faz na Europa.

Para o Brasil, nas fases P8 e L7, que começarão a vigorar a partir de 2022, o mais indicado é adotar $CF = 1,43$ para o NO_x logo no início, ficando alinhado com o valor definitivo que terá sido adotado na Europa um ano antes. Isso se justifica porque ao adotar esse valor de CF, a Comissão Europeia já considera a inclusão de duas parcelas, uma para a severidade da rota, que seria igual à unidade, e outra referente à margem de variação para os equipamentos, no valor de 0,43 ($CF = 1 + 0,43$). Portanto pode-se depreender que os fabricantes devem ser capazes de adaptar seus motores para atender aos limites mesmo nas condições mais severas que a rota impõe. Já, os equipamentos PEMS que serão usados no Brasil serão os mesmos usados na Europa, não se justifica um fator de conformidade diferenciado. O mesmo ocorre para o PN, para o qual sugere-se usar o CF de 1,5.

Todavia, para o CO e para o HC, serão necessários trabalhos específicos para a determinação dos respectivos CFs. Na falta de dados mais precisos, sugere-se que nos dois primeiros anos, no máximo, os valores para esses poluentes sejam apenas anotados e, se necessário, no terceiro ano, seja adotado o mesmo valor que está sendo usado para NO_x como temporário na Europa, $CF = 2,1$, por representar uma margem suficientemente ampla para o período de adaptação. Com isso haverá tempo suficiente para que esses fatores sejam levantados. Convém que sejam implementados o quanto antes.

Apesar do entendimento comumente aceito de que o material particulado é emitido apenas pelos motores a diesel e pelos motores com GDI, os resultados reportados por Wang *et al* (2018), mostram que alguns veículos leves a gasolina do tipo com injeção no coletor ou PFI (*port fuel injection*) podem emitir particulados acima do limite do PROCONVE L7. Portanto, é aconselhável que se mantenha uma vigilância anotando os valores de PN dos veículos PFI durante os testes RDE.

Além disso os modelos *flex* podem ser abastecidos com gasolina e etanol e, portanto, um teste RDE representativo para esses veículos tem que ser conduzido em, no mínimo, duas passagens, uma com cada um desses combustíveis. Os resultados devem ser ponderados com pesos que respeitam a proporção de vendas atualizada do mercado.

Para o caso dos veículos pesados, cuja frota é quase totalmente abastecida com óleo diesel, não se identificam diferenças importantes em relação à Europa e, portanto, as emissões não demandam maiores adequações. Da mesma forma, para os veículos leves a diesel, a sugestão é seguir o procedimento europeu.

4.3.Proposta 3: temperatura e altitude

Como já foi exposto no item 3.3, uma vez que milhões de veículos brasileiros circulam em regiões onde a temperatura frequentemente ultrapassa o limite de 30°C e/ou a altitude ultrapassa os 700 m, indicados na norma europeia como as faixas de condições moderadas, é necessária uma adequação.

A Índia, ao implantar o RDE também se baseou na norma europeia e, assim como o Brasil, tem milhões de veículos operando em regiões que estão fora das condições moderadas. Em sua ação de adequação, a norma Bharat Stage VI redefiniu a faixa de altitude moderada para até 950 m, e a de temperatura para 10 a 40°C. A faixa estendida de altitude foi mantida em até 1300 m, como na Europa, mas a de temperatura ganhou novos limites, sendo de 3 a 10°C a inferior e de 40 a 45°C a superior (Singh, 2019).

A proposta desse trabalho para a adequação da altitude é manter o limite para as rotas que estiverem abaixo de 700 m, como se faz na Europa, e usar um fator de correção para alargar os limites acima dessa marca, o que pode ser aplicado de duas formas.

A primeira é através de um fator de correção sobre os valores de emissões para cada um dos pontos que tenham sido medidos acima dos 700 m, respeitando uma proporção com a altitude. Essa seria a forma mais fiel, entretanto, essa solução ponto a ponto pode depender de modificações no *software* que faz o pós-tratamento dos dados, pois exige um processamento extra nessa fase. Isso pode ser uma desvantagem, pois normalmente esse *software* é do próprio fabricante do PEMS e, nesse caso, o laboratório pode não ter a autonomia para se adequar de forma independente.

A segunda é mais fácil de ser implementada, mas exige que toda a rota esteja compreendida abaixo ou acima da altitude de corte. Nesse caso, aplica-se para o teste todo um fator único de correção que equivale à correção que seria necessária para a altitude de 1000 m, já que a maioria das cidades brasileiras está abaixo dessa cota. A vantagem desse método é que a correção pode ser aplicada diretamente aos resultados finais e não depende de nenhum processamento ponto a ponto e nem de modificações no *software* de pós-tratamento dos dados.

Para os dois casos é necessário um estudo aprofundado para determinar o fator de correção das emissões acima dos 700 m.

Em seu trabalho, Wang *et al* (2018) realizaram testes RDE em veículos leves a gasolina ao nível do mar e depois repetiram os testes em cidades com diferentes altitudes, até 2300m. A maioria apresentou uma tendência de acréscimo das emissões de NO_x e CO com o aumento da altitude, mas os autores não conseguiram obter um coeficiente de correção definido devido à grande dispersão dos dados. Alguns casos apresentaram aumento de quatro ou cinco vezes para CO aos 2300 m enquanto outros tiveram redução. Mas próximo dos 1000 m a maioria demonstra pouca variação em relação ao nível do mar. O mesmo ocorreu com o NO_x, com uma tendência de aumento moderado com a altitude, mas revelando pouca influência na medição que foi realizada próxima de 1000 m.

Wang *et al* (2018) atribuem a elevada dispersão à junção de fatores. Segundo eles, quando os testes foram realizados em diferentes cidades com diferentes altitudes, também mudaram outras variáveis, tais como condições de trânsito, temperatura e umidade. Segundo os autores, fazer uma comparação de uma única variável nesse caso é uma tarefa difícil.

Opcionalmente, existe no Regulamento 1151/2017 (EC, 2017b), no subanexo 4, item 4.5.1, uma fórmula para a determinação de um fator de correção de temperatura e de pressão para a determinação da resistência ao avanço, que é aplicada para a configuração do dinamômetro nos testes de laboratório. Essa correção está apresentada na Equação 5, e pode ser usada para a correção da carga nos ensaios RDE, até que sejam determinados os parâmetros para a correção da temperatura e altitude.

