

CENTRO PAULA SOUZA
FATEC - SANTO ANDRÉ

TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA AUTOMOTIVA

LUCAS GUSTAVO FERREIRA SANTOS
LUCAS DA SILVA POLICARPO
NATHAN SALES DE SOUSA

COMPARAÇÃO DE EMISSÕES ENTRE VEÍCULOS DE INJEÇÃO DIRETA E
INDIRETA

Santo André
2022

CENTRO PAULA SOUZA
FATEC - SANTO ANDRÉ

TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA AUTOMOTIVA

LUCAS GUSTAVO FERREIRA SANTO
LUCAS DA SILVA POLICARPO
NATHAN SALES DE SOUSA

COMPARAÇÃO DE EMISSÕES ENTRE VEÍCULOS DE INJEÇÃO DIRETA E
INDIRETA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de eletrônica automotiva, pela FATEC - Santo André, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Tecnólogo em Eletrônica Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Orlando de Salvo Junior

Santo André

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

S237c

Santo, Lucas Gustavo Ferreira
Comparação de emissões entre veículos de injeção direta e indireta / Lucas Gustavo Ferreira Santo, Lucas da Silva Policarpo, Nathan Sales de Sousa. - Santo André, 2022. – 74f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Orlando de Salvo Junior

1. Eletrônica. 2. Estudo comparativo. 3. Veículos. 4. Injeção direta. 5. Injeção indireta. 6. Normas técnicas. 7. Emissão de poluentes. 8. Controle. 9. Tecnologia. I. Policarpo, Lucas da Silva. II. Sousa, Nathan Sales de. III. Comparação de emissões entre veículos de injeção direta e indireta.

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 25 DE JUNHO DE 2022.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“COMPARAÇÃO DE EMISSÕES ENTRE VEÍCULOS DE
INJEÇÃO DIRETA E INDIRETA” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE
DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. ORLANDO DE SALVO JUNIOR _____

MEMBROS:

PROF. FERNANDO GARUP DALBO _____

PROF. MARCO AURÉLIO FRÓES _____

ALUNO:

LUCAS GUSTAVO FERREIRA SANTOS _____

LUCAS DA SILVA POLICARPO _____

NATHAN SALES DE SOUSA _____

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de eletrônica automotiva, pela FATEC - Santo André, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Tecnólogo em Eletrônica Automotiva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores e colegas por me ajudarem a desenvolver este trabalho.

RESUMO

Com a crescente demanda de veículos automotores pela sociedade, e com as normas de emissões se tornando cada vez mais restritivas para alguns gases poluentes emitidos por veículos. O presente trabalho tem por objetivo comparar as emissões de poluentes em veículos de injeção indireta e Injeção direta, desvantagens dos sistemas apresentados com relação a emissões. Para chegar a esse objetivo buscamos obter os resultados de emissões de poluentes dos veículos com sistema de injeção direta e veículos com injeção indireta, com todos os modelos atendendo as normas de emissões do programa de controle de emissões veiculares PROCONVE 6 e o ciclo FTP-75. Para a realização dos comparativos, o projeto foi feito utilizando a tabela PBEV 2017, e a tabela PBVE 2021. Com base nestas tabelas, comparamos os dados de emissões de ambos as tecnologias para apresentar os pós e contras de cada sistema e propostas de desafios futuros, onde encontramos no geral valores de emissões menores no sistema de injeção direta, como por uma redução de 20,61% de NOx, 34,06% CO, 49,31% de NMHC, e um leve aumento de 2,11% de CO₂ em função da combustão completa.

Palavras-chave: Emissões de poluentes. injeção direta. injeção indireta.

ABSTRACT

With the growing demand for motor vehicles by society, and with emission standards becoming increasingly restrictive for some polluting gases emitted by vehicles. The present work aims to compare the emissions of pollutants in vehicles of indirect injection and direct injection, disadvantages of the systems presented in relation to emissions. To reach this objective, we seek to obtain the results of pollutant emissions from vehicles with direct injection system and vehicles with indirect injection, with all models meeting the emission standards of the PROCONVE 6 vehicle emission control program and the FTP-75 cycle. . To carry out the comparisons, the project was made using the PBEV 2017 table, and the PBVE 2021 table. Based on these tables, we compared the emissions data from both technologies to present the pros and cons of each system and proposals for future challenges , where we generally found lower emission values in the direct injection system, such as a reduction of 20.61% in NO_x, 34.06% in CO, 49.31% in NMHC, and a slight increase of 2.11% in CO₂ as a function of complete combustion.

Keywords: Pollutant emissions. direct injection. indirect injection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ângulo de atuação da válvula e distância da válvula.....	18
Figura 2 - injeção Simultânea.....	18
Figura 3 - injeção em grupo.....	19
Figura 4 - injeção em grupo.....	19
Figura 5 - injeção sequencial e individual.....	20
Figura 6 - tipos de acionamento do Corpo de borboleta mecânico Bowden e Drive By Wire.	22
Figura 7 - Corpo de borboleta mecânico por cabo Bowden e sensor de posição da borboleta	22
Figura 8 - Sistema de aceleração <i>Drive By Wire</i>	23
Figura 9 - detalhes do modulo de borboleta.....	24
Figura 10 - Eletro-injetor (DFI) na câmara de combustão	25
Figura 11 - detalhes dos componentes de alta pressão do sistema DFI.....	26
Figura 12 - vista do sistema de injeção DFI baixa pressão	27
Figura 13 - mistura estratificada no interior da câmara de combustão.....	28
Figura 14 - tipos de orientação para o combustível.....	28
Figura 15 - Localização dos componentes da injeção dual injection.....	29
Figura 16 - mapa de injeção do sistema dual injection.....	30
Figura 17 - Funcionamento EGR.....	32
Figura 18 - diagrama de válvulas de um motor com EGR interna.....	34
Figura 19 - Catalisador (conversor catalítico).....	40
Figura 20 - Leitor OBD2	41
Figura 21 - Formação da chuva ácida.....	44
Figura 22 - método de medição de emissões.....	45
Figura 23 - Ciclo USC06.....	46
Figura 24 - ciclo SC03.....	47
Figura 25 - ciclo FTP 75	Erro! Indicador não definido.
Figura 26 – Tabela PEBEV 2017	49
Figura 27 - Fluxograma de seleção.....	50
Figura 28 - Analisador de gases NAPRO	52
Figura 29 - Ensaio de emissão de poluentes em dinamômetro de chassis.....	53
Figura 30 - Médias de NMHC.....	59

Figura 31 - Médias de CO	59
Figura 32 - Médias de NOx	60
Figura 33 - Médias de CO2	60
Figura 34 - Emissões de escape x fator lambda	62
Figura 35 - Méida Geral de NMHC.....	63
Figura 36 - Média geral de CO	64
Figura 37 - Média geral de NOx	65
Figura 38 - Média geral de CO2.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
DFI	Injeção Direta de Combustível
PFI	Injeção Indireta de Combustível
OBD	Diagnóstico de bordo
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PROCONVE	Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
CONAMA	Conselho nacional do meio ambiente
CONPET	Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e gás natural
INOVAR AUTO	Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores
INMETRO	Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia
PCPV	Plano de Controle de Poluição Veicular
PCEA	Programa de Controle de Emissões Atmosféricas
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
PBT	Peso bruto total
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
NO _x	Óxidos de nitrogênio
SO _x	Óxidos de enxofre
H ₂ O	Água
N ₂	Nitrogênio
HC	Hidrocarbonetos
NMHC	Hidrocarbonetos não metanos
MP	Material particulado

THC	Total de compostos orgânicos
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
TSI	<i>Turbo Stratified Injection</i>
Ppm	Partes Por milhão
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

λ

Fator Lambda

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Limites de Emissões para veículos leves.....	38
Quadro 2 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção indireta 2017 .	56
Quadro 3 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção direta 2017	57
Quadro 4 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção indireta 2021 .	57
Quadro 5 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção direta 2021	58

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivo específico.....	14
1.2 Motivação	14
1.3 Conteúdo	15
2. Introdução de conceitos	16
2.1 Formação da mistura ar/combustível	16
2.1.3 Funcionamento da injeção indireta (PFI).....	17
2.1.4 Admissão de ar para combustão	21
2.1.5 Funcionamento da injeção direta de combustível (DFI).....	24
2.2 Recirculação de gases de escape (EGR)	31
2.3 Emissões	35
2.3.1 Novas Tecnologias Empregadas em Emissões	39
2.3.2 Efeitos Dos Gases expelidos.....	42
2.4 Ciclo de medição	45
2.3.1 Ciclo de medição para homologação	46
2.3.2 Ciclo FTP 75.....	Erro! Indicador não definido.
3. Materiais e métodos	48
3.1 Tabela PBEV	48
3.1.2 Separando Dados	51
3.2 instrumentos utilizados.....	51
3.2.1 Analisador de gases	51
3.2.2 Dinamômetro.....	52
3.3 Cálculos utilizados para obter dados de emissões.....	53

3.3.1 Cálculo de massa dos gases de escape através das massas de ar e massa de combustível.....	54
3.3.2 Cálculo de massa dos gases de escape através da relação ar/combustível.....	54
4. Resultados e discussões.....	56
4.1 Comparando os níveis de emissões	56
4.1.1 Analisando os resultados	58
4.2 Fatores que influenciam nos resultados.....	61
5. Conclusão	67
6. Propostas futuras	68
7. Bibliografia.....	69

1. INTRODUÇÃO

Atualmente é crucial em nossa sociedade a utilização de veículos automotivos, com os avanços tecnológicos e acessibilidade a elas, permitiu os veículos evoluírem rapidamente e fazer parte de grande parte da sociedade.

Esses veículos ajudam de forma direta ou indireta as pessoas realizarem suas atividades de forma prática e confortável, embora os veículos híbridos e elétricos ganharam espaço, a maior frota presente ainda é de veículos com motores a combustão interna que utilizam a energia química, de combustíveis a energia térmica e transformam em energia mecânica. Os principais combustíveis utilizados são de origem fóssil por exemplo a gasolina e diesel, na combustão são emitidos para atmosfera gases poluentes e tóxicos dentre eles o CO₂ (dióxido de carbono), que não é tóxico mas contribui de forma negativa para o efeito estufa. O gás CO (Monóxido de Carbono), altamente tóxico á seres humanos em grandes quantidades causa sonolencia. O HC (Hidrocarbonetos), tóxico e causa a saude humana irritação nas mucosas, olhos e nariz. O gás NO_x (Óxidos de Nitrogênio), tóxico e normalmente se oxida com o ar, e com odor forte causa aumento da sensibilidade e baixa resistência a doenças respiratórias e na atmosfera causa danos a vegetação por chuvas ácidas (VOLKSWAGEN, 2012).

Com o objetivo de conter a emissão desses gases, de forma descontrolada, ás autoridades de vários países vem adotando medidas de restrições dos niveis de emissões veiculares e programas de incentivo ao aumento da eficiência energética de seus veículos. No Brasil os principais programas criados são: O programa de controle de poluição da ar por Veículos automotores (PROCONVE), Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) e o Programa de Incentivo à inovação Tecnológica e Adesão da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (INOVAR-AUTO) e Rota 2030.

Com respeito as tecnologias empregadas para controles de emissões veiculares podemos destacar a injeção indireta (PFI – Port Fuel Injection), que é amplamente utilizada, por se tratar de um sistema mais simples ainda é capaz de atender as normas de emissões vigentes no Brasil, porém acaba apresentando valores de CO maiores em relação a injeção direta (DFI – Direct

Fuel Injection). Trataremos aqui de sistemas relacionados a motores de combustão interna de Ciclo Otto. O sistema direto DFI, posiciona por construção o eletro-injetor diretamente na câmara de combustão, tem potencial de redução de consumo de combustível e por consequência a redução de CO₂ por poder trabalhar com injeção estratificada, onde a relação ar/combustível é extremamente pobre, todavia, requer desenvolvimentos mais criteriosos de mapas de injeção.

Apresentados esses pontos, detalhados conhecimentos são necessários tanto para desenvolvimentos de sistemas mais precisos de injeção que atendam níveis de emissões, quanto testes para comprovar a eficiência desses sistemas.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo comparar as emissões de poluentes em veículos de injeção indireta e Injeção direta, desvantagens dos sistemas apresentados com relação a emissões.

1.1.2 Objetivo específico

Para o estudo das emissões nos veículos PFI e DFI utilizaremos como referência as tabelas PBEV 2017, e PBEV 2021, para comparar as emissões dos veículos com injeção indireta PFI e injeção direta DFI. E comparar os dois sistemas de injeção de combustível verificando as deficiências e vantagens em relação as emissões. Todos veículos atendem a mesma norma de emissão, o PROCONVE 6.

1.2 Motivação

Cada vez mais, é comum que as normas de emissões para veículos automotores se tornem mais restritivas, com isso, resolvemos estudar e

comparar os níveis de emissões dos veículos com sistema de injeção DFI e PFI.

1.3 Conteúdo

Este trabalho está dividido em objetivo que traz a proposta de comparação entre diferentes tecnologias de injeção de combustível e as emissões de poluentes. Introdução que aborda um ideia geral do trabalho quanto a emissões, tipos de gases presentes na queima de um motor de combustão interna e como o CONAMA através de programas controla a emissão desses gases, tecnologias presentes de injeção Direta e indireta. Formação da mistura que informa os pré requisitos para uma mistura homogênea e estratificada de combustível. Funcionamento da injeção de combustível PFI, que aborda o tipo de injeção de combustível presente na maioria dos veículos atualmente, componentes, e tipos de injeções. Funcionamento da injeção direta de combustível DFI componentes e tipos de injeções. Emissões de poluentes que indicam quais Órgãos estão envolvidos e os limites presentes no PROCONVE 6.

2. INTRODUÇÃO DE CONCEITOS

Dentro de nosso trabalho trabalharemos com alguns conceitos que por vez precisam ser compreendidos para que os métodos utilizados e os resultados obtidos possam ter melhor entendimento.

2.1 Formação da mistura ar/combustível

Com relação a formação de combustível segundo o manual Bosch (2005), os componentes de formação da mistura precisam garantir fornecimento de combustível de forma adequada e para que essa mistura atinja de forma adequada a câmara de combustão, para isso são necessários eletro-injetores que posicionam o combustível atrás da válvula de admissão na injeção(PFI) ou diretamente na câmara de combustão através de um furo de acesso na injeção (DFI).

Especificamente a mistura de formação externa que é realizada fora da câmara de combustão no coletor de admissão, também se faz necessário a massa de ar necessária para que a mistura esteja estequiometricamente calibrada ou muito próximo disso. Para isso é necessário que a ECU (*Electronic Control Unit*), esteja informada da massa de ar admitida pelo motor para calcular o Tempo de Injeção (TI), necessário para que a mistura não esteja muito rica com excesso de combustível ou pobre com excesso de ar.

O fator que monitora essa relação é conhecido como Fator Lambda que refere-se o quanto em função de uma mistura ideal fator Lambda igual à 1 (estequiométrico), a mistura queimada está acima de 1 ou abaixo de 1.

Na prática isso quer dizer o quanto a massa de combustível admitida pelo motor está acima ou abaixo da massa ideal para que a combustão ocorra sem sobras de oxigênio ou falta. A mistura rica é composta pelo excesso de combustível após a queima no interior da câmara, a mistura pobre é composta pela falta de combustível. Uma mistura estequiométrica acontece quando todas as partes de combustível foram queimadas para a quantidade de ar aspiradas pelo motor no interior da câmara após a queima pelo processo de

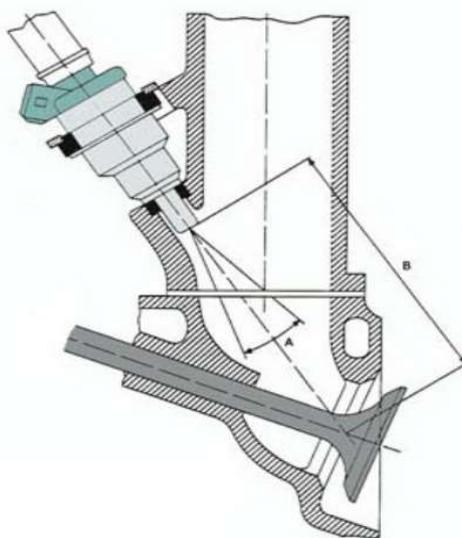
centelhamento executado pela vela de ignição presente no motor de combustão interna de ciclo Otto.

2.1.3 Funcionamento da injeção indireta (PFI)

Os sistemas de controle de injeção indireta (PFI), segundo a Bosch (2005), são sistemas de injeção de combustível com formação externa a câmara de combustão (no coletor de admissão), no qual o combustível é injetado intermitentemente em cada cilindro individual, ou seja, em intervalos diretamente antes da válvula de admissão. Durante a injeção no coletor o combustível é enviado através da bomba de combustível, tubulação de combustível e filtros sob pressão até a galeria de combustível, a qual garante que o combustível seja distribuído igualmente aos eletro-injetores. É de suma importância para a qualidade de mistura ar-combustível a preparação do combustível pelos eletro-injetores, cuja a pulverização deve disponibilizar as menores gotículas possíveis.

