

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**MOTORES A COMBUSTÃO CICLO OTTO COM
TURBOCOMPRESSOR, SUA EFICIÊNCIA E A
TENDÊNCIA ATUAL DE DOWNSIZING**

Angelo de Almeida Belotti

Orientador: Prof. Me. Sylvio Magrani

**Rio de Janeiro
Fevereiro de 2022**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**MOTORES A COMBUSTÃO CICLO OTTO COM
TURBOCOMPRESSOR, SUA EFICIÊNCIA E A
TENDÊNCIA ATUAL DE DOWNSIZING**

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Angelo de Almeida Belotti

Orientador: Prof. Me. Sylvio Magrani

**Rio de Janeiro
Fevereiro de 2022**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B452 Belotti, Angelo de Almeida
Motores a combustão ciclo Otto com turbocompressor, sua
eficiência e a tendência atual de downsizing / Angelo de Almeida
Belotti – 2022.
58f.: il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2022.
Bibliografia: f. 54-58
Orientador: Sylvio Jose Gomes Magrani

1. Engenharia mecânica. 2. Motores de combustão
interna. 3. Automóveis – Motores – Turbocompressores.
I. Magrani, Sylvio Jose Gomes (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

RESUMO

O trabalho proposto visa o estudo das atuais tecnologias de redução de tamanho dos motores a combustão, o *downsizing*, empregando os turbocompressores e injeção eletrônica, focando no ciclo Otto. Como abordagem inicial são apresentados os dados históricos das principais tecnologias utilizadas, assim como os elementos básicos de funcionamento de um motor e do turbocompressor, seus ciclos e a motivação para o seu emprego nas últimas décadas. É feita também uma análise das emissões de poluentes no Brasil e no mundo, abrangendo os principais elementos nocivos ao meio ambiente e a saúde. Por fim, é apresentado o estudo do *downsizing*, objetivando a melhoria de consumo, aumento de eficiência e redução de emissões de poluentes.

Palavras-chave: Turbocompressor. Emissões. *Downsizing*. Eficiência. Motor. Combustão. Interna. Consumo. Desempenho.

ABSTRACT

The proposed work aims to study the current technologies for reducing the combustion engines size, the downsizing, by using turbochargers and electronic fuel injection, focusing on the Otto cycle engines. As an initial approach, the general data of the main technologies used are presented as well as the basic engine and turbocharger components and the motivation for its use in the last decades. An analysis of pollutant emissions in Brazil and in the world is also presented, covering the main elements, harmful to the environment and human health. Finally, the downsizing study, aiming at improving consumption, increasing efficiency and reducing pollutant emissions.

Keywords: Turbocharger. Emissions. Downzising. Efficiency. Engine. Combustion. Internal. Consumption. Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclos real e ideal dos motores de ignição por centelha e seus diagramas P-v.....	5
Figura 2 - Diagramas do ciclo dos motores Diesel.....	6
Figura 3 - Ciclo Otto 2 Tempos.	8
Figura 4 - Frota veicular por combustível.	10
Figura 5 - Ciclo Otto 4 Tempos.	11
Figura 6 - Ciclo Diesel 4 Tempos.	12
Figura 7 - Participação dos tipos de ignição no mercado por ano.	14
Figura 8 - Sistema de injeção monoponto.	15
Figura 9 - Sistema de injeção multiponto.....	16
Figura 10 - Comparativo entre os sistemas de injeção eletrônica para motores ciclo Otto.....	17
Figura 11 - Funcionamento da injeção direta.	17
Figura 12 - Funcionamento de um compressor mecânico tipo Roots.....	20
Figura 13 - Funcionamento de um turbocompressor.....	21
Figura 14 - Distribuição de emissões de CO2 no setor de transporte.....	23
Figura 15 - Índice de emissão de CO2 por combustíveis fósseis, por país.	24
Figura 16 - Índice de emissão de CO2 no transporte de 2000 a 2070.....	25
Figura 17 - Índice de emissão de CO2 no Brasil por combustível.	26
Figura 18 - Índice de emissões de CO2 no Brasil por categoria.	27
Figura 19 - Categorias de veículos e a emissão de CO.....	30
Figura 20 - Categorias de veículos e a emissão de NOx.....	31
Figura 21 - Categorias de veículos e a emissão de HC.....	32
Figura 22 - Representação dos casos responsáveis pelas emissões de HC.....	32
Figura 23 - Categorias de veículos e a emissão de SOx.....	33
Figura 24 - Categorias de veículos e a emissão de MP.....	34
Figura 25 - Emissões de CO2 e economia de combustível ao longo das décadas.....	35
Figura 26 - Representação das mudanças de volume, consumo e potência específica.....	36
Figura 27 - Esquema de um turbocompressor com intercooler.	38

Figura 28 - Válvula wastegate (alívio de pressão).	39
Figura 29 - Corte e componentes da válvula wastegate.	39
Figura 30 - Válvula de prioridade (Blow-off).	40
Figura 31 - Turbina com capa de isolamento térmico.	41
Figura 32 - Configuração de um motor do tipo Twin-turbo.	42
Figura 33 - O turbocompressor pulsativo (Twin-scroll).	43
Figura 34 - Turbo de geometria variável (VGT).	44
Figura 35 - Motor Audi com compressor elétrico.	45
Figura 36 - Ciclo de condução IC19.	48
Figura 37 - Ciclo de condução MEC01.	48
Figura 38 - Ciclo de condução NEDC.	49
Figura 39 – Tecnologias mais utilizadas pelos fabricantes de veículos no ano de 2020.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Os poluentes e seus efeitos nocivos.....	29
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens dos tipos de turbocompressores.	46
Quadro 3 - Especificações dos veículos utilizados nos testes.....	47
Quadro 4 - Resultados do downsizing com turbocompressor.	50
Quadro 5 - Comparativo entre motores aspirados e com turbocompressor (T ao lado da cilindrada).....	52

LISTA DE SIGLAS

C	Carbono
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Água
HC	Hidrocarbonetos
MP	Material particulado
NO _x	Óxidos de nitrogênio
NMHC	hidrocarbonetos não metano
O ₂	Oxigênio
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
RCHO	Aldeídos
SO _x	Óxidos de enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 CICLO TÉRMICO	4
2.2 OS MOTORES, SUAS CLASSIFICAÇÕES E SEU FUNCIONAMENTO	7
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MOTORES QUANTO AO CICLO DE OPERAÇÃO	8
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES SEGUNDO A FORMA DE IGNIÇÃO	9
2.4.1 Motores de ignição por faísca ou ciclo Otto	10
2.4.2 Motores de ignição por compressão ou ciclo Diesel	11
2.5 A ADMISSÃO NO CICLO OTTO	13
2.6 A SOBREALIMENTAÇÃO	18
2.6.1 Sobrealimentação por compressão mecânica	19
2.6.2 Sobrealimentação por turbocompressor	20
3 AS EMISSÕES DE POLUENTES	23
3.1 A EMISSÃO RESULTANTE DA COMBUSTÃO.....	27
3.1.1 O monóxido de carbono (CO).....	29
3.1.2 Os óxidos de nitrogênio (NOx).....	30
3.1.3 Os hidrocarbonetos (HC).....	31
3.1.4 Os óxidos de enxofre (SOx).....	33
3.1.5 O material particulado (MP)	34
4 O <i>DOWNSIZING</i> DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	35

4.1 O TURBO APLICADO NA TÉCNICA DO DOWNSIZING	36
4.1.1 O turbocompressor e seus componentes	37
4.1.2 Tipos de turbocompressor	41
4.2 COMPARATIVO DE EFICIÊNCIA E EMISSÃO ENTRE MOTORES TURBO E ASPIRADOS EM UMA SIMULAÇÃO.....	46
4.2.1 Comparativo de motores.....	51
5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com a grande tendência mundial de utilização de novas fontes energéticas mais limpas, a fim de reduzir os impactos ambientais, vem se desenvolvendo novas tecnologias no setor industrial para reduzir o uso de combustíveis fósseis, cuja emissão ao longo dos séculos se mostrou prejudicial ao planeta em uma escala crescente.

Um dos maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, em torno de 25%, é o setor automotivo, cuja frota produzida para mover o mundo resultou em uma utilização desenfreada de tais combustíveis. Tal problema foi se agravando ao longo das últimas décadas, impulsionado pelo crescimento das cidades e a larga escala de utilização de motores grandes, pouco eficientes e de alto consumo.

Podem ser empregadas diversas modificações para a redução do consumo de combustível, como a instalação e programação de um sistema de injeção e gerenciamento eletrônico de combustível, a redução do número de cilindros e a utilização de um sistema de injeção direta de combustível. Além disso, ainda existe o sistema híbrido, com auxílio de um motor elétrico, onde o motor à combustão serve tanto para a propulsão, quanto para geração de energia a ser transferida às baterias e aos motores elétricos.

Uma outra solução possível é o *downsizing* dos motores a combustão. *Downsizing* é uma das técnicas propostas pela engenharia automobilística contemporânea, possuindo como meta a construção de um motor mais eficiente possível. Assim, é possível a construção de motores menores e com menor índice de emissões, mantendo o mesmo nível de potência de motores de maior volume.

1.1 MOTIVAÇÃO

As mudanças climáticas que vêm ocorrendo impulsionaram estudos que concluíram a necessidade de reduzir as emissões. Novas leis de proteção ambiental e tratados obrigaram o setor industrial a se adaptar à nova realidade em que o ser humano se encontra.

No setor automobilístico existe a tendência de utilizar a força motriz proveniente de motores elétricos, que atualmente ainda estão limitados quanto ao custo e armazenamento da energia. Veículos híbridos que se utilizam dos ciclos térmicos aliados ao elétrico, já são realidade, porém ainda pouco difundidos em países menos desenvolvidos devido ao seu alto custo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa baseia-se na solução mais imediata encontrada, que foi a utilização de motores de volume reduzido, aliado ao turbocompressor e às novas tecnologias de injeção direta de combustíveis, provando ser uma eficiente alternativa com equilíbrio entre custo e manutenção até que as outras tecnologias possam se desenvolver e se difundir ainda mais.

Baseado nisso, o trabalho visa abordar o funcionamento e utilização de motores com turbocompressor da atual geração, que visa o aumento da eficiência e redução de emissões através do downsizing, pensando principalmente no mercado nacional, que ainda se encontra dependente em larga escala dos combustíveis fósseis para a movimentação de sua frota.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo neste trabalho é a análise de funcionamento de motores de volume reduzido aliados a utilização de turbocompressores, demonstrando sua eficiência em

relação ao de volume maior sem a utilização de tal sistema, visando sua aplicação no setor automotivo atual.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em cinco capítulos. Sendo o primeiro capítulo composto pela introdução do assunto, a motivação, a justificativa e os objetivos. O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, apresentando o funcionamento do ciclo Otto.

No terceiro capítulo são apresentados os tipos de motores e seus componentes. O quarto capítulo aborda a solução de *downsizing*, apresentando uma simulação feita em que se reduz o volume de alguns motores aspirados e se faz o uso de turbocompressores, comparando a eficiência, assim como o novo consumo e índice de emissões. Por fim, no quinto capítulo é apresentada a conclusão de todos os assuntos abordados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO TÉRMICO

Nikolaus Otto foi o pioneiro na construção do motor com ciclo de 4 tempos, trazendo grande progresso na produção de máquinas compactas e de maior rendimento (MARTINS, 2006).

Segundo Çengel (2019), o ciclo padrão a ar Otto é um ciclo ideal que se aproxima do motor alternativo de combustão interna de ignição por centelha. Devido à complexidade de obter uma análise quantitativa precisa quanto às propriedades dos gases dentro do cilindro de um motor real, o ciclo se baseia em algumas aproximações teóricas.

Para isso, algumas hipóteses são adotadas: O fluido ativo possui as mesmas propriedades do ar; o fluido ativo comporta-se sempre como um gás perfeito; o processo de combustão é alterado pela adição de uma fonte externa; o processo de exaustão é alterado por uma rejeição de calor, que restitui o fluido ativo ao seu estado inicial.

O ciclo Otto consiste em quatro processos internamente reversíveis. O processo de combustão ocorre dentro do cilindro, que necessita de duas revoluções completas para completar um ciclo. Na Figura 1 seguinte está descrito cada processo do ciclo em 4 tempos.

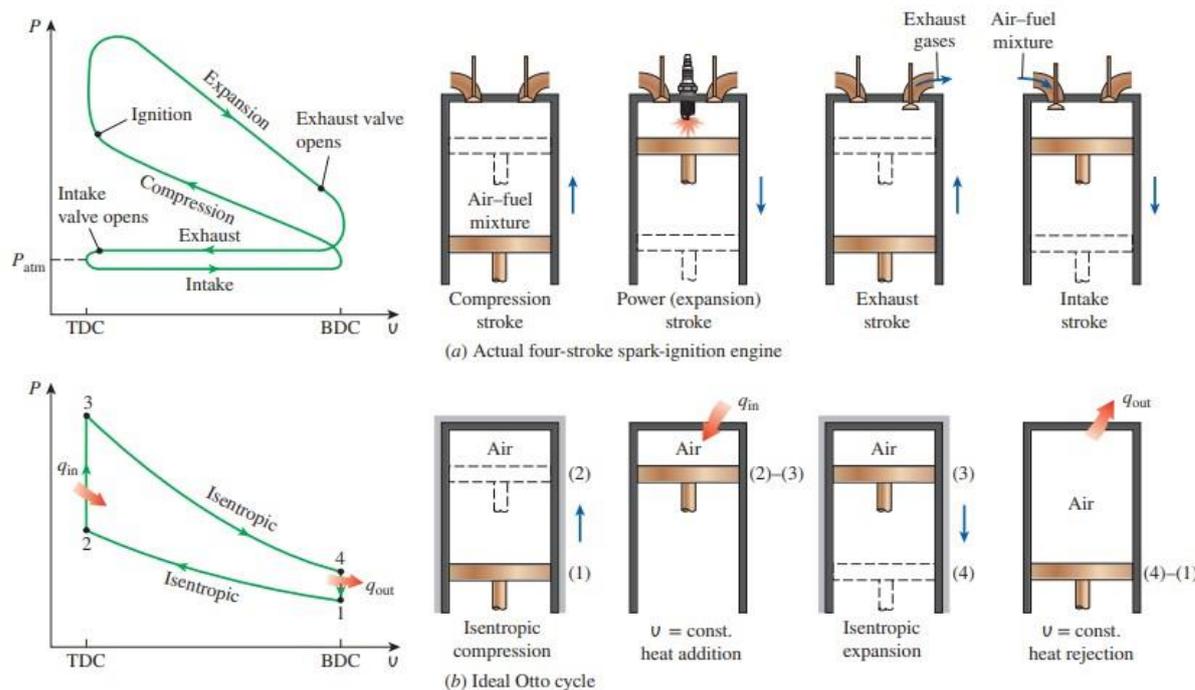


Figura 1 - Ciclos real e ideal dos motores de ignição por centelha e seus diagramas P-v.

Fonte: Çengel, 2019.

- 1-2 Compressão isentrópica
- 2-3 Fornecimento de calor a volume constante
- 3-4 Expansão isentrópica
- 4-1 Rejeição de calor a volume constante

O primeiro tempo, também conhecido como admissão, inicia no momento que o movimento do pistão do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI) provocando uma diferença de pressão que admite a mistura ar/combustível para dentro do cilindro através da abertura da válvula de admissão, que se fecha logo após completar o movimento.

Em seguida ocorre a compressão, onde a mistura de ar/combustível admitida é comprimida pelo movimento do pistão do PMI em direção ao PMS, aumentando sua temperatura e pressão.

Logo após ocorre a expansão. Na iminência do pistão alcançar o PMS, uma faísca provoca a ignição da mistura ar combustível, resultando num aumento abrupto de pressão, que empurra o pistão em direção ao PMI. Neste momento é realizado o trabalho positivo do motor.

Por fim ocorre a exaustão ou escape. O pistão desloca-se do PMI em direção ao PMS, expulsando os gases recém queimados através da válvula de exaustão e finalizando o ciclo completo. Após esse processo, o cilindro estará pronto para recomeçar o ciclo.

Segundo Brunetti (2012), o motor ciclo Diesel foi desenvolvido pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel em 1893 e se caracteriza pela ignição por compressão, onde o ar é comprimido sem mistura e quando o combustível é injetado dentro do cilindro, o mesmo se inflama espontaneamente. Os motores ciclo diesel se caracterizam também pelas altas taxas de compressão, em comparação aos motores ciclo Otto. O ciclo de um motor Diesel é demonstrado na Figura 2 a seguir.

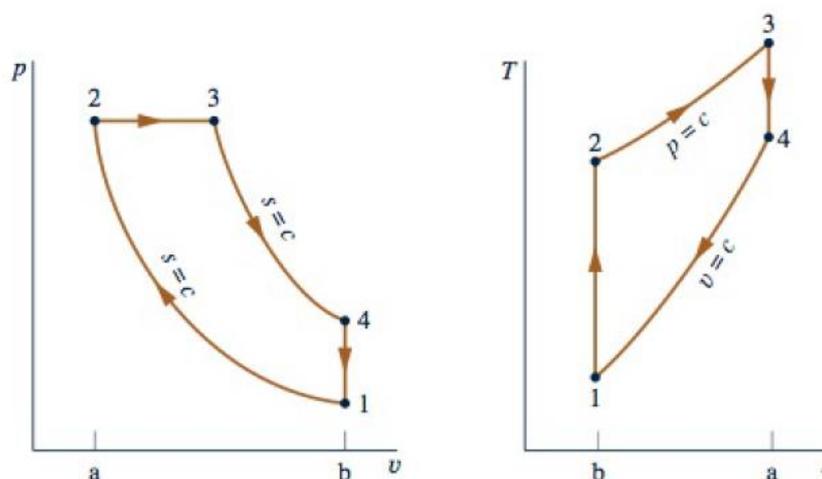


Figura 2 - Diagramas do ciclo dos motores Diesel.