Correção da resistência do ar K₂:

$$K_2 = \frac{T}{293 \text{ K}} \times \frac{100 \text{ kPa}}{P} \quad (5)$$

em que:

K₂ = coeficiente de correção da resistência do ar;

T = média aritmética da temperatura atmosférica no teste RDE, em Kelvin (K);

P = média aritmética da pressão atmosférica nos percursos, em kPa.

Para o caso específico da temperatura, a outra possibilidade é fazer a correção através do ensaio WLTC, também prevista em EC (2017b) como ensaio de correção da temperatura ambiente, ATCT (*ambient temperature correction test*) ensaiando o veículo na faixa de temperatura moderada e ensaiando novamente na temperatura típica da região onde se deseja executar o teste RDE. A correção se dá pela Equação 6.

$$FCF = M_{CO_2, T_{reg}} / M_{CO_2, 23^\circ} \quad (6)$$

em que:

$M_{CO_2, 23^\circ C}$ = emissões mássicas de CO₂ no ciclo WLTC* a 23 °C

$M_{CO_2, T_{reg}}$ = emissões mássicas de CO₂ no WLTC* à temperatura regional

* Ciclo WLTC completo do ensaio do tipo 1 em veículo H, após o passo 3 do quadro A7/1 do subanexo 7, sem quaisquer outras correções, em g/km.

Essa forma é simples mas tem as desvantagens de ser limitada aos veículos leves e exigir dois ensaios extras em laboratório.

4.4.Proposta 4: combustível de referência de homologação

Com a ANP (2018) especificando a gasolina de referência com adição de 22% de etanol e o óleo diesel de referência com 7% de biodiesel, surge mais um fator que distancia os testes de homologação das condições de uso normal dos veículos, com combustíveis comerciais.

Essa medida, mesmo não colaborando com representatividade, se justifica para os ensaios de laboratório onde a repetibilidade e a reprodutibilidade são importantes para a comparação com os limites do PROCONVE. Mas para o teste RDE, que se propõe a ser mais representativo das condições reais, isso é um obstáculo.

Para o caso do etanol hidratado, o combustível de referência é similar ao comercial e, portanto, seu uso não deve afetar as emissões.

Já, para a gasolina, a diferença é importante, pois o combustível comercial recebe a adição de 27% de etanol anidro, o que é significativo para emissões e consumo se esse combustível for usado sem misturas, mesmo nos veículos *flex*, que são a maioria da frota.

Para o caso do óleo diesel, que abastece quase a totalidade dos veículos pesados e cerca de 10% dos veículos leves, a composição do óleo diesel comercial, atualmente fixada em 10%, também é diferente daquela do óleo diesel de referência. Assim, é esperado um desvio entre os testes RDE, com o combustível de referência, e as emissões reais, com o diesel comercial.

A sugestão proposta para esse tipo de desvio é atualizar as especificações da gasolina de referência para que passe a ter o mesmo teor de etanol anidro da gasolina comercial, bem como mudar a especificação do óleo diesel de referência para ter o mesmo teor de biocombustível do óleo diesel comercial. Essa é uma decisão que cabe à ANP, que tem a competência de especificar os combustíveis comerciais e de referência.

4.5.Proposta 5: condições que afetam a severidade da rota

TE (2018), em setembro de 2018, argumentou que, mesmo os parâmetros de testes RDE adotados na Europa não eram representativos o suficiente das emissões em uso e, por isso, propôs que a proporção de condução urbana fosse aumentada, bem como a taxa de ganho de altitude e a faixa de temperatura. Também indicou que a condução deveria ser mais dinâmica (severa) para representar melhor o modo de condução dos usuários e que não deveria haver ajustes das condições dinâmicas na análise dos resultados, mas sim limites mínimo e máximo dos parâmetros.

Pouco tempo depois, em novembro do mesmo ano, a Comissão Europeia publicou seu quarto ato (EC, 2018), onde entre outras coisas, determina uma nova faixa moderada de temperaturas, que agora passa a ser de 0°C a 30°C, e estabelece uma nova forma de validação dos testes. Essas duas medidas estão alinhadas com a melhoria do teste e são um sinal de que os procedimentos continuam a ser revistos. Mas isso ainda existem muitos outros fatores que são importantes, tais como a influência das rampas e declives da rota sobre os resultados, destacada por Bielaczyc (2015), e a influência dos ventos durante o

teste, mostrada por AVL (2018b). Mas essas questões ainda não foram tratadas pela norma.

A comparação entre diferentes rotas RDE mostra que as diferenças entre elas causam grande influência sobre as emissões médias (TE, 2018). Em outras palavras, a escolha dos critérios de definição da rota, levando em conta as condições que afetam a severidade, é um fator crítico para alcançar a representatividade dos testes.

Então, no Brasil, pode-se utilizar a experiência europeia para incluir as condições mais severas nos critérios de aceitação da rota. Mas, existe a necessidade de que as rotas sejam comparáveis aos limites definidos e, para isso, mesmo sabendo que a natureza do teste implica numa certa variabilidade por se realizar em ambiente não controlado, devem-se tomar cuidados para tornar o teste repetitivo e reprodutível o bastante para que cumpra a sua função.

O que esse trabalho propõe para tratar as principais variáveis que modificam a severidade da rota RDE é a aplicação da metodologia de Franco *et al* (2014), que apresenta a quantização das condições encontradas em rotas RDE e as separa em tipos e níveis de intensidade. Por exemplo, a inclinação é quantizada em níveis: descida forte, descida suave, plano, subida suave e subida forte. O mesmo ocorre com a aceleração (v.a), a velocidade, a temperatura do líquido de arrefecimento, temperatura dos gases do escapamento, etc.

O próximo passo é a determinação dos fatores de emissões para cada poluente em cada uma dessas condições. Feito isso basta criar uma rota que contemple cada uma dessas condições nas proporções que forem representativas da condução normal dos veículos. Assim, quaisquer rotas criadas com esse critério podem ser comparadas entre si e, portanto, ao limite de emissões estipulado.

A Tabela 17 mostra um exemplo de como fica a distribuição desses critérios de forma isolada, ou seja, aplicados de forma independente na análise de cada situação, de acordo com Franco *et al* (2014). Os critérios combinados são exemplificados na Tabela 18.

Tabela 17: Critérios de filtragem para a determinação de fatores de emissões específicos situacionais (Franco et al, 2014).