Para que o sistema possa gerenciar a quantidade de combustível, é necessário um conjunto de sensores e atuadores e uma unidade eletrônica (ECU), os valores lidos nos sensores são transformados por tabelas ou mapas de injeção em ações nos atuadores. O principal atuador do sistema é o eletro-injetor de combustível que garante a quantidade adequada de combustível em diversas situações de carga e rotação. Neste tipo de injeção é característica posicionar o jato de combustível diretamente na válvula para eliminar possíveis perdas de combustível por exemplo no coletor de admissão por condensação, utilizar o efeito de turbilhonamento e temperatura da válvula para vaporização do combustível (Volkswagen, 2012). Portanto é importante definir em um projeto com injeção (PFI) o ângulo de contato da mistura com o eletro-injetor e a distância conforme pontos A e B da Figura 1:

Figura 1 - Ângulo de atuação da válvula e distância da válvula

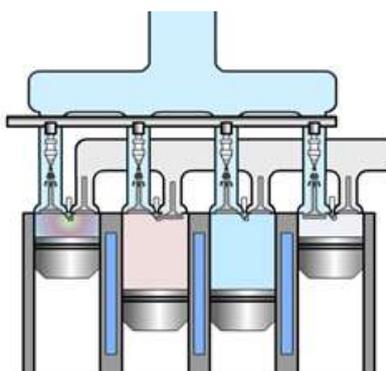


Fonte: Faggi (2021).

Segundo a Bosch (2005), existem 4 tipos de injeção multiponto:

- Injeção simultânea conforme Figura 2, onde todos os eletroinjetores são acionados simultaneamente duas vezes por ciclo. Este tipo de injeção é realizada para facilitar a partida em baixas temperaturas.

Figura 2 - injeção Simultânea

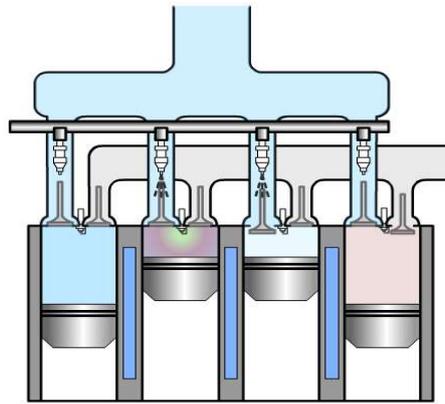


Fonte: Senai (2021).

- Injeção em grupo conforme Figuras 3 e 4, onde grupos de eletroinjetores são acionados e cada grupo recebe ativação duas vezes por ciclo. Esse modo de funcionamento pode ser realizado em

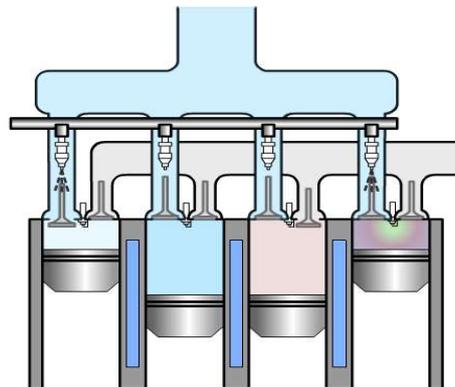
periodo de aquecimento do motor foi detalhado em duas figuras para observarmos quais pontos ocorre a injeção em conjunto após um ciclo de injeção.

Figura 3 - injeção em grupo



Fonte: Senai (2021).

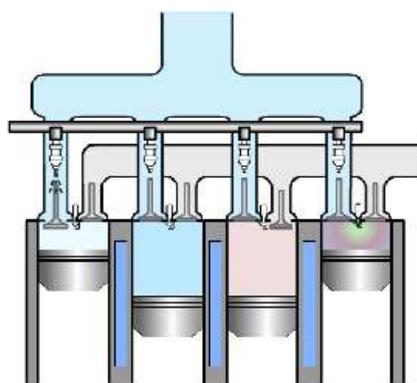
Figura 4 - injeção em grupo



Fonte: Senai (2021).

- Injeção sequencial e individual conforme Figura 5, onde cada injetor é acionado independentemente e sequencialmente de acordo com a fase do cilindro. Para a injeção individual, esse modo de funcionamento é semelhante ao sequencial, também possui a vantagem de permitir acionamento individual de acordo com a fase do cilindro.

Figura 5 - injeção sequencial e individual



Fonte: Senai (2021).

De acordo com Brunetti (2018), com os sistemas digitais de injeção permite-se utilizar injeções de combustíveis mais complexas e eficazes como por exemplo injeções indireta, com injeção sequencial fasada. Neste tipo de injeção há um eletro-injetor para cada cilindro.

Com relação a formação da mistura de combustível na câmara de combustão dizemos que essa formação é homogênea ou seja é realizada no momento da aspiração de ar para dentro do cilindro.

Um motor de combustão interna de ciclo Otto, precisa de uma relação de ar e combustível para sua operação, essa relação na teoria esta definida em 14,7 partes de ar para 1 parte de combustível neste caso gasolina (14,7:1), ou seja são necessários para 1kg de combustível para 14,7kg de ar. Esse sistema influencia diretamente o sistema de pós tratamento de combustível (Volkswagen, 2012).

O motor opera em diferentes faixas ou regimes de funcionamento e os sistemas de injeção eletrônica devem ser capazes de operar nesses regimes de forma dinâmica por isso o coeficiente de ar ou Lambda (λ) desvia do valor teórico apresentando anteriormente.

Segundo (Bosch 2005), o fator lambda (λ) refere-se a massa de ar admitida em relação a demanda de ar para queima estequiométrica e podem ser $\lambda = 1$, onde a massa de ar admitida corresponde ao valor teórico necessário para a queima. $\lambda < 1$, onde é predominante a falta de ar portanto mistura rica, a potência se dá com $\lambda=0.85...0,95$. $\lambda > 1$ onde é predominante a falta de combustível dizemos que essa mistura é pobre e motores com injeção (PFI) com

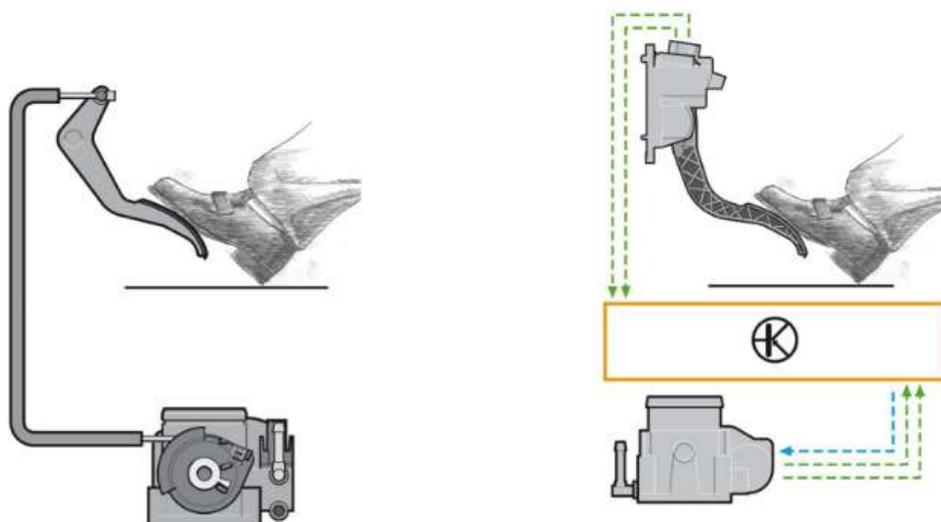
potência do motor constante de 20%...50% opera com excesso de ar ou ($\lambda = 1,2...1,5$).

2.1.4 Admissão de ar para combustão

O ar admitido, deve ser direcionado por tubulações passando pelo filtro de ar até o corpo de Borboleta, que regula a aspiração deste para a câmara de combustão em função da ação do condutor que ao pisar no pedal do acelerador envia sua intenção de aumentar a rotação do motor e a ECU, que atua sobre o corpo de borboleta para permitir maior aspiração de ar para o motor, assim compondo a mistura ar combustível necessária para o funcionamento de um motor de combustão interna (VOLKSWAGEN, 2012).

Para detalhar ainda mais o funcionamento desse sistema é importante salientar que existem dois tipos de acionamento para o corpo de borboleta por cabo *Bowden*, esse acionamento caracteriza a abertura da borboleta mecanicamente e o outro tipo é eletrônico do tipo *Drive by Wire* onde o condutor manifesta sua intenção de aceleração do motor, e a ECU avalia e atua na abertura da borboleta (VOLKSWAGEN, 2012). o sistema é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - tipos de acionamento do Corpo de borboleta mecânico *Bowden* e *Drive By Wire*.



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

Os sistemas evoluíram e atualmente são utilizados sistemas eletrônicos de acionamento, que utilizam um motor elétrico para acionamento da borboleta, mas nos sistemas mecânicos podemos verificar a utilização de sensores para permitir informar a posição da borboleta e a unidade calcular a massa de ar admitida de forma indireta utilizando um sensor do tipo potenciômetro que informa a ECU um valor de tensão que varia de 0 Volts até 5 Volts conforme o posicionamento da borboleta, esse potenciômetro se movimenta em conjunto com a mesma (VOLKSWAGEN, 2012). O posicionamento desse sensor é externo ao Corpo de borboleta, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Corpo de borboleta mecânico por cabo *Bowden* e sensor de posição da borboleta



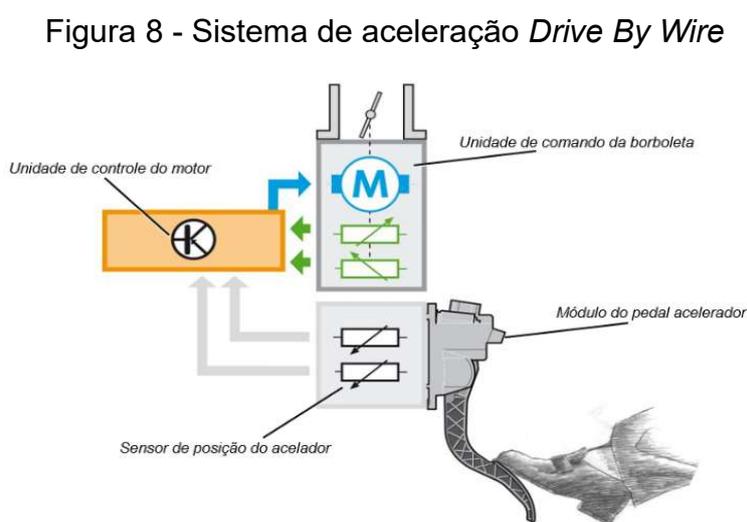
Fonte:VOLKSWAGEN (2012)

Nos sistemas eletrônicos com o auxílio dos sinais procedentes dos sensores de posição do acelerador (Potenciômetros), a unidade de controle do motor detecta com que grau o pedal do acelerador é pressionado esses potenciômetros estão posicionados de forma redundante para garantir o funcionamento do sistema em caso de falhas.

Se o pedal do acelerador não está pressionado inicia-se a regulação de marcha lenta. Se pressionado o acelerador, a unidade de controle do motor interpreta isso como a ação executada pelo condutor. Esta é atendida modificando a posição da válvula borboleta.

O percurso do pedal não é relacionado em uma proporção 1 : 1 com o movimento da válvula borboleta. Por regra geral a borboleta abre um pouco mais, principalmente em cargas parciais, do que abriria em um motor com cabo *bowden* do acelerador. Com isso são reduzidas as perdas por estrangulamento, melhorando o consumo de combustível (VOLKSWAGEN, 2012).

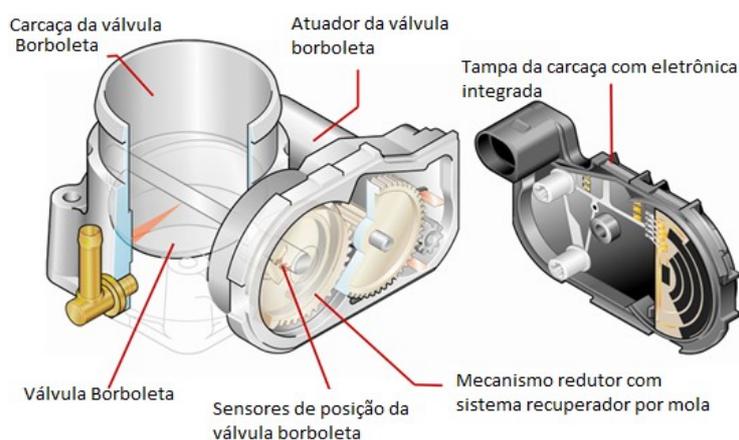
Neste caso ao invés de um sensor de posição da borboleta são usados dois sensores de ângulo para o comando da borboleta (potenciômetros da borboleta) que informam à unidade de controle do motor sobre a posição momentânea da mesma. Os potenciômetros na unidade de comando da borboleta são implementados por redundância, por motivos de segurança o mesmo se aplica para o módulo do pedal do acelerador. A Figura 8 apresenta de forma esquemática os componentes envolvidos.



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

A válvula de borboleta, é composta de uma carcaça, posicionada de forma estratégica no coletor de admissão ou próximo a ele, um mecanismo redutor com sistema recuperador por mola que basicamente garante o atuador da válvula borboleta, ou motor elétrico, para transferir o movimento para a borboleta e através de redução no mecanismo, possibilita a movimentação mais suave da borboleta. O retorno por mola garante o fechamento da borboleta caso ela deixe de receber alimentação elétrica. Sensores de posição da borboleta se comunicam com a tampa da carcaça que possui um conector elétrico para permitir comunicação com a ECU do motor, que tanto alimenta o atuador como recebe a resposta dos potenciômetros em uma malha fechada de controle. A Figura 9 mostra os componentes citados (VOLKSWAGEN, 2012).

Figura 9 - detalhes do módulo de borboleta



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

2.1.5 Funcionamento da injeção direta de combustível (DFI)

Segundo Brunetti (2012), a injeção direta de combustível, vem sendo aplicada nas últimas duas décadas, e mostrou-se eficiente em veículos Diesel, o que motivou a introdução nos motores de Ciclo Otto. Sua principal diferença é a utilização do eletro-injetor posicionado no interior da câmara de combustão conforme Figura 10.

Figura 10 - Eletro-injetor (DFI) na câmara de combustão



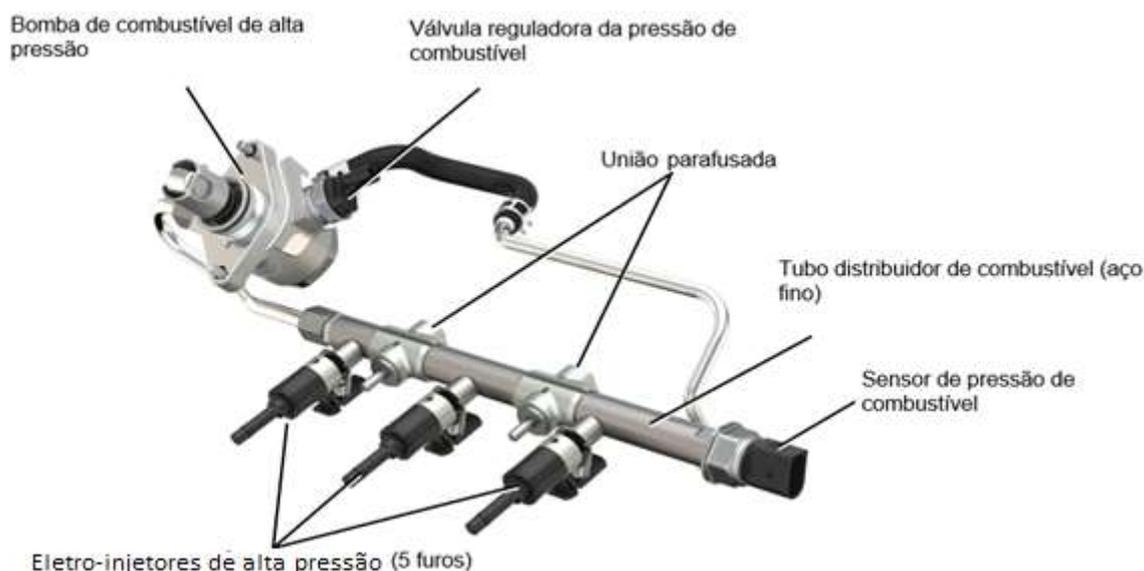
Fonte: Bosch *automotive* (2021).

Além de um eletro-injetor aprimorado construído em Aço inoxidável para suportar maiores pressões de combustível a utilização de uma bomba de alta pressão, tubo distribuidor de aço de mesmo material e sensores específicos para esse sistema são necessários. A Figura 11, apresenta um sistema de injeção direta Bosch, com bomba de alta pressão que mecanicamente transforma a pressão de baixa vindo do tanque para alta pressão enviando para os eletro-injetores. A Válvula reguladora de pressão de combustível que tem por objetivo controlar de forma eletrônica e é comandada pela ECU do motor, e a maior demanda ou entrega de pressão de combustível que pode variar de 90 Bar á 240 Bar para o tubo distribuidor. O Sensor de pressão de combustível, monitora e envia para ECU a pressão interna do tubo distribuidor para que seja feito o controle da pressão gerada na bomba de alta pressão atuando na válvula reguladora de pressão (VOLKSWAGEN, 2012).