Fonte: Çengel, 2019.

O ciclo de ar-padrão Diesel é um ciclo ideal que considera que a adição de calor ocorre durante um processo a pressão constante, que se inicia com o pistão no ponto morto superior. O ciclo Diesel é mostrado nos diagramas p-ve T-s na Fig. 9.5. O ciclo consiste em quatro processos internamente reversíveis em série. O primeiro

processo, do estado 1 ao estado 2, é o mesmo que no ciclo Otto: uma compressão isentrópica. Porém, o calor não é transferido para o fluido de trabalho a volume constante como no ciclo Otto. No ciclo Diesel, o calor é transferido para o fluido de trabalho a pressão constante. O Processo 2-3 também constitui a primeira parte do curso de potência. A expansão isentrópica do estado 3 para o estado 4 é o restante do curso de potência. Como no ciclo Otto, o ciclo é completado pelo Processo 4-1 a volume constante, no qual o calor é rejeitado pelo ar enquanto o pistão está no ponto morto inferior. Este processo substitui os processos de admissão e descarga do motor real.

Uma vez que o ciclo de ar-padrão Diesel é composto de processos internamente reversíveis, as áreas nos diagramas T-sep-v da Fig. 9.5 podem ser interpretadas como calor e trabalho, respectivamente. No diagrama T-s, a área 2-3-a-b-2 representa o calor fornecido por unidade de massa e a área 1-4-a-b-1 é o calor rejeitado por unidade de massa. No diagrama p-u, a área 1-2-a-b-1 é o trabalho fornecido por unidade de massa durante o processo de compressão.

2.2 OS MOTORES, SUAS CLASSIFICAÇÕES E SEU FUNCIONAMENTO

Os motores de combustão interna são classificados como máquinas térmicas, sendo estes, dispositivos que transformam energia térmica em trabalho. O calor pode ser obtido de diferentes fontes de combustão, pela queima do combustível, ou seja, a transformação da energia química em trabalho mecânico.

O trabalho é obtido por uma sequência de processos realizados numa substância denominada de fluido ativo. No caso do motor de combustão interna, o fluido ativo participa diretamente da combustão, sendo formado pela mistura de ar e combustível na entrada do volume de controle e produtos da combustão na saída.

Existem diversas classificações para os motores de combustão interna, sendo elas, motores alternativos, rotativos e de impulso. Os alternativos são os motores em que o trabalho é obtido pelo movimento alternativo de um êmbolo ou pistão, transformado este em rotação contínua por um sistema biela/manivela. Nos rotativos

o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação, como por exemplo, turbinas a gás e o motor Wankel. Motores de impulso geram trabalho pela força de propulsão gerada por gases expelidos em alta velocidade.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MOTORES QUANTO AO CICLO DE OPERAÇÃO

Ao se tratar dos motores alternativos existem duas classificações com relação ao ciclo de operação, podendo ser de dois ou quatro tempos. Nos motores de dois tempos o primeiro tempo pode ser definido supondo que o pistão esteja no PMS e a mistura comprimida, composta de ar, combustível e óleo lubrificante, ao haver centelhamento, inicia-se sua combustão, deslocando o pistão para baixo. Durante o deslocamento até o PMI, o conteúdo do cárter é comprimido. Em determinado ponto do deslocamento libera-se a passagem de escape, expelindo os gases da combustão e logo em seguida, pela janela de transferência, libera-se a passagem de nova mistura contida no cárter, terminando o ciclo, conforme a Figura 3 a seguir.

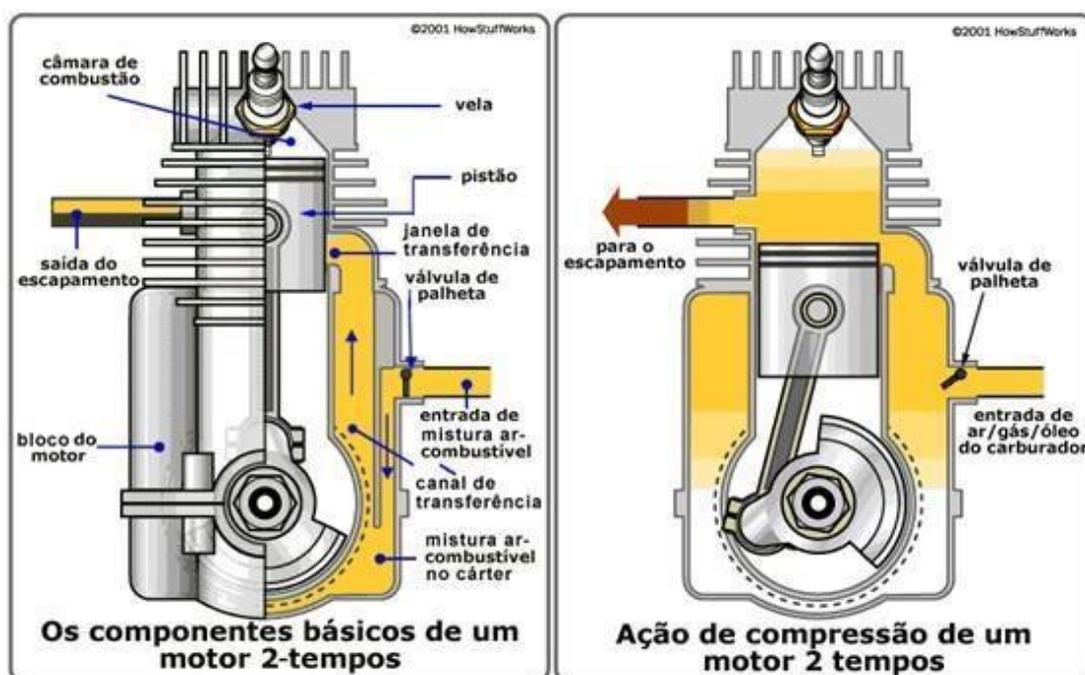


Figura 3 - Ciclo Otto 2 Tempos.

Fonte: ANTONIO GUILHERME, 2014.

O funcionamento dos motores quatro tempos do ciclo Otto é definido primeiramente pela admissão, em que o pistão se desloca do PMS para o PMI, admitindo a entrada da mistura ar-combustível através da válvula de admissão que se encontra aberta e preenchendo o cilindro.

Em seguida, no tempo de compressão a válvula de admissão é fechada e o pistão desloca-se do PMI ao PMS, comprimindo a mistura. A compressão deve ser elevada tal que se atinjam temperaturas elevadas o suficiente e conseqüentemente a maior facilidade de combustão da mistura.

No tempo de compressão, pouco antes de se atingir o PMS, há o

centelhamento que provoca a ignição da mistura, resultando em um grande aumento da pressão, que empurra o pistão para o PMI, à medida que os gases produzidos sofrem expansão.

Por fim, no tempo de escape, é aberta a válvula de escape e o pistão deslocase do PMI ao PMS jogando os gases para fora do cilindro, preparando para se iniciar um novo ciclo.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES SEGUNDO A FORMA DE IGNIÇÃO

Diante das inúmeras classificações que podem ser feitas quanto ao tipo de motores a combustão interna, a mais convencional e largamente utilizada é a classificação quanto ao tipo de ignição.

Segundo Brunetti (2012), a combustão é um processo químico exotérmico de oxidação de um combustível. É necessário que exista algum agente que reaja com o oxigênio do ar para que o combustível inicie a reação. A esse processo é dado o nome de ignição. Quanto à ignição, os motores alternativos são divididos em dois tipos fundamentais, ignição por faísca ou Otto e ignição espontânea ou Diesel.

Segundo estudo divulgado pela Sindipeças (2021), quase 90% da frota de veículos brasileiros são de motores do tipo ciclo Otto. Devido a este dado, o projeto

terá como foco o estudo de motores internos do tipo ciclo Otto. A Figura 4 a seguir demonstra a frota veicular por combustível.

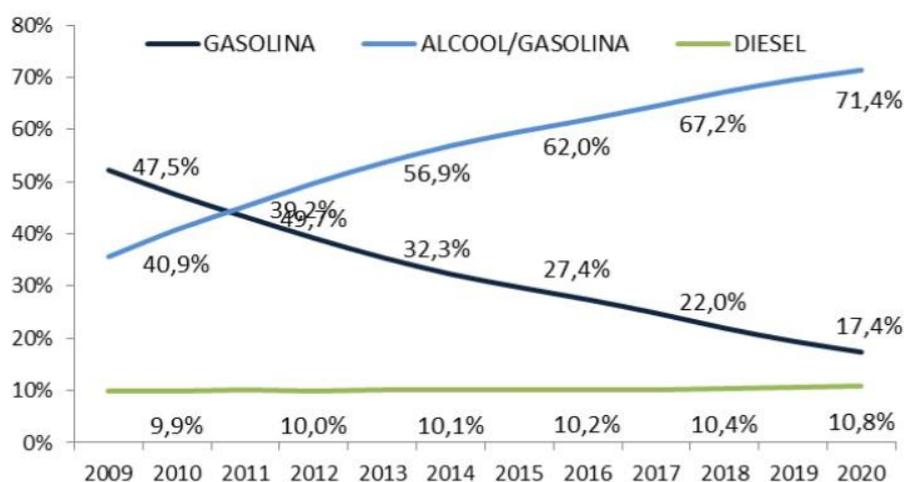


Figura 4 - Frota veicular por combustível.

Fonte: Sindipeças, 2021.

2.4.1 Motores de ignição por faísca ou ciclo Otto

Segundo Brunetti (2012) esse motor foi implementado pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto em 1876, tendo seu funcionamento por meio de centelhamento através de velas de ignição.

A mistura ar/combustível é admitida, em quantidade determinada antes ou, no interior dos cilindros, quando há um sistema de injeção direta de combustível, havendo então a detonação por uma faísca que ocorre entre os eletrodos da vela de ignição.

A Figura 5 abaixo demonstra o esquema de funcionamento de quatro tempos do ciclo Otto.

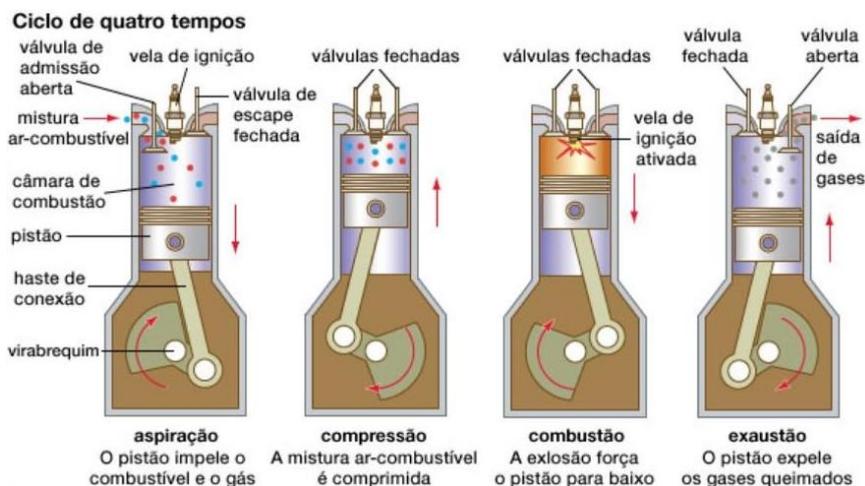


Figura 5 - Ciclo Otto 4 Tempos.

Fonte: Claudiu Varan – Enciclopédia Britannica, 2016.

2.4.2 Motores de ignição por compressão ou ciclo Diesel

De acordo com Brunetti (2012), este motor inventado por Rudolf Diesel em 1893, caracteriza-se por não possuir velas de centelha. A combustão ocorre por meio de compressão do ar pela força do pistão e posterior injeção do combustível na câmara, que se inflama instantaneamente.

O ciclo Diesel apresenta taxas de compressão superiores às do ciclo Otto. A Figura 6 abaixo demonstra os ciclos de operação de um motor Diesel de quatro tempos.

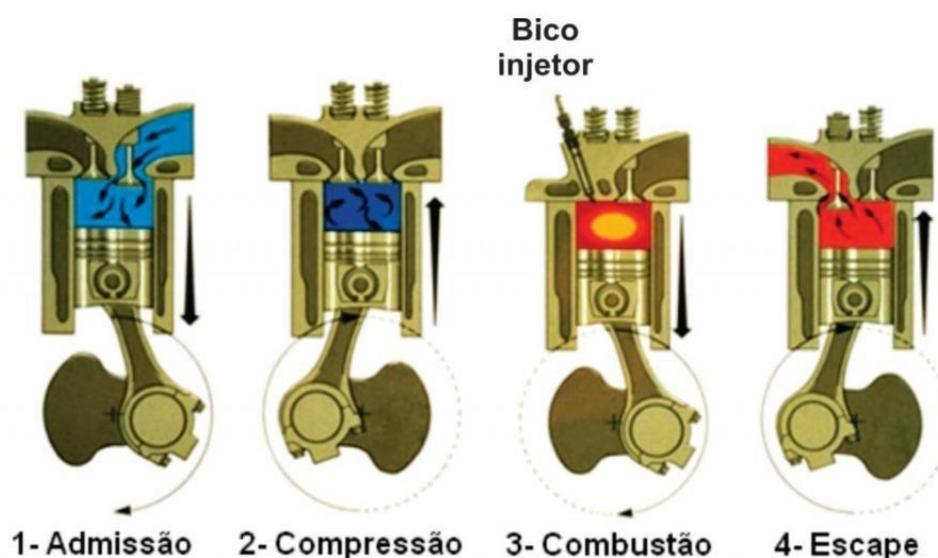


Figura 6 - Ciclo Diesel 4 Tempos.

Fonte: AutoTalk Brasil, 2019.

Neste ciclo os tempos ocorrem de maneira semelhante ao ciclo Otto 4 tempos, salvo algumas diferenças. Inicialmente, o pistão se movimenta do PMS para o PMI, com a válvula de admissão aberta, fazendo com que haja uma diferença de pressão no interior do cilindro e havendo a aspiração do ar para dentro do cilindro.

No segundo tempo, o êmbolo se movimenta do PMI ao PMS e comprime o ar do cilindro, aumentando a temperatura do ar e a pressão no interior do cilindro.

Na terceira fase o pistão se aproxima do PMS e o combustível é pulverizado pelo bico injetor, misturando-se com o ar quente resultando na combustão espontânea da mistura. A expansão dos gases dentro do cilindro empurra o pistão em movimento descendente gerando torque.

No último tempo ocorre a exaustão, logo antes do pistão atingir o PMI, a válvula de escape se abre e os gases começam a sair do cilindro, diminuindo a pressão interna no mesmo. Quando o pistão se movimenta em direção ao PMS o restante dos gases é expelido. Ao chegar no PMS, o ciclo se reinicia, com o tempo de admissão.

2.5 A ADMISSÃO NO CICLO OTTO

Ao longo dos anos os motores de combustão interna foram sofrendo diversas mudanças em seus sistemas de funcionamento. Com isso, a complexidade dos motores foi aumentando, sendo eles compostos por diversos sub-sistemas.

O sistema de alimentação de combustível foi um dos que sofreu grandes evoluções. Ele é responsável por levar o combustível necessário à combustão ao interior dos cilindros, nas devidas proporções.

Os primeiros motores utilizavam o carburador como componente responsável pela dosagem de combustível para a queima. Nesse sistema, a admissão de combustível pelo cilindro era provida pelo vácuo formado pelo pistão ao descer.

O carburador era o principal componente do sistema de alimentação, pois era responsável por regular a mistura ar/combustível nas proporções necessárias para o funcionamento do motor. Este componente, por ser mais antigo, era menos eficiente, o que resultava em um consumo maior de combustível e em uma maior emissão de poluentes.

Os carburadores foram substituídos ao longo do tempo por sistemas de injeção de combustível. Inicialmente, os primeiros sistemas foram os de injeção de corpo de borboleta (TBI), em seguida, sistemas de injeção de combustível no coletor de admissão (PFI) e, mais recentemente, a injeção direta de combustível (GDI), conforme mostrado na Figura 7 abaixo.