CRITÉRIO	SENSOR	PONTO DE CORTE	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	FATOR
Velocidade x Aceleração	GPS (velocidade)	$v.a < -9,2 \text{ W/kg}$	desaceleração forte	$\nabla\nabla *$	0,49*
		$-9,2 \leq v.a < 0 \text{ W/kg}$	desaceleração suave	$\nabla *$	0,72*
		$0 \leq v.a < 9,2 \text{ W/kg}$	aceleração suave	$\Delta *$	1,61*
		$v.a \geq 9,2 \text{ W/kg}$	aceleração forte	$\Delta\Delta *$	3,45*
Rampa	GPS (altitude)	inclinação $< -4\%$	declive forte	$\nabla\nabla *$	0,31*
		$-4 \leq i < -1 \%$	declive suave	$\nabla *$	0,68*
		$-1 \leq i < 1 \%$	plano	$= = *$	1,00*
		$1 \leq i < 4 \%$	aclive suave	$\Delta *$	1,23*
		inclinação $\geq 4\%$	aclive forte	$\Delta\Delta *$	4,76*

Tabela 18: Critérios de filtragem combinados para a determinação de fatores de emissões específicos situacionais (Franco et al, 2014).

CONDUÇÃO	CRITÉRIO	FILTRO	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	FATOR
Urbana	Aceleração e rampa	declive forte	desaceleração forte	URB $\nabla\nabla *$	0,50*
			desaceleração suave	URB $\nabla *$	0,72*
			aceleração suave	URB $= = *$	1,00*
			aceleração forte	URB $\Delta *$	1,25*
		declive suave	desaceleração forte	URB $\nabla\nabla *$	0,60*
			desaceleração suave	URB $\nabla *$	0,81*
			aceleração suave	URB $\Delta *$	1,25*
			aceleração forte	URB $\Delta\Delta *$	1,95*

* Os fatores preenchidos nas tabelas são fictícios, para fins de exemplo.

A determinação dos fatores de correção para cada condição demanda um trabalho de levantamento empírico que medirá a variação das emissões de cada poluente para cada situação, formando uma tabela de fatores de severidade. Após o teste RDE, pode-se executar uma correção ponto a ponto que considera os fatores de severidade, resultando

na mitigação da influência desses fatores, minimizando o efeito das variações que existem entre diferentes rotas.

É preciso lembrar que essa ação não vai conferir ao RDE a repetitividade e nem a reprodutibilidade semelhantes às dos testes de laboratório. Segundo Singh *et al* (2019), a condução de testes em vias públicas envolve muitas variáveis que prejudicam a repetibilidade e a reprodutibilidade. Por isso as condições dinâmicas de contorno da norma são uma tentativa de reduzir a variabilidade, mas não poderão eliminá-la completamente.

Mas, mesmo tendo isso em conta, a definição cuidadosa da tabela de fatores de severidade para cada segmento de veículos, como proposto nesse trabalho, pode ajudar a obter resultados mais estáveis e comparáveis.

A metodologia de Franco *et al* (2014) tem a desvantagem de depender de um grande trabalho empírico de levantamento dos fatores de severidade, que envolve um grande número de testes e um trabalho estatístico. Além disso, a aplicação desse procedimento exige a instalação de novos sensores que não são previstos no teste RDE da norma europeia, como sensores de vento e de inclinação. Outro fato indesejável é que algumas condições de severidade, como tipo de condução (branda/dinâmica), condições da pista e condições de tráfego, se incluídas, serão de difícil medição, podendo até mesmo contar com avaliações subjetivas. Também é preciso tomar cuidado para não se criar muitos critérios de forma que se torne difícil determinar todos os fatores.

Entretanto, depois de feito esse trabalho e tomados todos os cuidados, a metodologia pode facilmente ser usada para tratar os outros parâmetros que já foram vistos anteriormente, como congestionamentos, temperatura e altitude. Devido à sua grande versatilidade, a proposta de Franco *et al* (2014) pode ser aplicada para condições de teste que vão desde aquelas chamadas moderadas até condições que fogem à faixa das condições estendidas, ou seja, que extrapolam os limites de -7 a 35 °C e de 1300 m de altitude máxima.

Outro ponto a destacar destaque no trabalho de Franco *et al* (2014) é que, para o caso da temperatura, o exemplo apresentado pelo autor indica a medição no escapamento e/ou do líquido de arrefecimento ao invés de medir no ar ambiente, privilegiando os parâmetros do motor em lugar dos externos. Da mesma forma, a altitude também pode ser tratada

através de um parâmetro interno do motor, por exemplo, observando as pressões de coletor de admissão e de escapamento.

Para que essa abordagem seja aplicada, é necessário fazer uma parametrização para compensar as diferenças entre os diferentes motores, como já é feito para a rotação e para o torque nos testes em banco de motor. A vantagem é que, dessa forma, os fabricantes serão estimulados a projetar os seus motores para que sejam menos sensíveis à altitude e à temperatura externa, permanecendo dentro dos limites de emissões em uma faixa mais ampla de condições, com ganhos em redução de emissões.

5. Conclusão

O objetivo desse trabalho foi auxiliar a implantação do teste RDE no processo de homologação dos veículos no Brasil, identificando as ações necessárias para ajudar a alcançar rapidamente a efetividade em representar as emissões que ocorrem no uso real dos veículos no país.

Esse trabalho foi desenvolvido considerando a proximidade da implantação do teste RDE no Brasil, e tomando como referência o caso da Europa, que já o implantou.

Na Europa essa implantação levou vários anos e demandou intensos estudos, levando a uma produção de documentos oficiais muito elevada, estimada em cerca de 3000 páginas até o início do ano de 2019.

Tendo isso em mente, uma das preocupações durante a produção dessa dissertação foi manter a simplicidade, tanto quanto possível, para, ao final do trabalho, apresentar um documento de auxílio à implantação do RDE, com informações relevantes, de forma clara, focadas na solução e que podem ser aplicadas rapidamente. Esse trabalho não pretende substituir o que a Comissão Europeia e o CONAMA já publicaram sobre o tema, mas sim contribuir no propósito de fazer com que o teste seja representativo das condições de uso dos veículos no Brasil.

A Europa incluiu o RDE na homologação dos veículos porque constatou que a redução dos limites de emissões não estava levando à melhoria da qualidade do ar, especialmente

para a concentração de NO_x . Esse poluente, que afeta a saúde humana, é uma emissão típica dos veículos a diesel, comuns naquele continente.

Os primeiros testes com equipamentos PEMS confirmaram que o controle de emissões usando avaliações por testes de laboratório não era eficaz porque os veículos emitiam muito mais em seu uso normal. Também se concluiu que o RDE é capaz de representar o uso real dos veículos muito melhor do que os ciclos de laboratório.