A bomba de combustível de alta pressão, que gera a pressão necessária para atomização do combustível e é acionada pelo comando de válvulas. A reguladora de combustível. É quem regula a entrega de pressão conforme demanda do motor de combustão acionada pela ECU do motor. O tubo distribuidor que entrega de forma distribuída o combustível aos injetores e garante o armazenamento de combustível para entrega imediata. Injetores de alta pressão que posicionados de forma a injetar na câmara de combustão o combustível necessário para a queima. O sensor de alta pressão monitora a pressão no

tubo distribuidor e informa a ECU para manter constante ou aumentar a demanda pela bomba de alta pressão (VOLKSWAGEN, 2012).

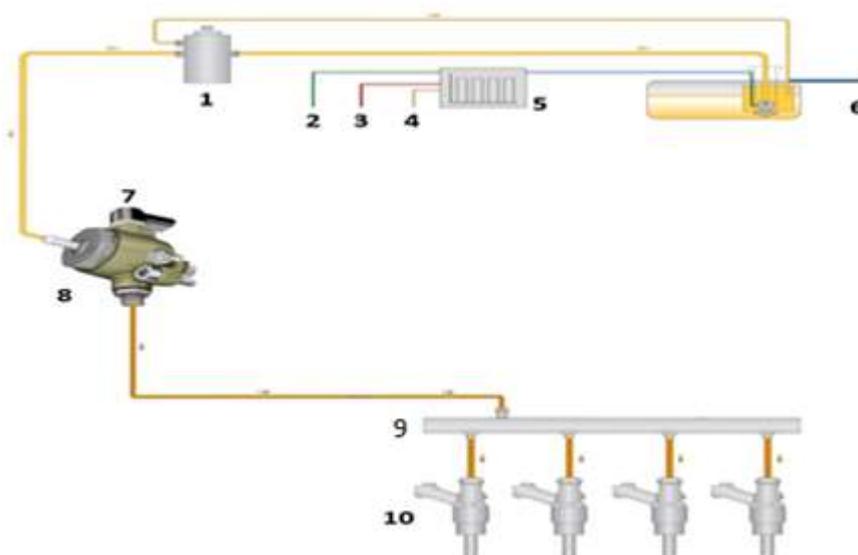
Figura 11 - detalhes dos componentes de alta pressão do sistema de injeção direta



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

O sistema de injeção também é composto pelo circuito de baixa pressão que entrega o combustível a bomba de alta pressão e desta para tubo distribuidor e eletro-injetores. O sistema é composto de filtro de combustível (1), controle, realizado pela ECU do motor (2), positivo para a ECU auxiliar da bomba de baixa pressão (3), Aterramento para ECU auxiliar da bomba de baixa pressão (4), ECU auxiliar bomba de combustível de baixa pressão (5), Bomba de combustível de baixa pressão (6), Válvula reguladora da pressão de combustível (7), Bomba de alta pressão de combustível (8), tubo Distribuidor de alta pressão (9), Eletro-injetores de alta pressão (10). A Figura 12 demonstra uma esquemática do sistema (VOLKSWAGEN, 2012).

Figura 12 - vista do sistema de injeção direta de baixa pressão

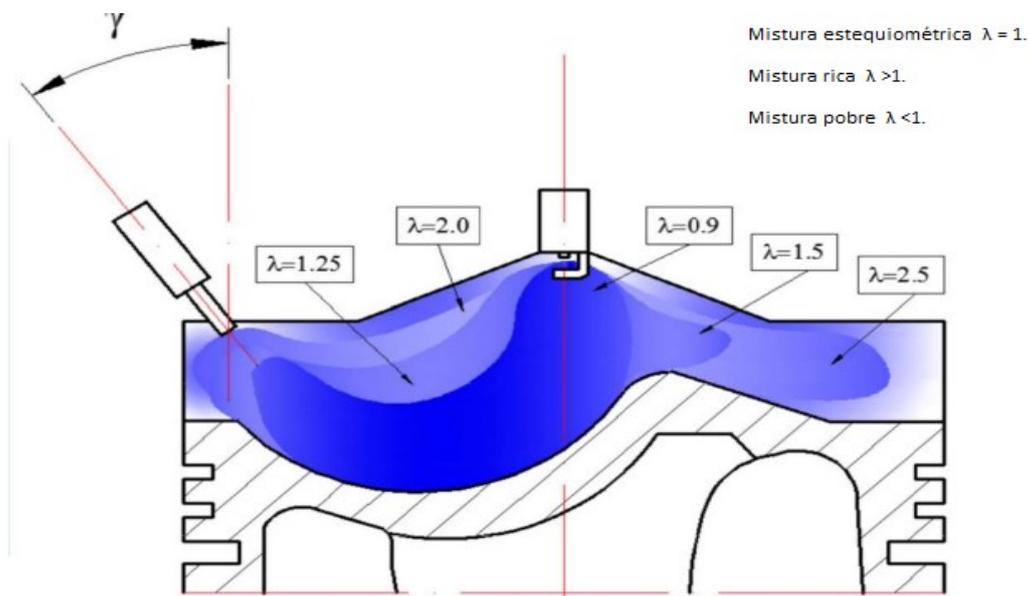


Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

Segundo a Bosch (2005), ao contrário do sistema PFI, na injeção direta flui somente ar pelos dutos e válvulas de admissão e a injeção é feita diretamente na câmara de combustão com injetor fixado diretamente ao cabeçote do motor o sistema de injeção DFI, possui modos de operação além da operação homogênea que possibilita a mistura durante o ciclo de admissão e compressão do motor, a injeção estratificada que acontece pouco antes da centelha para combustão na fase final de compressão também pode ser utilizada.

Segundo Brunetti (2012), a queima estratificada trabalha com mistura extremamente pobre com relação acima dos 20% de excesso de ar, mas deve-se garantir pelo menos uma relação estequiométrica ao menos no entorno do eletrodo da vela de ignição para não comprometer a ignição desse combustível e o processo se tornar instável. Se observamos uma variação de relação ar combustível no interior da câmara de combustão que podem variar de ricas até sem combustível dizemos que se trata de uma mistura estratificada. A Figura 13 representa a variação de λ no interior da câmara entre estequiométrica, rica e pobre e visualização do ângulo do eletro-injetor que influencia o posicionamento dessa mistura.

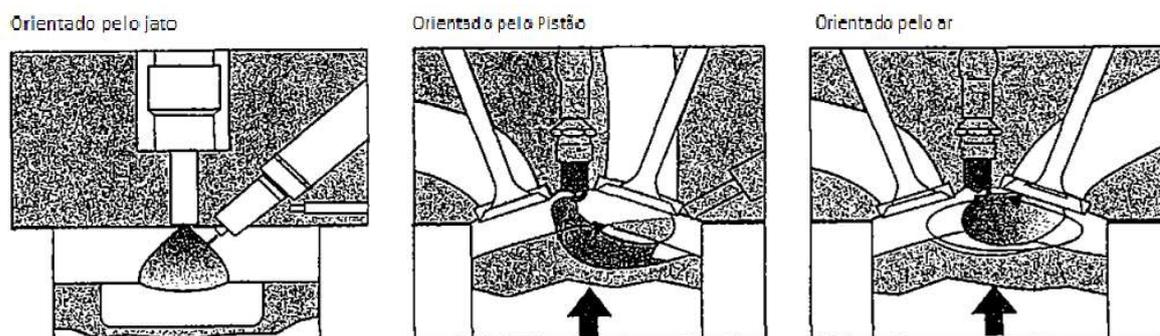
Figura 13 - mistura estratificada no interior da câmara de combustão



Fonte: Aula de motores 2, sistemas de injeção direta e indireta (2021).

A injeção ainda pode ser orientada pelo jato de combustível o que chamamos de guiado pelo jato ou *Spray (Spray-Guided)*, direcionada pela cabeça do pistão (*Wall-guided*), ou ainda deslocada pela própria massa de ar no interior da câmara de combustão que recebe o nome de (*Air-Guided*), (Brunetti, 2021). Exemplificados na Figura 14.

Figura 14 - tipos de orientação para o combustível

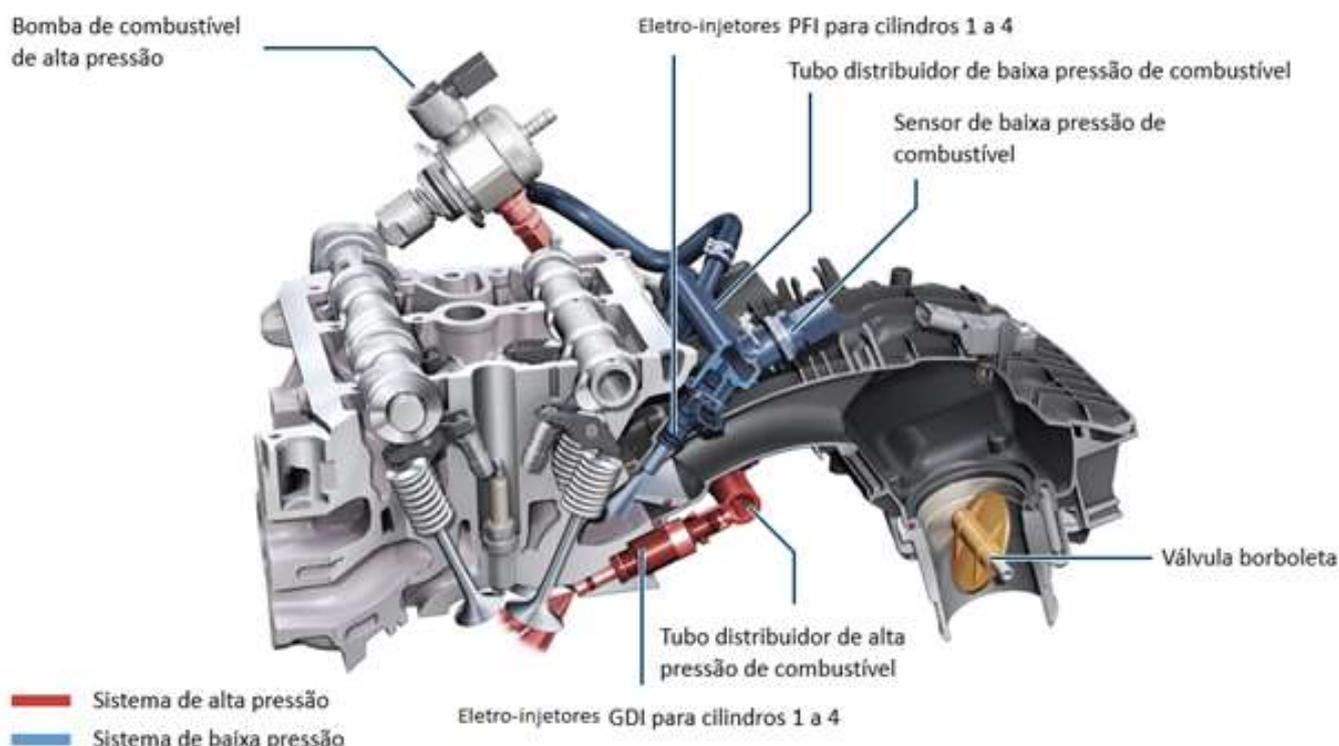


Fonte: Franco Brunetti (2021).

Em sistemas mais modernos pode ser utilizada os dois sistemas PFI e DFI ou *dual injection*. Isto significa que a formação da mistura pode ser gerada de duas maneiras diferentes. A primeira é mediante o sistema DFI, diretamente

no cilindro. A segunda é mediante o sistema PFI no coletor de admissão. Graças a utilização da injeção *dual* foi possível reduzir consideravelmente as emissões de partículas finas de *hollín* termo em espanhol (fuligem). Outros objetivos do projeto do sistema de injeção *dual* foram, aumento da pressão de trabalho no sistema de alta pressão (150 a 200 bar). Alcançar os valores limite de partículas da norma de emissões de gases de escape Euro 6 (EU6), em relação a massa e a quantidade de partículas, redução das emissões de CO₂, redução do consumo de combustível em cargas parciais e melhora da acústica do motor (VOLKSWAGEN, 2012). A Figura 15 mostra os componentes aplicados para esse sistema de injeção.

Figura 15 - Localização dos componentes da injeção dual injection



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

O sistema *dual injection* possui modos de funcionamento que são determinados por meio de curvas características que são programados na ECU do motor e podem funcionar por injeção simples PFI, que permite a uma mistura homogênea, injeção DFI simples que possui apenas uma injeção principal e pela precisão desses sistemas também é possível trabalhar com injeção Dupla DFI e tripla DFI, que são injeções feitas entre as principais para reduzir a tem-

peratura da câmara de combustão ou na fase de aquecimento do motor (VOLKSWAGEN, 2012)

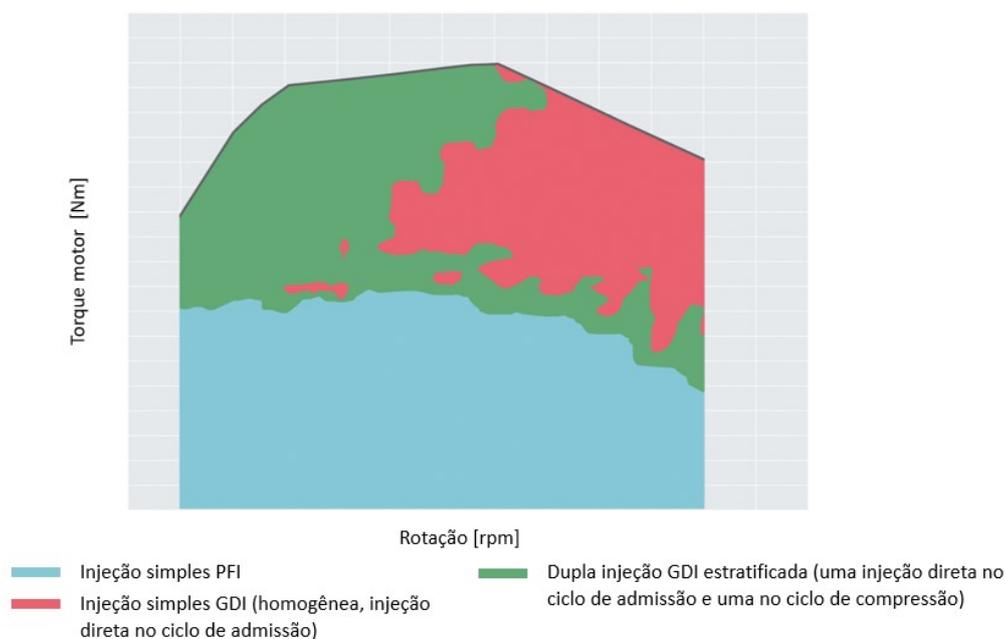
Na partida do motor é realizada uma injeção direta dupla no tempo de compressão do motor, em seguida na fase de aquecimento, para isso o momento de ignição do motor é ligeiramente atrasado.

Com a temperatura do motor maior que 45 graus e cargas parciais o sistema passa ao modo PFI, o sistema apresenta vantagens no consumo, a mistura é homogeneizada de forma ótima pela antecipação da formação dela, isto é, se tem mais tempo para sua formação o que acarreta uma formação mais rápida e de melhor rendimento, adicionalmente não é desperdiçada potência do motor pela atuação da bomba de alta (VOLKSWAGEN, 2012).

Com cargas superiores e temperatura normal de funcionamento são produzidas injeções diretas simples no tempo de admissão. O sistema pode acionar os injetores DFI brevemente para evitar carbonização desses injetores, se caso o sistema funcione por muito tempo no modo PFI.

A Figura 16, apresenta o mapa criado para o sistema *dual injection* em função do torque e rotação do motor.

Figura 16 - mapa de injeção do sistema *dual injection*



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

2.2 Recirculação de gases de escape (EGR)

A recirculação externa de gás de escapamento pode ser utilizada para controlar a carga do cilindro e, conseqüentemente o processo de combustão. O gás de escapamento recirculado para o coletor de admissão aumenta a proporção de gás inerte no abastecimento de gás fresco. Isto permite a redução da temperatura de pico de combustão, assim como a redução de NO_x, não tratada, que depende da temperatura (Bosch, 2005).

Os catalisadores não conseguem converter o NO_x devido a grande quantidade de oxigênio presente nos gases de escape dos motores Otto. A conversão do NO_x em N₂ exige uma reação de redução (retirada de oxigênio do gás) o que não é possível num ambiente com excesso de oxigênio. Então, para se reduzir a emissão de NO_x nos motores Otto, se utiliza a técnica da recirculação dos gases de escape (MATTOS, A. P., 2018).