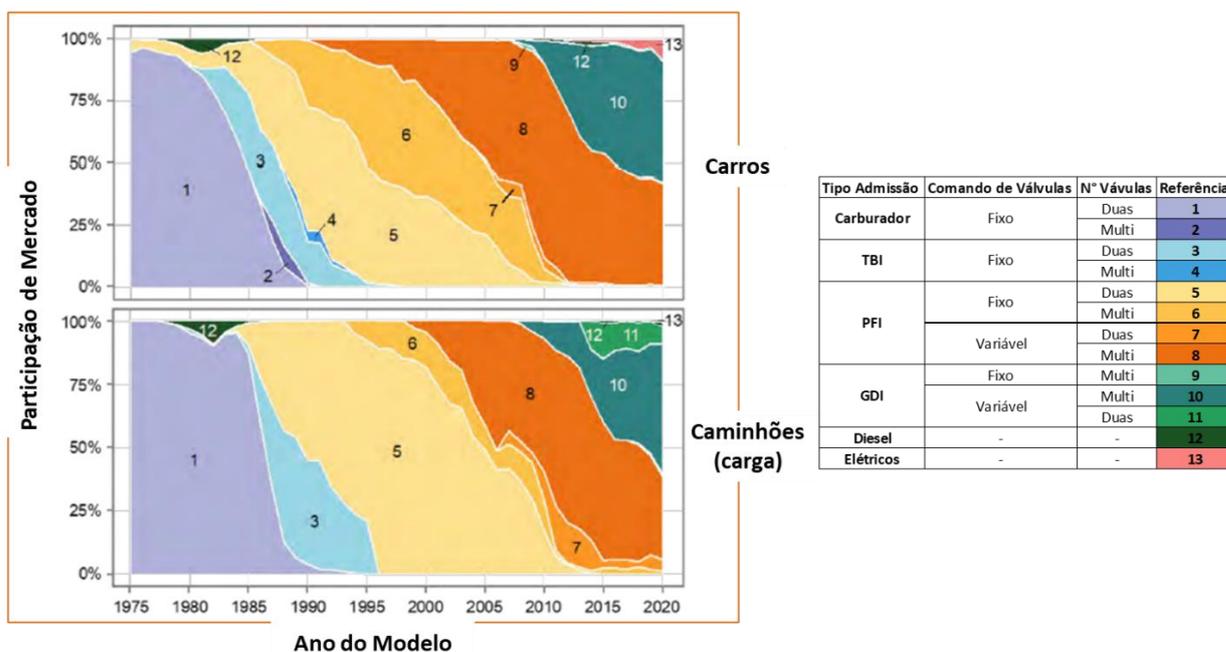


Figura 7 - Participação dos tipos de ignição no mercado por ano.

Fonte: EPA, 2020.

De acordo com Hurtado e Souza (2012), em 1988 surgiu o sistema de injeção eletrônica analógica, composto por um bico injetor, que funcionava com parâmetros fixos em termos de dosagem de combustível, resultando em um ganho de potência e torque significativo em um mesmo motor, em que somente foi alterado o sistema de alimentação, substituindo o carburador.

Em decorrência desta melhoria, o sistema se mostrou mais eficiente, reduzindo os índices de emissões em relação ao mesmo motor que utilizava o carburador. Este sistema, que usava apenas um bico injetor, era conhecido como Injeção Monoponto, demonstrado a seguir na Figura 8.

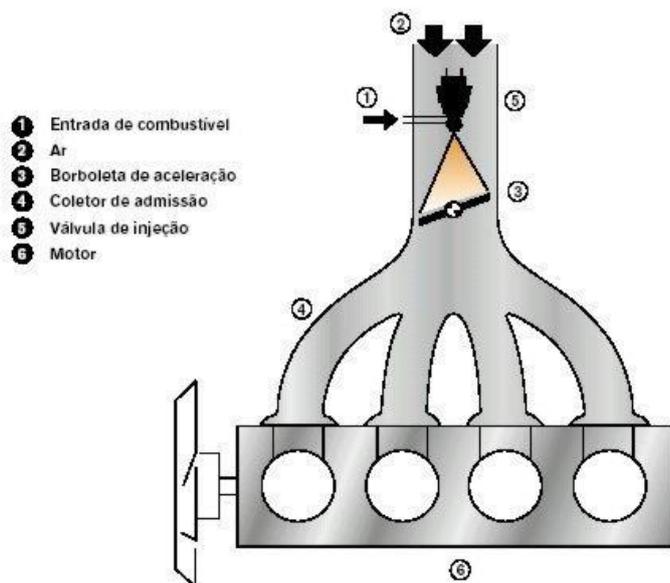


Figura 8 - Sistema de injeção monoponto.

Fonte: Auto Entusiastas Classic, 2012.

Segundo Hurtado e Souza (2012), já na década de 1990, a Bosch introduziu a injeção monoponto eletrônica que funcionava de forma semelhante a analógica, porém permitindo o gerenciamento dos sistemas de injeção e de ignição de combustível. O novo sistema possuía também a função de diagnóstico de falhas de funcionamento, com a correção da mistura ar/combustível através de sensores de oxigênio posicionados logo após o coletor de escape.

Posteriormente foi desenvolvido o sistema de injeção multiponto, que pode ser tratado como um sistema monoponto eletrônico com mais de um bico injetor. Estes novos recursos fizeram com que as emissões de poluentes fossem consideravelmente reduzidas, pois a demanda do combustível passou a ser suprida de forma mais precisa, em todas as faixas de rotação dos motores, tornando o sistema ainda mais eficiente.

A Figura 9 a seguir demonstra o sistema multiponto.

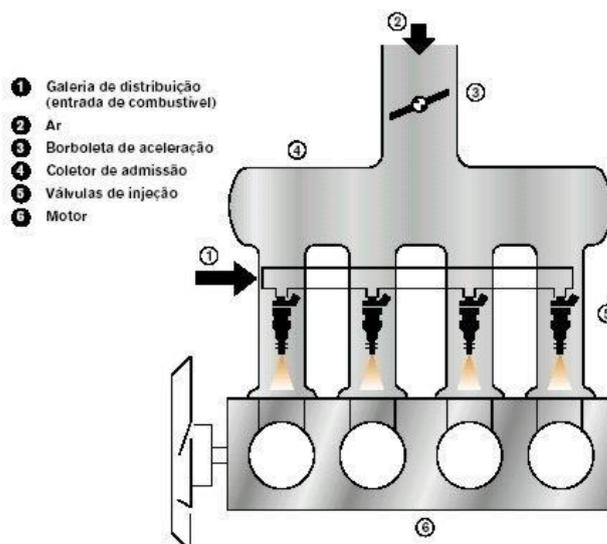


Figura 9 - Sistema de injeção multiponto.

Fonte: Auto Entusiastas Classic, 2012.

Atualmente, o sistema mais eficiente de alimentação do ciclo Otto, é a injeção direta. Anteriormente, ele era utilizado em veículos a Diesel, assim como em motores ciclo Otto de alta performance, sendo os altos custos um fator impeditivo para seu uso em larga escala. Com a necessidade de motores mais limpos e eficientes, essa tecnologia começou a ser empregada nos motores modernos, aliada a módulos eletrônicos.

No sistema de injeção direta os bicos injetores ficam posicionados dentro dos cilindros, evitando perdas e injetando o combustível no momento exato, tornando possível todo o seu aproveitamento e tendo como vantagem a utilização de elevadas taxas de compressão, assim como a redução das perdas por bombeamento.

De acordo com Brunetti (2012), existe um aumento da eficiência térmica relacionado a maior taxa de compressão no ciclo Otto. A adoção da injeção direta permite mais de uma injeção de combustível no mesmo ciclo de combustão, resultando em uma menor temperatura no interior da câmara de combustão. Este fator permite a adoção de taxas de compressão mais elevadas e uma queima mais eficiente do combustível injetado.

Além disso, a injeção direta possui a vantagem de um controle mais preciso da mistura de ar/combustível. Isso deve-se a não haver mais o problema de condensação do combustível nas paredes internas do coletor de admissão, do cabeçote e das válvulas, provocado pela distância entre os bicos e o cabeçote.

A Figura 10 abaixo apresenta um comparativo entre os sistemas de injeção, assim como o detalhamento da injeção direta.

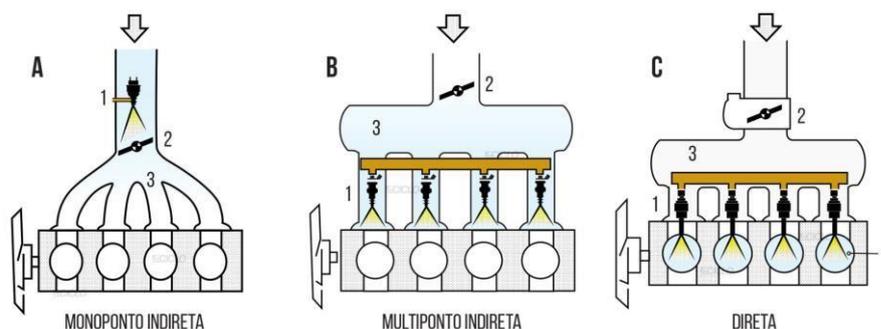


Figura 10 - Comparativo entre os sistemas de injeção eletrônica para motores ciclo Otto.

Fonte: Auto Entusiastas Classic, 2012.

A Figura 11 abaixo representa o momento da injeção direta de combustível na câmara de combustão.



Figura 11 - Funcionamento da injeção direta.

Fonte: Bosch Mobility Solutions, 2013.

Os injetores de combustível, posicionados dentro da câmara de combustão, precisam suportar as altas pressões e temperaturas do interior da mesma, portanto

sendo necessário que possuam uma pressão de combustível muito maior do que os bicos convencionais dos outros sistemas de injeção.

A adoção da injeção direta de combustível permite também o controle da temperatura de escapamento por meio da pós-injeção no ciclo de escapamento com a válvula de escape aberta, possibilitando um controle muito mais efetivo do acionamento dos turbocompressores (Brunetti, 2012).

Ainda segundo Brunetti (2012), como resultado, os ganhos em termos de economia giram em torno de 15% em relação ao sistema indireto em um motor de mesma cilindrada. Os ganhos de desempenho ficam em média 5% superiores quando comparados aos valores da convencional. A maior desvantagem do sistema é o seu custo, ainda alto para os padrões atuais (Kelley Blue Book, 2018).

2.6 A SOBREALIMENTAÇÃO

A sobrealimentação é um método utilizado para aumento da eficiência volumétrica dos motores a combustão. Isto ocorre através do aumento da densidade do ar por uma entrada forçada dentro da câmara de combustão, ao invés da aspiração natural do sistema.

De acordo com o fabricante BorgWarner, o turbocompressor teve sua primeira aplicação em veículos de grande porte, como locomotivas, embarcações e aviões, sendo esses últimos devido à perda de potência em elevadas altitudes, gerado pelo ar rarefeito. Então havia a necessidade de um equipamento que forçasse o ar para a alimentação do motor. A solução encontrada foi o turbocompressor.

De acordo com Mayer (2001), o *turbocharger* (turbocompressor) foi criado pelo engenheiro suíço chamado Alfred Büchi (1879-1959), chefe de pesquisa de motores diesel na Gebrüder Sulzer Motor, empresa suíça localizada em Winterthur, e que em 1905 patenteou o uso de um compressor acionado por gases de escapamento para forçar o ar em um motor de combustão interna e aumentar a produção de energia.

Essa tecnologia também foi utilizada ao longo dos anos em experimentos por uma série de fabricantes. Entretanto, a necessidade de metais nobres que resistissem à altas temperaturas e o elevado custo de tal sistema restringiram o emprego dos turbocompressores em veículos leves até há pouco tempo, quando surgiu a demanda por menor consumo de combustíveis e a redução dos gases nocivos para o planeta. A partir disso, teve início o *downsizing* de motores, com o uso dos turbocompressores em motores de menor cilindrada, sem perda de performance, comparado a motores de maior cilindrada.

Existem alguns métodos para a sobrealimentação e os mais utilizados nos motores do ciclo Otto são a compressão mecânica e o turbocompressor.

2.6.1 Sobrealimentação por compressão mecânica

Segundo Pinto, Valente (2012) o compressor mecânico já é usado há bastante tempo. A Volkswagen já utilizava um compressor centrífugo, criado na França em 1905. A Ford e a Toyota usaram um compressor do tipo Roots, inventado em 1854.

Ainda de acordo com Pinto, Valente (2012), os compressores mecânicos são acionados pelo virabrequim do motor, geralmente através de uma correia ou um conjunto de engrenagens, a uma velocidade de rotação de 10.000 a 15.000rpm. A pressão de sobrealimentação fica definida pela velocidade do motor, além de não ser necessária uma válvula de descarga como nos turbocompressores.

Este método de sobrealimentação possui como vantagem uma resposta mais rápida, não havendo o efeito "lag", ou seja, o atraso da potência e torque, que ocorre no turbo. Em contrapartida, a principal desvantagem do compressor é a perda de potência do motor devido ao seu acionamento mecânico direto através de polias, aumentando à medida que sobe o regime de revoluções do motor, não havendo um rendimento tão eficaz. Por isso, seu emprego é indicado para motores de maior cilindrada, que já possuem uma potência e torque mais elevados (Pinto, Valente, 2012).

Na Figura 12 seguir, temos a demonstração do funcionamento de um compressor mecânico do tipo Roots.

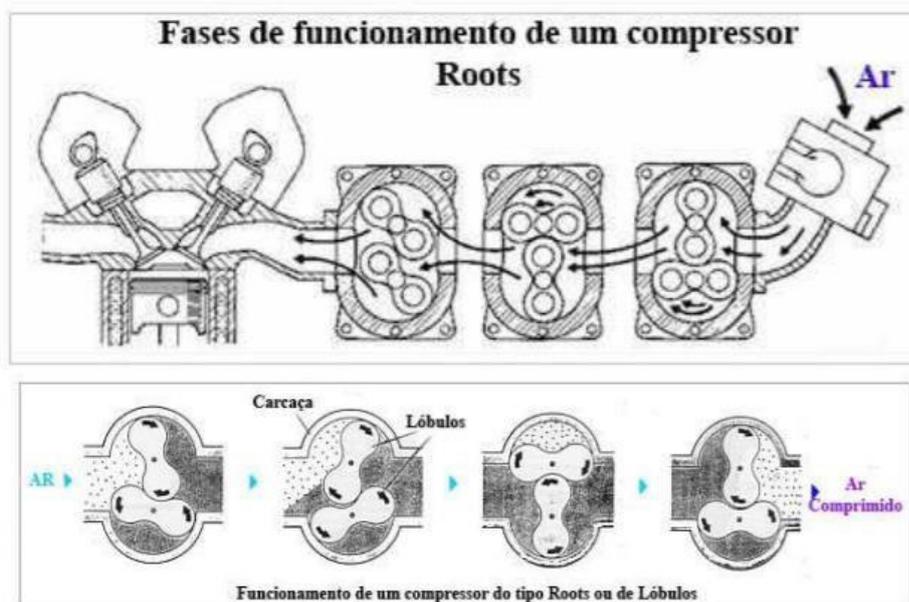


Figura 12 - Funcionamento de um compressor mecânico tipo Roots.

Fonte: Pinto, Valente, 2012.

2.6.2 Sobrealimentação por turbocompressor

De acordo com Brunetti (2012), em motores sobrealimentados, o torque de um motor relaciona-se diretamente à massa de ar que o mesmo consegue aspirar por ciclo de admissão, já que quanto maior a massa de ar admitida pelos cilindros, maior o aproveitamento da mistura. O turbocompressor tem a função de comprimir o ar antes dele ser admitido pelo motor. Assim, com um mesmo volume, é possível alocar muito mais massa de ar devido ao aumento da compressão.

O turbocompressor é movido por uma turbina, que por sua vez é acionada pelos gases de escape do motor. Com isso, os gases da queima colaboram para um aumento de sua eficiência térmica.

Um turbocompressor é composto basicamente por duas partes conectadas por um eixo, sendo uma delas a turbina ou caixa quente e o compressor ou caixa

fria, referentes à temperatura de trabalho às quais estão sujeitas. A turbina recebe os gases da queima da mistura ar/combustível que passam por suas palhetas em alta temperatura e giram o eixo ao qual o compressor está conectado. Este, por sua vez, ao ser acionado, admite o ar ambiente frio e o envia em direção ao coletor de admissão, com maior pressão. Na Figura 13 a seguir é mostrado o esquema básico de funcionamento do turbocompressor.

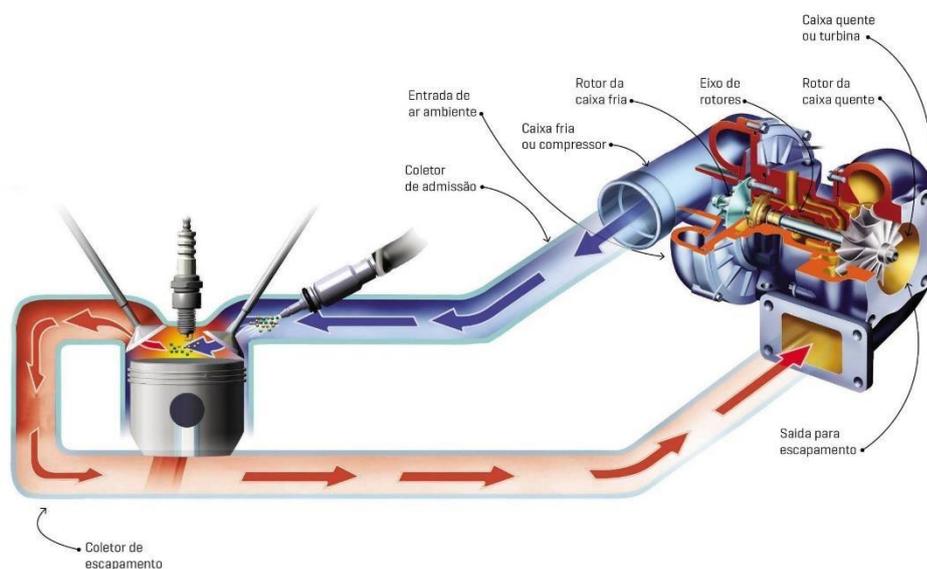


Figura 13 - Funcionamento de um turbocompressor.