A Europa enfrentou problemas no início da implantação do teste RDE, relacionados à representatividade e à garantia da transparência. A solução veio em medidas subsequentes, que ficaram conhecidas como os quatro atos da implantação do RDE.

Na definição dos critérios e procedimentos de teste RDE, a Comissão Europeia levou em conta as condições que são comuns na Europa. Ainda assim, mesmo nesse ambiente, alguns parâmetros ainda precisam ser redefinidos para melhorar ainda mais a representatividade desse teste com relação à condução dos veículos em seu uso real, destacando-se a inclusão de rampas na rota e de considerações sobre o comportamento dos motoristas comuns. A necessidade de aumentar a proporção da condução urbana também é uma possível melhoria, defendida pela comunidade científica, por ser uma condição mais severa de uso.

Para considerar a aplicação do RDE no Brasil, foram destacados os principais fatores de sucesso para que o teste rapidamente se torne eficaz em representar o uso real nesse ambiente, com suas características diferenciadas da Europa.

A diferença de motorização, o predomínio de uso urbano dos veículos, o clima tropical, a ocorrência de altitudes acima de 700 m e o uso de combustível padrão para os testes de homologação são alguns dos fatores relacionados à adequação ao ambiente brasileiro em relação à Europa. Já os fatores que conferem uma severidade diferenciada ao teste são uma oportunidade de melhoria do RDE que já é levantada como opção mesmo para a Europa, em ações futuras.

A grande concentração da população brasileira nas metrópoles e a existência de megacidades, como São Paulo e Rio de Janeiro, acentuam a proporção de uso em trânsito urbano e a ocorrência de congestionamentos para veículos leves e veículos urbanos de carga. Por isso a solução proposta é aumentar a participação da condução urbana no RDE

e reduzir a velocidade média dessa parcela através da definição da rota em regiões centrais das cidades, enfrentando congestionamentos.

A composição da frota brasileira, diferente da europeia, é baseada em motores de ignição por centelha para os veículos leves e em motores de ignição por compressão para veículos pesados. Essa diferença impõe que sejam medidos poluentes característicos desses tipos de motores, que são CO e HC para os veículos leves de ciclo Otto, incluindo PN para os modelos com injeção direta de gasolina, e NO_x e PN para os veículos pesados e leves a diesel.

As temperaturas elevadas do clima tropical e a ocupação de regiões de altitude elevada, que são características do Brasil, situam a maior parte do tráfego em condições que estão fora da faixa regular das condições do RDE europeu. Por isso se recomenda a reformulação dessas faixas com as devidas correções para compatibilizar os resultados obtidos nos testes. Para compatibilizar o teste com o relevo acidentado presente em diversas cidades importantes, foi indicada a inclusão de uma maior taxa de ganho de altitude na rota RDE.

Na consideração sobre fatores que causam maior severidade nos testes RDE, principalmente as rampas, ventos e comportamento do motorista, que causam as maiores inconsistências nas medições em comparação ao uso real, foi proposta uma metodologia de fatores de severidade que podem ser usados para compensar cada situação específica, tornando dois testes comparáveis, mesmo que tenham rotas com severidades diferentes.

Ao se destacar as diferenças entre as cidades brasileiras em relação às europeias, em clima, altitude e congestionamento, são também evitados problemas relativos à definição da rota e à própria realização dos testes. Para se obter uma boa representatividade entre a homologação e as emissões que são efetivamente lançadas na atmosfera, é preciso um especial cuidado com a forma como os veículos são homologados, para se ter controle sobre o que se está aprovando.

Ficou claro nessa pesquisa que as montadoras são capazes de desenvolver tecnologias avançadas e soluções para obedecer aos limites de emissões exigidos nos testes de homologação. Entretanto, todo o investimento nos controles pelos órgãos públicos e o desenvolvimento tecnológico por parte da indústria podem ter seu resultado

comprometido se houver brechas na definição dos testes de homologação. Limites factíveis e testes representativos da realidade são elementos chave para se alcançar o objetivo último, que é a melhoria da qualidade do ar.

As soluções aqui recomendadas incluem um trabalho de levantamento de dados que pode tomar um tempo significativo e, por isso, é recomendável que os pesquisadores interessados comecem o mais breve possível para que essas informações sejam disponibilizadas a tempo de subsidiar a definição dos procedimentos nacionais antes da entrada do RDE, em 2022.

Apesar de não aparecer na maioria dos trabalhos que utilizam o PEMS, a sua aplicação inclui uma etapa bastante trabalhosa que precisa ser vencida antes mesmo de iniciar os testes para a coleta de dados de emissões. Esta etapa diz respeito ao aprendizado no uso do equipamento, que é bastante complexo, sensível e com rotinas específicas de operação e manutenção. O conhecimento em detalhes da norma à qual o aparelho atende também é necessário para que os resultados das medições tenham validade. No caso do Brasil, o CONAMA já determinou a adoção da norma europeia Euro 6/IV como base para a implantação do RDE na sua fase L7/P8. O uso dos procedimentos europeus é questionável, pois esses foram escritos para representar as condições típicas europeias das quais o Brasil difere, como será tratado no próximo capítulo.

O uso do PEMS será uma solução ótima para o caso do Brasil. Entretanto, como utiliza uma tecnologia das mais avançadas, e que se encontra em constante aperfeiçoamento em termos de precisão e de redução de peso, o seu elevado preço ainda desencoraja algumas instituições que, por vezes, preferem aguardar para comprar o equipamento de uma geração mais avançada. Além disso, o PEMS tem um tempo de *setup* alto, permitindo poucos testes diários, o que ainda restringe o seu uso.

O objetivo desse trabalho foi apresentar direcionamentos e soluções para tornar mais rápida e eficaz a implantação do teste RDE no Brasil e, dentro desse entendimento, pode-se afirmar que foi atingido.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Na falta de referências atuais, alguns dados utilizados neste trabalho, principalmente para determinação das velocidades médias, são antigos, com mais de 6 anos ou, ainda, fruto de cálculos a partir do cruzamento de referências diferentes, o que certamente impacta na precisão dos valores. Portanto fica a sugestão para que futuros trabalhos contribuam com o aprofundamento dos levantamentos dos números médios de tempo de viagem, distâncias por viagem e velocidade de deslocamento urbano das cidades brasileiras, sobretudo nas 10 principais cidades, que concentram uma parcela significativa da frota. Feito isso, esses dados refinados podem ser combinados com este trabalho para direcionar ainda melhor as sugestões para os parâmetros de teste RDE no Brasil.