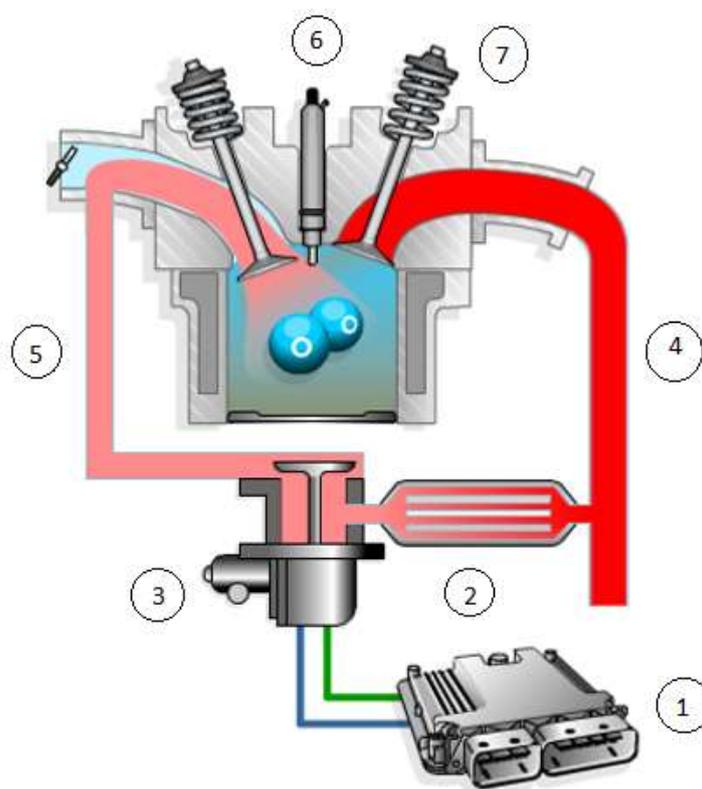
A recirculação dos gases de escape tem a função de substituir uma porcentagem de ar fresco de entrada por gases de escape não combustíveis. Isto reduz o conteúdo de oxigênio nos cilindros, além da temperatura e a pressão máxima deles. Em muitos casos, os gases de escape são resfriados antes do seu retorno para o motor mediante ao uso de radiador de recirculação de gases de escape. Isto possibilita a introdução de um volume de gases de escape superior nos cilindros. Desta forma, a temperatura de combustão é reduzida um pouco mais, que por sua vez diminui a quantidade de óxidos de nitrogênio (NO_x).

As válvulas EGR podem ser acionadas mediante a um atuador pneumático ou eletricamente de acordo com o sistema implantado no veículo. As válvulas EGR de acionamento elétrico funcionam progressivamente para permitir a recirculação de gases de escape variável, enquanto uma válvula com diafragma é regulada através de posições de parada pré-definidas (MATTOS, A. P., 2018).

Alguns veículos possuem também uma válvula borboleta, que trabalha em conjunto com o sistema EGR, que é utilizada para restringir a entrada de ar fresco. Quando a válvula borboleta restringe a entrada de ar, é criada uma depressão na entrada que facilita o fluxo dos gases de escape até os cilindros.

A Figura 17 apresenta um sistema de EGR que utiliza um radiador reductor de temperatura antes da entrada no coletor podemos destacar o ECU do motor (1), um radiador que reduz a temperatura dos gases antes da entrada na admissão (2), uma válvula elétrica que por meio de pulso elétrico da ECU pelos dois fios controla a abertura ou fechamento da válvula permitindo a passagem dos gases de escape para a admissão do motor (3). Tubo que orientam os gases de escapamento para saída na atmosfera (4) e tubo de retorno para admissão (5). O injetor de combustível que está posicionado no interior da câmara de combustão na injeção direta (6) e as válvulas de admissão e escapamento que permitem a entrada dos gases e saída para interior do motor (7) (VOLKSWAGEN, 2012).

Figura 17 - Funcionamento EGR



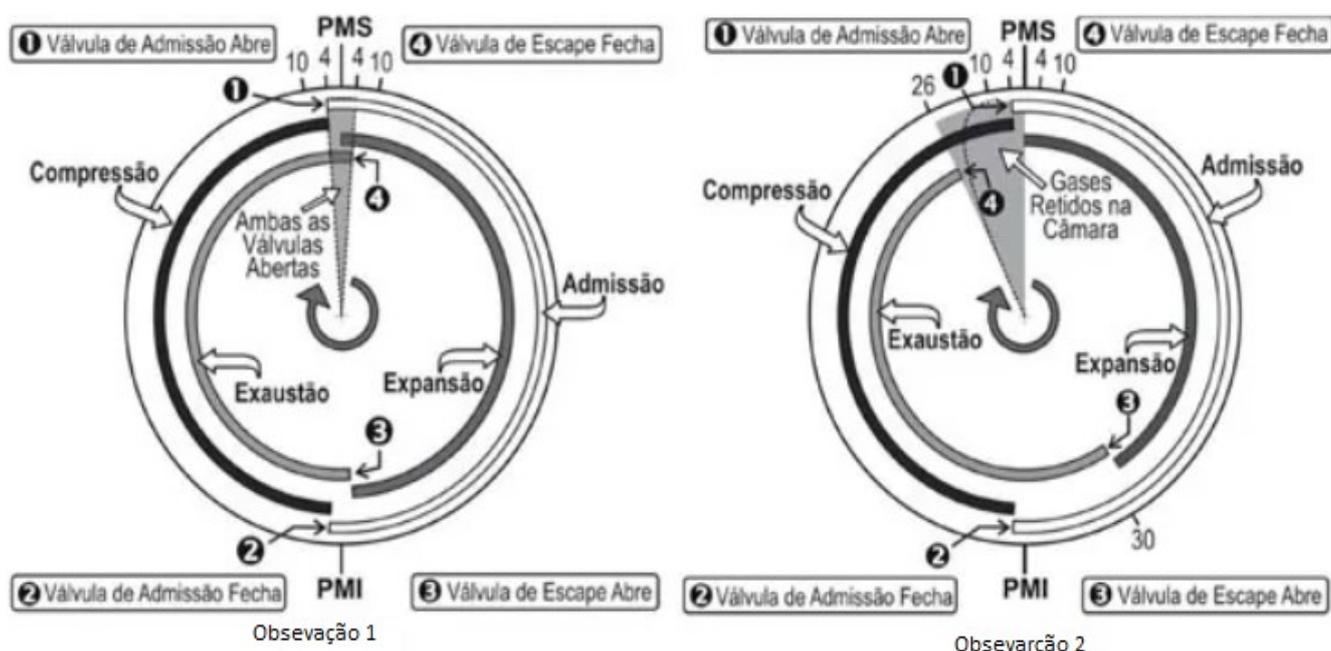
Fonte: VOLKSWAGEN (2021)

Existe um outro tipo de EGR que tem seu funcionamento utilizando o processo de cruzamento de válvulas. Cada vez mais presentes nos veículos atuais ele reduz a complexibilidade e presença de muitos componentes dos sistemas convencionais e seu controle é feito pela ECU gerenciando os siste-

mas de avanço e atraso de válvulas esse sistema de EGR também é conhecido com EGR interno e facilita o controle de ignição do motor não sendo necessário atrasar muito a ignição do motor garantindo melhor eficiência. Outro ponto é a redução da temperatura interna na câmara de combustão diminuindo a emissão de NOx e melhorando o consumo de combustível este é um recurso muito usado nos veículos com tecnologia DFI (MATTOS, A. P., 2018).

Para que esse sistema funcione é necessário utilizar o recurso de comando variável para os comandos de válvulas a quantidade de gases retidos na câmara de combustão depende do ângulo de avanço do comando de exaustão pelo controle desse ângulo a ECU consegue controlar a quantidade de EGR aplicada. Basicamente para motores de duplo comando variável tanto para admissão quanto para escape o comando de admissão pode ser adiantado, abrir a válvula antecipadamente promove uma maior diluição residual da mistura. Pode-se fechar a válvula de admissão antecipadamente para obter maior aumento de potência. Para o comando de escape pode-se atrasar em cargas parciais permitindo uma maior diluição residual da mistura e atrasar sua abertura promove um melhor trabalho de expansão dos pistões. Atrasar os dois comandos admissão e escape aumenta a diluição residual melhora o consumo de combustível pela redução de perdas por bombeamento garantindo melhor enchimento do cilindro. Em geral, os efeitos acima mencionados são melhorados com a modificação independente da fase do comando de admissão e de exaustão. Para melhor entendimento do processo de cruzamento de válvulas a Figura 18, apresenta um diagrama de válvulas que descreve o ciclo de abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape para um motor de ciclo Otto com duas observações de funcionamento (SINDIREPA, 2021).

Figura 18 - diagrama de válvulas de um motor com EGR interna



Fonte: SINDIREPA (2021)

A observação 1, apresenta uma configuração típica de marcha lenta. Reparar no cruzamento das válvulas de 8° em torno do ponto morto superior (PMS), onde a válvula de admissão abre em 4° antes do ponto morto superior (APMS) e a de escape fecha em 4° depois do ponto morto superior (DPMS).

A observação 2, apresenta a configuração para o caso em que o comando de exaustão é adiantado 30° com relação à situação de marcha lenta. Nesta condição, a válvula de escape fecha em 26° APMS e a de admissão continua a abrir em 4° APMS. Neste caso não há cruzamento de válvulas e uma parte dos gases se mantem dentro da câmara de combustão gerando uma EGR interna (SINDIREPA, 2021).

2.3 Emissões

As emissões veiculares trata-se dos gases (tóxicos) expelidos pelo carro que são resultados do processo de combustão do motor de combustão interna. Os principais gases expelidos pelos veículos são (Denise Azuaga, 2000):

- Óxidos de nitrogênio;
- Material particulado;
- Monóxido de carbono;
- Hidrocarbonetos;
- Dióxido de enxofre.

Estes gases expelidos pelos veículos são os principais responsáveis pela poluição do ar, eles afetam tanto a saúde do ser humano quanto o próprio meio ambiente, com sua inalação por momentos prolongados podendo acarretar até mesmo na morte.

Apesar do primeiro automóvel ter sido produzido em 1866, as leis para poder controlar os limites de emissão e estudos sobre os próprios só foram realizados anos depois, tendo início somente a partir da década de 60 nos EUA, quase 100 anos após o início da era dos veículos automotores. As fontes veiculares de poluição atmosférica, além de serem as mais importantes, aumentando sua contribuição relativa em cidades menos industrializadas, são as de mais difícil controle, devido a sua grande dispersão. Os veículos automotores têm tido uma participação ativa no crescimento acelerado da poluição, principalmente no Brasil que privilegia o transporte rodoviário. Como o Brasil não tem uma linha ferroviária que possa abranger todo o país de forma adequada nos quesitos de transporte de carga e no transporte de passageiros, o país ficou com meios mais poluentes para realizar a locomoção de cargas, feita majoritariamente por caminhões, enquanto o de pessoas por ônibus, transporte esse que seria feito de maneira muito mais ecológica se feita a partir de trens (Denise Azuaga, 2000).

O órgão responsável pelo controle de emissões dentro do Brasil é o CONAMA, por meio de planos de controle como o Plano de Controle de Poluição Veicular (PCPV), Plano de Contingência e emergência ambiental (PCEA) e

Centro Tecnológico de Saneamento Básico (CETESB). Programas estes responsáveis pelo controle da qualidade do ar e medidas de controle para diminuição de emissões nocivas dos veículos. A CETESB começou a monitorar os níveis de emissões no Brasil já na década de 70, causada pelo aumento constante da frota veicular do país e na falta de controle e tecnologias adequadas para se ter um controle desses poluentes.

Em 1977 a CETESB inaugurou seu laboratório para realização de ensaios das emissões veiculares e suas contribuições para poluição do ar, para poder desenvolver uma legislação para controle e diminuição das emissões, já que até essa época não existia nada para regulamentar as emissões dentro do Brasil (CETESB, 2021).

Procurando viabilizar um programa de controle de emissões veiculares que fosse tecnicamente factível e economicamente viável, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) criou, em 1986 a partir da Resolução Conama nº 18, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). O Programa foi baseado na experiência internacional dos países desenvolvidos, sendo considerado como um dos mais bem elaborados para o controle de emissão em fontes móveis (IBAMA, 1998).

Passou-se a vigorar então a primeira legislação específica para se ter um controle de emissões dentro do país. Programa este que visava como objetivo (IBAMA, 2016):

- Reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores para atender os padrões de qualidade do ar, especialmente nos centros urbanos;
- Promover o desenvolvimento tecnológico nacional tanto na engenharia automobilística como em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes;
- Criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso;

- Promover a conscientização sobre a poluição do ar por veículos automotores;
- Promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos disponíveis para a frota nacional de veículos automotores, visando a redução de poluentes emitidos na atmosfera;
- Estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados;

O Brasil já passou por 6 fases do PROCONVE, com a primeira fase tendo foco na revisão dos projetos dos veículos já em produção e no início do controle da evaporação automotiva. A Fase 2 de veículos leves (L-II) teve início em 1992, com ela chegando à aplicação das novas tecnologias, como a injeção eletrônica e o catalizador automotivo, nesta mesma fase, posteriormente em 1994 também foi inserido o controle de ruídos expelidos pelos automóveis. Com a fase L-III tendo início em 1997, o fabricante viu a necessidade de utilizar das melhores tecnologias existentes para o controle eletrônico do motor e a formação da mistura de ar – combustível. Nas fases L-IV e L-V começando em 2005 e 2009 se teve como objetivo a constante diminuição das emissões de HC e NO_x pelos veículos leves (PROCONVE, 2011).

A fase de nosso estudo, a fase L-VI que teve sua resolução publicada em 24/09/2019 pela resolução CONAMA nº 415/2009, porém só teve início efetivamente com novos projetos em 2014, onde o foco também se deu em diminuir os níveis de emissões de CO, THC, NMHC, NO_x, Aldeídos (CHO) e MP em seu início, além de ajustes nos limites do OBDBr para as funções de gerenciamento do motor que exerciam influência sobre a emissão de Poluentes do ar. Conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Limites de Emissões para veículos leves.

POLUENTES	LIMITES	
	Fase L-5	Fase L-6
	"Desde 01/01/2009"	"A partir de 01/01/2014"
monóxido de carbono (CO em g/km)	2,00	1,30
hidrocarbonetos (THC em g/km)	0,30	0,30
hidrocarbonetos não metano (NMHC em g/km)	0,05	0,05
óxido de nitrogênio (Nox em g/km)	0,12 ou 0,25	0,08
material particulado (MP em g/km)	0,05	0,025
aldeídos (CHO em g/km)	0,02	0,02
emissão evaporativa (g/ensaio)	2,00	1,5 ou 2,0
emissão do gás no cárter	nula	nula

Fonte: Manual PROCONVE PROMOT (2011)

Atualmente temos a publicação das novas fases L-VII e VIII para veículos leves, que tiveram suas divulgações em 2018, a adoção dessa legislação levará o país a se aproximar dos requisitos existentes nos EUA, para veículos leves e a se igualar aos existentes na Europa para veículos pesados (CETESB, 2018).

A fase L-7 entrou em vigor pelo país a partir de 2022 para todos os modelos de veículos a serem comercializados, com essa fase chega também um novo modelo de OBD (*On Board Diagnose*), o OBD Br3, sistema de diagnóstico que terá referência os requisitos estabelecidos nos EUA para a fase *Tier 3*. Os novos requisitos para OBD fazem também com que ele seja menos suscetível a fraudes e que seja possível o monitoramento de seus parâmetros com o veículo em funcionamento. Já a fase L-8 tem seu prazo de atendimento para 2025, tendo a cada dois anos um novo aumento dos limites tolerados das emissões, aumento esse que irá até a 2031 (CETESB, 2018).

O atendimento às fases L-7 e L-8 impõe a confirmação do atendimento aos limites de emissão em ensaios em campo. Já que até a fase L-6 esse atendimento se dava exclusivamente por meio de ensaios em laboratório. Bem como uma moderação na exigência de garantia da manutenção dessas emissões ao longo da vida útil do veículo.

Requer também um sistema de monitoramento mais robusto por meio de novos requisitos para OBD em termos absolutos pode-se afirmar que o maior ganho ambiental a ser obtido será pelo controle da emissão de reabastecimento de combustível. A grande redução da emissão de hidrocarbonetos propiciada por esse controle, considerando ser esse poluente um dos precursores da formação de ozônio e aliado ao fato de que essa emissão se concentra em áreas urbanas, pode ser uma importante ação a médio prazo na redução da concentração de ozônio. As exigências das fases L-7 e L-8 levarão à adição de tecnologias de controle das emissões que incluirão catalisadores mais eficazes e duráveis, e sistemas SCR no caso de veículos comerciais leves movidos a diesel (CETESB, 2018).

2.3.1 Novas Tecnologias Empregadas em Emissões

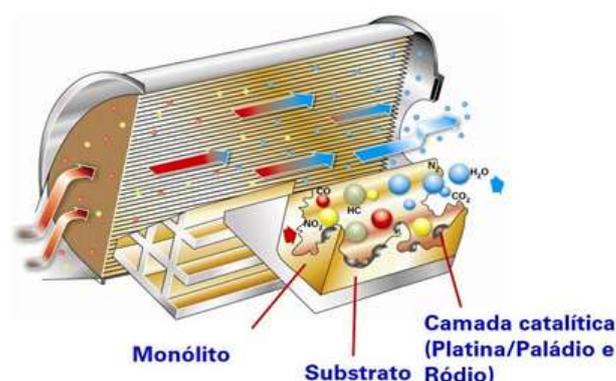
Com a chegada do PROCONVE e as novas fases que foram postas em vigor com o tempo, tivemos um aumento muito significativo nas tecnologias empregadas nos veículos para um controle de emissões. Tecnologias essas que também abrangeram outras áreas do veículo como os motores diesel, onde tivemos o sistema SCR que transforma os gases poluentes dos veículos em vapor de água e nitrogênio a partir do aditivo ARLA 32, aditivo este que se trata de uma solução transparente de ureia em água desmineralizada que é usada para controlar a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) no gás de escapamento dos veículos. Este aditivo não é tóxico, ou inflamável (Ibama, 2020).