Fonte: Quatro Rodas, 2016.

Uma das vantagens deste tipo de equipamento é a ausência da ligação mecânica com o motor, sem consumir potência do mesmo. Sendo assim, seu emprego é mais indicado para motores de menor cilindrada. Em contrapartida, a principal desvantagem é o fato de que tanto o compressor quanto a turbina possuem uma faixa ótima de operação, gerando uma compressão ineficiente até determinadas rotações, o que gera o “lag” da turbina.

O que define essa faixa de operação é o tamanho da caixa quente do turbocompressor. Quanto menor a turbina, mais rapidamente ela é preenchida pelos gases. O turbocompressor opera de maneira mais eficiente em médias e altas

rotações, quando ocorre a maior queima da mistura ar/combustível. A turboalimentação, ainda assim, é o método mais usual para se obter um aumento de potência e torque em motores que operam no ciclo Otto (Brunetti, 2012).

Ainda segundo Brunetti, a sobrealimentação de um motor ciclo Otto pode aumentar em até 20% a sua potência, com poucas modificações para o uso comum, sem comprometer o consumo. Sendo assim, a adoção de um turbocompressor em motores de baixa cilindrada permite que o mesmo tenha desempenho equivalente ao de cilindrada maior aspirado, contando ainda com consumo de combustível menor.

3 AS EMISSÕES DE POLUENTES

De acordo com Climate Watch Data (2018), o transporte é responsável por cerca de um quinto das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂).

Conforme dados da IEA (2018) sobre as emissões de CO₂, constatou-se que a produção de energia equivale a emissão de 33,5 bilhões de toneladas de CO₂, sendo o setor de transporte responsável por 8 bilhões, que resulta em 24% das emissões relacionadas com energia.

No Brasil as viagens rodoviárias correspondem a três quartos das emissões dos transportes. A maior parte é proveniente de automóveis ou ônibus, contribuindo com 45,1%. Já os caminhões que transportam cargas representam 29,4%. A Figura 14 abaixo representa as fontes de emissão de CO₂.

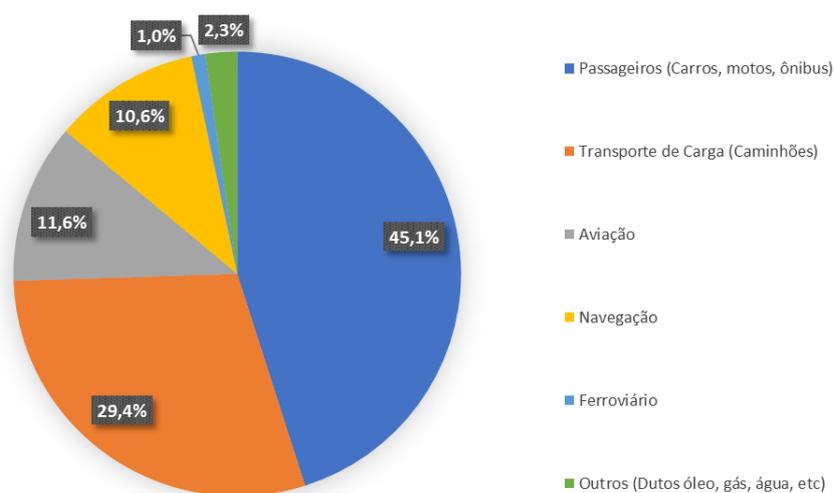


Figura 14 - Distribuição de emissões de CO₂ no setor de transporte.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Uma vez que todo o setor de transporte se encarrega de 21% das emissões totais e o transporte rodoviário é responsável por três quartos das emissões, o mesmo é responsável por 15% do total de emissões de CO₂. A Figura 15 a seguir

demonstra o índice de emissões de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis em alguns países incluindo o Brasil.

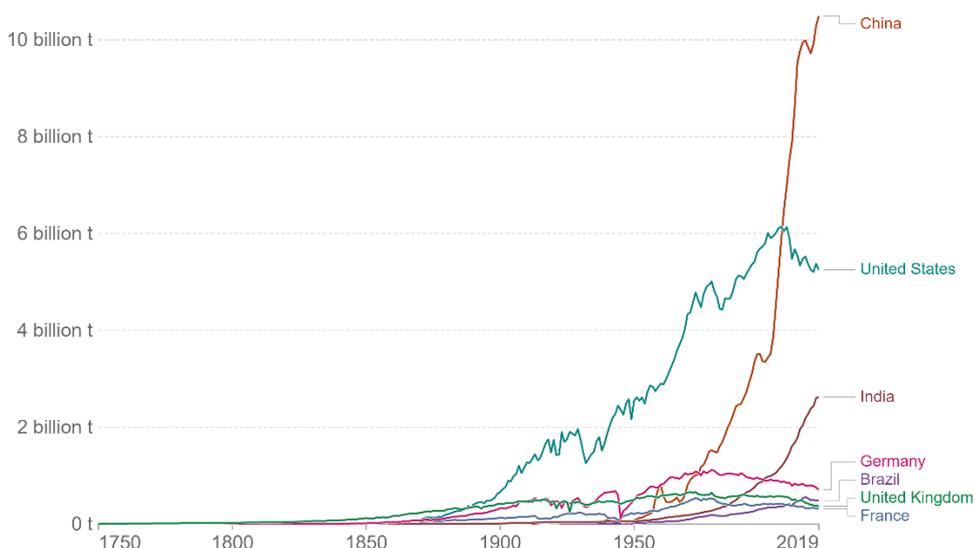


Figura 15 - Índice de emissão de CO₂ por combustíveis fósseis, por país.

Fonte: Our World In Data, 2019.

No gráfico acima, pode-se perceber que embora o Brasil emita grandes quantidades de CO₂, países como Estados Unidos e China são os maiores responsáveis globais.

Com as tecnologias de eletrificação e utilização de hidrogênio, alguns desses subsetores podem se descarbonizar em poucas décadas. Os indicadores da IEA mostrados na Figura 16 abaixo demonstram a eliminação gradual das emissões de motocicletas até 2040, ferroviário em 2050, caminhões pequenos em 2060, embora as emissões de carros e ônibus não sejam completamente eliminadas até 2070. Espera-se que em muitas regiões, incluindo a União Européia, Estados Unidos, China e Japão a fabricação o de veículos convencionais será eliminada já em 2040.

Alguns setores de transporte serão muito mais difíceis de descarbonizar, como ilustra a Figura 16 abaixo.

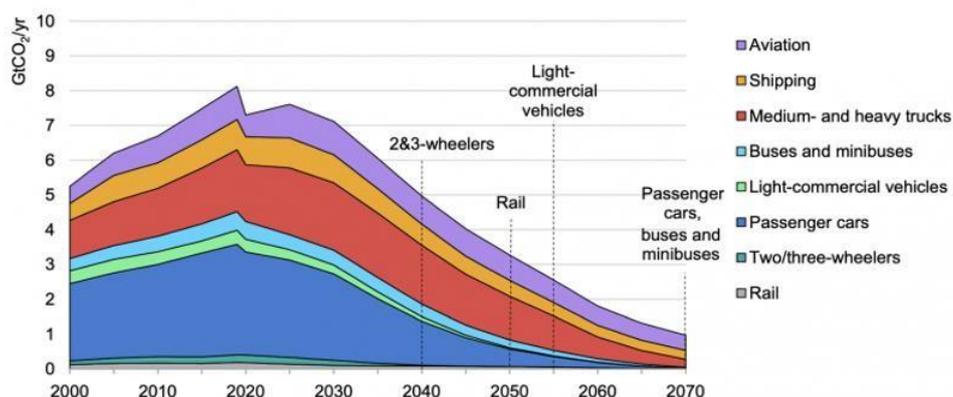


Figura 16 - Índice de emissão de CO2 no transporte de 2000 a 2070.

Fonte: IEA, 2020.

No gráfico acima, as linhas tracejadas indicam que nas próximas décadas os diversos tipos de transportes reduzirão drasticamente o consumo de combustíveis fósseis e, portanto, não contribuirão mais para a emissão de CO2.

Em um artigo publicado na Science, Steven Davis *et al.*, (2018), analisaram as opções em todos os setores para alcançar um sistema de energia com emissões líquidas zero. Foi destacado, que no frete rodoviário de longa distância de caminhões de grande porte, a aviação e o transporte marítimo como sendo particularmente difíceis de eliminar.

Apesar da queda de três quartos no cenário visualizado, as emissões desses subsetores ainda tornariam o transporte o maior contribuinte para as emissões relacionadas à energia em 2070. Para chegar a zero líquido para o setor de energia como um todo, essas emissões devem ser compensadas por 'emissões negativas' (por exemplo, a captura e armazenamento de carbono da bioenergia ou captura direta de ar) de outras partes do sistema de energia.

A Figura 17 abaixo mostra o índice de emissões de CO2 por combustível no Brasil.

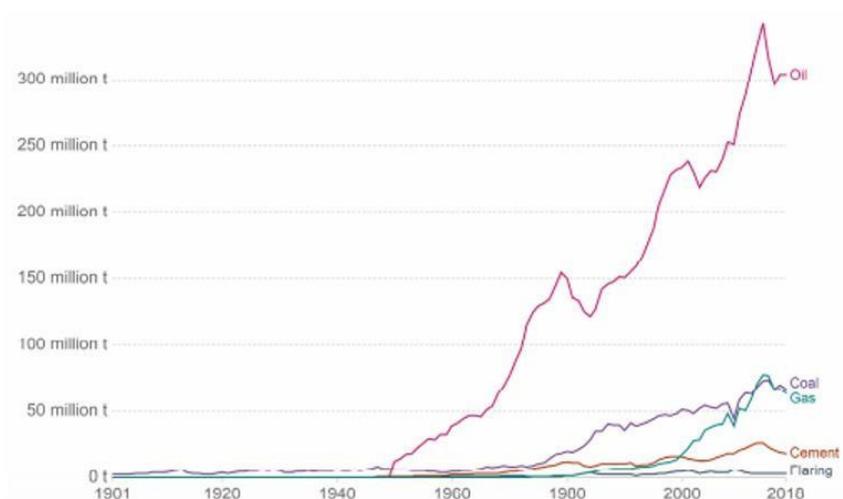


Figura 17 - Índice de emissão de CO2 no Brasil por combustível.

Fonte: Our World In Data, 2020.

O maior índice de emissões representado na Figura 16 é resultado da queima de combustíveis derivados do petróleo (Oil), seguido pelo carvão (Coal), em terceiro o gás, em quarto a indústria do cimento (Cement) e por fim o *flaring*, que é a queima do gás que sai junto ao petróleo e em seu processamento.

No Brasil, as emissões do setor de energia são provenientes da queima de combustíveis nos setores de transporte, da indústria e na geração de eletricidade. Existem ainda as causadas pelos gases de efeito estufa liberados durante a produção de combustíveis, como por exemplo, o metano na exploração de petróleo e do gás natural. (SEEG, 2021)

Na Figura 18 abaixo, são apresentados dados referentes a emissão de CO2 por categoria no Brasil. De acordo com o gráfico, pode-se constatar que a maior parte das emissões de CO2 no Brasil é proveniente da agropecuária, sendo o transporte o segundo maior responsável ao longo das últimas décadas.

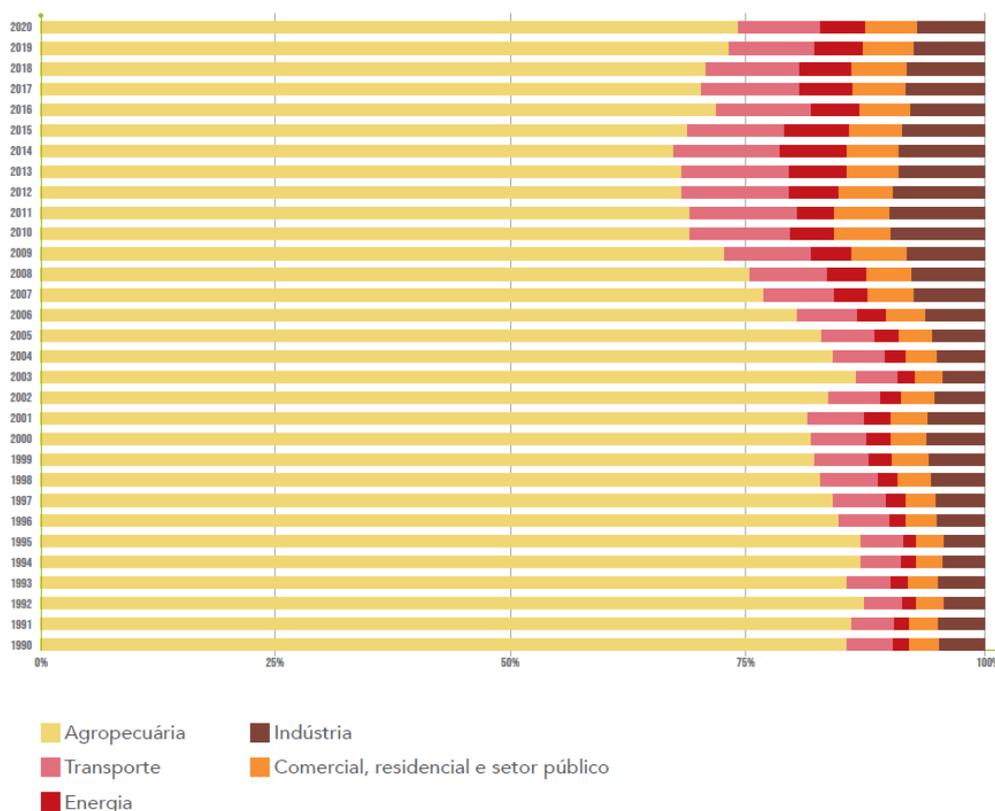


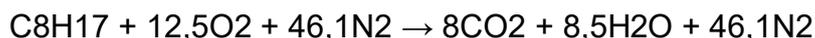
Figura 18 - Índice de emissões de CO2 no Brasil por categoria.

Fonte: SEEG, 2021.

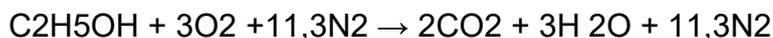
3.1 A EMISSÃO RESULTANTE DA COMBUSTÃO

Como visto anteriormente, o gás de exaustão do motor de combustão interna do ciclo Otto é composto pelos produtos da combustão da mistura ar/combustível. No Brasil, os combustíveis mais utilizados são o gasool, que é uma mistura de gasolina e etanol anidro, e o álcool hidratado, formado por 96% etanol e 4% água nos motores a gasolina.

Segundo GARCIA (1988), a gasolina é uma mistura de diversos hidrocarbonetos cujas propriedades foram ajustadas para fornecer as características operacionais exigidas. Já o etanol é uma substância pura. Tomando gasolina com uma composição média de hidrocarbonetos representada por C_8H_{17} , e assumindo que o volume de ar é composto de 21% O_2 e 79% N_2 , tem-se:



Já para o álcool etílico $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, tem-se:



Durante o processo de combustão, o carbono e o hidrogênio reagem com o oxigênio do ar, liberando energia e formando vários produtos de reação. No caso da combustão perfeita, o gás de exaustão seria composto apenas por dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), não totalmente prejudiciais ao meio ambiente, embora o CO_2 esteja relacionado à degradação da camada de ozônio.

Como a combustão não é perfeita, além de H_2O e CO_2 , o gás de exaustão também contém monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), que são ligações de oxigênio e nitrogênio, hidrocarbonetos não queimados (HC) e outros aldeídos derivados da combustão do álcool, óxidos de enxofre (SO_x) e materiais particulados (MP).

A mistura estequiométrica, razão ar-combustível para se ter combustão completa, é de 14,9:1, para a gasolina pura (aproximadamente 13:1 para o gasool) e 9:1 para o álcool etílico. Para se detectar o quanto a mistura ar-combustível desvia do valor estequiométrico, define-se o coeficiente, ou constante, de ar λ , como sendo a relação entre a mistura ar-combustível empregada e a mistura estequiométrica:

$$\lambda = \frac{\text{mistura ar/combustível empregada}}{\text{mistura ar/combustível estequiométrica}}$$

Desta forma, classifica-se a mistura como rica, caso $\lambda < 1,0$ (pouco ar), estequiométrica tendo $\lambda = 1,0$ e pobre com $\lambda > 1,0$ (excesso de ar).

O Quadro 1 abaixo apresenta os principais poluentes e seus impactos ambientais e na saúde.

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

Quadro 1 - Os poluentes e seus efeitos nocivos.

Fonte: IPEA, 2011.

A seguir serão comentadas as características e efeitos dos principais gases provenientes da emissão veicular.

3.1.1 O monóxido de carbono (CO)

Segundo Heywood (1988), a concentração de monóxido de carbono é proporcional à taxa da mistura ar/combustível. Sua produção ocorre na combustão incompleta do combustível, quando não existe oxigênio (O₂) em concentração suficiente para a queima de todo o carbono (C) contido nele.

O CO possui como características a ausência de cor e odor, além de ser tóxico ao organismo humano, interagindo com a hemoglobina do sangue e formando a carboemoglobina, o que diminui o transporte de O₂ para as células. A inalação prolongada de CO causa tonturas, dores de cabeça e pode até levar à morte. Concentrações maiores ainda podem causar doenças cardíacas e respiratórias. A

Figura 19 abaixo mostra a participação de cada tipo de veículo na emissão de CO, a título ilustrativo, referente a dados da CETESB no Estado de São Paulo.