Uma das informações mais urgentes é a composição do uso dos veículos, sobretudo os leves de passeio, já que os seus usuários costumam usá-los indistintamente para todas as finalidades: deslocamento urbano diário, deslocamento rural, viagens e até mesmo em aplicação comercial, incluindo transportes de pequenas cargas. Os valores estimados no item 4.1 devem ser ajustados com a melhor acurácia e no menor tempo possível.

Também seria de grande interesse um estudo comparativo entre os resultados de várias cidades com características diferentes de relevo, clima e trânsito, para conhecer a influência destas peculiaridades sobre os resultados dos testes RDE, eventualmente propondo adequações para diferentes regiões.

Alternativamente, sugere-se um estudo mais completo fazendo o levantamento de fatores de correção para uso na metodologia de Franco *et al* (2014). Nessa linha seriam mais importantes os fatores relativos à altitude, com abrangência até 1100 m, os relativos à temperatura até 35°C, para abranger as 10 principais cidades, conforme a Tabela 16 e Figura 22. Também são importantes os fatores para a inclinação da pista e para o comportamento do condutor (brando/dinâmico).

Sabendo-se que a inclinação, a altitude e a temperatura ambiente influenciam as emissões, espera-se que cada poluente tenha um comportamento próprio em função desses fatores. A diferenciação entre tecnologias e o tipos de motor também devem ser considerada. Portanto sugerem-se trabalhos para determinar fatores de emissões ou curvas de correção dos principais poluentes em função dessas variações de severidade, para possibilitar o uso

da metodologia dos fatores de emissões específicos situacionais ou simplesmente aplicar as correções para os testes RDE.

Um teste de 90 minutos usando o PEMS tem cerca de 5400 pontos de medição, cada um com mais de quinze variáveis registradas. E tanto o uso simples das curvas de correção das emissões quanto a metodologia dos fatores de emissões específicos situacionais demandam um certo trabalho. Portanto, o processamento dos resultados só é viável se for automatizado e, por essa razão, sugerem-se trabalhos que ajudem a desenvolver um *software* capaz de processar as correções de forma automática, se esse for o caso ou, se forem usados os fatores de correção situacionais, que seja capaz de fazer os cortes de pontos para o ajuste das proporções conforme foi descrito no item 4.5.

Como complemento a este trabalho, sugere-se buscar uma amostragem mais ampla de medições RDE em veículos no Brasil, em diferentes cidades, para avaliar as características próprias de cada uma. Um dos principais parâmetros a se levantar em cada cidade é a taxa de ganho de altitude em m/100km, pois este é um fator apontado na literatura como um dos mais difíceis de reproduzir em laboratório e, portanto, deve ser bem representado pelo RDE.

Estudos que auxiliem a definição das famílias de teste, classificação e tamanho da amostragem e controles de produção e de durabilidade dos sistemas de controle de emissões em veículos usados também serão bem-vindos, assim como aqueles que auxiliem no estímulo à prática da vigilância por laboratórios independentes sobre a frota circulante.

Assim que for definida a especificação do óleo diesel de referência de homologação pela ANP, sugere-se que sejam feitos trabalhos de comparação entre esse e o óleo diesel comercial, determinando a correlação entre as emissões desses combustíveis, podendo-se determinar fatores de correção para os principais poluentes.

A implantação do RDE no Brasil será uma tarefa árdua, especialmente considerando o curto prazo que resta até 2022, pois existe uma grande lacuna de dados básicos. Contudo, se todas as medidas forem tomadas os resultados certamente serão gratificantes.

6. Bibliografia

- ABNT, 2012, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15634 – Veículos Rodoviários Automotores – Análise de Determinação do Gás de Exaustão Segundo os Ciclos ETC, ESC e ELR. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2001, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13037 – Veículos rodoviários automotores - Gás de escapamento emitido por motor diesel em aceleração livre - Determinação da opacidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ACEA, 2017, The European Automobile Manufacturers' Association. Average age of the EU motor vehicle fleet, by vehicle type. 11/06/2019. Disponível em: <https://www.acea.be/statistics/article/average-age-of-the-eu-motor-vehicle-fleet-by-vehicle-type>
- ACEA, 2019, The European Automobile Manufacturers' Association. What Is WLTP and How Does It Work? WLTP FACTS.EU. Acesso em 27/01/2019, disponível em: <https://www.acea.be/> ou <https://wltpfacts.eu/>
- AEA, 2017, Agência Europeia do Ambiente. Poluição Atmosférica. 2017-10-09. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/air/intro>
- ANP, 2018, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 764, de 20 de dezembro de 2018. Estabelece as especificações dos combustíveis de referência utilizados nos ensaios de avaliação de consumo de combustível e de emissões veiculares para a homologação de veículos automotores novos. DOU publicado em: 21/12/2018, Ed 245, Seção: 1, p. 841
- AVL, 2016, “Legislation Services - Apresentação comercial”, AVL South America. Junho de 2016.
- AVL, 2017, “Draft Proposal for a set of Amendments to the Regulation – Apresentação”. 15º Congresso SAE Brasil de Powertrain, Campinas, SP, Brasil. Outubro de 2017
- AVL, 2018a, “Apresentação sobre testes de emissões em condução real”. AVL South America. 16º Simpósio SAE Brasil de Powertrain. Campinas, SP, 24 e 25 de outubro de 2018.
- AVL, 2018b, “Emission Regulation Trends”. AVL India Seminar. Overcoming BS6 & RDE Challenges with 2020 getting Closer. Engeljehring, Kurt, India. May 2018 Acesso em : 27 de abril de 2019. Disponível em : https://www.avl.com/documents/10138/8665616/02+AVL+India+Seminar+May+2018_Regulation+Trends_Engeljehring.pdf
- ANTP, 2014, Agência Nacional de Transportes Públicos. *Relatório geral 2012*. In: Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP. Julho de 2014.
- ANTP, 2018, Agência Nacional de Transportes Públicos. *Relatório geral 2015*. In: Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP. Maio de 2018
- Arioli, M., Lindau, L. A., Cooper, E., 2014, “Meta-Análise das Emissões de Gases na Exaustão dos Ônibus Urbanos”. XXVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Curitiba, PR, Brasil, novembro de 2014.
- Barros M., 2017, “Um Brasil cada vez mais motorizado - A frota atual já é duas vezes e meia a existente em 2001 e segue crescendo apesar da crise”. *Estadão*. Especial para o Estado, O Estado de S. Paulo. 11 Dezembro 2017, 05h00. Disponível em: <https://brasil.estadao.com.br/noticias/geral,um-brasil-cada-vez-mais-motorizado,70002113861>
- Beauboeuf, D. P., 2010, *Microscopy Investigations of Ash and Particulate Matter Accumulation in Diesel Particulate Filter Surface Pores*. Grau D/Sc. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering. Massachussets.
- Bielaczyc, P., 2015, Bosmal. “A Comparison of RDE Testing and the WLTP as Evaluation Tools for Emissions and Fuel Consumption”. 3th International Conference – Real Drive Emissions, 2015,.
- Blanco-Rodriguez, D., Holderbaum, G.Vagoni B., 2016, “EU6 C-Segment Diesel Vehicles, a Challenging Segment to Meet RDE and WLTP Requirements”. *Elsevier - IFAC Papers Online, Conference Paper*. Vol. 49 n.11 p.649-656.