Uma das tecnologias mais importantes implantadas com as novas fases do PROCONVE foi o catalisador automotivo que está representado na Figura 19. A evolução tecnológica de motores que funcionam a partir da mistura de ar-combustível estequiométrica, o catalisador tem a função de converter os componentes poluentes como HC, CO e NOx em componentes não nocivos ao meio ambiente e ao ser humano. Estes gases tóxicos são transformados em gases toleráveis ao meio ambiente, que são o H₂O, CO₂ e N₂. (Bosch, 2005).

Essa conversão de poluentes, é possível, pois o catalisador é formado, basicamente, de uma carcaça metálica, do monólito, do substrato e da camada

catalítica. Normalmente, utilizam-se substratos como monólitos cerâmicos, mas existem também os monólitos metálicos. O substrato serve para ampliar a área efetiva do catalisador. A camada catalítica aplicada sobre esse substrato contém os metais nobres Platina ou Paládio, e Ródio. Do ponto de vista químico, um catalisador propicia uma reação química que acelera ou torna possível a conversão dos gases nocivos. Os metais nobres não participam diretamente da reação química, portanto não se desgastam. O catalisador tem vida útil devido ao envelhecimento químico ou contaminação da camada catalítica e ao seu funcionamento em altas temperaturas onde essa camada pode ser deteriorada (VOLKSWAGEN, 2012).

Figura 19 - Catalisador (conversor catalítico)



Fonte: VOLKSWAGEN (2012)

O OBD acabou sendo uma das tecnologias necessárias nos veículos com as novas fases do PROCONVE, No OBD inclui-se um sensor de NO_x no escape do veículo que indica falhas no sistema de dosagem de ureia, fundamental ao desempenho do veículo (no caso de Diesel). A grande vantagem do OBD 2 é checar continuamente o funcionamento do catalisador de três vias, responsável por corte drástico nas emissões CO₂, NO_x e HC. Para tanto, se adiciona um segundo sensor de oxigênio. O primeiro, colocado antes do catalisador, ajuda por retroinformar a injeção eletrônica a calcular a quantidade exata de combustível liberada ao motor. No Brasil, todos os carros desde 1997 o utilizam, também conhecido como sonda lambda (MS-MOTORSERVICE,

2009). Já o segundo, posicionado pós-catalizador tem a função de verificar a eficiência em realizar a catálise dos gases. A Figura 20, demonstra um leitor OBD2.

Figura 20 - Leitor OBD2



Fonte: SUN (2021)

Além dos novos componentes que se tornaram obrigatórios para o controle de emissões dos veículos, temos também novas tecnologias empregadas também nos combustíveis. Em 2002, o CONAMA publicou a Resolução 315/2002 com novas fases do PROCONVE a serem cumpridas, nesta resolução, estão presentes, dentre outros, os seguintes objetivos (IBAMA, 2016):

- Reduzir os níveis de emissão de poluentes pelo escapamento e por evaporação, visando o atendimento aos padrões nacionais de qualidade ambiental vigentes;
- Promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia de projeto e fabricação, como em métodos e equipamentos para o controle de emissão de poluentes;
- Promover a adequação dos combustíveis automotivos comercializados, para que resultem em produtos menos agressivos ao meio ambiente e à saúde pública, e que permitam a adoção de tecnologias automotivas necessárias ao atendimento do exigido por esta resolução.

O motivo que impossibilitou o devido comprimento da produção de veículos que atendessem à fase P-6 dos veículos a partir de 2009, foi a de que os objetivos dessa fase não foram devidamente atendidos, os motores que equi-

pariam veículos pesados teriam que incorporar novas tecnologias até então não aplicadas, e utilizar combustível com baixo teor de enxofre, o S-50. Ocorre que os órgãos e empresas do governo responsáveis pela especificação e produção do combustível de testes dos motores não conseguiram atender a tempo a Resolução 315/2002 (IBAMA, 2016).

2.3.2 Efeitos Dos Gases expelidos

A poluição do ar é um dos maiores problemas ambientais da atualidade, comprometendo a saúde e a qualidade de vida das populações. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que mais 4 milhões de pessoas morrem prematuramente no mundo em decorrência da poluição do ar. Cerca de 90% da população mundial está exposta a níveis de concentração de poluentes acima dos recomendados pela OMS (CETESB, 2020).

Nas regiões metropolitanas, as emissões dos veículos rodoviários, tais como automóveis, ônibus, caminhões e motocicletas, se constituem nas principais fontes de poluição. Essas emissões são compostas por diversas substâncias tóxicas que, absorvidas pelo sistema respiratório, produzem efeitos negativos sobre a saúde. Essa emissão é composta de gases como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SOx), material particulado (MP), etc (CETESB, 2020).

Óxidos de nitrogênio: Um dos gases mais preocupantes da atualidade, necessitando de alto controle de emissões. Contribui na formação de chuvas ácidas, prejudica a realização das plantas do processo de fotossíntese, auxilia na formação de material particulado e na formação de smog fotoquímico. Devido a seu alto potencial de danos a qualidade do ar, requer tecnologias de controle e monitoramento avançadas (CETESB, 2020)

Hidrocarbonetos: gás proveniente do combustível queimado parcialmente ou que nem sequer foi queimado no motor durante a combustão. Assim o oxido de nitrogênio, contribui para a formação do “smog” fotoquímico na atmosfera, que acaba fornecendo ozônio para a atmosfera. Resultando para os

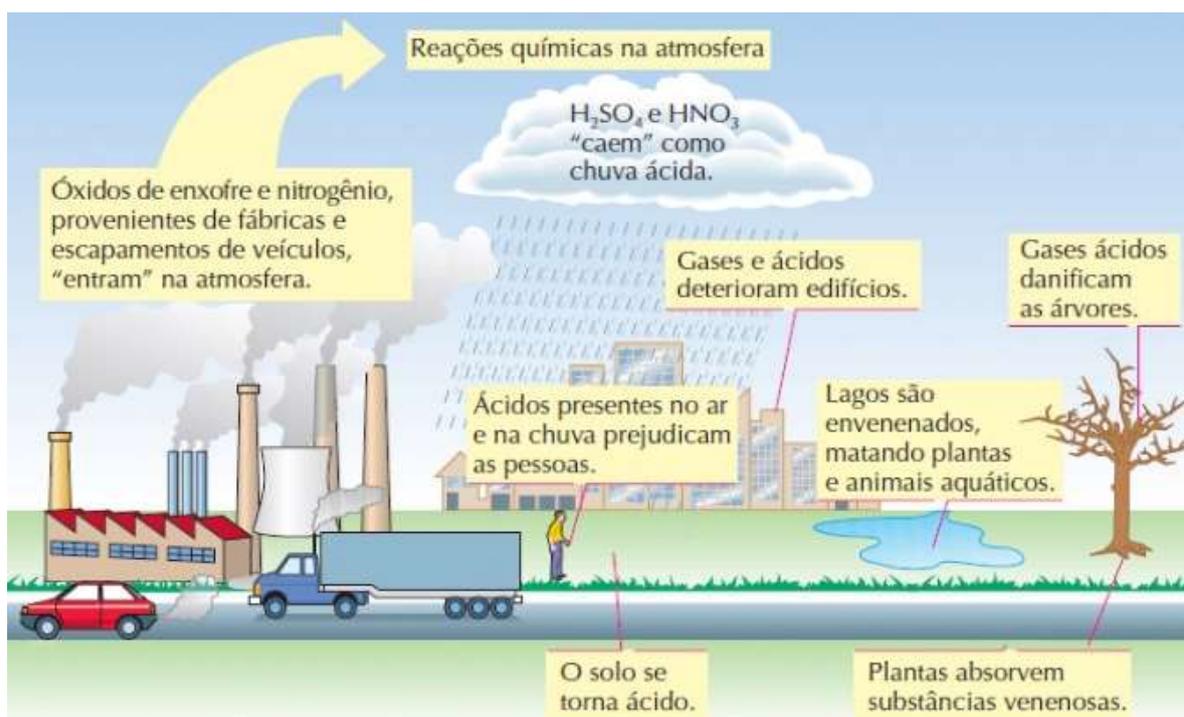
seres humanos em problemas respiratórios e inflamação nos olhos (Rodrigo Faggi, 2012).

Monóxido de carbono: gás resultante da queima incompleta da queima de combustível, a inalação deste gás pelo ser humano acarreta à redução da capacidade do sangue de transportar oxigênio pelo corpo, podendo até mesmo causar a morte por asfixia (CETESB, 2020).

Material Particulado: partículas que ficam suspensas dentro da atmosfera em forma de fuligem (fumaça preta), são um dos principais intensificadores do aquecimento global, causam problemas pulmonares de saúde ao afetar negativamente os alvéolos pulmonares, maior densidade das nuvens, chuvas ácidas, e demais problemas (CETESB, 2020).

Dióxido de enxofre: Tem fontes tanto naturais, como por meio de vulcões, e fontes não naturais como o processo de combustão dos veículos (fonte antropogênica). Este gás auxilia na formação de chuvas ácidas, a inalação deste poluente pelo homem traz dificuldades respiratórias, alteração na defesa dos pulmões, agravamento de doenças respiratórias como enfisema e bronquite, e de doenças cardiovasculares. No meio ambiente, quando presente na atmosfera pode levar a formação de chuva ácida e é precursor dos sulfatos, um dos principais componentes dos MP (CETESB, 2012) conforme a Figura 21.

Figura 21 - Formação da chuva ácida.



Fonte: ENGQUIMICASANTOSSP (2013)

As fontes veiculares de poluição atmosférica possuem uma participação ativa no aumento da poluição do ar, principalmente em grandes centros urbanos. Os veículos automotores produzem mais poluição atmosférica do que qualquer outra atividade humana isolada (GOV.SP,1997). Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), os veículos automotores (veículos leves e pesados, incluindo ainda as motocicletas e similares) correspondem à principal fonte de emissão de poluentes, com uma contribuição de cerca de 95% das emissões de CO, 94% das emissões de HC, 96% das emissões de NOx e 65% das emissões de SOx. Os veículos leves, que são movidos a gasool (gasolina com adição de álcool) e álcool, contribuem com 63% das emissões de CO, 28% das emissões de HC, 32% das emissões de HC evaporativo, 17% das emissões de NOx e 17% das emissões de SOx. Já os veículos pesados, que são movidos a diesel, contribuem com maior emissão de SOx (48%) e NOx (78%) (CETESB, 1999).

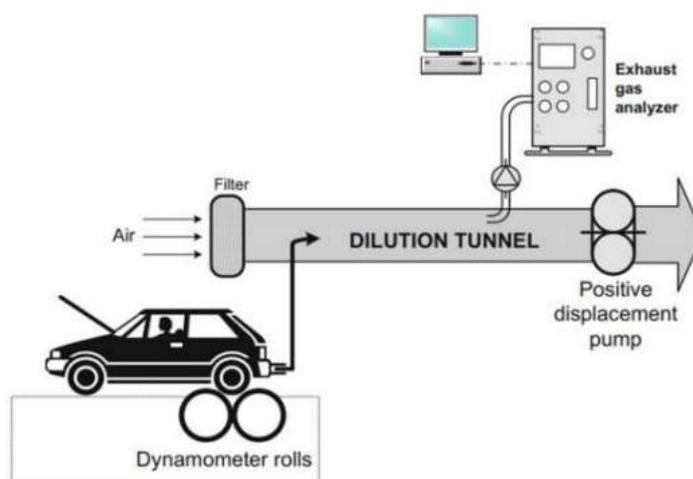
Dentre os danos ao ambiente e à saúde humana causados pela emissão desses poluentes, destacam-se a acidificação de rios e florestas, ataque aos materiais (prédios, construções, etc.), aumento de problemas respiratórios

e circulatórios na população (podem levar até a morte pacientes crônicos dessas doenças), perda de saúde da população (e.g., perda de mobilidade devido aos congestionamentos nas grandes cidades, ou a perda de áreas de lazer), efeito estufa e aquecimento global. Nota-se que os danos provenientes da poluição atmosférica não se restringem às áreas onde ocorreu a emissão, pois devido a dispersão através das correntes de ar, eles ultrapassam fronteiras regionais e nacionais (EYRE et al., 1997).

2.4 Ciclo de medição

Dentre as normas para medição de poluentes dentro de um processo de homologação e testes de um veículo no Brasil, temos alguns ciclos nos quais os veículos devem ser medidos, sendo o utilizado por nós o ciclo FTP 75 (*Federal Test Procedure - 75*) Brasil. No processo de medição de emissões de escapamento temos uma esquemática próxima a demonstrada na Figura 22.

Figura 22 - método de medição de emissões



Fonte: GIAKOUMIS (2016)

2.3.1 Ciclo de medição para homologação

Dentro dos ciclos de medição utilizados para certificação de veículos automotores no Brasil, podemos caracterizar basicamente três ciclos de medição, sendo 1 principal e 2 ciclos suplementares. No primeiro ciclo chamado de FTP-75, é englobado simulações envolvendo partidas a frio e a quente assim como normalmente o veículo é submetido em seu uso diário por seus condutores. A Figura 25 mostra graficamente como é esse ciclo.

Entre os ciclos suplementares temos o US06, ciclo no qual simula uma condução de forma mais agressiva colocando mais carga no motor, e trabalhando com velocidades mais elevadas para que assim, as condições de circuito rodoviária possam ser simuladas e assim podendo ser utilizada na medição de consumo – HWFET(*Highway Fuel Economy Test*) conforme as normas regulamentadoras Brasileiras NBR 6601 e NBR 7024, referente aos ciclos FTP-75 e HWFET. A Figura 23 demonstra como um ciclo US06 ocorre. (DALLMANN; FAÇANHA, 2017).

Figura 23 - Ciclo USC06



Fonte: DALLMANN; FAÇANHA (2017)

Já o terceiro e último ciclo denominado SC03, tem a finalidade de simular condições próximas ao que seria um ciclo urbano em condições de calor, onde o veículo tem diversas fases de aceleração e desaceleração, e durante esse ciclo de medição o sistema de ar-condicionado do veículo deve permanecer ligado, na Figura 24 podemos observar essas fases de aceleração e desaceleração que são medidas dentro desse ciclo (DALLMANN; FAÇANHA, 2017).

Figura 24 - ciclo SC03



Fonte: DALLMANN; FAÇANHA (2017)

2.3.2 Ciclo FTP-75

O ciclo utilizado em nosso material de pesquisa é o FTP 75, ciclo no qual é utilizado para homologar carros para o mercado brasileiro.

O ciclo FTP-75 busca analisar separadamente cada fase de funcionamento dos veículos, onde teremos a fase fria na qual o motor passa por processo de aquecimento para chegar em sua temperatura ideal de trabalho, onde dentro dessa fase o sistema de injeção tende a trabalhar com lambda abaixo de 1 para permitir um aquecimento mais rápido, temos também dentro desse ciclo a fase estabilizada, onde o motor de veículo já se encontra em sua temperatura ideal de trabalho, e seu sistema de injeção eletrônica passa a trabalhar com o fator lambda mais próximo ou igual a 1, já a fase de partida a quente o motor é desligado e ligado novamente para que ele possa partir com uma temperatura de trabalho ideal, porém a CETESB utiliza uma variação desse ciclo onde, entre a terceira e segunda fase o veículo fica 10 minutos com seu motor desligado, e após esse período é ligado novamente e realizado a 3ª fase do teste. A Figura 25 mostra graficamente como é esse ciclo (DALLMANN; FAÇANHA, 2017).

Figura 25 - ciclo FTP 75



Fonte: DALLMANN; FAÇANHA (2017)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

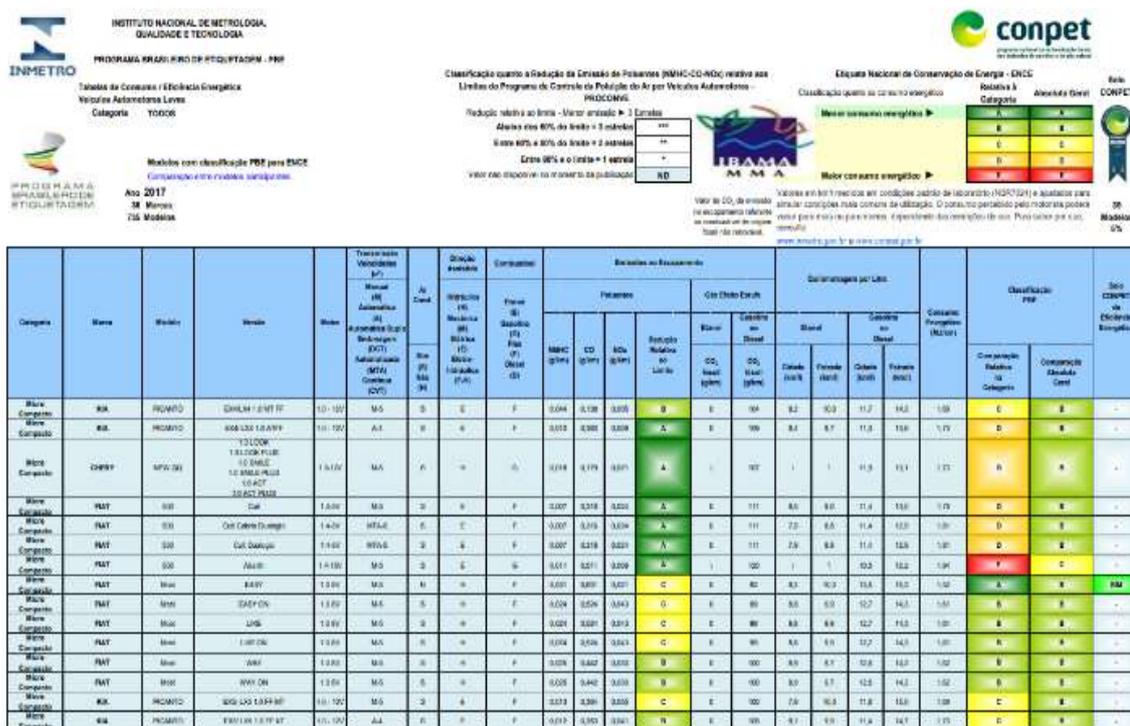
Para a realização deste trabalho utilizaremos dados oficialmente emitidos pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e Concept, de veículos com diferentes tecnologias empregadas em seus sistemas de injeção de combustível. Todos estes veículos atendendo os limites de emissões estabelecidos pelo PROCONVE 6 e o ciclo FTP-75 em seus ensaios das tabelas PBEV 2017 e PBEV 2021.

3.1 Tabela PBEV

São tabelas nas quais trazem informações como versões, tipo de combustível utilizado, níveis de emissões liberadas no escapamento e quilometragem feita por litro, entre outras.

A principal função da PBEV é informar e catalogar todos os veículos vendidos no mercado Brasileiro, e assim permitir que o consumidor possa ter informações sobre dados do veículo, o que permite também que essas informações sejam utilizadas para estudos e outras finalidades. A Figura 26, exemplifica como é a tabela PBEV utilizada.

Figura 26 – Tabela PEBEV 2017

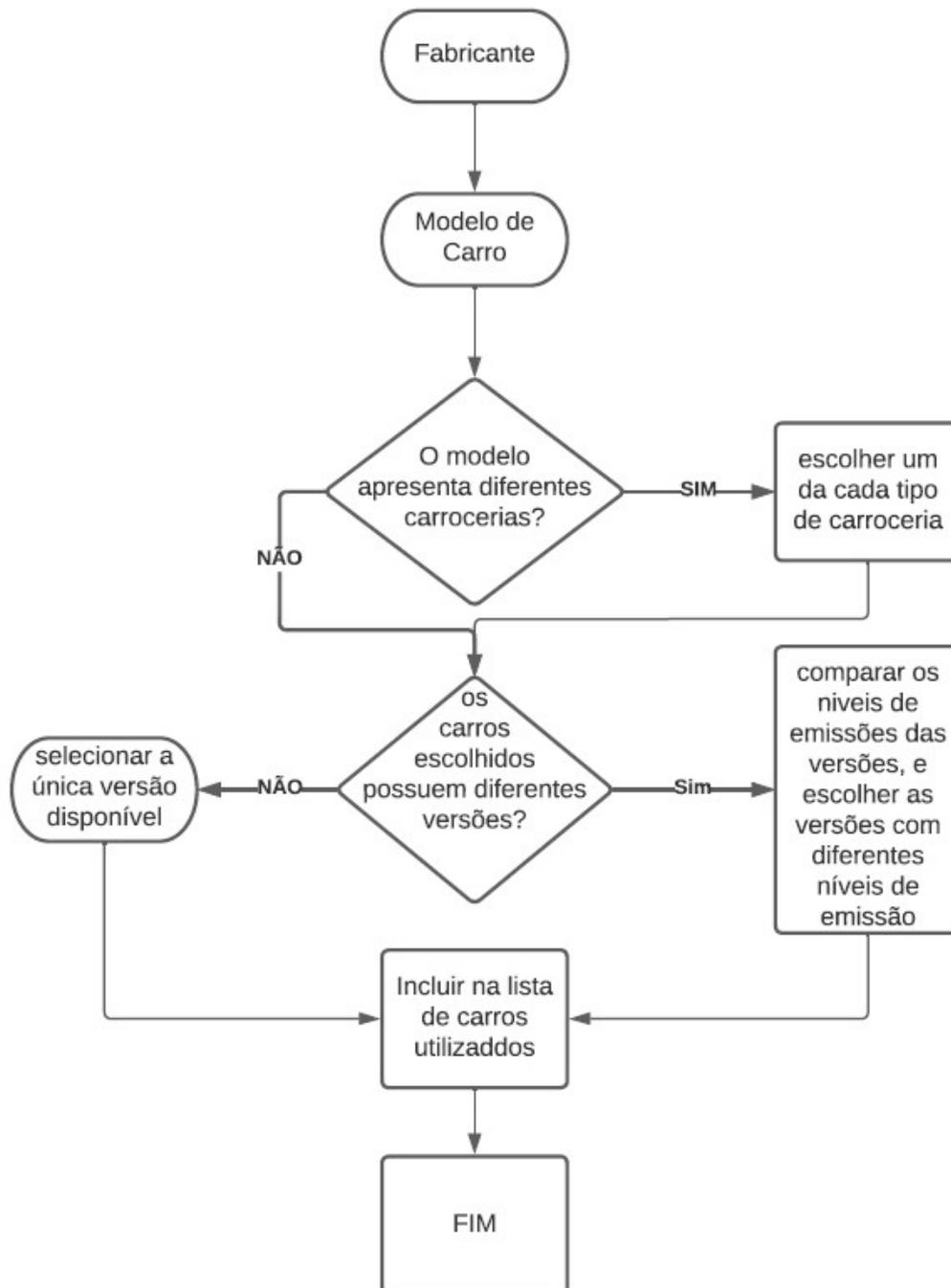


Fonte: INMETRO (2022)

Conforme citamos anteriormente, cada um desses veículos possui um motor cuja suas tecnologias são bem diferentes, tanto quanto a tecnologia empregada no sistema de injeção eletrônica, quanto a sua tecnologia para diminuir os níveis de emissões, sendo assim podemos notar através de seus históricos de projetos e até mesmo através de seus dados técnicos fornecidos pela Tabela PBEV 2017, PBEV 2021 e pela ficha técnica fornecida pelos fabricantes de alguns desses veículos. Pois para podermos ter compreensão de alguns níveis de emissão, é necessário ter conhecimento de algumas características técnicas, pois elas podem influenciar diretamente nos resultados de emissão de veículo. Foram selecionadas as tablas de 2017 e 2021, por conta da tabla PBEV 2017 ser a primeira após o Inovar-Auto, e a 2021 por ser os dados mais recentes fornecidos.

Para realizar a seleção de dados dos carros utilizados, utilizamos o processo exemplificado na Figura 27, tanto para os veículos de injeção indireta quanto para os de injeção direta.

Figura 27 - Fluxograma de seleção



Fonte: Autores

3.1.2 Separando Dados

Para ter maior compreensão dos dados, foi necessário selecionar alguns veículos dentro das tabelas PBEV 2017 e PBEV 2021, inicialmente selecionamos apenas veículos com motores com tecnologia FLEX pois devido a esses motores possuírem maior taxa de compressão quando comparados com motores somente a gasolina, poderiam gerar resultado de emissão muito divergentes um do outro. Após isso, separamos os com injeção direta e os com injeção indireta, ambos FLEX, para podermos analisar os dados separadamente.

Com a separação por meio dos sistemas de injeção, passamos então a separar os veículos por versões, onde, fora eliminado todas as versões que compartilhavam o mesmo motor, câmbio, e até a mesma carroceria.

Inicialmente a PBEV 2017 continha 735, após todo processo de seleção ficaram apenas 177, sendo 151 com injeção indireta e apenas 26 com injeção direta. Já no caso da PBEV 2021 que contém 1120 carros, foram selecionados apenas 211, sendo 162 equipados com injeção indireta, e 49 com injeção direta.

3.2 instrumentos utilizados

Para obter os dados apresentados na tabela PBEV, a CETESB, ou a montadora com avaliação da CETESB, utiliza alguns equipamentos para poder monitorar o veículo durante a fase de teste, assim como também para realizar os devidos testes. Iremos citar apenas alguns de maior relevância para esse processo.

3.2.1 Analisador de gases

Sua finalidade é medir os gases de escapamento emitido pelos veículos durante os ciclos de medição, mais especificamente o modelo NAPRO PC – MULTIGÁS que utiliza um sistema de medição não dispersivo por meio de luz infravermelha que trabalha em conjunto a um sensor lambda para medir o AFR

(*Air Fuel Ratio*), ou traduzindo para o português, (Relação ar/combustível). A Figura 28 ilustra um analisador de gases.

Figura 28 - Analisador de gases NAPRO



Fonte: NAPRO (2021)

Através desse analisador poderemos medir os níveis de CO₂, CO, HC, NO_x e o fator Lambda durante os ciclos FTP 75 Brasil.

Segundo o Fabricante NAPRO, este analisador possui as seguintes características técnicas de medições:

- CO: 0 - 15%;
- CO₂: 0 - 20%;
- HC: 0 - 20000ppm Hexano;
- O₂: 0 - 25%;
- NO_x Opcional: 0 - 5000 ppm;
- Lambda: 0 - 9.99;
- AFR: 0 - 99.99;

3.2.2 Dinamômetro

O dinamômetro assim como o analisador de gases é um equipamento muito útil, já que ele será responsável por simular um ciclo de rodagem no qual cada um dos veículos deverá ficar com seu eixo de tração sobre rolos, que por sua vez farão carga nas rodas, o que permite gerar condições próximas as en-

contradas na condução desses veículos no dia a dia. Os ensaios realizados em dinamômetro são semelhantes ao demonstrado na Figura 29.

Figura 29 - Ensaio de emissão de poluentes em dinamômetro de chassis



Fonte: CETESB (2021)

3.3 Cálculos utilizados para obter dados de emissões

Para a validação desses dados, é possível utilizar o método de cálculo de massa de gases de escape emitidos e o método de cálculo de relação ar/combustível. Onde algumas das variáveis desses cálculos podem ser obtidas via OBD2 por um scanner.

3.3.1 Cálculo de massa dos gases de escape através das massas de ar e massa de combustível

Segundo o REGULAMENTO (UE) 2016/427 item 10.2 da comissão europeia, o cálculo da massa de gases escape emitidos através das massas de ar e de combustível é dado pela seguinte Equação 1:

$$Q_{mew, i} = Q_{maw, i} + Q_{mf} \quad (1)$$

sendo que:

- $Q_{mew, i}$ é a massa instantânea de gases de escape (Kg/s);
- $Q_{maw, i}$ é a massa de ar instantânea admitida (Kg/s);
- $Q_{mf, i}$ é a massa instantânea de combustível (Kg/s);

3.3.2 Cálculo de massa dos gases de escape através da relação ar/combustível

Além do método de cálculo por meio de massa de ar e de combustível admitidos temos também o método de cálculo por meio da relação ar/combustível, método no qual através da proporção estequiométrica entre eles podemos determinar a massa de gases de escape.

Conforme o REGULAMENTO (UE) 2016/427 item 10.3 da comissão europeia, o cálculo é dado pela seguinte Equação 2:

$$q_{mew, i} = q_{maw, i} \left(1 + \frac{1}{\frac{A}{F_{st}} \lambda_i} \right) \quad (2)$$

Onde:

$$\frac{A}{F_{st}} = \frac{138,0 \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{4} + \frac{\varepsilon}{2} + \gamma\right)}{12,011 + 1,008 \cdot \alpha + 15,9994 \cdot \varepsilon + 14,0067 \cdot \delta + 32,0675 \cdot \gamma}$$

$$\lambda_i = \frac{\left(100 - \frac{c_{CO} \cdot 10^{-4}}{2} - c_{HCw} \cdot 10^{-4}\right) + \left(\frac{\alpha}{4} \cdot \frac{1 - \frac{2 \cdot c_{CO} \cdot 10^{-4}}{3,5 \cdot c_{CO_2}}}{1 + \frac{c_{CO} \cdot 10^{-4}}{3,5 \cdot c_{CO_2}}} - \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta}{2}\right) \cdot (c_{CO_2} + c_{CO} \cdot 10^{-4})}{4,764 \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} + \gamma\right) \cdot (c_{CO_2} + c_{CO} \cdot 10^{-4} + c_{HCw} \cdot 10^{-4})}$$

sendo que:

- $Q_{mew, i}$ é a massa instantânea de gases de escape (Kg/s);
- $Q_{maw, i}$ é a massa de ar instantânea admitida (Kg/s);
- $\frac{A}{F_{st}}$ é a razão estequiométrica ar/combustível (kg/kg);
- λ_i é o fator de ar instantâneo;
- c_{CO_2} é a concentração de CO_2 em base seca (%);
- c_{CO} é a concentração de CO em base seca (%);
- c_{HCw} é a concentração de HC em base úmida (ppm);
- α é a razão molar do hidrogénio (H/C)
- β é a razão molar do carbono (C/C)
- γ é a razão molar do enxofre (S/C)
- δ é a razão molar do azoto (N/C)
- ε é a razão molar do oxigénio (O/C)

No caso de combustíveis com carbono em sua composição, os coeficientes referem-se a um combustível $C_\beta H_\alpha O_\varepsilon N_\delta S_\gamma$ com $\beta = 1$. A concentração de emissões de HC é geralmente baixa e pode ser obtida através do cálculo de λ_i .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo foi iniciado, analisando e interpretando os dados fornecidos pelo INMETRO por meio da tabela PBEV.

4.1 Comparando os níveis de emissões

Após todo o processo de separação dos dados, iniciamos então a análise dos mesmos, onde encontramos valores máximo e mínimos, a média, e o desvio médio e o desvio padrão, e assim gerando tabelas onde encontramos os resultados conforme os Quadros a seguir.

O quadro 2 demonstra os dados obtidos dos modelos de veículos com injeção indireta vendido em 2017.

Quadro 2 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção indireta 2017

INJEÇÃO INDIRETA				
DADOS OBTIDOS	Poluentes			Gás Efeito Estufa
	NMHC (g/km)	CO (g/km)	Nox (g/km)	CO2 fóssil(g/km)
Médias	0,0201	0,4249	0,0229	119,7168
Val. MIN	0,0060	0,0230	0,0030	85,0000
VAL. MAX	0,0380	1,3040	0,0910	214,0000
Desvio padrão	0,0069	0,1722	0,0136	22,1583
Desvio médio	0,0056	0,1341	0,0094	16,3172

Fonte: Autores

O Quadro 3, demonstra os dados dos modelos selecionados com injeção direta em 2017

Quadro 3 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção direta 2017

INJEÇÃO DIRETA				
DADOS OBTIDOS	Poluentes			Gás Efeito Estufa
	NMHC (g/km)	CO (g/km)	Nox (g/km)	CO2 fóssil (g/km)
Média	0,015615	0,218	0,017231	117,8462
Val. MIN	0,004	0,093	0,005	86
VAL. MAX	0,03	0,587	0,031	149
Desvio padrão	0,007796	0,110177	0,008803	11,07559
Desvio médio	0,006663	0,086615	0,007923	8

Fonte: Autores

Por sua vez os Quadros 4 e 5, são Quadros montados com nossa base de modelos de carros selecionados vendidos em 2021.

O Quadro 4 é formado por dados dos veículos com injeção indireta vendidos em 2021.

Quadro 4 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção indireta 2021

INJEÇÃO DIRETA				
DADOS OBTIDOS	Poluentes			Gás Efeito Estufa
	NMHC (g/km)	CO (g/km)	Nox (g/km)	CO2 fóssil (g/km)
Média	0,02118	0,33802	0,0177	117,88
Val. MAX	0,065	0,782	0,039	197
VAL. MIN	0,003	0,067	0,004	89
Desvio padrão	0,010987	0,206729	0,009458	18,98277
Desvio médio	0,008427	0,166783	0,008116	13,2112

Fonte: Autores

Já no Quadro 5, são os modelos de veículo selecionados com injeção direta vendido em 2021

Quadro 5 - Dados de emissões obtidos de veículos de injeção direta 2021

INJEÇÃO INDIRETA				
DADOS OBTIDOS	Poluentes			Gás Efeito Estufa
	NMHC (g/km)	CO (g/km)	Nox (g/km)	CO2 fóssil (g/km)
Médias	0,0211	0,4183	0,0211	111,1288
Val. MAX	0,0440	0,9850	0,0750	169,0000
VAL. MIN	0,0030	0,0800	0,0030	83,0000
Desvio padrão	0,0083	0,1803	0,0108	15,4686
Desvio médio	0,0068	0,1459	0,0078	11,8248

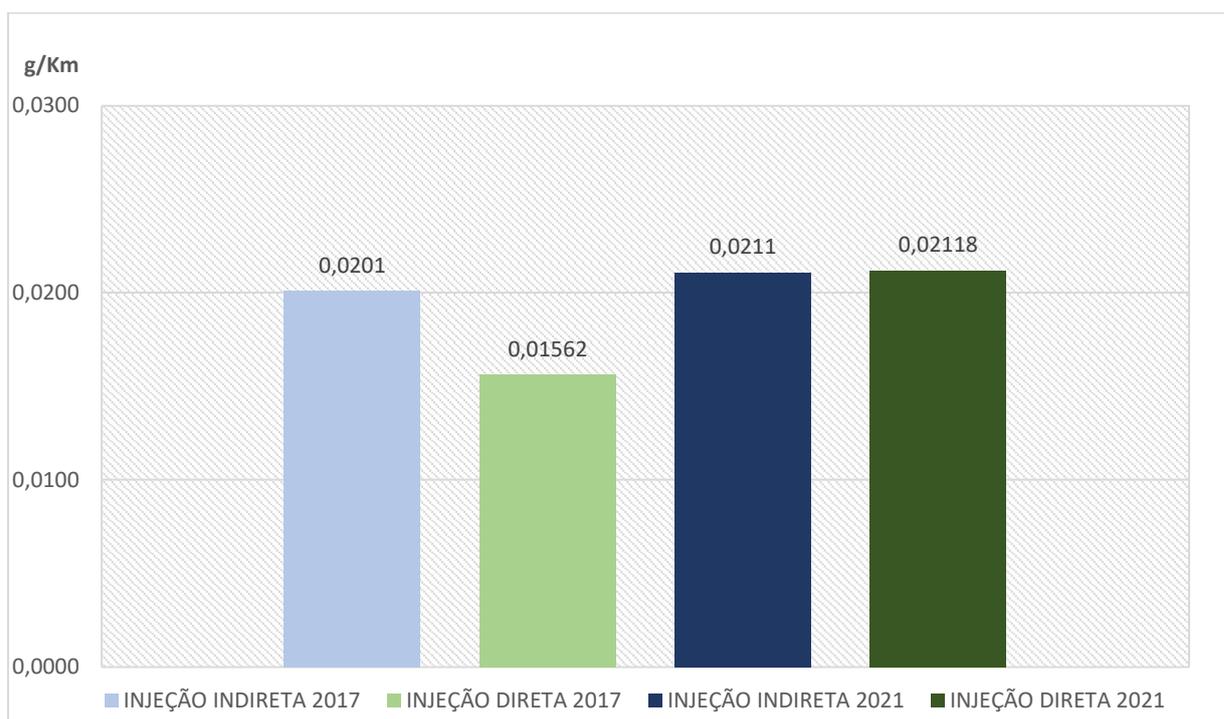
Fonte: Autores

4.1.1 Analisando os resultados

A partir do levantamento desses dados, realizamos a análise e interpretação, com isso, os resultados obtidos foram os seguintes:

- As médias de NMHC de 2017 e 2021 obtidas, estão representadas na Figura 30.

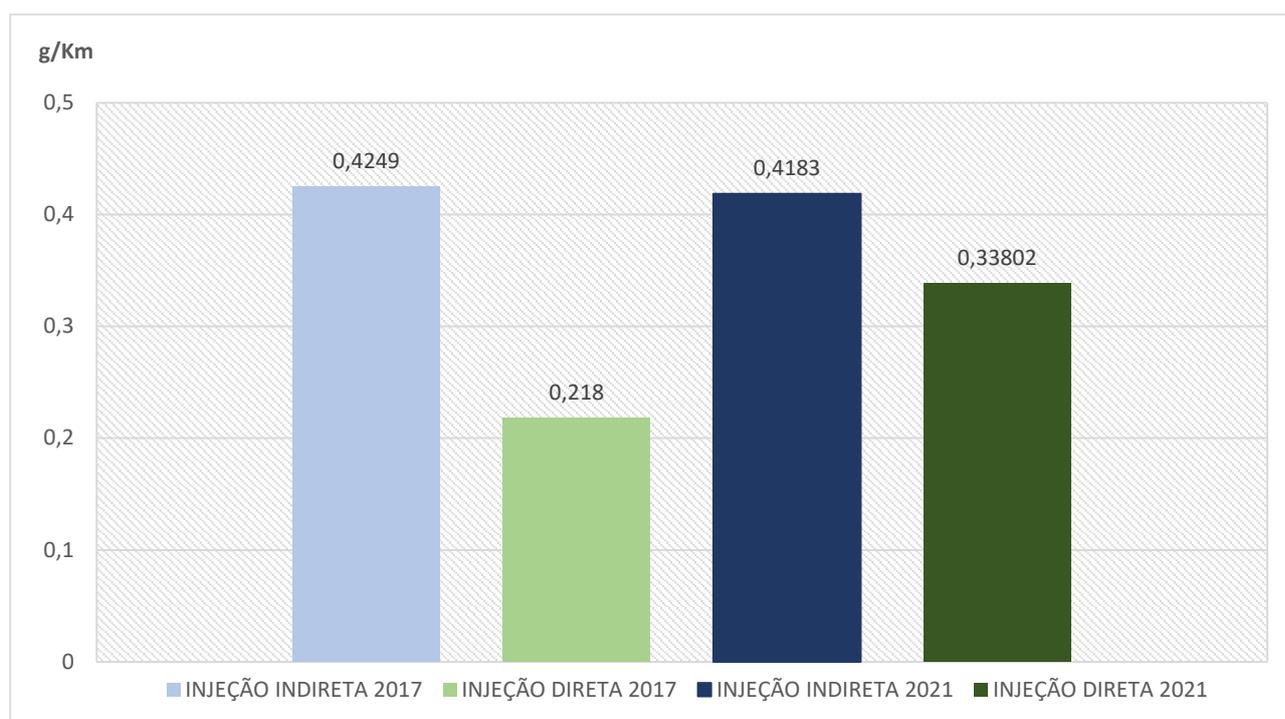
Figura 30 - Médias de NMHC



Fonte: Autores

- A Figura 31, representa as médias de CO de ambos os anos.

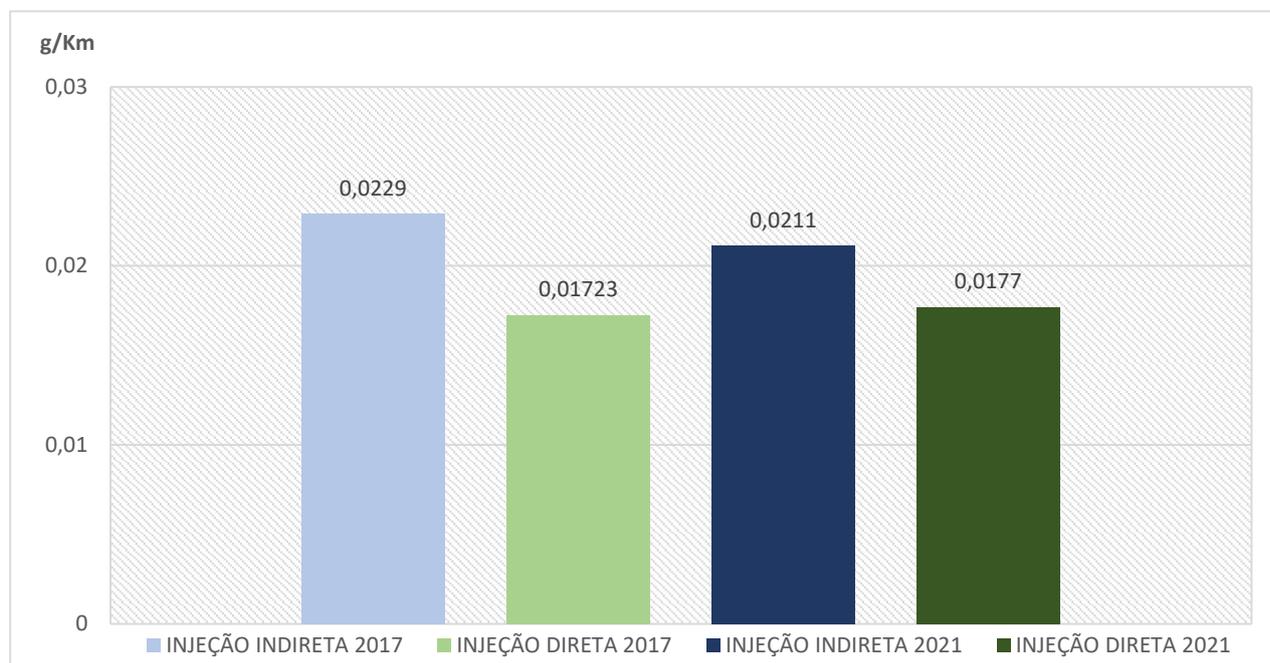
Figura 31 - Médias de CO



Fonte: Autores

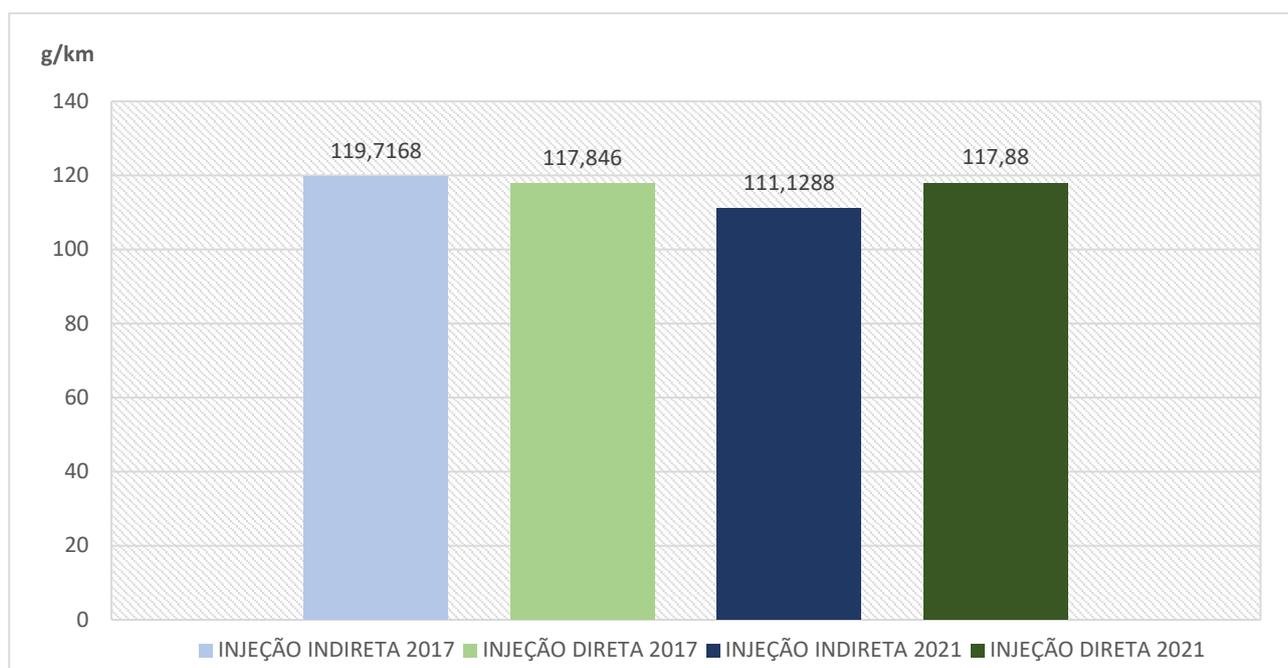
- Na Figura 32, temos as médias de NOx de ambos os anos.

Figura 32 - Médias de NOx



Fonte: Autores

- Já a Figura 33, temos a média de CO₂ de ambos os anos.

Figura 33 - Médias de CO₂

Fonte: Autores

Ao obtermos esses dados, podemos identificar que em 2017 os carros de injeção direta apresentaram aproximadamente 22,5% a menos de NMHC que os com injeção indireta do mesmo ano, assim como apresentaram também uma redução de 48,7% de CO, 24,6% de NOx, e 1,6% a menos de CO₂ quando comparados aos carros com injeção indireta.

Observando os dados referentes a PBEV 2021, podemos notar uma diferença em alguns pontos, dentre eles as emissões de NMHC dos veículos de injeção direta foram 0,37% maior que os de injeção indireta, assim como as emissões de CO₂ também foram 5,73% maiores. Já as emissões de CO e NOx continuaram menores em carros com injeção direta, sendo que o de CO foi 19,9% menor em 2021, e o NOx foi 16,6% menor também em 2021. Alguns dados foram diferentes nesse ano, pois a quantidade de carros equipados com injeção direta fornecidos ao mercado Brasileiro em 2021 foi maior, e no geral esses carros possuem proporções maiores, como tamanho e peso, quando comparados a grande maioria dos modelos de carro com injeção Indireta.

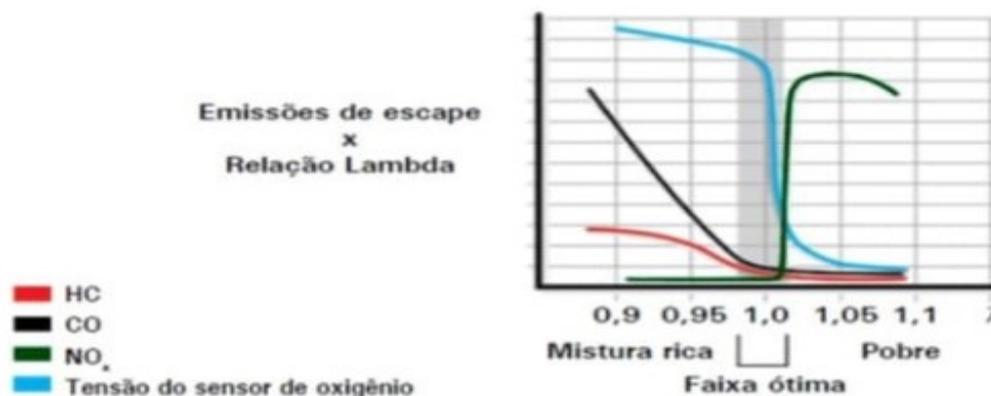
4.2 Fatores que influenciam nos resultados

Os processos de formação de poluentes nos motores DFI diferem dos já conhecidos motores PFI. A variável determinante dos motores PFI é a relação ar-combustível, e nos motores DFI além da relação ar-combustível, tem grande importância a diferença entre o momento da injeção do combustível e o momento em que ocorre a centelha de ignição, principalmente em condições de carga estratificada (VILAR, L. H. C.,2015).

Outro ponto de relevância segundo (VILAR, L. H. C.,2015) é o controle de taxas de NOx ser feito pelo processo de EGR interno, que por sua vez reduz a temperatura de combustão e a concentração de oxigênio na câmara de combustão.

A Figura 34 mostra que a redução no catalisador é favorecida com a redução do oxigênio nos gases de exaustão, e a oxidação do HC e CO, que são respectivamente hidrocarbonetos correspondentes ao combustível não oxidado durante a combustão e o monóxido de carbono, é mais eficiente com o aumento do oxigênio nos gases de exaustão (VILAR, L. H. C., 2015).

Figura 34 - Emissões de escape x fator lambda



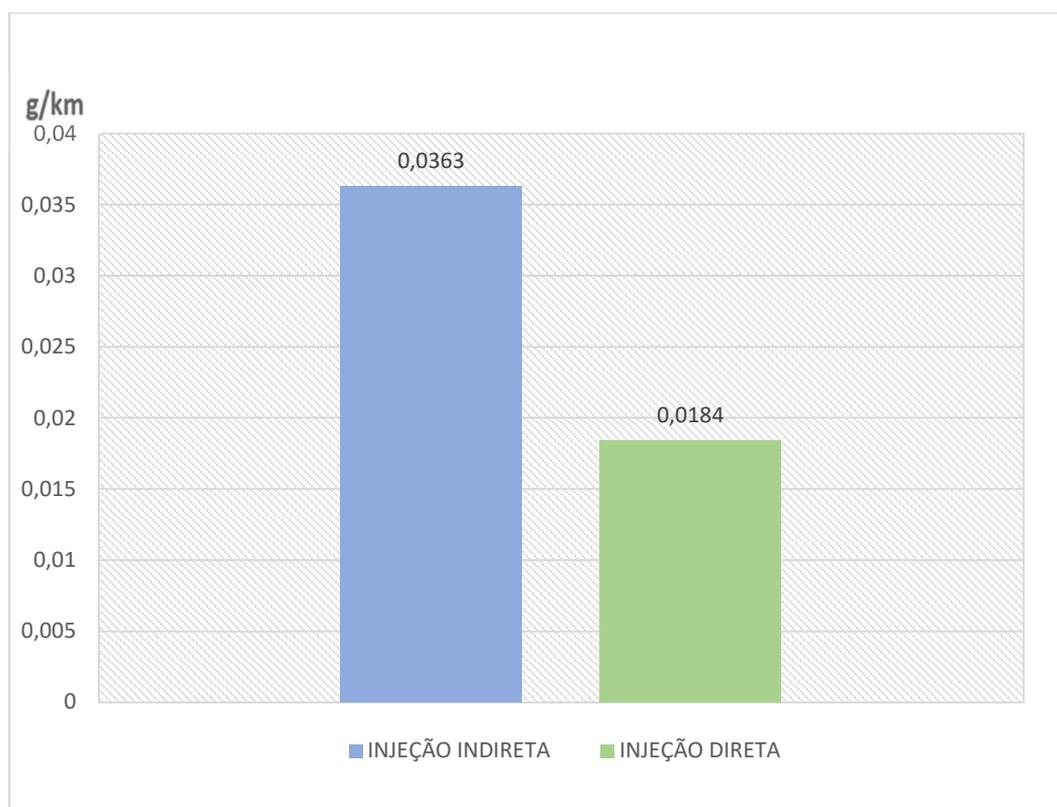
Fonte: EMBARCADOS (2021)

Observando o Gráfico observa-se que o aumento de HC está relacionado com misturas ricas λ próximo de 0,9. Para CO observa-se o aumento com λ próximo de 0,85 portanto com misturas ricas. O NO_x sobe em função de misturas pobres com λ próximo a 1,05. O sensor de Oxigênio está analisando constantemente o nível de oxigênio presente na mistura e indicando para a ECU do motor se mistura está com falta de oxigênio ou excesso neste caso rica falta de oxigênio e pobre excesso de oxigênio. Essa informação é enviada para a ECU do motor em nível de tensão para pobre aproximadamente 100 milivolts e aproximadamente 900 milivolts para mistura rica (VILAR, L. H. C., 2015).

4.3 Resultados Finais

Diante dos resultados apresentados, juntamos os dados dos veículos de 2017 e 2021, obtendo uma média geral de ambos os anos, com isso notamos que os veículos com injeção direta apresentaram maior eficiência na redução de emissões de Hidrocarbonetos em 49,31% a menos na injeção direta em relação a injeção indireta conforme Figura 35:

Figura 35 - Média Geral de NMHC

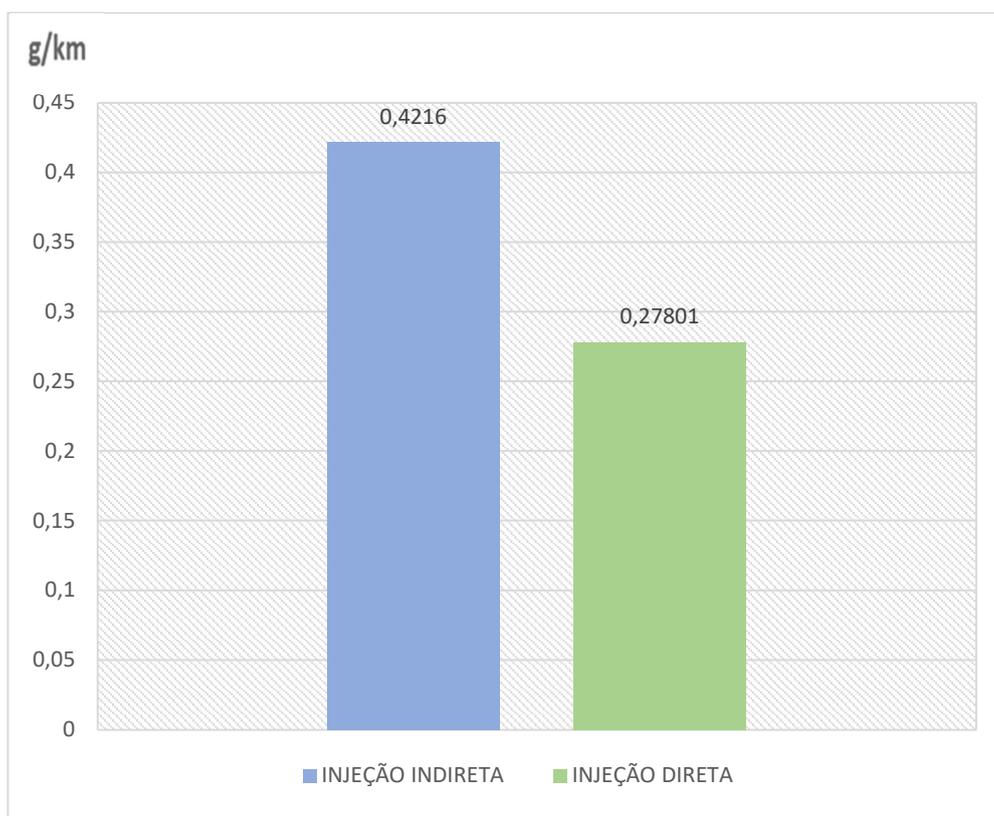


Fonte: Autores

Isso se deve a porque a relação de aumento de HC está relacionada a mistura pobre ou rica misturas muito pobres apresentam níveis de HC menores e estão mais presentes na injeção direta que pode ser injetada pouco antes da combustão impedindo fenômenos como a queima irregular, e a redução do risco de pré-detonação como é o caso da injeção indireta se trabalhar com misturas pobres já na fase de admissão e posterior mistura com o ar atmosférico compondo a mistura para combustão posteriormente (MATTOS, A. P., 2018).

Com relação as emissões de CO temos de 34,06% a menos na injeção direta em relação a injeção indireta que aponta relevância para injeção direta conforme Figura 36 :

Figura 36 - Média geral de CO

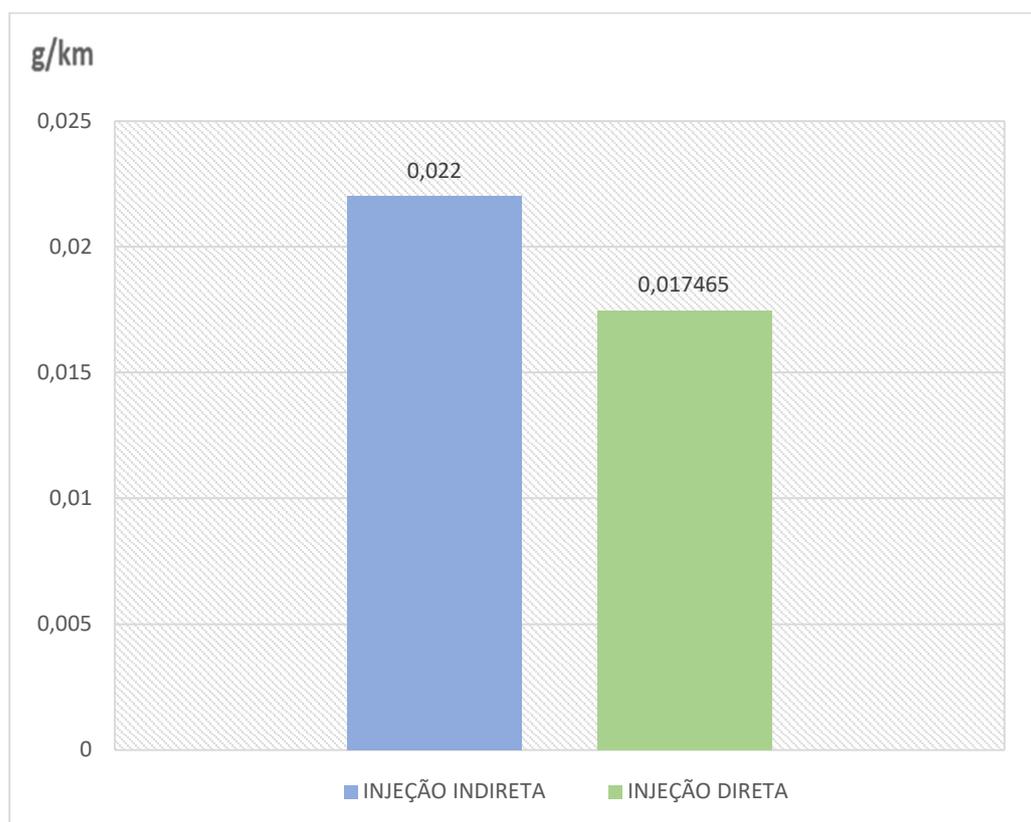


Fonte: Autores

Isso se deve pela melhor atomização e conseqüentemente melhor homogeneização da mistura resultado em combustões mais completas em relação a injeção indireta, reduzindo a formação desse gás nos gases de escape (Volkswagen, 2012).

Com relação ao NOx podemos verificar 20,61% a menos de emissões na injeção direta em relação a injeção indireta conforme Figura 37:

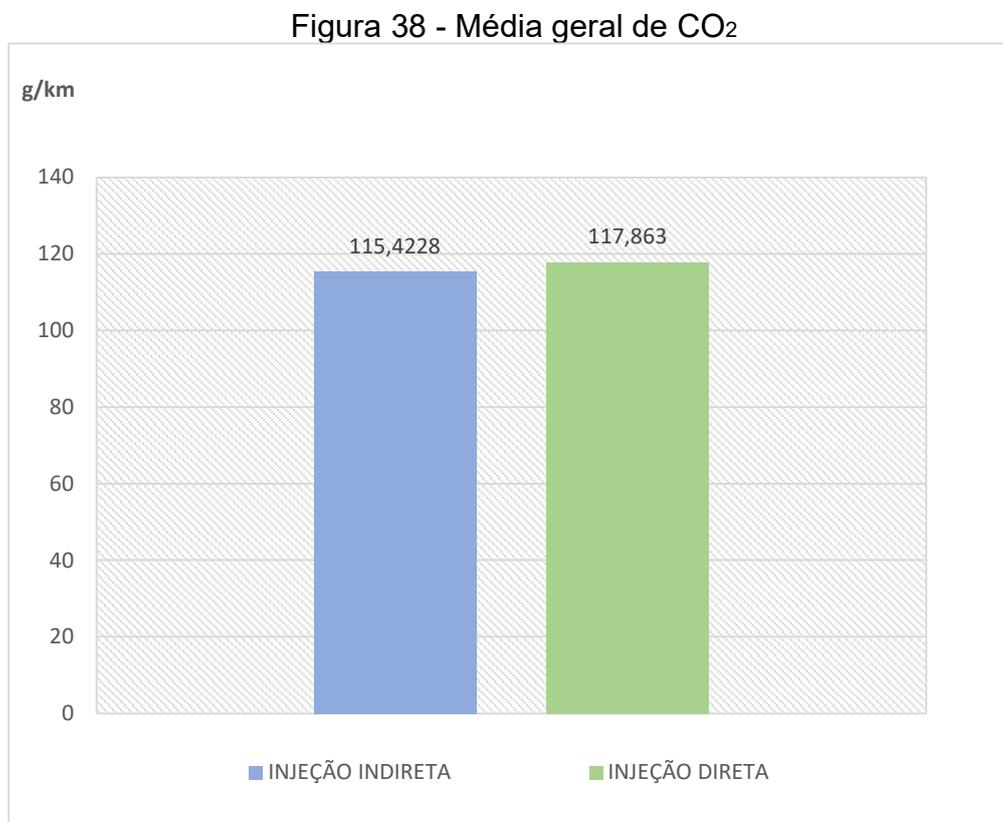
Figura 37 - Média geral de NOx



Fonte: Autores

A diferença dos resultados deve-se pelo uso de softwares cada vez mais eficientes para controle de gerenciamento de ECU a aplicação da estratégia de EGR interno garantem menor temperatura na câmara de combustão e a concentração de oxigênio na câmara de combustão, além de a injeção ser realizada dentro da câmara de combustão colaborar na absorção de calor, o que colabora na redução de NOx. Vemos nos veículos analisados que apenas uma pequena parcela de 15% dos veículos de injeção direta não possui comandos com variadores na admissão e escape permitindo melhor eficiência nesse processo. Nos veículos com injeção indireta a utilização dessa tecnologia também é presente, justificando uma diferença menor a favor da injeção direta, mas não desprezível. O ciclo FPT 75 é um ciclo menos agressivo em relação a outros ciclos como o WLTP utilizado na homologação de carros na Europa (ciclo no qual a cargas impostas ao motor simula condições reais de topografia), o que favorece a menor emissões de NOx, que podemos notar em nossa pesquisa, influenciando positivamente o resultado.

Com relação à média de emissões de CO₂ os resultados ficaram muito próximos, 2,11% a menos para injeção indireta conforme a Figura 38 :



Fonte: Autores

A primeira interpretação deste resultado se deve pelo maior teor de CO na PFI, o que significa que teve maior massa com combustão completa na DFI. Outro elemento se deve ao porte dos veículos. Este fator não faz parte deste método, mas o tamanho/peso do veículo tem influência direta no consumo de combustível. Outro ponto a ser considerado é a eficiência de catalizadores atualmente empregados nos veículos tanto na injeção direta quanto indireta. O processo de recirculação de gases de escape eleva ligeiramente o nível de substâncias contaminantes, mas que podem ser convertidas facilmente em dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água (H₂O) com o uso de materiais oxidantes como a platina ou paládio no catalisador. O catalisador, converte os gases contaminantes, uma vez que os elementos catalisadores como platina ou paládio favorecem as reações químicas (Bosch, 2005).

5. CONCLUSÃO

Ao longo do desenvolvimento, podemos perceber que algumas tecnologias empregadas nos próprios motores, e em seu sistema de injeção eletrônica podem trazer diferenças em seus níveis de emissões, como por exemplo o sistema de EGR interna que acreditamos ter colaborado muito para redução de emissões dos veículos com injeção direta com essa tecnologia.

Dentre os dados obtidos podemos perceber que os veículos com injeção direta apresentaram uma redução significativa nas médias de emissão, sendo assim o sistema de injeção mais eficiente. Esse sistema apresentou uma redução de 49,31% de NMHC, 34,06% de CO, e 20,61% de NOx. O benefício da DFI que tem combustão mais completa, isto é, menos CO, resultando em maior teor de CO₂, outro fator que influenciou para maiores emissões de CO₂, foi o porte e peso dos veículos, mas esses dados de peso e porte não foram suportados pelo método, mas notamos que o uso de motores com essa tecnologia DFI em é mais empregada em carros maiores e mais pesados quando comparado a grande maioria dos carros com injeção indireta.

6. Propostas futuras

No decorrer dessa monografia, foi observado vários pontos de melhorias futuras que por falta de recursos dentro do tempo de desenvolvimento não foram implementados. Essas implementações podem trazer melhor estudo sobre o tema trabalhado e enriquecer os conhecimentos sobre o assunto. Pontos esses que podem ser continuados futuramente ou melhorados como trabalhos futuros dessa monografia são apresentados abaixo:

- Inclusão de veículos Diesel para análise, comparando com o sistema DFI ciclo Otto para comparar emissões de material particulado e NOx.
- Comparação dos tipos de injeção quanto a massa de ar admitida e massa de combustível utilizando ciclo FPT 75, para obtenção na prática a comparação de emissões entre veículos DFI e PFI.
- Inclusão de outros motores, Atkison e Wankel as tecnologias empregadas e diferenças de emissões.
- Incluir na pesquisa o peso do veículo para estudo dos efeitos do porte do veículo nas emissões de CO₂ para uma análise da eficiência de cada sistema de alimentação.

7. Bibliografia

IBAMA. **Agente Redutor Líquido Automotivo (Arla 32)**. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/agente-redutor-liquido-automotivo-arla-32>>. Acesso em: 18/10/2021.

AUTOMOTIVA, C.-T. **Válvula EGR: entenda como ela diminui a emissão de poluentes**. Disponível em: <<https://chiptronic.com.br/blog/valvula-egr-entenda-como-ela-diminui-emissao-de-poluentes>>. Acesso em: 18/10/2021.

AUTOMÓVIL, B. **Injeção direta de gasolina desenvolvida pela Bosch | Bosch Automóvil**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-ZEpKKHgn38>>. Acesso em: 07/10/2021.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. [s.l.] Blucher, 2005.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna - Vol. 1**. [s.l.] BLUCHER, 2018.

COELHO, P. **Chuva Ácida: Causas, Consequências e Medidas de Prevenção**. 2013.

DA SILVA, C. T. **Introdução ao gerenciamento eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto**. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/motores-de-combustao-interna-ciclo-otto/>>. Acesso em: 15/10/2021.

DALLMANN, T.; FAÇANHA., C. **INTERNATIONAL COMPARISON OF BRAZILIAN REGULATORY STANDARDS FOR LIGHT-DUTY VEHICLE EMISSIONS**. [s.l.] ICCT, 2017.

BREATHE. **Dióxido de Enxofre SO₂ - Equipamentos para Proteção Respiratória**. Disponível em: <<https://protecaorespiratoria.com/dioxido-de-enxofre-so2/>>. Acesso em: 18/10/2021.

ECYCLE, E. **Conheça os perigos do material particulado**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/material-particulado>>. Acesso em: 07/10/2021.

ICCT. **International comparison of Brazilian regulatory standards for light-duty vehicle emissions**. Disponível em: <<https://theicct.org/publications/international-comparison-brazilian-regulatory-standards-light-duty-vehicle-emissions>>. Acesso em: 27/11/21.

CETESB. **Laboratório de Emissão Veicular**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/laboratorio-de-emissao-veicular/>>. Acesso em: 23/11/2021.

VOLKSWAGEN. **Manual técnico Volkswagen**. [s.l.] Volkswagen, 2012.

MATTOS, A. P. **Estudo do desempenho de um motor turbo alimentado a etanol empregando EGR para redução de emissões de NO_x e controle de detonação. CAMPINAS 2018**. [s.l.] UNICAMP, 2018.

MECÂNICO, O. **Como funciona o sistema MultiAir usado na Fiat Toro?** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YrTTI5OZcC0>>. Acesso em: 25/05/2022.

IBAMA. **Programa de controle de emissões veiculares (Proconve)**. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 18/10/2021.

COMISSÃO. **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)**. . [s.l: s.n.].

SNAP-ON. **Scanners**. Disponível em: <<https://br.sun-workshopsolutions.com/pt-br/p/pdl-5600>>. Acesso em: 07/02/2022.

SINDIREPA, M. T. **Monitor do Sistema de Comando Variável VVT em conjunto com o sistema EGR**Sindirepa MTwebwolf, , 22 jan. 2019. Disponível em: <<https://sindirepamt.com.br/monitor-do-sistema-de-comando-variavel-vvt-em-conjunto-com-o-sistema-egr-2/>>. Acesso em: 7 /05/2022

INMETRO. **Veículos Automotivos (PBE veicular)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>>. Acesso em: 20/05/2022.

VILAR, L. H. C. et al. **ESTUDO DAS EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO EM VEÍCULO LEVE COM MOTOR CICLO OTTO DE INJEÇÃO DIRETA FLEX FUEL** Luiz. [s.l.] SENAI-PR ; Institutos Lactec; Universidade Federal do Paraná;, 2015.