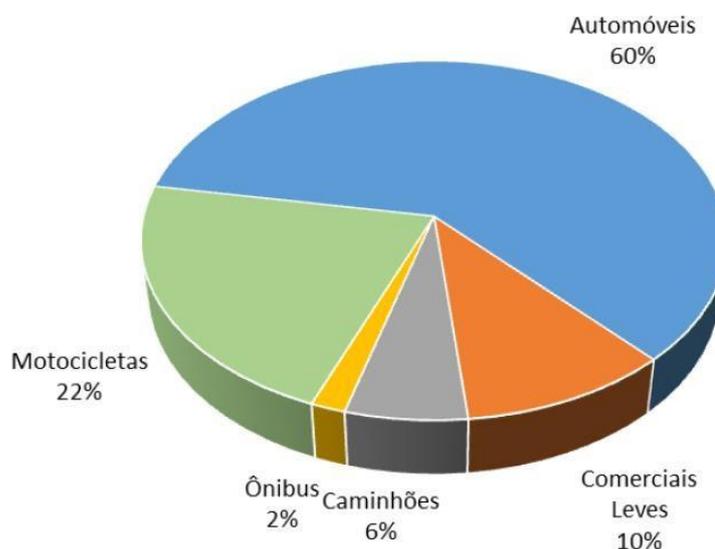


Figura 19 - Categorias de veículos e a emissão de CO.

Fonte: CETESB, 2019.

3.1.2 Os óxidos de nitrogênio (NOx)

De acordo com Heywood (1988), os óxidos de nitrogênio não são produzidos diretamente pela combustão, mas sim em decorrência dela. Uma reação ocorre entre o nitrogênio presente no ar atmosférico e os gases de temperatura elevada formados na combustão, o que origina tais óxidos.

Quando existe um baixo consumo de combustível, pouca quantidade de NOx é expelida. Em condições de mistura pobre (excesso de ar), tende a haver uma quantidade maior de NOx, em função do excesso de O₂.

O NOx é um dos responsáveis pela formação do ozônio e ainda reage com a amônia e outros elementos, resultando na formação do ácido nítrico, causador de problemas respiratórios. Além disso, contribui também para a precipitação da chuva ácida. A Figura 20 abaixo mostra a participação de cada tipo de veículo na emissão de Nox na frota de veículos do Estado de São Paulo.

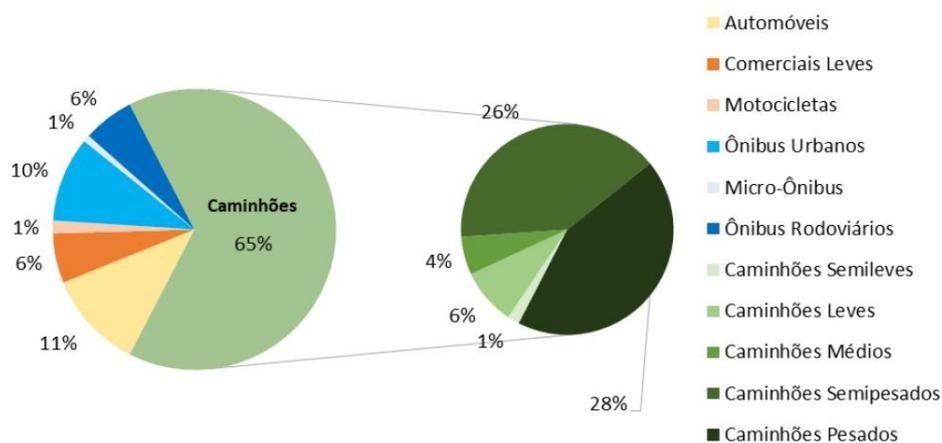


Figura 20 - Categorias de veículos e a emissão de NOx.

Fonte: CETESB, 2019.

3.1.3 Os hidrocarbonetos (HC)

Segundo Honeywood (1988), tais agentes são compostos orgânicos formados pela combustão incompleta do combustível ou pelos seus vapores. Quando ocorre uma mistura estequiométrica, ou no caso de uma mais rica (menor quantidade de ar), as emissões de HC são proporcionalmente equivalentes ao consumo de combustível. Quando existem longos intervalos de desaceleração, incorre em uma mistura mais pobre, gerando maiores níveis de HC. Os hidrocarbonetos podem criar o efeito smog, que é resultado da reação com os óxidos de nitrogênio e a luz solar, formando o ozônio. A Figura 21 abaixo mostra a participação de cada tipo de veículo na emissão de HC, referente a frota de veículos no Estado de São Paulo.

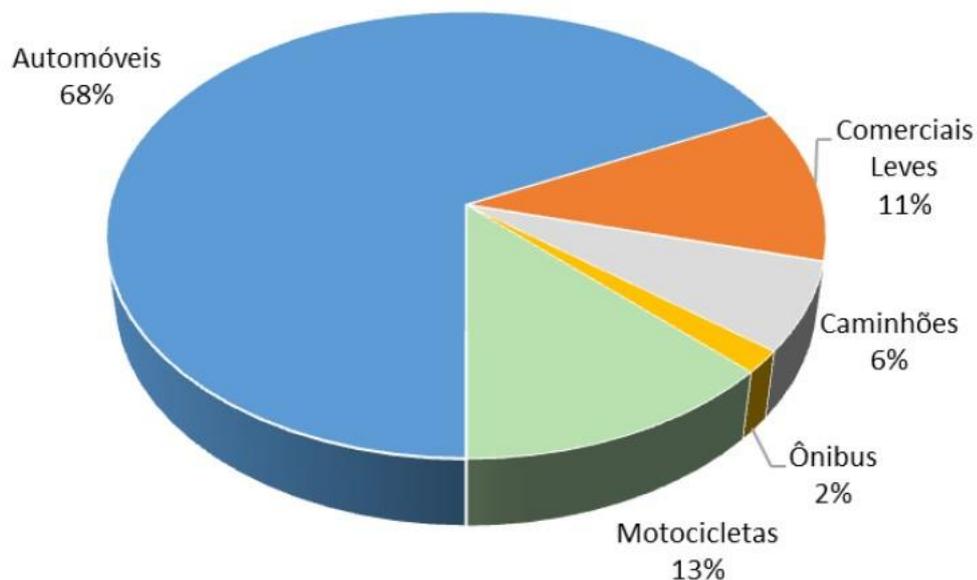


Figura 21 - Categorias de veículos e a emissão de HC.

Fonte: CETESB, 2019.

É interessante ressaltar também que uma parte considerável das emissões de HC é proveniente do momento de abastecimento e da evaporação do combustível, como pode ser observado na Figura 22 abaixo, também da frota de São Paulo.

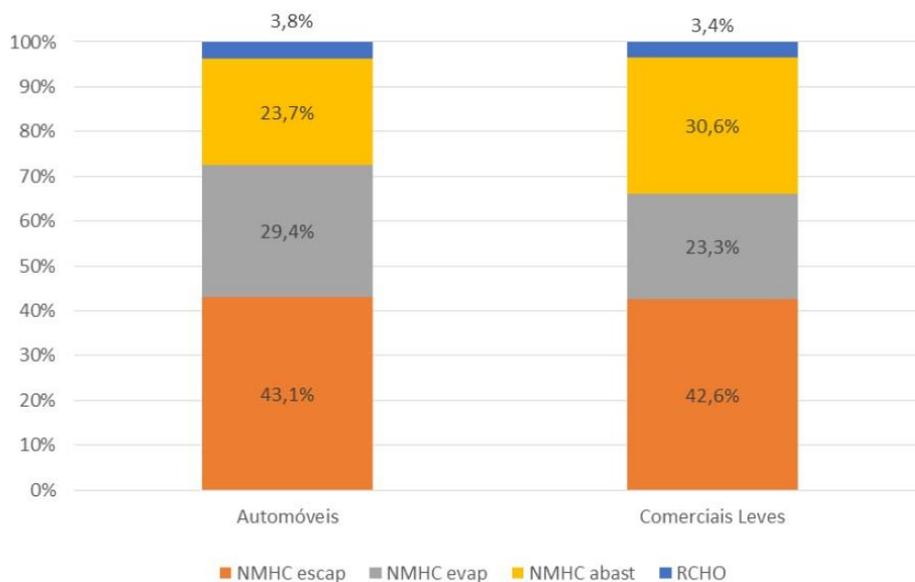


Figura 22 - Representação dos casos responsáveis pelas emissões de HC.

Fonte: CETESB, 2019.

3.1.4 Os óxidos de enxofre (SOx)

Os óxidos de enxofre, são formados pela oxidação do enxofre presente no combustível, principalmente no óleo diesel. Os principais fatores que influenciam as emissões de SO₂ são a operação do motor e o tipo de catalisador presente no veículo. Fruto da combustão, o trióxido de enxofre (SO₃), pode unir-se às moléculas de água, formando o ácido sulfúrico, o que na atmosfera resulta na chuva ácida.

De acordo com a resolução N° 807 da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) de 23 de janeiro de 2020, a gasolina possui cerca de 50 ppm de enxofre em sua composição, que pode formar os óxidos de enxofre anteriormente mencionados.

Altas concentrações de enxofre também provocam prejuízos não apenas ao meio ambiente, mas também para a saúde da população pela inalação. Ao entrar no corpo, pode causar coriza, irritação na garganta, olhos e até prejudicar o pulmão irreversivelmente. (IBEAS, 2013)

A Figura 23 abaixo mostra a participação de cada tipo de veículo na emissão de SOx no Estado de São Paulo.

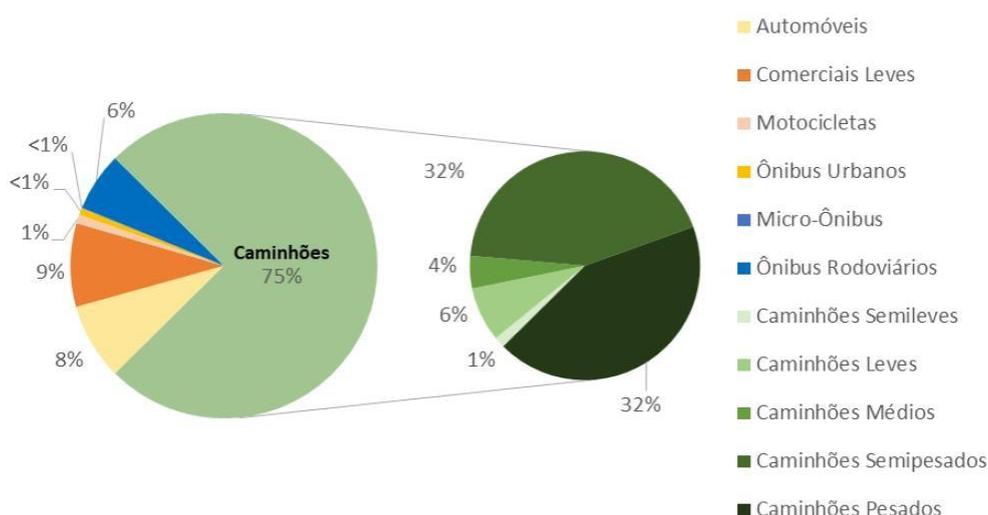


Figura 23 - Categorias de veículos e a emissão de SOx.

Fonte: CETESB, 2019.

3.1.5 O material particulado (MP)

De acordo com Heywood (1988), o material particulado é originado da combustão de veículos a gasolina e a diesel, além de partículas deslocadas pelos veículos em vias. Consiste em substâncias sólidas ou líquidas de material orgânico, chumbo e enxofre.

O material particulado pode ser coletado por filtragem através dos catalisadores do escapamento. Nos motores de ciclo Otto a emissão de MP é muito inferior aos motores a Diesel, responsável pela maior parte da sua emissão. A Figura 24 abaixo mostra a participação de cada tipo de veículo na emissão de MP em São Paulo.

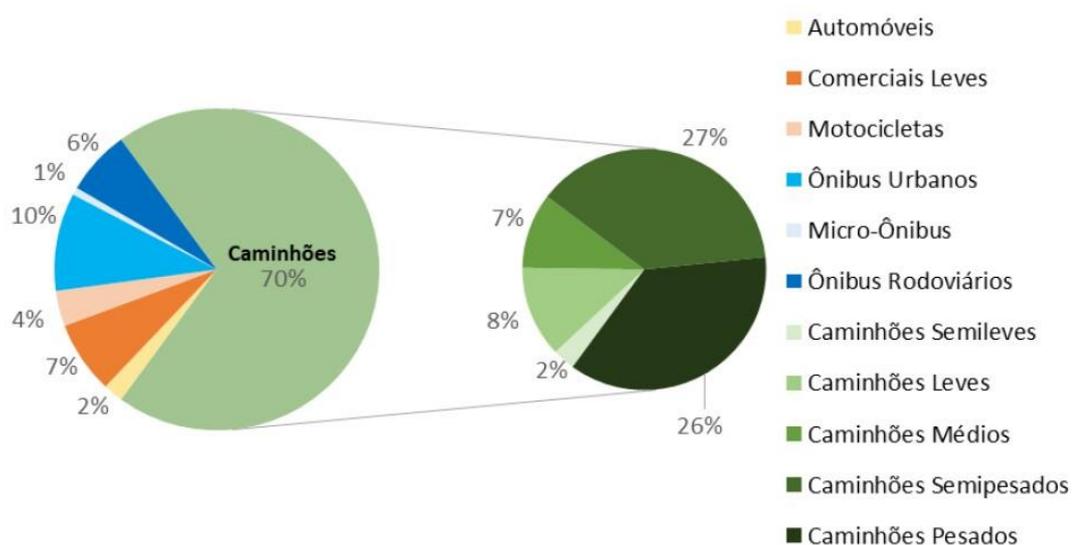


Figura 24 - Categorias de veículos e a emissão de MP.

Fonte: CETESB, 2019.

4 O DOWNSIZING DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O termo também é utilizado para definir uma situação onde sistemas, originalmente hospedados em grande quantidade, são adaptados em menor número, mas funcionando de forma mais eficiente e com um menor custo para que isso ocorra. Devido à semelhança, isso fez com que, a incessante busca por uma redução no consumo dos motores de combustão interna, sempre melhorando as formas de aproveitamento do combustível, tornasse possível a utilização do mesmo termo (Nogueira, 2014).

Em relação à crescente exigência de redução de emissões, estudos indicam um aumento considerável na frota de veículos turbo na Europa, China, Estados Unidos e na América do Sul. Com a expansão da Garrett Motion no Brasil, empresa global de tecnologias de turbocompressores, a produção e comercialização de carros turbinados tende a crescer cada vez mais. Com isso, de acordo com a empresa, metade do mercado brasileiro de veículos novos poderá ser composto por carros com turbocompressores até 2022.

A Figura 25 abaixo, apresenta a evolução de emissões de CO₂ e economia de combustível ao longo das décadas, como resultado das novas tecnologias, incluindo o *dowsinzing*.

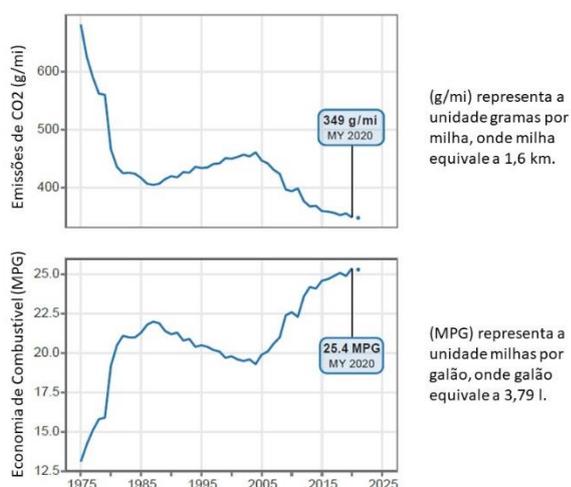


Figura 25 – Emissões de CO₂ e economia de combustível ao longo das décadas.

Fonte: EPA, 2021.

No mundo, entre os anos de 1975 e 2019, a potência específica (hp/deslocamento) dos motores aumentou quase 200%. Essa evolução é mostrada na Figura 26 abaixo.

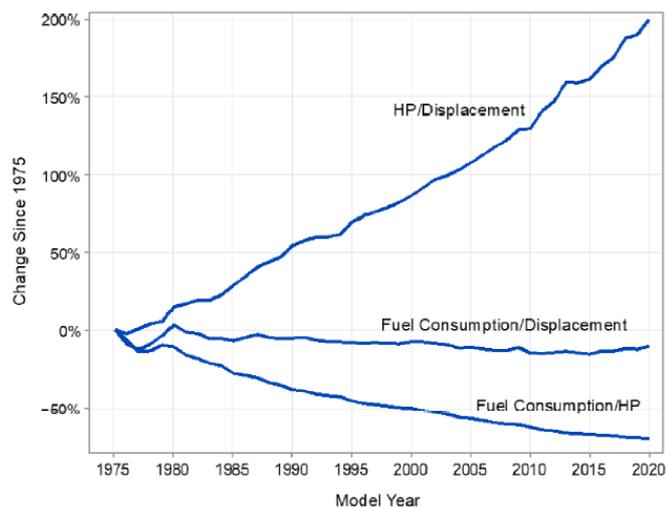


Figura 26 - Representação das mudanças de volume, consumo e potência específica.

Fonte: EPA, 2020.

Conforme apresentado pela Automotive Business (2021), dos 15 veículos mais vendidos no país no ano de 2021, e segundo a Fenabrave, o motor com turbocompressor está presente em 8, em pelo menos uma versão. Além disso, em 3 desses modelos, existe apenas versões com turbocompressor.

4.1 O TURBO APLICADO NA TÉCNICA DO DOWNSIZING

A redução eficiente de tamanho dos sistemas de propulsão automotivos pode ser atingida através de diversas técnicas, desde configurações com o uso de injeção eletrônica, seja do tipo direta ou comum, a diminuição do número de cilindros até o uso de turbocompressores.

Como visto anteriormente, o turbocompressor auxilia em uma queima mais eficiente, proporcionando mais potência e torque, contribuindo assim para a redução

do consumo nos motores a combustão interna. Devido a essas vantagens, ele vem sendo amplamente empregado pelas montadoras em seus mais recentes projetos, a fim de atrair o consumidor em tempos de altos preços nos combustíveis.

Quanto ao funcionamento, o motor com turbocompressor possui componentes que são acessórios adjacentes necessários para o conjunto desempenhar regularmente seu trabalho. Por ser um sistema baseado em fluxo de gases, é composto por dutos, trocador de calor e válvulas.

4.1.1 O turbocompressor e seus componentes

O princípio de funcionamento baseia-se na compressão do ar, gerando uma maior densidade de ar na admissão, que por sua vez irá resultar nos ganhos de performance e consumo.

Inicialmente, os gases provenientes da queima que seriam dispersados diretamente pelo escape, passam pelo coletor adaptado que os redirecionam para as palhetas da turbina. Esta então transmite o movimento para o compressor através do eixo ao qual estão conectados.

O compressor, por sua vez, comprime o ar externo que passa inicialmente por um filtro, é resfriado por um trocador de calor ou *intercooler* e finalmente é admitido na câmara de combustão, como demonstrado na Figura 27 a seguir.

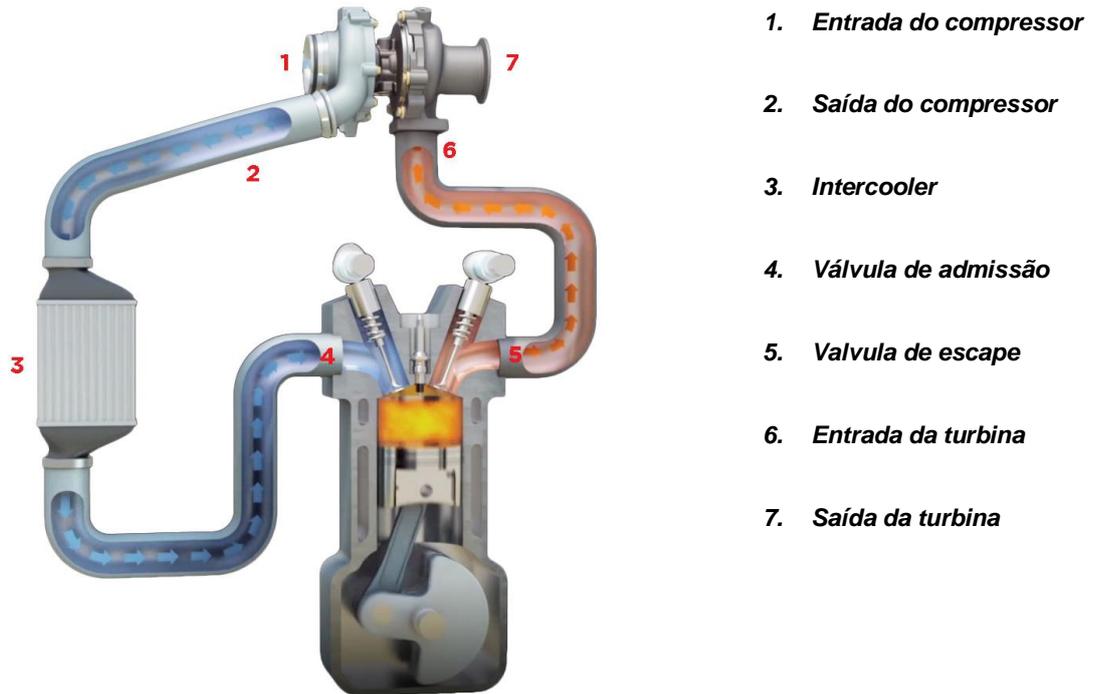


Figura 27 - Esquema de um turbocompressor com intercooler.

Fonte: Garrett, 2021.

Este processo ocorre sob pressões variadas que são controladas por válvulas. Estas estão presentes tanto no lado do escape, quanto na admissão. Para manter o controle de pressão do sistema é indispensável a utilização da válvula *wastegate* ou válvula de alívio de pressão, mostrada na Figura 28 abaixo, que elimina o excesso de gases de escape, evitando a aceleração desenfreada do turbocompressor, que danificaria o componente e também o motor. Elas podem ser do tipo interna ou externa e realizam o *bypass* do fluxo excessivo, redirecionando-o para o escape e equalizando a pressão de trabalho. A regulação da pressão é feita por mola ou contrapressão pneumática. (Garrett, 2021)



Figura 28 - Válvula wastegate (alívio de pressão).

Fonte: Garrett, 2021.

A Figura 29 abaixo apresenta a vista em corte e os componentes internos da válvula wastegate.

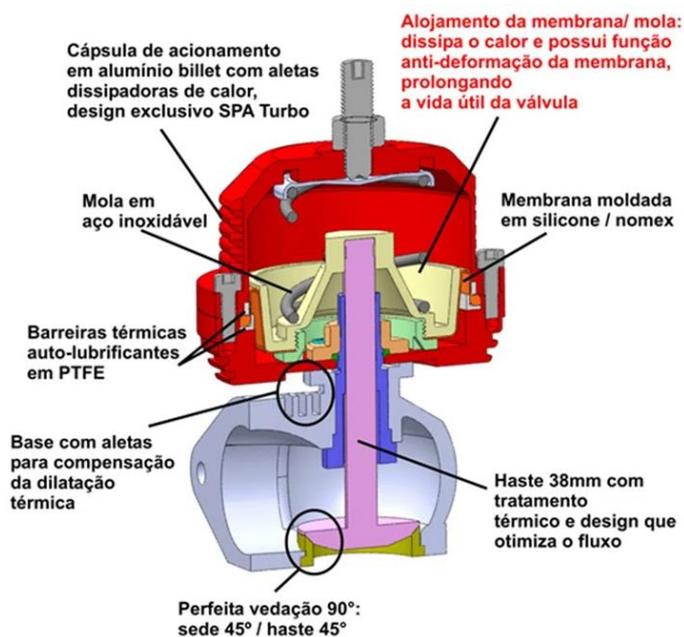


Figura 29 - Corte e componentes da válvula wastegate.

Fonte: SPA Turbo, 2022.

De acordo com Garrett 2021, a válvula de prioridade ou *blow-off*, representada na Figura 30 abaixo, tem por função a eliminação do excesso de pressão que ocorre na admissão, quando o corpo de borboleta se fecha ao cessar a aceleração no pedal. Caso não houvesse esta válvula, todo o ar pressurizado se acumularia no local até que sua força se tornasse superior à do compressor, ocasionando um retorno brusco pelo próprio, o efeito audível turbo *flutter*, desbalanceando seu eixo, o que levaria a seu desgaste prematuro.



Figura 30 - Válvula de prioridade (Blow-off).

Fonte: Garrett, 2021.

O sistema necessita de arrefecimento e lubrificação devido às altas velocidades de rotação. Por isso, existem dutos que transportam óleo até o rotor e os mancais do turbocompressor, a fim de reduzir a temperatura e o atrito no local. Alguns modelos ainda possuem isolamento com uma manta térmica que isola a caixa quente, conservando sua temperatura e mantendo os demais componentes em temperaturas adequadas ao funcionamento. A Figura 31 a seguir, apresenta uma turbina com aplicação de capa de isolamento térmico.



Figura 31 - Turbina com capa de isolamento térmico.

Fonte: Flatout, 2018.

Outro elemento importante é o *intercooler*, um trocador de calor responsável por resfriar o ar comprimido antes de entrar no coletor de admissão e enfim, na câmara de combustão. Isso proporciona uma maior densidade do ar e conseqüentemente, maior quantidade de moléculas de oxigênio, resultando em um aumento da performance e da eficiência da queima. (Garret, 2021)

4.1.2 Tipos de turbocompressor

Os turbocompressores podem ser classificados quando ao seu funcionamento. Novas tecnologias proporcionaram maior desenvolvimento de funções que auxiliam na compressão do ar, algumas vezes de maneira dinâmica ou sob demanda, melhorando sua eficiência. Os mais comuns são o turbo simples, o Twin-turbo, Twin-scroll, o de geometria variável (VGT), o Twin-scroll de geometria variável e o elétrico.

O primeiro, de tipo simples, é o mais amplamente utilizado, possuindo uma grande variedade de modelos. O torque gerado é definido pela diferença de tamanho dos rotores entre a caixa quente e da fria. Quanto maior o tamanho do turbo, maior será proporcionalmente a sua potência gerada, especialmente em altas rotações, enquanto os menores resultarão em menos potência final. Em relação ao eixo da turbina, os apoios podem ser por mancais ou roletes, estas últimas chamadas turbinas “roletadas” que fornecem menos atrito, porém mais caras. (INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ, 2019)

O segundo tipo é o chamado twin-turbo, como mostrado na Figura 32 abaixo, onde são utilizados dois turbocompressores. Geralmente, esta aplicação ocorre em motores de maior cilindrada, como os V6 (6 cilindros em formato de “V”, 3 em cada lado) ou V8 (8 cilindros em formato de “V”, 4 em cada lado), onde cada bancada de cilindro é alimentada por um turbocompressor. Alternativamente, pode haver uma aplicação sequencial em motores de cilindros lineares, onde um turbocompressor menor é utilizado em baixas rotações e o outro maior, acionado em altas.

Outra configuração possível, é a utilização de dois turbocompressores de tamanho semelhante, em que um é acionado em rotações baixas e ambos são utilizados em alta. (INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ, 2019)



Figura 32 - Configuração de um motor do tipo Twin-turbo.

Fonte: Portal Auto, 2019.

Os gases de escape, são direcionados para movimentar as pás da turbina, como foi mencionado anteriormente, mas este processo ocorre em forma de pulsos, pois os cilindros obedecem a uma sequência de detonação. Estes pulsos podem acabar se sobrepondo e interferindo uns com os outros. A fim de reduzir este problema, surgiu a solução do Twin-scroll, que utiliza uma entrada de gases de escape dividida em dois, uma para cada par de cilindros, conectada em um coletor adaptado.

Em um veículo de quatro cilindros, por exemplo, o primeiro e quarto alimentam um lado e o segundo e terceiro, outro. Com isso, ocorre menos sobreposição dos pulsos e redução do *lag* da turbina. (INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ, 2019)

A Figura 33 em seguida representa o funcionamento da turbina do tipo pulsativo.

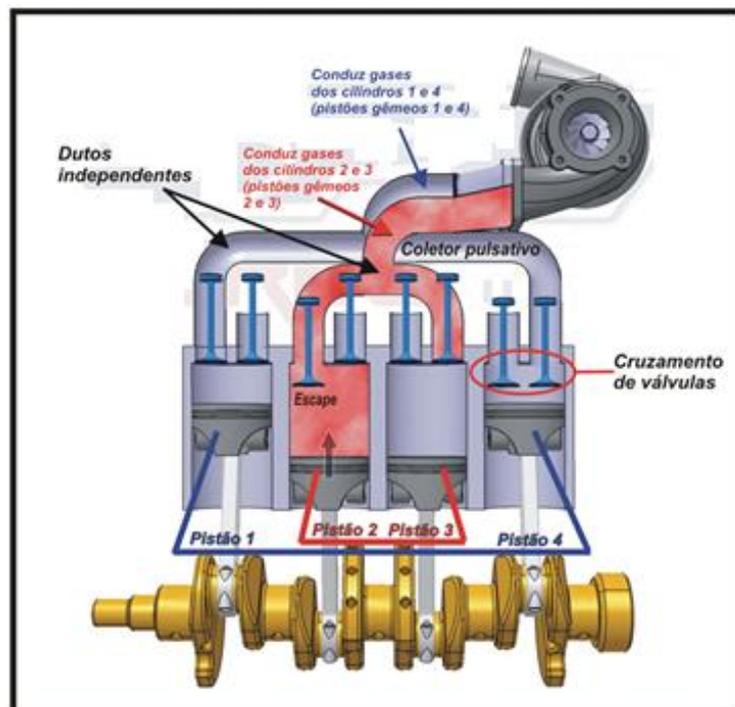


Figura 33 - O turbocompressor pulsativo (Twin-scroll).

Fonte: Canal da Peça, 2021.

O turbo de geometria variável ou VGT, é uma solução mais amplamente utilizada em motores Diesel, que reduz o turbo *lag*. Ele diferencia-se do tipo tradicional por possuir uma coroa com aletas móveis na região da turbina que se abrem e fecham sob demanda em determinados ângulos mediante um mecanismo de alavanca de acionamento automático. Em baixas rotações do motor, as aletas encontram-se fechadas, resultando em uma relação área/raio que gera mais velocidade dos gases inicialmente. Conforme aumentam as rotações do motor, as aletas se abrem, permitindo maior passagem de gases, gerando maior potência. O processo ocorre de maneira mais progressiva, sem a presença de picos abruptos, que resulta em uma faixa mais ampla e menos atrasos. (INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ, 2019)

A Figura 34 abaixo demonstra o funcionamento das aletas do turbocompressor do tipo VGT.

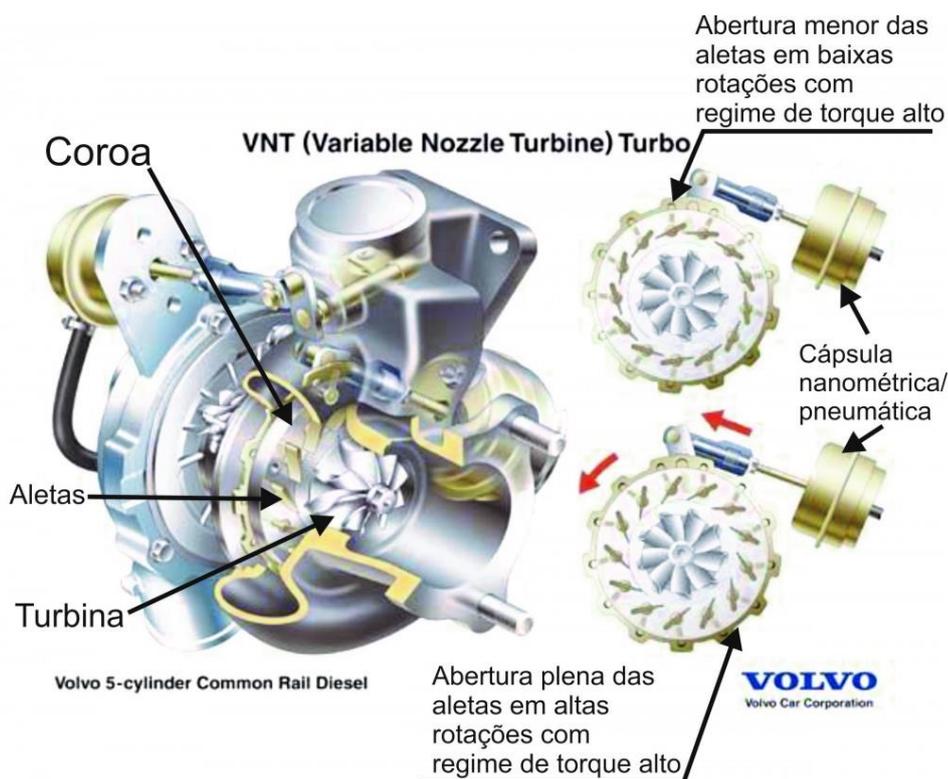


Figura 34 - Turbo de geometria variável (VGT).

Fonte: Simplo, 2019.

Um modelo mais recente é o turbo elétrico, em que um compressor é movido por eletricidade. Este sistema, empregado no modelo SQ7 da Audi, como mostrado na Figura 35 a seguir, fornece pressão instantânea para eliminar completamente o turbo *lag* enquanto o turbocompressor tradicional está ganhando velocidade de rotação e começando a gerar impulso. Embora útil, é muito caro e sofisticado, necessitando de componentes elétricos paralelos, incluindo uma bateria e um motor elétrico próprio para funcionar. (INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ, 2019)

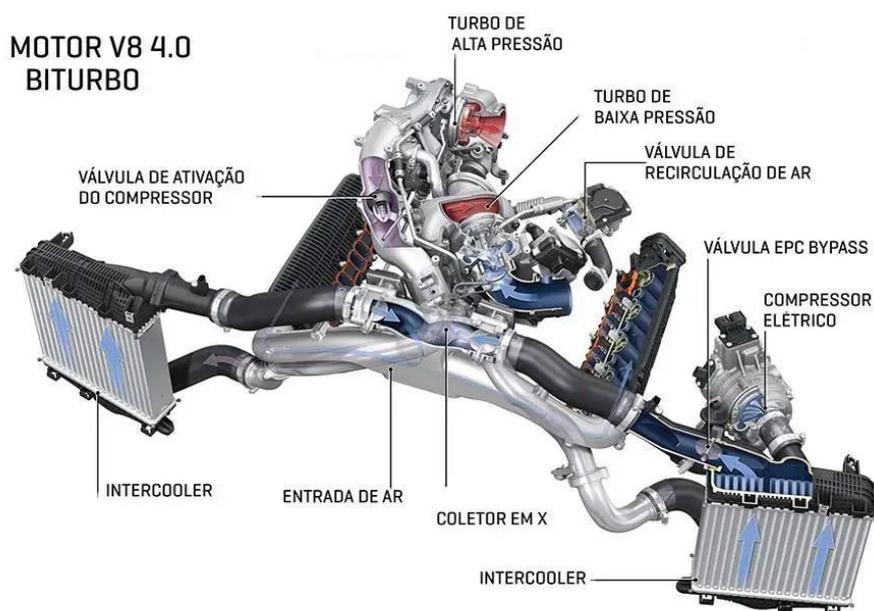


Figura 35 - Motor Audi com compressor elétrico.

Fonte: Quatro Rodas, 2016.

O Quadro 2 a seguir apresenta as principais vantagens e desvantagens dos modelos de turbocompressores mencionados anteriormente.

TIPO DE TURBOCOMPRESSOR	VANTAGENS	DESvantagens
Simples	<ul style="list-style-type: none"> • Uma maneira econômica de aumentar a potência e a eficiência de um motor. • Simples, geralmente a mais fácil das opções de turboalimentação para se instalar. • Permite o uso de motores menores para produzir a mesma potência de motores maiores de aspiração natural, o que pode reduzir seu peso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Turbos individuais tendem a ter uma faixa de RPM efetiva bastante estreita. Isso torna o dimensionamento um problema, pois se deve escolher entre um bom torque em baixa ou maior potência em alta RPM. • A resposta do turbo pode não ser tão rápida quanto nas configurações alternativas.
Twin turbo	<ul style="list-style-type: none"> • Para o turbo duplo paralelo em motores em 'V', os benefícios (e as desvantagens) são muito semelhantes às configurações de turbo único. • Quando usados na forma de turbos sequenciais ou em baixa RPM e ambos em alta RPM, permite uma curva de torque muito mais ampla e plana. Melhor torque em baixa, mas a potência não diminui em altas RPM como em um turbo simples. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo e complexidade, já que existem praticamente o dobro dos componentes. • Existem maneiras mais leves e eficientes de se alcançar resultados semelhantes.
Twin-scroll	<ul style="list-style-type: none"> • Mais energia é enviada para a turbina de exaustão, o que significa mais potência. • É possível uma faixa mais ampla de RPM de aumento efetivo de desempenho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer um layout de motor específico e projeto de escapamento (por exemplo: I4 e V8 onde 2 cilindros podem ser alimentados para cada scroll do turbo, em intervalos regulares). • Custo e complexidade altos em relação aos turbos individuais tradicionais.
Geometria variável - VGT	<ul style="list-style-type: none"> • Curva de torque ampla e plana. Turboalimentação eficaz em uma faixa de RPM muito ampla. • Requer apenas um único turbo, simplificando uma configuração de turbo sequencial de forma mais compacta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente usado apenas em aplicações a diesel, onde os gases de escape possuem menor temperatura para que as palhetas não sejam danificadas pelo calor. • Para aplicações com gasolina, o custo normalmente os elimina, pois metais mais caros devem ser usados para manter a confiabilidade. A tecnologia foi usada no Porsche 997, embora muito poucos motores a gasolina VGT existam como resultado do custo associado.
Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Ao conectar um motor elétrico diretamente ao compressor, o turbo lag e os gases de exaustão insuficientes podem ser praticamente eliminados, girando o compressor com energia elétrica sob demanda. • Conectando um motor elétrico à turbina de exaustão, a energia desperdiçada pode ser recuperada (como é feito na Fórmula 1). • Uma faixa de RPM efetiva muito ampla com torque uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo e complexidade, já que se deve levar em conta o motor elétrico e garantir seu resfriamento para manter sua vida útil. Isso também se aplica aos controladores adicionados. • Espaço e peso tornam-se um problema, especialmente com a adição de uma bateria a mais, que será necessária para fornecer energia suficiente para o turbo quando necessário. • VGTs ou twin-scrolls podem oferecer benefícios muito semelhantes (embora não no mesmo nível) por um custo significativamente mais baixo.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens dos tipos de turbocompressores.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.2 COMPARATIVO DE EFICIÊNCIA E EMISSÃO ENTRE MOTORES TURBO E ASPIRADOS EM UMA SIMULAÇÃO

Em uma análise realizada por Carla Silva, Marc Ross e Tiago Farias (2008), foram feitos estudos para redução do consumo de combustível e emissões em veículos leves a gasolina. No modelo de simulação foram consideradas as situações em que eram utilizados os sistemas de frenagem regenerativa, corte de combustível em marcha lenta, o sistema start/stop, downsizing e sobrealimentação.

Como apresentado por Silva *et. al.*, (2008), a simulação computacional numérica permitiu a obtenção do desempenho de um veículo rodoviário em uma rota

pré-definida. Foram levados em consideração o tipo de condução, especificações do motor do veículo e as vias.

No que diz respeito ao downsizing e sobrealimentação, foram realizadas análises de 5 classes típicas de veículos europeus, em diversas condições de condução e foram medidos o consumo de combustível e as emissões de HC, CO, NO e CO₂. Os dados dos motores utilizados estão representados no Quadro 3 a seguir.

Classe	Pequeno	Pequeno/médio	Médio	Médio/grande	Grande
Peso (kg)	980	1158	1375	1540	1683
Af (área frontal, m ²)	2.01	2.04	2.10	2.14	2.70
Cd (arrasto)	0.32	0.33	0.30	0.31	0.36
Cr (atrito solo)	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
Cilindrada (l)	1.2	1.4	1.6	1.8	4
Potência (kW)@rpm/torque (Nm)@rpm	59@5600/110@4000	65@5250/133@3250	74@6000/150@3600	120@5700/225@1950	150@4500/350@3500
Combustível	Gasolina	Gasolina	Gasolina	Gasolina	Gasolina
Consumo ciclo NEDC (l/100 km)	5.8	6.5	7.2	8.2	9
CO ₂ (g/km)	139	159	163	187	206

Quadro 3 - Especificações dos veículos utilizados nos testes.

Fonte: Silva et. al., 2008.

De acordo com a Universidade do Minho em Portugal (S.d.), existem ciclos de condução ou *Driving Cycles*, utilizados para a criação de legislações que permitem regular as emissões poluentes, abrangendo todos os modelos de veículos que são postos à venda ao público. Estes mecanismos permitem comparar os diversos modelos, pois devido à grande variedade, não seria possível aplicar a mesma norma de maneira semelhante a todos.

Um ciclo de condução é um modelo normalizado apresentado por um gráfico de velocidade/tempo. O percurso é separado em pequenos intervalos de tempo onde a aceleração é considerada constante. Desta forma, a velocidade irá variar de maneira linear com o tempo em cada intervalo. Como a velocidade e aceleração são conhecidas para cada intervalo de tempo, a energia mecânica requerida em função do tempo pode ser determinada com algumas fórmulas. Um ciclo de condução pode ser simulado fora das vias, como em um dinamômetro. O consumo de combustível e as emissões podem então ser aferidas. (Universidade do Minho, S.d.)

Os veículos foram ensaiados em três ciclos de condução, sendo eles chamados de IC19, MEC01 e NEDC. O modelo IC19 corresponde a emulação de vias congestionadas, enquanto o MEC01 é baseado em uma condução mista, inclusive mais extremas, com todos os tipos de situação das vias para explorar ao máximo as capacidades do motor. Já o NEDC ou *New European Driving Cycle*, consiste na união de ciclo urbano e de estrada.

A Figura 36 abaixo apresenta o ciclo de condução IC19, classificado por vias congestionadas.

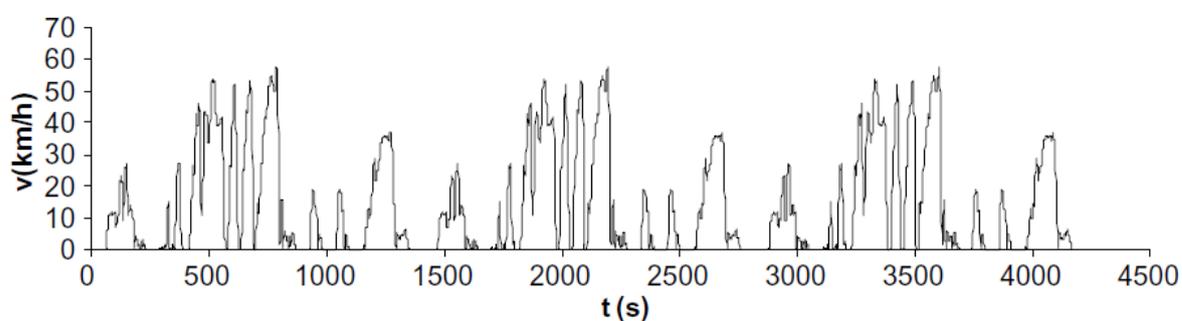


Figura 36 - Ciclo de condução IC19.

Fonte: Silva et. al., 2008.

Na Figura 37 a seguir demonstra o ciclo de condução MEC01, caracterizado por condução mista, explorando todo o potencial do motor.

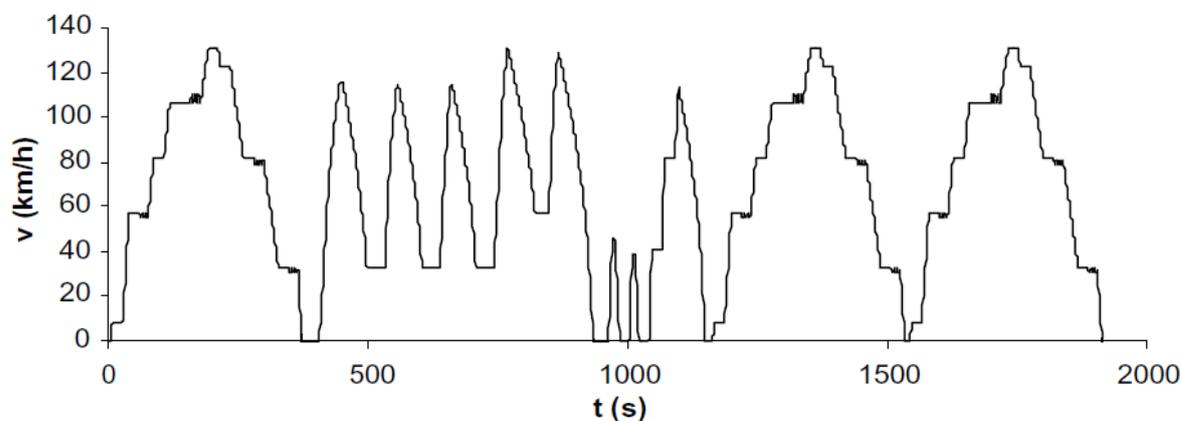


Figura 37 - Ciclo de condução MEC01.

Fonte: Silva et. al., 2008.

A Figura 38 abaixo mostra o ciclo de condução NEDC, com uma viagem abrangendo vias expressas, assim como o ciclo urbano.

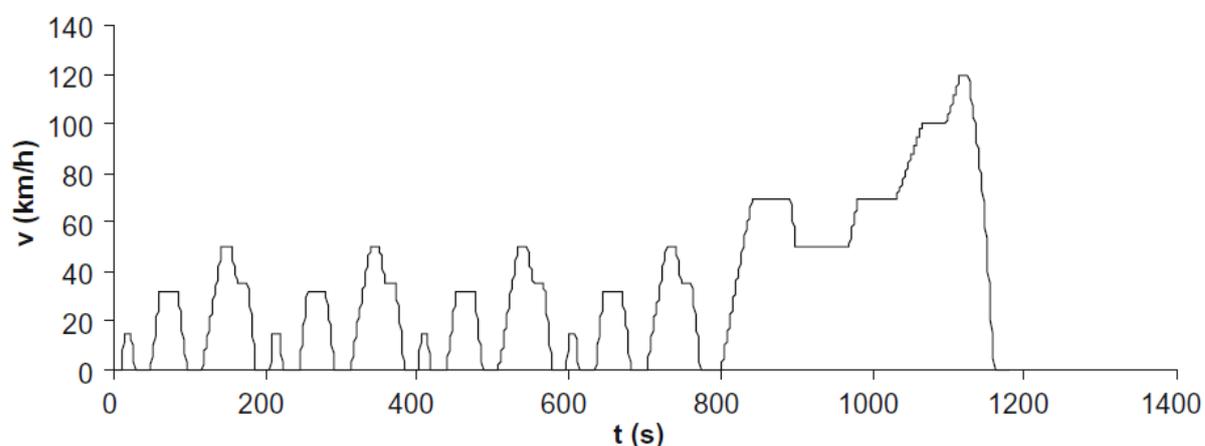


Figura 38 - Ciclo de condução NEDC.

Fonte: Silva et. al., 2008.

A simulação tinha por objetivo a substituição dos motores originais dos veículos por versões de volume reduzido em 20% e 40%, mantendo os outros parâmetros constantes. Assumia-se que os motores de aspiração natural possuíam uma diminuição de torque da mesma ordem em toda faixa de rotação, sendo, por exemplo, um motor 20% menor com uma diminuição de 20% no torque.

A pressão de turbocompressão foi escolhida para ser de 20% e 50% maiores que a pressão de admissão absoluta dos motores naturalmente aspirados. Durante os testes foram considerados os três ciclos de condução mencionados anteriormente. Nas simulações não foram consideradas as variações decorrentes do *turbo lag*, pois atualmente existem diversos mecanismos de redução desse efeito.

Classe	Pequeno		Pequeno/médio		Médio		Médio/grande		Grande	
Cilindrada base (l)	1.2		1.4		1.6		1.8		4	
Nova cilindrada -20%/-40% (l)	0.96/0.72	0.96/0.72	1.12/0.84	1.12/0.84	1.28/0.96	1.28/0.96	1.44/1.08	1.44/1.08	3.20/2.40	3.20/2.40
Aumento % pressão em relação ao original	20	50	20	50	20	50	20	50	20	50
Ciclo de Condução	IC19-MEC01									
Redução do consumo e CO2 (%)	11-7/21-14	12-8/22-15	10-6/19-13	12-7/20-13	12-6/21-14	14-7/23-15	11-7/22-14	13-9/23-15	17-10/27-17	19-11/29-18
Redução HC (%)	2-3/4-6	2-4/4-6	2-3/4-5	2-3/4-6	3-2/5-6	3-3/5-7	3-4/5-7	3-4/6-8	5-6/9-9	6-6/9-10
Redução CO (%)	17-9/33-17	20-10/34-18	16-8/29-15	18-9/31-16	18-7/31-17	20-8/32-18	18-9/33-17	20-10/35-18	25-11/38-19	28-13/41-20
Redução NOx (%)	20-9/35-17	22-11/37-18	18-8/15-35	20-9/32-16	20-8/33-17	23-9/35-18	18-9/33-18	20-11/34-14	28-12/39-20	31-13/41-21
Ciclo de Condução	NEDC									
Redução do consumo e CO2 (%)	9/18	11/19	8/16	10/17	10/18	12/19	9/18	11/19	13/22	15/23
Redução HC (%)	3/5	3/5	2/5	3/5	3/6	4/6	3/6	4/7	6/9	6/10
Redução CO (%)	13/24	15/25	11/21	13/23	14/23	16/25	13/24	14/25	17/27	19/28
Redução NOx (%)	13/25	11/19	12/21	14/23	15/24	17/25	14/26	15/27	18/28	20/30

Quadro 4 - Resultados do downsizing com turbocompressor.

Fonte: Silva et. al., 2008.

No Quadro 4 acima a leitura é feita na primeira coluna em um motor pequeno e com 20% de aumento de pressão. Para redução do consumo de combustível e CO₂, (11-7)/(21-14) refere-se a uma redução de 11% no ciclo de condução IC19 e 7% no MEC01, para um motor com nova cilindrada 20% menor, e uma redução de 21% no ciclo IC19 e 14% no ciclo MEC01, para um motor com nova cilindrada 40% menor.

O *downsizing* de 20%, com 20 a 50% de aumento de pressão no coletor de admissão gera uma redução no consumo de combustível de 6 a 19%. A emissão de CO₂ também possui queda de 6 a 19%. O modelo ainda prevê uma redução de 2 a 6% de HC, 7 a 28% de CO, 8 a 31% de NO_x.

Já o *downsizing* de 40%, com 20 a 50% de aumento de pressão no coletor de admissão proporciona uma redução de consumo de combustível de 13 a 29%, o percentual de redução do CO₂ é o mesmo. O modelo prevê redução de 4 a 10% de HC, 15 a 41% de CO, 14 a 41% de NO_x.

Pode-se perceber que quanto menor a velocidade de condução dos veículos (ciclo IC19), maiores são os benefícios associados ao *downsizing* e ao uso do turbocompressor. Em relação as emissões, as menos afetadas foram as de HC, diminuindo em torno de 2 a 10%. O aumento da velocidade média, provoca uma melhora na redução de emissão de HC, pois nessas faixas o processo de combustão

apresenta menos falhas. Percentuais de redução de CO e NOx são similares para todos os casos simulados e podem chegar a 41%.

Estas mudanças nas características dos motores, principalmente com a adição do turbocompressor requerem um projeto, pois resultam em uma maior solicitação térmica e mecânica, o que pode diminuir sua durabilidade. A adequação dos mapas de injeção, bem como das especificações de material e projeto do bloco, camisas, pistão, virabrequim, bronzinas, bielas e juntas a serem utilizadas, seriam necessárias visando manter a confiabilidade do motor.

4.2.1 Comparativo de motores

Um exemplo nacional de motor de cilindrada reduzida com turbocompressor é o 1.0 I TSI da Volkswagen, que equipa diversos veículos da marca. Este propulsor possui potência equivalente a motores maiores, como os 1.6 I da própria montadora, com um torque ainda superior.

Em suas especificações, ele produz uma potência de 105 cv quando abastecido no etanol em suas variantes de entrada que equipam o modelo Up! TSI, além de 16,8 kgfm de torque disponíveis a apenas 1500 rpm. A potência e o torque são 28% e 68% maiores respectivamente em comparação com a versão aspirada de 1.0 I. Possui ainda um consumo energético de 1,44 MJ/km com o uso do ar-condicionado, tratando-se de um índice 6,5% maior que o aspirado de acordo com aferições do Inmetro. Estes dados estão aliados a um menor consumo de combustível, comparado às versões de potência e torque equivalentes aspiradas.

Na Tabela 5 a seguir, são mostrados alguns exemplos de motores que equipam veículos vendidos no Brasil, onde pode-se perceber as melhorias proporcionadas pelo *downsizing*. (Inmetro, 2021)

Motor	Ano	Cilindros	Cilindrada (l)	Potência Gas. (cv)	Torque Máx. Gas. (kgfm)	Consumo Urbano (km/l)	Consumo Rodovias (km/l)	Emissões CO2 (g/km)
VW EA211	2021	3 em linha	1.0T	116	20,4	11,2	14,6	106
VW EA211	2021	4 em linha	1.6	110	15,8	10,8	13,8	112
VW EA888	2021	4 em linha	2.0T	230	35,7	9,9	12,5	123
Mitsubishi 4B11	2019	4 em linha	2.0	160	20,1	10,2	11,7	125
Honda L15B7	2019	4 em linha	1.5T	173	22,4	11,8	14,4	104
GM 250	1985	6 em linha	4.1	134	31,1	4	7	≈242*
Ford Windsor 302	1975	8 em V	5.0	197	39,5	4,5	6	≈413*

*Dados estimados pela IEA 2020

Quadro 5 - Comparativo entre motores aspirados e com turbocompressor (T ao lado da cilindrada).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pela Tabela 5, com dados do Inmetro (2021 e 2019) e EPA (2020), pode-se perceber que com o passar das décadas, as tecnologias de aumento de eficiência e a aplicação do downsizing juntamente com o turbocompressor foram responsáveis por uma redução do consumo de combustível e de emissões, e mantendo ou superando o desempenho dos modelos aspirados de maior volume.

O indicado é comparar os modelos turbo e aspirados de desempenho (potência e torque) semelhante e verificar o menor consumo de combustível e emissões. Neste aspecto, é bem perceptível a diferença entre os modelos EA888 de 2021 e o Windsor 302 dos anos 70, onde o mais atual produz uma potência superior, torque semelhante e mesmo assim, seu consumo e índice de CO2 expelido são metade do mais antigo.

Vale também observar as tecnologias empregadas no aumento de eficiência como demonstrado na Figura 39 a seguir, onde GDI representa injeção direta, CVT refere-se ao tipo de transmissão, StartStop em que o veículo desliga ou liga o motor ao parar e DC sendo a tecnologia de desativação de cilindros sob demanda.

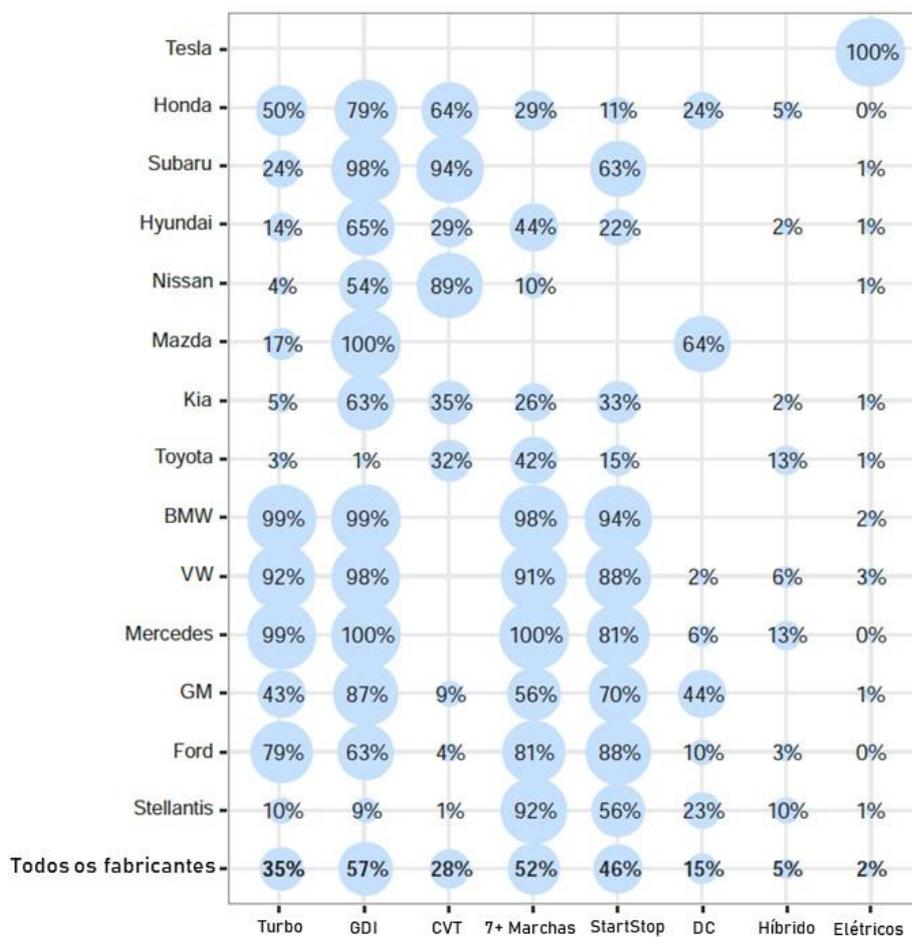


Figura 39 – Tecnologias mais utilizadas pelos fabricantes de veículos no ano de 2020.

Fonte: EPA, 2021.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista as crescentes demandas mundiais por menos emissões de poluentes e os problemas que essas emissões podem trazer tanto para a população, quanto para o meio ambiente, houve a necessidade da criação de leis mais rigorosas e metas de redução deste problema. Por isso, o mercado entrou em constante tendência de produção de automóveis com menor emissão de poluentes.

Além da questão ambiental, outra diretamente associada é a do consumo de combustível, em que os veículos devem ser mais econômicos e ao mesmo tempo manter seu desempenho e um preço acessível. Durante o trabalho foram apresentados os principais conceitos do *downsizing*, sua crescente aplicação nas últimas décadas e as tecnologias envolvidas para sua utilização. O aumento da eficiência dos motores de menor cilindrada associados a um turbocompressor, foi o principal fundamento para seu emprego nos veículos de mercado.

Conforme demonstrado, já estão sendo empregadas diversas tecnologias aliadas a redução de volume dos motores a combustão, tanto em sistemas adjacentes, como a injeção direta, quanto no próprio turbocompressor, com várias configurações de acordo com a demanda. Ainda existem outras soluções para diminuição de consumo e poluentes, como os veículos híbridos e elétricos, mas que devido ao seu valor mais elevado, ainda estão um pouco distantes de alguns mercados, principalmente os emergentes, como o Brasil. Por este fator, o etanol, em grande disponibilidade no país, proporciona uma opção mais viável, com um saldo de emissões de CO₂ muito menor, quando comparado com os combustíveis fósseis.

Por fim, pode-se perceber que o motor de combustão ainda tem capacidade de permanecer por um tempo antes de ser finalmente substituído por outras soluções mais eficientes. O *downsizing* é um dos responsáveis por esta vida mais longa e um meio termo a curto prazo. A total adoção de veículos elétricos parece ser inevitável nas próximas décadas, mas até o momento, a redução volumétrica aliada ao uso do turbocompressor e o uso das outras técnicas de redução de consumo é a solução com maior custo-benefício para os problemas de emissões.

REFERÊNCIAS

ANTONIOGUILHERME (Brasil), **Motores**. Disponível em: <<http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/motores.php>>. Acesso em: 5 de Junho de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002. (modelo de referência com autoria coletiva).

Automotive Business, 2015. **Motor turbo é o melhor que o Up! TSI oferece**. Disponível em: <https://www.automotivebusiness.com.br/pt/posts/noticias/motor-turbo-e-o-melhor-que-o-up-tsi-oferece/>. Acesso em: 29 de Dezembro de 2021.

Automotive Business, 2021. **Turbo vira pop e já está em 8 dos 15 carros mais vendidos do Brasil**. Disponível em: <https://www.automotivebusiness.com.br/pt/posts/noticias/turbo-vira-pop-e-ja-esta-em-8-dos-15-carros-mais-vendidos-do-brasil/>. Acesso em: 28 de Dezembro de 2021.

Auto Entusiastas Classic, 2012. **Motor Fiasa: Uma História Recheada De Técnica**. Disponível em: <<http://www.autoentusiastasclassic.com.br/2012/06/motor-fiasa-umahistoria-recheada-de.html?m=0>>. Acesso em 01 de Maio de 2021.

Auto Talk Brasil, 2019. **Como Funcionam E Quais As Diferenças Entre Motores Do Ciclo Otto E Diesel**. Disponível em: <<https://autotalk.com.br/edicao33/>>. Acesso em: 01 de Maio de 2021.

BORGWARNER. **History**. Disponível em: <<http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerHistory.aspx>>. Acesso em: 20 de Abril de 2021.

Bosch Mobility Solutions, 2013. **EN | Bosch gasoline direct injection**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LjJSbHxlvnM>. Acesso em: 15 de Abril de 2021.

BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna: volume 1. São Paulo: Blucher, 2012.

CALIXTO, Marcio. **Até onde chegará o downsizing**. Notícias Automotivas. Disponível em: <http://www.noticiasautomotivas.com.br/ate-onde-chegara-odownsizing/>. Acesso em: 16 de Abril de 2020.

Canal da Peça. **Turbina monofluxo ou pulsativa: qual é a melhor?** Disponível em: <https://www.canaldapeca.com.br/blog/turbina-monofluxo-pulsativa/>. Acesso em: 13 de Dezembro de 2021.

Carla Silva, Marc Ross, Tiago Farias, 2009. **Analysis and simulation of “low-cost” strategies to reduce fuel consumption and emissions in conventional gasoline light-duty vehicles**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890408003920>. Acesso em: 15 de Outubro de 2021.

Carros na Web, 2022. **Comparativo**. Disponível em: <https://www.carrosnaweb.com.br/compara.asp>. Acesso em 15 de Janeiro de 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.; KANOĞLU, Mehmet. **Thermodynamics: An engineering approach**, ninth edition. 2019.

CETESB, 2019. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf>. Acesso em: 15 de Maio de 2021.

Climate Watch Data, 2022. **Data Explorer**. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=cait&historical-emissions-end_year=2018&historical-emissions-gases=co2&historical-emissions-regions=All%20Selected&historical-emissions-sectors=total-including-lucf%2Ctransportation&historical-emissions-start_year=2018&page=1&sort_col=unit&sort_dir=ASC. Acesso em: 10 de Fevereiro de 2022.

EDUCAÇÃO AUTOMOTIVA. **Como funciona um motor 4 tempos**. Disponível em: <https://educacaoautomotiva.com/2017/07/06/motor-4-tempos-como-funciona/> Acesso em: 5 de Junho de 2020.

EPA, 2020. **The 2020 EPA Automotive Trends Report**. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P1010U68.pdf>. Acesso em: 20 de Outubro de 2021.

Flatout, 2016. **Sobrealimentação de motores: tudo sobre superchargers e compressores centrífugos.** Disponível em: <https://flatout.com.br/sobrealimentacao-de-motores-tudo-sobre-superchargers-e-compressores-centrifugos/>. Acesso em: 19 de Maio de 2021.

Flatout, 2018. **“Capa de turbina”: para que servem e como funcionam as mantas térmicas para turbo?** Disponível em: <https://flatout.com.br/capa-de-turbina-para-que-servem-e-como-funcionam-as-mantas-termicas-para-turbo/>. Acesso em: 12 de Dezembro de 2021.

GARCIA, O. (1988). **Motores de Combustão Interna.** São Paulo, DER-SP.

GARRETT MOTION. **How a Turbo Works – Basic.** Disponível em: <https://www.garrettmotion.com/knowledge-center-category/oem/basic/>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2021.

HEYWOOD, J.B. (1988). **Internal Combustion Engine Fundamentals.** New York: McGraw-Hill.

HURTADO, Diego K. ; SOUZA, Alfeu de A. **A evolução do sistema de injeção de combustível em motores ciclo Otto: uma análise crítica desde suas implicações no meio ambiente à regulamentação legal no sistema normativo pátrio.** 2012.
Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/revistadireito/article/viewFile/8527/5175>>. Acesso em: 02 de Maio de 2021.

IBEAS, 2013. **ENXOFRE: UM POLUENTE EM POTENCIAL NA COMPOSIÇÃO DO ÓLEO DIESEL BRASILEIRO.** Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/XI-081.pdf>> Acesso em: 20 de Maio de 2021.

INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ, 2019. **TURBOCHARGER: COMPONENTS, WORKING PRINCIPLES, AND TYPES.** Disponível em: <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/turbocharger-components-working-principles-and-types/>>. Acesso em: 10 de Dezembro de 2021.

INMETRO, 2022. **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: 15 de Fevereiro de 2022.

IPEA, 2011. **TD 1606 - EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE MOTORIZADO DE PASSAGEIROS NOS GRANDES CENTROS URBANOS BRASILEIROS.** Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=9567>. Acesso em: 21 de Maio de 2021.

Kelley Blue Book. **Injeção direta - O que é e para que serve?** Disponível em: <https://www.kbb.com.br/detalhes-noticia/injecao-direta-para-que-serve/?ID=1407>. Acesso em: 02 de Maio de 2021.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna: Segunda edição.** Portugal: Publindústria, 2006.

MAYER, Michael. **Turbochargers: Effective use of exhaust gas energy.** 2nd revised edition, 2001.

MOTORTREND, 2021. **Basic Turbocharging Components & Theory - Turbocharging 101.** Disponível em: <https://www.motortrend.com/how-to/1105gmhpt-basic-turbocharging-components-and-theory/>>. Acesso em 11 de Dezembro de 2021.

NOGUEIRA, Nuno. 2011. **O que é downsizing?** Disponível em: <http://www.portalgestao.com/gestao/item/6319-o-que-%C3%A9-o-downsizing.html>>. Acesso em: 16 de Abril de 2020.

Our World in Data, 2020. **Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?** Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>. Acesso em: 26 de maio de 2021.

PINTO, Adriano B; VALENTE, Steven da C. 2012. **Sobrealimentação automóvel.** Disponível em: http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/act_lect/SIAUT/Trabalhos%20201112/SIAUT_2011-12_Sobrealimentacao.pdf>. Acesso em: 10 de Maio de 2021.

Portal Auto, 2019. **Twin-turbo x Biturbo – Qual a Diferença? E Twin Scroll?** Disponível em: <https://portalauto.com.br/acessorios/twin-turbo-biturbo-twin-scroll/>. Acesso em: 13 de Dezembro de 2021.

Quatro Rodas, 2016. **Como funciona e quais são as vantagens de um motor turbo?** Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/carro-turboquerendo-ou-nao-voce-ainda-tera-um/>>. Acesso em: 10 de Maio de 2021.

Quatro Rodas, 2016. **Entenda o funcionamento e as vantagens do compressor elétrico.** Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/entenda-o-funcionamento-e-as-vantagens-do-compressor-eletrico/>. Acesso em: 12 de Dezembro de 2021.

REVISTA AUTOESPORTE GLOBO. **Quase metade dos carros será turbo até 2022.** Disponível em: <https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2019/06/quasemetade-dos-carros-sera-turbo-ate-2022.html>>. Acesso em: 16 de Abril de 2020.

Science, 2018. **Net-zero emissions energy systems.** Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aas9793>. Acesso em: 27 de Maio de 2021.

SINDIPEÇAS ABIPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante - edição 2021.** Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2021/RelatorioFrotaCirculanteMarco_2021.pdf>. Acesso em: 13 de Abril de 2021.

Simple, 2019. **Turbo compressor de geometria variável.** Disponível em: <https://blog.simplusbr.com/turbo-compressor-de-geometria-variavel>. Acesso em 14 de Dezembro de 2021.

SPA Turbo, 2021. **Wastegate USA com Regulagem Mecânica.** Disponível em: <https://www.spaturbo.com.br/wastegate-usa-regulagem-mecanica/p>. Acesso em 11 de Fevereiro de 2022.

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica, S.d. **Simulação Energética de um Veículo.** Disponível em: <https://vehicleenergysimulation.weebly.com/ciclos-de-conduccedilatildeo-standard.html>. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2022.