- Braga A., Böhm G. M., Pereira L. A. A., Saldiva P., 2001, “Poluição Atmosférica e Saúde Humana”. *Revista USP*, São Paulo, n.51, p. 58-71, setembro/novembro de 2001.
- Buchholz K., 2017, *PEMS Intros On-the-road Emissions Testing to U.S., Europe*. In: SAE International, Energy/environment. Technology Report. Automotive Engineering – November 2017 p. 10.
- Carvalho, C. H. R., 2011, “Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros, Texto para Discussão”. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)*, No. 1606, Brasília, abril de 2011. ISSN 1415-4765, JEL: R49. Disponível em: http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf
- CONAMA, 1986, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. DOU de 17 de junho de 1986, Seção 1, p. 8792-8795
- CONAMA, 1993, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 8, DE 31 de agosto de 1993, institui as fases CONAMA P1, P2, P3 e P4. Acessado em 22/01/2019. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res93/res0893.html>
- CONAMA, 1995a, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 015, de 13 de dezembro de 1995. Estabelece nova classificação dos veículos automotores a partir de 1996. Acessado em 22/01/2019. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res95/res1595.html>
- CONAMA, 1995b, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 16, DE 13 de dezembro de 1995. Estabelece limites para opacidade de motores a diesel pesados e limita emissão de gases de carter para motores turboalimentados. Acessado em 22/01/2019. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res95/res1595.html>
- CONAMA, 2002, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 315, de 29 de outubro de 2002, institui as fases CONAMA L4, L5, P5 e P6. DOU nº 224, de 20 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 90-92.
- CONAMA, 2004, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 354, de 13 de dezembro de 2004. Dispõe sobre os requisitos dos sistemas de diagnose a bordo, OBD. DOU no 239, de 14 de dezembro de 2004, Seção 1, páginas 62-63.
- CONAMA, 2008, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 403, de 11 de novembro de 2008. Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências. DOU nº 220 de 12 de novembro de 2008, Seção 1, p. 92-93.
- CONAMA, 2009, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 415, de 24 de setembro de 2009. Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências. DOU nº 184, de 25/09/2009, p. 53-54
- CONAMA, 2011, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 432, DE 13 DE JULHO DE 2011. Estabelece novas fases de controle de emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, e dá outras providências. DOU Nº 134, em 14/07/2011, p. 69
- CONAMA, 2018a, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 490, de 16 de novembro de 2018. Estabelece a Fase PROCONVE P8 de emissões de veículos pesados. Publicado em: 21/11/2018, DOU nº 223, Seção 1, p. 153 a 155. ISSN 1677-7042
- CONAMA, 2018b, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 492 de 20 de dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de emissões de veículos leves. Publicado em: 24/12/2018, DOU nº 246, Seção: 1, p. 141 - 145. ISSN 1677-7042
- CONAMA, 2019, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 493 de 24 de junho de 2019. Estabelece a Fase PROMOT M5 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos similares - PROMOT para controle de emissões de gases poluentes e de ruído por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, altera as Resoluções CONAMA nºs 297/2002 e 432/2011, e dá outras providências. Dou nº 121, 26 de junho de 2019, seção 1, p. 96 - 97. ISSN 1677-7042
- Costa, T. E. G. da, 2018, Comparação dos Resultados das Pesquisas Origem-Destino de 2002 e 2012. Acessado em jan/2019. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/bhtrans/2018/documentos/Resultados%20OD%202002-2012%20Tiago%20Esteves.pdf>

- DENATRAN, 2019, Frota de Veículos. Publicado: Terça, 10 de Maio de 2016, 18h20 - Última atualização em Quarta, 13 de Fevereiro de 2019, 19h01. Acesso em: 12 de maio de 2019. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/237-frota-veiculos>
- Donateo, T., Giovinazzi, M., 2017, “Building a Cycle for Real Driving Cycle Emissions”. *72° Conference of Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI 2017*, 6-8, September 2017, Lecce, Italy. Energy Procedia 126 (201709) pp 891-898.
- Dziubiński, M., 2016, “Testing of Exhaust Emissions of Vehicles Combustion Engines”. *The Fifth National Congress of Environmental Engineering*, novembro de 2016. Lublin University of Technology, Lublin, Poland p. 305-310. 10.1201/9781315281971-43. Acesso: 25 Abr, 2019. Available from: https://www.researchgate.net/publication/312399942_Testing_of_exhaust_emissions_of_vehicles_combustion_engines.
- EC, 2008, Regulamento (CE) N.º 692/2008 da Comissão de 18 de Julho de 2008 que executa e altera o Regulamento (CE) n.º 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo à homologação dos veículos a motor no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 5 e Euro 6) e ao acesso à informação relativa à reparação e manutenção de veículos. Jornal Oficial da União Europeia, L199, 18 de julho de 2008.
- EC, 2009, Regulamento (CE) N.º 595/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de Junho de 2009 relativo à homologação de veículos a motor e de motores no que se refere às emissões dos veículos pesados (Euro VI) e ao acesso às informações relativas à reparação e manutenção dos veículos, que altera o Regulamento (CE) n.º 715/2007 e a Directiva 2007/46/CE e revoga as Directivas 80/1269/CEE, 2005/55/CE e 2005/78/CE. Jornal Oficial da União Europeia, L199, 18 de Junho de 2009.
- EC, 2011, EU – European Commission. Regulation 2011/582 de maio de 2011 que dá aplicação e altera o Regulamento (CE) n.º 595/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho no que se refere às emissões dos veículos pesados (Euro VI) e que altera os anexos I e III da Directiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Jornal Oficial da União Europeia, L167, 25 Maio de 2011.
- EC, 2011a, Cidades de Amanhã - Desafios, visões e perspectivas. Política Regional. União Europeia. Outubro de 2011. Acesso em: 13 de maio de 2019. Disponível em: http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/citiesoftomorrow/citiesoftomorrow_final_pt.pdf
- EC, 2012, European Commission. Joint Research Centre Institute for Energy and Transport Driving and parking patterns of European car drivers --- a mobility survey. https://setis.ec.europa.eu/system/files/Driving_and_parking_patterns_of_European_car_drivers-a_mobility_survey.pdf
- EC, 2013, Regulamento n.º 49 da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) — Prescrições uniformes no que diz respeito às medidas a tomar contra a emissão de gases e de partículas poluentes provenientes dos motores de ignição por compressão e de ignição comandada utilizados em veículos
- EC, 2016a, Regulamento (UE) 2016/427 da Comissão de 10 de março de 2016 que altera o Regulamento (CE) n.º 692/2008 no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 6). Jornal Oficial da União Europeia, L82, 10 de março de 2016.
- EC, 2016b, Regulamento (UE) 2016/646 da Comissão de 20 de abril de 2016 que altera o Regulamento (CE) n.º 692/2008 no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 6). Jornal Oficial da União Europeia, L109, 20 de abril de 2016.
- EC, 2017a, EU – European Commission. A Europa em Movimento - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité Das Regiões, Fact Sheet – Press Release Database, Bruxelas, 31 Maio 2017, COM (2017) 283 final, acesso em 24/02/2019, disponível em: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-17-2821_en.htm
- EC, 2017b, REGULAMENTO (UE) 2017/1151 DA COMISSÃO de 1 de junho de 2017 que completa o Regulamento (CE) n.º 715/2007 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo à homologação dos veículos a motor no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais (Euro 5 e Euro 6) e ao acesso à informação relativa à reparação e manutenção de veículos, que altera a Directiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, o Regulamento (CE) n.º 692/2008 da Comissão e o Regulamento (UE) n.º 1230/2012 da Comissão, e revoga o Regulamento (CE) n.º 692/2008 da Comissão

- EC, 2017c, COMMISSION REGULATION (EU) 2017/1154 of 7 June 2017 amending Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Regulation (EC) No 692/2008 and Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council as regards real-driving emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6).
- EC, 2018a, Testing of emissions from cars. European Commission - Fact Sheet. Brussels, 4 May 2018. Acesso: 16 de novembro de 2018. Disponível em: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-18-3646_en.htm
- EC, 2018b, REGULAMENTO (UE) 2018/1832 DA COMISSÃO de 5 de novembro de 2018 que altera a Diretiva 2007/46/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, o Regulamento (CE) n.º 692/2008 da Comissão e o Regulamento (UE) 2017/1151 da Comissão com o objetivo de melhorar os ensaios e procedimentos de homologação no que respeita às emissões dos veículos ligeiros de passageiros e comerciais, incluindo os que dizem respeito à conformidade em circulação e às emissões reais de condução, e de introduzir dispositivos para a monitorização do consumo de combustível e energia elétrica.
- FENABRAVE, 2018, Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. “Anuário 2017” *O Desempenho da Distribuição Automotiva no Brasil*. Ed.: Milxto Arte, p.: 96 Março / 2018
- FENABRAVE, 2019a, Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. Disponível em: <http://www.fenabrave.com.br/>. Acesso em: 30 jan. 2019.
- FENABRAVE, 2019b, Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. “Anuário 2018”. *O Desempenho da Distribuição Automotiva no Brasil*. Ed.: Milxto Arte, p.: 92, Março / 2019
- Fiebig, M., Wiartalla, A., Holderbaum, B., Kiesow, S., 2014, “Particulate Emissions from Diesel Engines: Correlation between Engine Technology and Emissions”. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. Disponível em: <http://www.occup-med.com/content/9/1/6>. Acesso em 05/04/2016.
- Forcetto, A. L. S., Abrantes, R. de., 2017, “Questions about Real Driving Emissions in Brazil. CETESB – Environmental Company of Sao Paulo State”. *Congresso SAE Brasil 2017*. Ref.: 2017-36-0189. ISSN 0148-7191
- Franco, V., F. P. Sanchez, J. German, P Mock, 2014, “Real-World Exhaust Emissions from Modern Diesel Cars - A Meta-analysis of PEMS Emissions data from EU (EURO 6) and US (TIER 2 Bin 5/ULEV II) Diesel Passenger Cars”. *ICCT, White paper*. October, 2014.
- Giongo, A., Perin, C., Melo, T. C. C., Freitas, F. A., Pereira, C. G., 2012, “A Chegada do Arla 32 ao Brasil”. *21th SAE Brasil International Congress and Exhibition*. São Paulo, Brasil. 02 a 04 de outubro de 2012. 2012-36-0510
- Heywood, J. B., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals. 1ed. Estados Unidos da América. McGraw-Hill. p. 567-659.
- Huo, H.; Yao, Z.; Y. Zhang; Shen, X.; Zhang, Q.; He, K., 2012, “On-board Measurements of Emissions from Diesel Trucks in Five Cities in China”. *Atmospheric Environment*. n. 54, pp. 159-167, janeiro de 2012.
- IBGE, 2010, *Regiões Metropolitanas*. In: Tabelas, Sinopse do Censo Demográfico 2010, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Acesso: 10/02/2019. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse/sinopse_tab_rm_zip.shtm:
- IBGE, 2019, *População do Brasil*. In: Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Acesso: 31/05/2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>
- ICCT, 2017, “Real Drive Emission Test Procedure for Exhaust Gas Pollutant Emissions of Cars and Light Commercial Vehicles in Europe”. ICCT Wite paper. Janeiro de 2017.
- Koifman, H., 2018, *Carros Elétricos: o que Falta para Vê-los nas Ruas? - Verdades e Mentiras sobre a Lenta Jornada desses Veículos até o Mercado Brasileiro*. Projeto Colabora. Novembro de 2018. Acesso: 05/07/2019. Disponível em: <https://projetocolabora.com.br/sustentabilidade/carros-eletricos-o-que-falta-o-que-falta/>

- Mamakos, A., Bonnel, P., Perujo, A. e Carriero, M., 2013, “Assessment of Portable Emission Measurement Systems (PEMS) for Heavy-Duty Diesel Engines with Respect to Particulate Matter”. *Journal of Aerosol Science* n.57 pp.54–70. Commission, Joint Research Centre, I-21027 Ispra (VA), Italy.
- Mamikoglu, S.; Andric, J.; Dahlander, P., 2017, “Impact of Conventional and Electrified Powertrains on Fuel Economy in Various Driving Cycles”. *SAE Technical Paper*. Maio de 2017. 2017-01-0903, doi:10.4271/2017-01-0903.
- MMA, 2011, Ministério do Meio Ambiente. *PROCONVE: Programa De Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores*, disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf. Acessado em 01/06/2018.
- MMA, 2013, Ministério do Meio Ambiente. *Emissões Veiculares*. Acesso em: 01/06/2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/emissoes-veiculares>.
- MMA, 2019, Ministério do Meio Ambiente. *Poluentes Atmosféricos*. Acesso em 05/02/2019. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos.html>.
- May, J., D. Bosteels, C. Favre, 2014, “An Assessment of Emissions from Light-Duty Vehicles using PEMS and Chassis Dynamometer Testing”. *SAE Int. J. Engines*, v.7, n.3, pp. 1326-1335, doi:10.4271/2014-01-1581. Janeiro de 2014.
- Metrô, 2013, *Pesquisa De Mobilidade da Região Metropolitana de São Paulo - Principais Resultados*. Pesquisa Domiciliar. Dezembro de 2013. Governo de São Paulo.
- Mobilize, 2019, Mobilidade Urbana Sustentável. *Brasil Custos da emissão de poluentes e dos acidentes de trânsito, por modo*. Acesso em fev/2019. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/estatisticas/9/custos-da-emissao-de-poluente-e-dos-acidentes-de-transito-por-modo.html>
- O Globo, 2013, “Tempo de Deslocamento nas Regiões Metropolitanas”. *Economia*. Disponível em: <http://infograficos.oglobo.globo.com/economia/tempo-de-deslocamento-nas-regioes-metropolitanas.html>
- O'Sullivan, F., 2017, “The Cars That Ate Paris”. *Citylab - Transportation*. Março de 2017. Acesso: 07/05/2019. Disponível em: <https://www.citylab.com/transportation/2017/03/the-cars-that-ate-paris/520710/>
- Omidvarborna, H.; Kumar, A.; Kim, D. S., 2015, “Recent Studies on Soot Modeling for Diesel Combustion”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 26, n. 2, Agosto de 2015 - ResearchGate. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.019. USA
- Puphunjivatt, T., 2015, “Real Driving Emissions - A Game Changer for the Industry?: Mastering On-Road Emissions Targets with Integrated Vehicle Testing Solution AVL M.O.V.E.”. *SAE Technical Paper*. Janeiro de 2015, 2015-01-0056, doi:10.4271/2015-01-0056.
- PlanMob-BH, 2019, *Plano de Mobilidade de Belo Horizonte*. Observatório. Acesso: janeiro de 2019. Disponível em: <http://www.bhtrans.pbh.gov.br/portal/page/portal/portalpublico/Temas/ObservatorioMobilidade/Indicadores/Transporte%20Coletivo/VOPTC>
- Rykowski, R. A.; Nam, E. K. and Hoffman, G., 2005, “On-road Testing and Characterization of Fuel Economy of Light-Duty Vehicles”. *2005 SAE World Congress*, Detroit, Michigan. 11 a 14 de abril de 2005.
- Ristovski, Z. D.; Miljevic, B; Sruawki, N. C. *et al*, 2012, Respiratory Health Effects of Diesel Particulate Matter. Invited Review Series: Air Pollution and Lung Health Series. Ed. Ian Yang and Stephen Holgate - *Respirology* (2012) 17, 201–212; doi: 10.1111/j.1440-1843.2011.02109.x
- Silva, R. B., 2017, “Popularização do transporte individual: ilusões perdidas com os automóveis e motocicletas em São Paulo”. *Confins – Revista Franco-brasileira de Geografia*. n. 33, dezembro de 2017. Acesso: 31/01/2019. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/12461>
- Singh, A.P., Kulkarni, A.N., and More, M.V., 2019, “Experimentation for Evaluation of Real Driving Emission Test Routes in India for LDVs”. *SAE Technical Paper*. Janeiro de 2019. 2019-26-0150, doi:10.4271/2019-26-0150.
- TE, 2018, European Federation for Transport and Environment. *Cars with Engines: Can they ever be Clean?* Transport & Environment. Setembro de 2018. Acesso: 27/03/2019. Disponível em: <https://www.transportenvironment.org/publications/cars-engines-can-they-ever-be-clean>

- TomTom, 2017, *TomTom Traffic Index 2017 – Full Ranking*. Acesso em: 14 de janeiro de 2019. Disponível em: https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list?citySize=LARGE&continent=ALL&country=ALL
- UN, 2011, United Nations. *Informal document No. GRPE-50-4-Rev.1* (50th GRPE, 30 May - 03 June 2005, agenda item 1.1) Draft Global Technical Regulation (GTR). Worldwide Harmonized Heavy Duty Emissions Certification Procedure. Uniform - Provisions Concerning The Test Procedure For Compression-Ignition (C.I.) and Positive-Ignition (P.I) Engines Fuelled with Natural Gas (Ng) and Liquefied Petroleum Gas (Lpg) and Vehicles Equipped with C.I. and P.I. Engines Fuelled with NG and LPG, with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine - Draft version 20.06.2005. UNECE-WP.29 – GRPE WHDC Working Group. Economic Commission for Europe, 20 June 2005.
- Ventura, L. M., 2009, “Ações para Atendimento aos Novos Limites do Proconve – Fase 7 - As Tecnologias Necessárias”, NETZ Automotiva. ANFAVEA, *Seminário sobre Emissões de Veículos a Diesel*. São Paulo, outubro de 2009.
- Wang, X., D. Thomas, Y. Ge, W. Yu, B. Song, X. Xu, S. Zheng, Z. Yang, S. Su, H. Gong, S. Yuan, H. HE, J. Xi, B. Fu, 2018, “Proceedings of Real Driving Emission (RDE) Measurement in China”. *SAE Technical Paper*. Abril de 2018. 2018-01-0653, 2018, doi:10.4271/2018-01-0653
- Weiss, M., P. Bonnel, J. Kühlwein, A. Provenza, 2012, “Will Euro 6 reduce the NOx emissions of new diesel cars? - Insights from On-road Tests with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS)”. *Atmospheric Environment*. n.62, pp. 657-665. Agosto de 2012.
- WHO – World Health Organization, 2013, *Health Effects of Particulate Matter - Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia*. Acessado em: dez/2018. Regional Office for Europe. Disponível em: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2013/air/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf>