

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SANTO ANDRÉ
TECNOLOGIA EM MECÂNICA AUTOMOBILÍSTICA**

**Breno Felipe Moraes de Souza
Danilo Tomei Silva
Igor Melo França**

A tecnologia Freevalve

**Santo André
2021**

Breno Felipe Moraes de Souza

Danilo Tomei Silva

Igor Melo França

A tecnologia Freevalve

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística da FATEC Santo André, orientado pelo Prof. Marco Aurélio Fróes, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecânica Automobilística.

Santo André

2021

Ficha catalográfica

S729t

Souza, Breno Felipe Moraes de
A tecnologia Freevalve / Breno Felipe Moraes de Souza, Danilo
Tomei e Silva, Igor Melo França. - Santo André, 2021. – 66f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2021.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Fróes

1. Mecânica. 2. Comando de válvulas. 3. Atuadores. 4. Veículos. 5.
Tecnologia. 6. Comando de válvulas variável. 7. Válvulas. I. Silva,
Danilo Tomei e. II. França, Igor Melo. III. A tecnologia Freevalve.

629.2

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a FATEC SANTO ANDRÉ
como requisito parcial à obtenção de título
de Tecnólogo em Mecânica
Automobilística.

Professor Orientador
Prof. Marco Aurélio Fróes

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Presidente da Banca
Prof. Marco Aurélio Fróes.
Fatec Santo André

Primeiro membro da Banca
Prof. Msc. Adriano Ribolla
Fatec Santo André

Segundo Membro da Banca
Prof. Dr. Edson Kitani
Fatec Santo André

Local: Fatec Santo André
Horário: 21:00
Data: 20/12/2021

SANTO ANDRÉ
2021

Dedicamos este trabalho à nossa família, amigos e professores que nos apoiaram até o final de nossa intensa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os integrantes da instituição da FATEC Santo André, desde a equipe de faxina, secretaria, professores e coordenadores.

Também agradecemos a todos que ajudaram diretamente no desenvolvimento desse trabalho, em especial ao Prof. Marco Aurélio Fróes que dispôs do seu tempo e seu vasto conhecimento para nos orientar em nosso tema de trabalho.

Gostaríamos de agradecer principalmente aos nossos familiares que participaram indiretamente dessa jornada, por meio do apoio e incentivo, aos nossos amigos e colegas de classe.

Por último e não menos importante, agradecer a Deus que nos concedeu saúde e possibilitou que tudo se concretizasse.

“Se um homem ainda não descobriu algo pelo qual ele morreria, ele não está apto a viver.”

- Martin Luther King Jr.

RESUMO

Nesse trabalho foi feito um estudo sobre as características de implantação de uma tecnologia sueca de motores sem comando de válvulas para motores de combustão interna, principalmente empregados de forma híbrida visando obter boa viabilidade para o mercado futuro e que atenda aos requisitos ambientais. Para alcançar a proposta do trabalho, serão expostos: Dados técnicos, princípios de funcionamento, comparações e outras informações de grande importância para compreensão do tema, além de apresentar as tendências futuras de mercado. Adotamos como métodos a pesquisa, qualitativa, bibliográfica e exploratória. Podemos observar que essa tecnologia é de grande importância para a indústria de motores a combustão pois com ela os motores terão um prazo de utilização maior, considerando que os rendimentos serão bem maiores e satisfatórios.

Palavras-chave: Freevalve. Válvulas. Comando de válvulas. Comando de Válvulas Variável. Atuadores.

ABSTRACT

In this work, a study was carried out for the implementation of a Swedish engine technology without valve cams for internal combustion engines, mostly applied to hybrid technologies aiming at obtaining good feasibility for the future market and meeting environmental requirements. To reach the proposal of the work, it will be exposed: Technical data, operational principles, comparisons and other information of great importance for understanding the subject in addition to presenting future market trends. We adopted as methods the qualitative, bibliographic and exploratory research. We can observe that this technology has a great importance for the combustion engine industry using it, the engines will have a longer period of usage, considering also that the performance will be much higher and satisfactory

Key words: Freevalve. Valves. Valve Cam. Variable Valve Cam. Actuators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Motor ciclo Wankel.....	17
Figura 2 - Representação de um pistão e cilindro	19
Figura 3 - Tempo de admissão.....	20
Figura 4 - Tempo de compressão	20
Figura 5 - Tempo de combustão	21
Figura 6 - Tempo de escape	21
Figura 7 - Compressão e admissão	22
Figura 8 - Expansão e escape.....	22
Figura 9 - Motor ciclo Atkinson	23
Figura 10 - Ciclo Atkinson/Miller.....	24
Figura 11 - Ciclo Diesel	25
Figura 12 - Processo de troca de gases.....	29
Figura 13 - Lubrificação por Chapinagem	34
Figura 14 - Lubrificação por pressão.....	34
Figura 15 - Lubrificação por cárter seco.....	35
Figura 16 - Componentes do trem de válvulas.....	37
Figura 17 - Cabeçote de motor com 4 válvulas por cilindro	38
Figura 18 - Representação de cabeçote de fluxo cruzado	39
Figura 19 - Representação de cabeçote de fluxo unilateral	39
Figura 20 - Eixo de comando de válvulas	40
Figura 21 - Corte do sistema de válvula OHC	41
Figura 22 - Tipos de sistemas de válvulas	42
Figura 23 - Sistema de válvulas OHV	43
Figura 24 - Sistema Honda VTEC	45
Figura 25 - Sistema MultiAir	46
Figura 26 - Trilho Freevalve com atuadores.....	48
Figura 27 - Atuador Freevalve com válvula acoplada	49
Figura 28 - Foto de unidade de controle eletrônico	49
Figura 29 - Esquema de atuação do Freevalve.....	50
Figura 30 - Linha pneumática e hidráulica	51
Figura 31 - Fase de Carregamento	53

Figura 32 - Estado de expansão/permanência.....	54
Figura 33 - Estado de descarga	55
Figura 34 - Freio Hidráulico	55
Figura 35 – Beijing Motor Show 2016: Qoros demonstrou o motor <i>camless</i>	57
Figura 36 - Koenigsegg Gemera	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem de ignição dos MCI

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

API	<i>AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE</i>
BDC	<i>BOTTON DEAD CENTER</i>
DOHC	<i>DUAL OVER HEAD VALVE</i>
FVVT	COMANDO TOTALMENTE VARIÁVEL DE VÁLVULAS
ITDC	TDC DE IGNIÇÃO
MCI	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
OTDC	TDC DE SOBREPOSIÇÃO
OHV	COMANDO DE VÁLVULAS
OHC	<i>OVER HEAD VALVE</i>
PMS	PONTO MORTO SUPERIOR
PMI	PONTO MORTO INFERIOR
SAE	<i>SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS</i>
SOHC	<i>SINGLE OVER HEAD VALVE</i>
TDC	CENTRO MORTO DO TOPO
VVT	VARIABLE VALVE TIMING
VTEC	<i>VARIABLE VALVE TIMING AND LIFT ELETRONIC CONTROL</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 METODOLOGIA	16
2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	17
2.1 Máquinas térmicas volumétricas rotativas	17
2.2 Motores de pistões alternativos	18
2.3 Motores de 4 tempos	19
2.3.1 Admissão.....	19
2.3.2 Compressão	20
2.3.3 Combustão	21
2.3.4 Escape	21
2.4 Motores 2 tempos	22
2.5 Ciclo Otto	23
2.6 Ciclo Atkinson	23
2.7 Ciclo diesel	24
3 RENDIMENTOS TÉRMICOS E MECÂNICOS	25
3.1 1ª Lei da Termodinâmica	26
3.2 2ª Lei da Termodinâmica	26
3.3 Potência efetiva (N_e)	27
3.4 Potência indicada (N_i)	27
3.5 Rendimento térmico (η)	27
3.6 Rendimento mecânico	28
3.7 Rendimento total	28
4 SINCRONISMO DE VÁLVULAS	29
5 SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO	30

5.1	Função dos componentes	30
5.2	Óleo Lubrificante	31
5.3	Tipos de Óleos Automotivos	31
5.3.1	Minerais	31
5.3.2	Sintéticos	32
5.3.3	Semissintético	32
5.4	ADITIVOS	32
5.5	PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO ÓLEO	32
5.5.1	Viscosidade	33
5.5.2	Índice de Viscosidade	33
5.5.3	Ponto de Fulgor	33
5.5.4	Ponto de Fluidez	33
5.6	MÉTODOS DE LUBRIFICAÇÃO	33
5.6.1	Lubrificação por Chapinagem	34
5.6.2	Lubrificação por Pressão	34
5.6.3	Lubrificação Mista	35
5.6.4	Lubrificação por Cáter Seco	35
6	Sistema de válvulas	36
6.1	Cabeçote do motor	38
6.1.1	Cabeçote com <i>design</i> de fluxo cruzado	38
6.1.2	Cabeçote com <i>design</i> de fluxo unilateral ou contrafluxo	39
6.2	Eixo de comando de válvulas	40
6.3	Válvulas	41
6.4	Tipos de Sistemas	42
6.4.1	Over-Head-Valve (OHV)	43
6.4.2	Over-Head-Camshaft (OHC) / Single-Overhead-Camshaft (SOHC)	44
6.4.3	<i>Variable Valve Timing and Lift Electronic Control (VTEC)</i>	44

6.4.4	MultiAir	45
7	Freevalve.....	47
7.1	Componentes	49
7.1.1	Unidade de controle eletrônica.....	49
7.1.2	Atuadores	50
7.1.3	Válvulas direcionais.....	50
7.1.4	Solenoides.....	50
7.1.5	Sensores de posições	51
7.1.6	Linhas pneumáticas e hidráulicas	51
7.2	Funcionamento.....	51
7.2.1	Fase de carregamento de ar	52
7.2.2	Fase de expansão e permanência	53
7.2.3	Descarga de ar.....	54
7.3	Vantagens do Freevalve	56
7.4	Desvantagens do Freevalve	56
7.5	Aplicações	57
8	CONCLUSÃO	58
8.1	Propostas Futuras.....	59

1. INTRODUÇÃO

Na infindável busca para se desenvolver veículos mais sustentáveis e eficientes para o mercado, capazes de gerar maiores rendimentos de potência e torque com baixos índices de consumo de combustível, as montadoras vêm otimizando os motores para que eles sejam cada vez mais eficientes. Nos motores, o comando de válvulas é um dos componentes mais importantes para eficiência do motor. Ele faz o trabalho do controle do enchimento de mistura ar/combustível e esvaziamento dos gases de escape nos cilindros em tempo correto para obter uma melhor eficiência de trabalho gerado na combustão.

Os primeiros comandos de válvulas de motores a combustão interna eram limitados, pois o tempo de abertura e o curso das válvulas eram constantes, dessa forma o motor não possuía um grande rendimento da combustão, as válvulas poderiam abrir muito em baixas rotações causando uma perda de rendimento, ou abrir pouco em altas rotações desencadeando uma perda de potência. Com um comando de válvula que possa regular a abertura e o fechamento em diversas fases de trabalho do motor tem-se um motor de maior eficiência tanto em relação ao consumo energético quanto ao trabalho gerado. Por isso a Koenigsegg, montadora sueca de carros superesportivos, juntamente com a empresa Freevalve, pesquisou e desenvolveu um sistema de válvulas variáveis sem comandos, utilizando apenas meios de atuação pneumáticos, hidráulicos e elétricos. Esse sistema ainda é uma inovação no mercado automobilístico mundial e principalmente no Brasil. Ele pode ajudar no consumo de gasolina tal como na diminuição de gases poluentes.

A tradução de *FreeValve* para português, também chamado de *camless engine*, faz referência a um motor livre de cames ou válvulas. Essa tecnologia possui muitas vantagens sobre as atuais tecnologias de comando de válvula variável utilizadas em grande parte dos veículos comercializados, sendo a maior das vantagens o alívio de peso devido ao fato de dispensar o uso de diversas peças e o menor número de peças mecânicas acopladas ao motor, diminuindo as perdas mecânicas e a probabilidade de falhas mecânicas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Esse trabalho foi desenvolvido com a intenção de apresentar uma inovação automotiva promissora, expondo a sua vasta vantagem quando adaptada a motores de combustão interna.

1.2 OBJETIVOS

Para se obter compreensão do tema, serão abordadas comparações entre o motor proposto pelo trabalho e os convencionais, mostrando as principais diferenças entre os seus principais sistemas, rendimentos térmicos e mecânicos, características de trabalho e outros dados de grande importância. O objetivo principal é demonstrar se a tecnologia é promissora para aplicação em motores.

Porém compreender os principais conceitos físicos que serão expostos no trabalho será indispensável para se absolver todos os benefícios do tema.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho foi feito por meio de análises de artigos e fontes bibliográficas e conversas com especialistas automotivos.

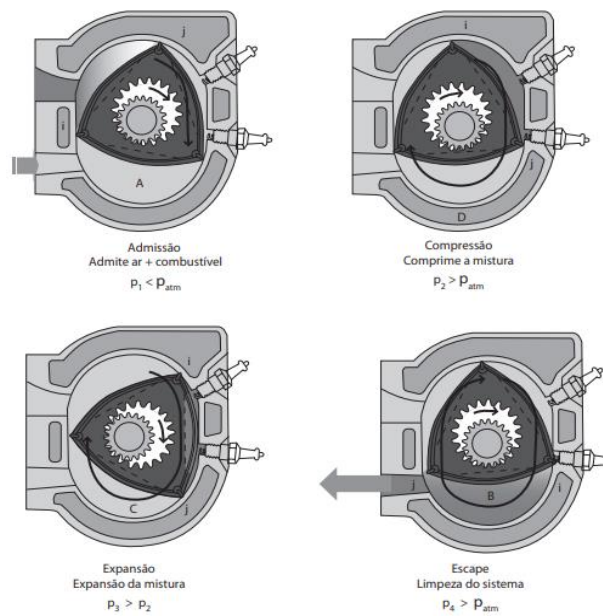
2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Segundo Brunetti (2013) os MCI (Motores de combustão interna) são essencialmente máquinas térmicas volumétricas, ou seja, são dispositivos que transformam a energia térmica em energia mecânica útil. A energia térmica é provida da combustão da mistura ar-combustível, que aumenta consideravelmente a pressão no cilindro. O motor foi feito para aproveitar essa pressão ao máximo e por meio do mecanismo de biela-manivela esse trabalho é transformado em movimento rotativo que depois é transferido para as rodas. Máquinas térmicas volumétricas podem ser divididas em alternativas e rotativas.

2.1 Máquinas térmicas volumétricas rotativas

Motores rotativos ou ciclo Wankel apesar de serem considerados como máquinas rotativas não são necessariamente rotativos, pois sofrem movimentos de translação associados a rotação, o movimento do rotor não é em torno do seu próprio eixo. Esses, como mostra a imagem da Figura 1, são constituídos de um rotor aproximadamente triangular e um estator formado pelas posições dos vértices do rotor. Cada lado do estator possui uma espécie de câmara para que haja mais espaço para a mistura ar-combustível. Existem quatro desses espaçamentos para cada ciclo: Admissão, compressão, combustão e escape. Entre esses espaços há a diminuição de volume dessa câmara, característica principal de máquinas volumétricas.

Figura 1 - Motor ciclo Wankel



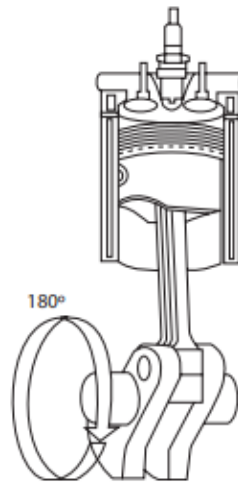
Fonte: BRUNETTI Franco, **Motores de combustão interna**, 2012, P. 58

2.2 Motores de pistões alternativos

Motores volumétricos alternativos ou motores de pistões alternativos são máquinas nas quais o trabalho é obtido pelo movimento alternativo do êmbolo, ou seja, um movimento de vai e vem, linear que vai de um ponto a outro, esses pontos são determinados como ponto morto superior (PMS) e ponto morto inferior (PMI), dentro de uma cavidade denominada cilindro. O movimento vai e vem é transformado em rotação contínua através de um sistema de biela-manivela.

Conforme Martins (2014), o MCI alternativo a mistura ar-combustível é admitida numa cavidade de volume variável chamada de êmbolo ou pistão como representa a Figura 2, esse com a diminuição do volume e o aumento de pressão resulta na combustão da mistura que faz com que o êmbolo seja forçado a se movimentar linearmente em direção ao PMS, transformando esse movimento em rotativo através de um mecanismo biela-manivela.

Figura 2 - Representação de um pistão e cilindro



Fonte: BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**, 2012. Pag. 34 volume 1

2.3 Motores de 4 tempos

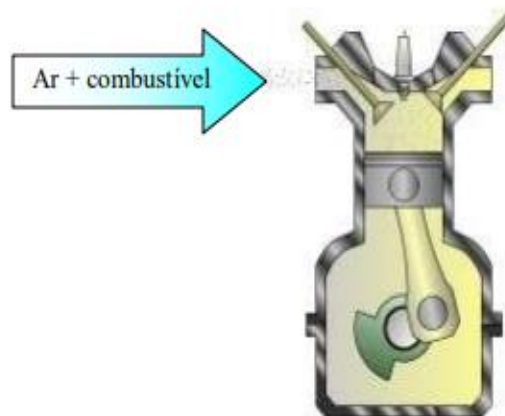
Nos motores de pistões alternativos de quatro tempos o ciclo completo é realizado em 720° na árvore de manivelas, ou seja, duas voltas. Cada tempo é realizado em 180° o que representa um movimento completo do PMS ao PMI ou vice e versa. Os pontos mortos são pontos máximo nos quais o êmbolo se desloca no cilindro. A distância entre esses é conhecida como o curso.

Os tempos conhecidos dos motores 4 tempos são: Admissão, compressão, expansão ou combustão e escape

2.3.1 Admissão

Nessa etapa o motor admite o ar externo por meio da abertura da válvula de Admissão. Representado na Figura 3 a pressão atmosférica e a sucção do êmbolo do pistão ao se deslocar do PMS ao PMI, realizam a aspiração de ar para o interior do cilindro. Em motores com injeção indireta de combustível, o motor admite a mistura de ar/combustível ao invés de apenas ar.

Figura 3 - Tempo de admissão



Fonte: VARELLA, Carlos. **Princípio de Funcionamento de Motores a Combustão Interna**, p.3.

2.3.2 Compressão

Após o ar ter sido Admitido, a Válvula de Admissão se fecha e o êmbolo do pistão começa a se deslocar do PMI ao PMS, comprimindo o ar na câmara de combustão. A figura 4 demonstra o tempo de compressão, evidenciando as válvulas do cabeçote fechadas.

Figura 4 - Tempo de compressão



Fonte: VARELLA, Carlos. **Princípio de Funcionamento de Motores a Combustão Interna**, p. 3.

2.3.3 Combustão

Com a Válvula de Admissão e a Válvula de Escape ainda fechadas, o deslocamento do êmbolo do pistão em direção ao PMS fornece pressão e a vela a ignição por meio da centelha para a mistura carburante no interior do cilindro. Como mostra a figura 5, após a queima da mistura carburante ocorre a expansão dos gases que acabam gerando uma pressão na câmara de combustão, fazendo o êmbolo deslocar-se ao PMI.

Figura 5 - Tempo de combustão

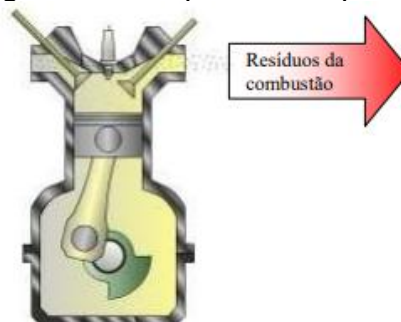


Fonte: VARELLA, Carlos. **Princípio de Funcionamento de Motores a Combustão Interna**, p.4.

2.3.4 Escape

Nessa última etapa a Válvula de Escape é aberta e o êmbolo do pistão desloca-se em direção ao PMS, eliminando todos os gases provenientes da combustão. A figura 6 ilustra a válvula de escape aberta enquanto o êmbolo direciona os gases residuais ao escape.

Figura 6 - Tempo de escape

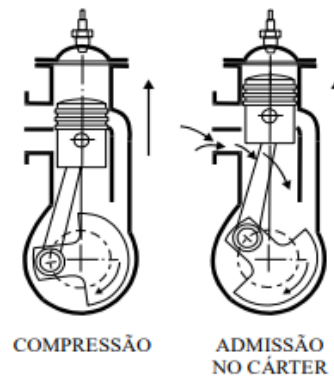


Fonte: VARELLA, Carlos. **Princípio de Funcionamento de Motores a Combustão Interna**, p.4.

2.4 Motores 2 tempos

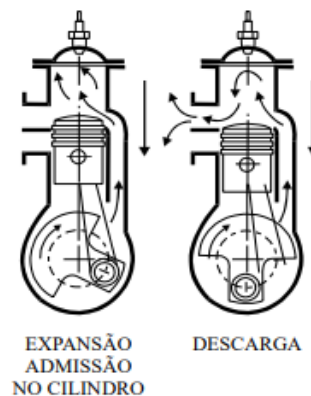
Os motores de pistões alternativos dois tempos recebem esse nome pois realizam o ciclo de trabalho completo em apenas 360° , uma volta na árvore de manivelas. O primeiro ciclo, como demonstra a figura 7, representa simultaneamente a admissão e a compressão em 180° na árvore de manivelas. O segundo ciclo, como demonstra a figura 8, representa simultaneamente a combustão e escape em mais 180° na árvore de manivela completando assim o ciclo de funcionamento completo.

Figura 7 - Compressão e admissão



Fonte: VARELLA, Carlos. **Princípio de Funcionamento de Motores a Combustão Interna**, p.4.

Figura 8 - Expansão e escape



Fonte: VARELLA, Carlos. **Princípio de Funcionamento de Motores a Combustão Interna**, p.4.

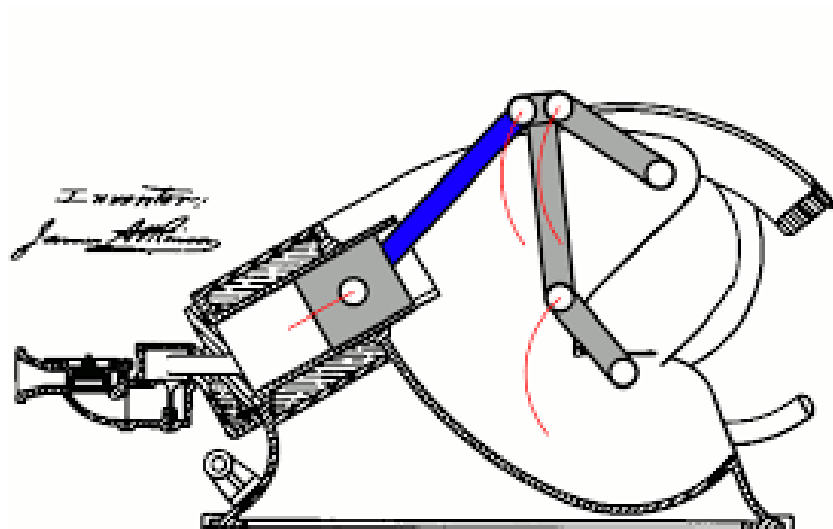
2.5 Ciclo Otto

Os motores ciclo Otto ou por ignição comandada são motores de pistão alternativos nos quais a combustão inicia-se por uma descarga de energia dentro da câmara de combustão, ou seja, a combustão interna. Podem ser 4 tempos ou 2 tempos. Essa descarga é proveniente de um sistema de ignição eletrônico composto principalmente por bateria, alternador, bobina de ignição, cabos e velas de ignição.

2.6 Ciclo Atkinson

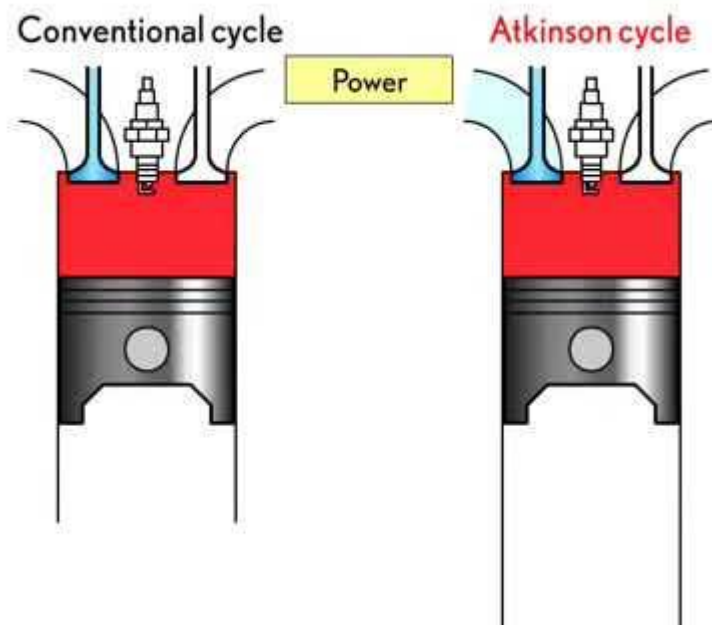
O motor de ciclo Atkinson ou Miller é um motor alternativo ao ciclo Otto no qual o principal objetivo é eficiência energética e não desempenho. Criado em 1982, por James Atkinson, o clássico motor ciclo Atkinson tinha como característica um deslocamento maior do pistão na fase de expansão. Atkinson alcançou esse traço característico do motor, observando a Figura 9, adotando um complexo sistema de construção da biela-manivela que fazia com que o deslocamento fosse maior.

Figura 9 - Motor ciclo Atkinson



O ciclo Miller tem o mesmo princípio do ciclo Atkinson, no entanto ele dispensa o uso de um sistema complexo de biela-manivela, como é possível observar na Figura 10. Miller atingiu a característica do Ciclo Atkinson somente com a configuração de abertura e fechamento das válvulas, o motor externamente tem a mesma construção de um motor ciclo Otto comum. Nesse caso as válvulas de admissão do motor não se fecham ao pistão chegar imediatamente ao PMI e sim após o PMI, enquanto o pistão sobe, com parte da mistura voltando ao coletor de admissão, o motor adquire o aspecto do ciclo Atkinson, no qual a fase de compressão é menor do que a de expansão.

Figura 10 - Ciclo Atkinson/Miller



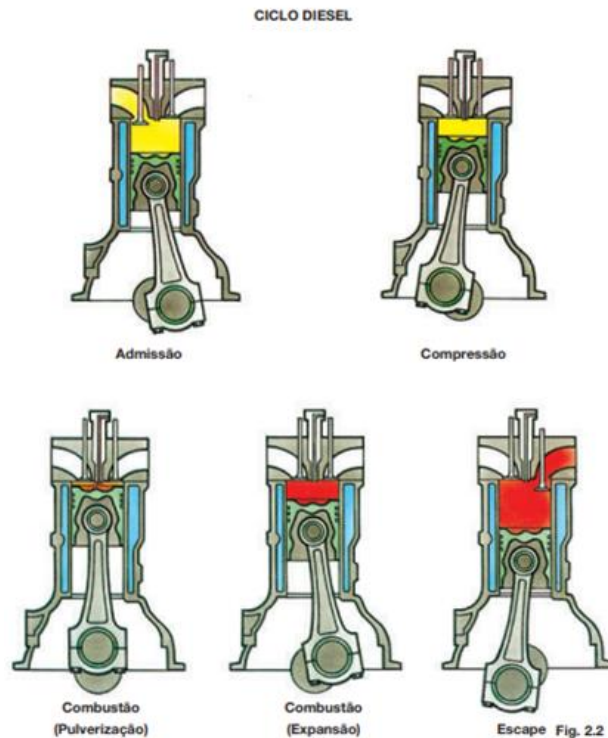
Fonte: Youtube. **Atkinson Cycle Animation**. 2015

2.7 Ciclo diesel

Os motores ciclo diesel ou motores por ignição espontânea, são motores de 4 tempos nos quais no ciclo de admissão apenas o ar é admitido no cilindro, na compressão o pistão comprime uma massa de ar até que a temperatura se encontre

suficientemente alta, conforme a Figura 11. Quando é alcançada essa temperatura, denominada temperatura de autoignição, normalmente próxima ao PMS, o combustível é pulverizado por um bico injetor na massa de ar quente e reage espontaneamente com o oxigênio, sem a necessidade de uma centelha para ignição. Por esse motivo são classificados como motores de ignição espontânea.

Figura 11 - Ciclo Diesel



Fonte: MAHLE, **Manual Técnico**, p.18.

3 RENDIMENTOS TÉRMICOS E MECÂNICOS

Para entendermos sobre os rendimentos térmicos dos motores precisamos inicialmente entender sobre os ciclos termodinâmicos. Motores de combustão interna são essencialmente máquinas térmicas, resumidamente são máquinas que conseguem converter calor em trabalho útil.

Nos motores, a reação de combustão ocorre no interior dos cilindros, por isso combustão interna, envolvendo o combustível. Essa é uma reação exotérmica, ou seja, libera calor e o motor tem como objetivo converter esse calor em trabalho. O principal problema é que não é possível transformar todo o calor liberado em trabalho.

3.1 1ª Lei da Termodinâmica

Fundamenta-se no princípio de conservação de energia, um dos mais importantes da física. De acordo com essa lei a energia não é perdida, mas sim transformada ou armazenada. Fundamentalmente podemos entender essa lei pela fórmula que representa a variação de energia interna, que é o trabalho realizado subtraído do calor trocado com o meio:

$$\Delta U = Q - W$$

W: Trabalho

Q: Calor

ΔU : Variação de energia interna

3.2 2ª Lei da Termodinâmica

A 2ª lei da termodinâmica diz respeito as trocas de calor que possuem tendências de se equilibrarem termicamente ou seja, temperaturas diferentes se igualarem.

Um de seus princípios refere-se ao rendimento dos processos que será sempre inferior a 100%, sempre há uma perda mesmo que mínima. O rendimento pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A}$$

η : rendimento

Q_A : calor fornecido por aquecimento

Q_B : calor não transformado em trabalho

Para entendermos melhor sobre a equação de rendimento térmico dos motores, demonstramos abaixo alguns conceitos importantes.

3.3 Potência efetiva (N_e)

Representa a potência medida no eixo do motor.

$$N_e = T \cdot 2\pi \cdot n$$

Sendo:

T: Torque

n: Rotação do eixo do motor

Ne: Potência efetiva

3.4 Potência indicada (N_i)

Representa a potência gerada pelo ciclo termodinâmico do fluido ativo (ar-combustível), normalmente utilizando um indicador de pressões para medições.

$$N_i = w_i \cdot \frac{n}{x} \cdot z$$

Sendo:

w_i : Trabalho

n: Rotação

x: 1 ou 2 (se for 2T ou 4T respectivamente)

z: Número de cilindros

3.5 Rendimento térmico (η)

Definimos a eficiência térmica pela relação da potência efetiva sobre o calor fornecido pela combustão. Sendo o calor \dot{Q} calculado pela equação:

$$\dot{Q} = \dot{m}_e \cdot pci$$

Assim, por conseguinte temos a equação de rendimento térmico indicado (ou eficiência térmica):

$$\eta_i = \frac{N_i}{\dot{Q}}$$

Sendo:

\dot{Q} = Calor fornecido pela combustão pela unidade de tempo

\dot{m}_e : Consumo, fluxo ou vazão em massa

P_{ci} : poder calorífico inferior do combustível

N_i : potência indicada

3.6 Rendimento mecânico

O rendimento mecânico dos motores está associado aos seus componentes e as perdas principalmente por atrito da transmissão, por acionamento nas bombas de óleo, água e combustível. Sendo eles, árvore de cames, válvulas, pistões, bielas, engrenagens de transmissão e engrenagens de diferencial. Somando todas as perdas causadas por estes e outros componentes, conseguimos chegar a um número que representa o rendimento mecânico do conjunto. Pode ser definido pela relação entre o trabalho efetivo disponível (W_e) e o trabalho indicado (W_i). Sendo a relação entre o trabalho produzido no interior dos cilindros sobre o trabalho disponível no virabrequim.

$$\eta_m = \frac{\text{Trabalho efetivo}}{\text{Trabalho do ciclo indicado}} = \frac{w_e}{w_i}$$

3.7 Rendimento total

O rendimento total do motor relaciona todos os rendimentos calculados para alcançar um número de rendimento total. Pode ser descrito pela multiplicação de todos os rendimentos do motor.

$$\eta_T = \eta_n \cdot \eta_t \cdot \eta_C \cdot \eta_A \dots$$

4 SINCRONISMO DE VÁLVULAS

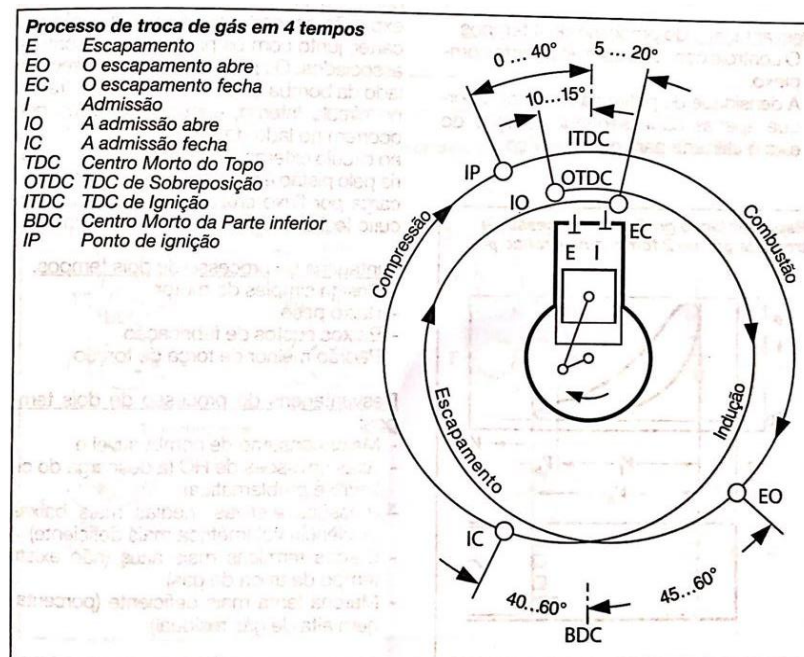
Nos motores de combustão interna que utilizam o processo aberto, o sistema de troca de gás deve demonstrar duas funções primordiais que são:

- A substituição de gás queimado, fazendo com que volte as suas condições iniciais do ciclo;
- Fornecer o oxigênio necessário para a queima do combustível.

A sincronização de válvula e conseqüentemente a troca de gases é regulada por um eixo de comando de válvula, cuja função é abrir e fechar as válvulas de admissão e escape do motor, que gira na metade da frequência da árvore de manivela.

Um MCI deve ser abastecido de ar fresco, enquanto o gás produzido pela combustão precisa ser eliminado. Como é possível observar na figura 12, logo antes do centro morto da parte inferior do pistão (BDC), a válvula de escape se abre (EO) e aproximadamente 50% dos gases produzidos pela combustão são eliminados por conta da pressão gerada na expansão da mistura. À medida que o pistão vai subindo em direção ao PMS, o resto da mistura queimada é eliminada da câmara de combustão. Logo após o centro morto da parte superior do pistão (TDC) e antes que a válvula de escape feche, a válvula de admissão abre (IO). Esse movimento é chamado de sobreposição de válvulas. Logo após isso o comando de válvula faz com que a válvula de escape feche (EC) e a de admissão continue aberta. Com a válvula de admissão ainda aberta o pistão está indo em direção ao PMI fazendo com que a câmara de combustão seja preenchida com ar fresco. Este processo de admissão de ar fresco que seria o segundo tempo continua até logo após BDC. Após isso é o processo de compressão no qual a válvula de admissão fecha e logo em seguida a combustão, o ciclo se repete infinitamente durante o uso do motor.

Figura 12 - Processo de troca de gases



Fonte: BOSCH, Robert **Manual de Tecnologia Automotiva**, 2018, p.471.

5 SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO

É um dos sistemas de maior importância no motor a combustão, ele é responsável por assegurar o correto funcionamento, garantindo a longevidade de todos os componentes fixos e móveis contra o atrito.

O atrito é uma força de resistência exercida através do contato de duas superfícies. Essa força resistível é capaz de provocar superaquecimentos, desgastes, perda de rendimento e até mesmo gripagem, ou seja, a peça se torna imóvel pois com a falta de lubrificação um componente se adere ao outro.

Os principais componentes encontrados nesse sistema são: Bomba de óleo, Pescador de Óleo, Filtro de Óleo, Cárter, além de outros como sensores e atuadores.

5.1 Função dos componentes

- **Bomba de Óleo:** Responsável por fornecer pressão ao sistema de lubrificação, fazendo assim com que o óleo percorra todo o interior do motor realizando a lubrificação.
- **Pescador de Óleo:** Através dele que o óleo é aspirado do cárter para as galerias do motor, além de fazer também a filtragem de partículas que habitualmente contaminam o óleo lubrificante.
- **Filtro de Óleo:** É o componente responsável por reter as menores partículas de contaminantes do óleo. Os mais comuns são capazes de filtrar partículas de até 20 μm .
- **Cárter:** Fica localizado na parte inferior do motor, sua principal função é servir de reservatório para o óleo escoado.

5.2 Óleo Lubrificante

O óleo lubrificante é o componente de maior importância presente no sistema de lubrificação, a tribologia é o estudo responsável pelo seu desenvolvimento, ela analisa a fricção, lubrificação e o desgaste para poder conferir a característica ao óleo.

A principal função do óleo lubrificante é formar uma camada lubrificada para que não ocorra o atrito sólido sobre as peças metálicas, porém também é capaz de fazer a refrigeração por meio da troca térmica entre componentes e fazer a redução de ruídos.

Assim como os combustíveis fósseis, o óleo lubrificante também é um derivado do petróleo. A sua composição é feita por meio da adição de óleo base e aditivo. Os lubrificantes são produzidos em diversos estados físicos, sendo eles: sólido, líquido, gasoso e pastoso.

5.3 Tipos de Óleos Automotivos

5.3.1 Minerais

São os óleos produzidos somente por meio da destilação e refino do petróleo, onde posteriormente serão adicionados aditivos que lhe fornecem devidas propriedades.

5.3.2 Sintéticos

São os óleos produzidos sem a utilização de petróleo, eles são formulados por indústrias por meio de reações químicas. Em sua formulação não é necessário a mesma proporção de aditivos do que os óleos minerais.

5.3.3 Semissintético

Esse óleo é produzido com a junção do óleo mineral e o sintético, em uma proporção que consiga alcançar as propriedades requeridas.

5.4 ADITIVOS

São substâncias químicas utilizadas na fórmula do óleo automotivo para garantir as propriedades físicas e químicas ideais de acordo com as características de cada motor.

Diversos tipos de aditivos são produzidos nas indústrias para atender a todas as exigências de projeto. Os principais aditivos utilizados são: Detergentes, antioxidantes, anticorrosivos, dispersantes e antiespumantes.

5.5 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO ÓLEO

Cada óleo lubrificante possui características físicas e químicas totalmente diferentes. As normas *American Petroleum Institute (API)* e *Society of Automotive Engineers (SAE)* são responsáveis por estabelecer as especificações e classificações dos óleos de acordo com sua aplicação de trabalho.

5.5.1 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade física do óleo mais trabalhada durante seu desenvolvimento. Ela é a grandeza física medida em centipoise (cP), ela determina a resistência ao fluxo de um fluido, portanto, quanto maior for a viscosidade, maior será a dificuldade de locomoção do fluido.

5.5.2 Índice de Viscosidade

O índice de viscosidade é um valor adimensional que demonstra a variação da viscosidade em relação a oscilação da temperatura. Ao analisar o índice de viscosidade, é possível concluir que a viscosidade de um óleo está totalmente relacionada à temperatura.

5.5.3 Ponto de Fulgor

O ponto de fulgor determina qual a temperatura mínima que um determinado óleo vai começar a liberar vapor, devido a uma fonte externa de calor. O estudo do ponto de fulgor é necessário para se determinar qual é a melhor faixa de trabalho de um óleo, sem que ele passe pela inflamação.

5.5.4 Ponto de Fluidez

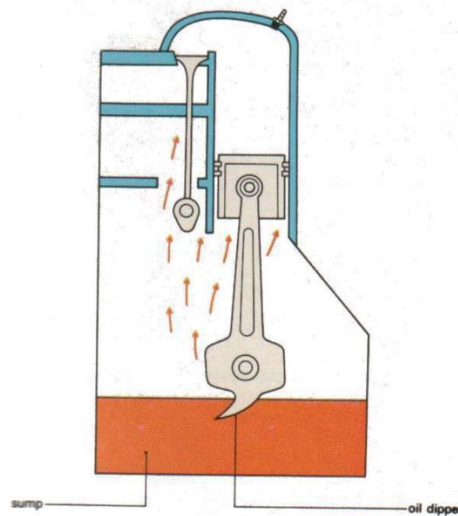
O ponto de fluidez determina a menor temperatura no qual o óleo consegue trabalhar devidamente, exposto somente a força da gravidade. A análise do ponto de fluidez determina o comportamento do óleo em condições de trabalho de baixa temperatura.

5.6 MÉTODOS DE LUBRIFICAÇÃO

5.6.1 Lubrificação por Chapinagem

Esse método consiste no uso da biela durante o seu ciclo rotativo de funcionamento, para entrar em contato com o óleo armazenado no interior do cárter e difundir-lo para os outros componentes internos do motor, como é possível observar na figura 13. Para que seja captado a quantidade exata de óleo, a capa da biela possui um formato similar a uma colher.

Figura 13 - Lubrificação por Chapinagem

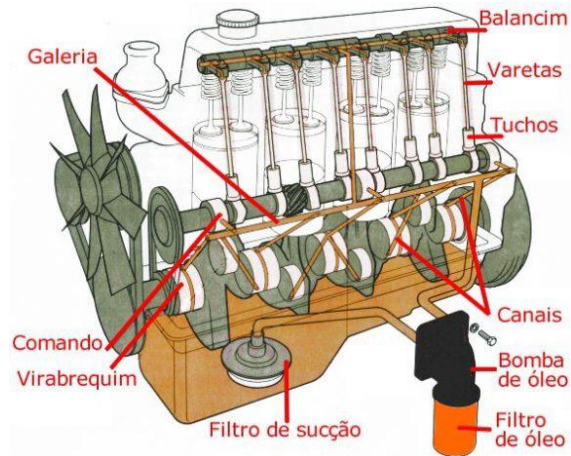


Fonte: Carros in Foco, 2014

5.6.2 Lubrificação por Pressão

Nesse método de lubrificação, o ponto mais baixo do cárter do motor encontra-se a bomba de óleo e o filtro de óleo, o filtro reterá as impurezas do óleo para que em seguida a bomba de óleo forneça pressão para que o óleo faça seu trajeto de lubrificação. A figura 14 ilustra um motor com lubrificação por pressão, o óleo passará por dutos, galerias internas do motor e pelos canais de componentes móveis deixando um filme de óleo sobre a superfície de mancais, bronzinas e outros componentes. O movimento rotativo do motor faz com que o óleo seja centrifugado e volte para o cárter.

Figura 14 - Lubrificação por pressão



Fonte: R19Club, 2018

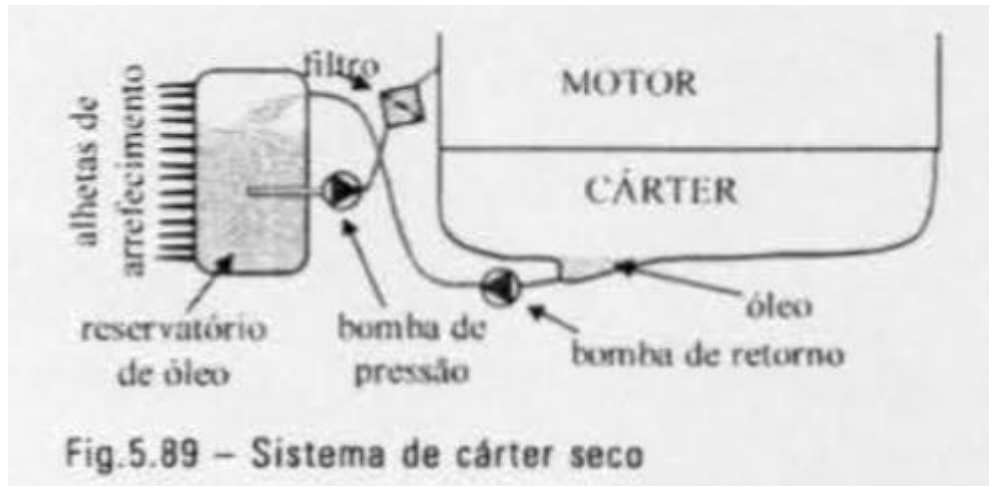
5.6.3 Lubrificação Mista

Esse método de lubrificação é muito utilizado tanto em veículos terrestres como em aeronaves, devido ao fato de unir dois sistemas de lubrificação em apenas um. A biela em formato de colher e a movimentação das peças entre si fazem a lubrificação de alguns pontos do motor, enquanto a bomba de óleo leva a lubrificação aos pontos não alcançados pela lubrificação por chapinagem.

5.6.4 Lubrificação por Cárter Seco

Diferente dos outros métodos de lubrificação, nesse o óleo fica armazenado no interior de um reservatório à parte e não no cárter do motor conforme figura 15 demonstra. Para fazer a lubrificação, são usadas duas ou mais bombas de óleo que continuam fornecendo pressão ao sistema independente da condição de trabalho. Devido à falta da necessidade de um cárter grande para armazenar óleo, o motor terá menor altura e conseqüentemente o centro gravitacional do veículo será aperfeiçoado.

Figura 15 - Lubrificação por cárter seco



Martins, J. **Motores de combustão interna**, 2006 p.127.

6 SISTEMA DE VÁLVULAS

Os motores de combustão interna 4 tempos, como já citado no capítulo 2.3.1, na etapa de admissão, admitem a mistura ar/combustível pelos dutos da válvula de admissão para que posteriormente, dentro da cavidade do cilindro essa mistura seja comprimida, queimada e depois expelida por meio dos dutos da válvula de escape. As aberturas e fechamentos das válvulas devem ocorrer ciclicamente pelo motor a metade da frequência da biela-manivela, isso significa que a cada 2 voltas, ou um ciclo, uma das válvulas abre uma vez. A tabela 1 demonstra que os motores possuem uma ordem de funcionamento específica e usualmente nos motores 4 cilindros em linha essa ordem de funcionamento é: 1,3,4,2

Tabela 1 - Ordem de ignição MCI

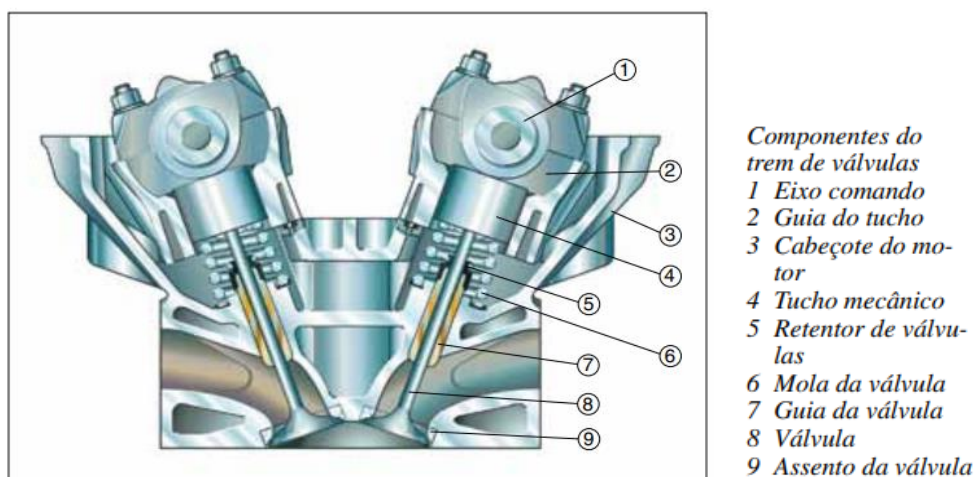
Ciclo de 4 tempos

Comando de válvulas	Árvore de manivelas	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	Cilindro 4
90°	180°	EXP	ESC	COMP	ADM
180°	360°	ESC	ADM	EXP	COMP
270°	540°	ADM	COMP	ESC	EXP
360°	720°	COMP	EXP	ADM	ESC

Fonte: Olivieri, ANDRE. **Motores - Introdução**. [2015]

O sistema de válvulas é um conjunto mecânico de vários componentes, evidenciados na Figura 16, nos motores atuais é composto normalmente de um ou mais eixos de comando de válvulas e as válvulas presentes no cabeçote do motor. Esse sistema é essencial para o funcionamento dos MCI pois o ciclo de combustão do motor depende totalmente da abertura e fechamento das válvulas, também conhecido como troca de gases, para controlarem a entrada e saída dos gases de admissão e escape.

Figura 16 - Componentes do trem de válvulas



Fonte: VERLAG, 2011, p. 5

6.1 Cabeçote do motor

A figura 17 demonstra um cabeçote que tem como função vedar a parte superior dos cilindros e alojar componentes como velas de ignição, injetores de combustível, no caso de injeção direta, e parte do sistema de válvulas como as válvulas, os tuchos ou balancins, dutos de óleo e água, eixo do comando de válvulas e os dutos que direcionam as massas de ar para dentro do cilindro (admissão) e para o sistema de escapamento (pós-combustão). Acrescentado com o pistão, o cabeçote também tem a função de garantir o formato da câmara de combustão.

Figura 17 - Cabeçote de motor com 4 válvulas por cilindro



Fonte: Hayabusa Zone, 2020

6.1.1 Cabeçote com *design* de fluxo cruzado

Os cabeçotes com esse *design* possuem a característica de fluxo de gases cruzado, vide Figura 18, ou seja, as passagens de admissão e escape ficam localizadas em lados opostos do cabeçote. De acordo com o Manual de tecnologia Bosch a vantagem deste *layout* é possuir maior liberdade no desenho dos dutos da admissão e escapamento.

Figura 18 - Representação de cabeçote de fluxo cruzado

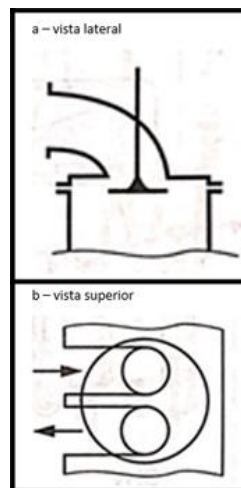


Fonte: BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. 2018, p. 467

6.1.2 Cabeçote com *design* de fluxo unilateral ou contrafluxo

Os cabeçotes de cilindro com esse *design* possuem a característica de fluxo de gases unilateral, como mostra a Figura 19, ou seja, os dutos de admissão e escape ficam localizados do mesmo lado no cabeçote. O Manual Bosch de tecnologia explica que esse *layout* limita o espaço disponível para as passagens, mas apresentam uma vantagem para motores sobrealimentados por possuir um fluxo mais curto.

Figura 19 - Representação de cabeçote de fluxo unilateral



Fonte: BOSCH, 2018, p. 467

6.2 Eixo de comando de válvulas

O eixo de comando de válvulas ou árvore de cames são eixos que possuem cames, como na Figura 20, em sua extensão e são essas cames que são responsáveis pelo acionamento do trem de válvulas. A árvore de cames pode ser localizada lateralmente, no bloco do motor ou à cabeça, no cabeçote. Juntando essas informações de localização, quantidade de árvores de cames e o tipo de acionamento é possível distinguir os variados tipos de construção dos sistemas de acionamento de válvulas. Esses sistemas serão abordados posteriormente. Atualmente a maioria dos automóveis possuem árvore de cames no cabeçote, podendo ser apenas uma ou duas.

Figura 20 - Eixo de comando de válvulas



Fonte: ClubAutoDoc, 2020

Por meio de correias dentadas ou correntes de comando, a ligação entre o virabrequim e a árvore de cames é realizada. Sabe-se que a velocidade de rotação do eixo de comando deve ser a metade da rotação do virabrequim.

Os cames apresentam formas excêntricas e esses tem a função de transformar o movimento giratório do eixo em movimento linear para as válvulas do motor por meio do seguidor. Esses devem assegurar a abertura e fechamento das válvulas de forma rápida e uniforme. Para o fechamento das válvulas são utilizados conjuntos de molas e pratos que aplicam uma força contrária ao movimento de abertura.

6.3 Válvulas

As válvulas tem a função de controlarem a entrada e saída de gases nos dutos do cabeçote, elas funcionam como uma porta controlada mecânica, que está relacionada à rotação do motor, abrindo e fechando várias vezes por minuto. Observando a Figura 17 percebemos que 2 válvulas são maiores que as outras, isso se dá pela alta temperatura dos gases que saem pelo escapamento, por isso comumente as válvulas de escape possuem um diâmetro menor possibilitando uma melhor dissipação de calor, além da necessidade de um fluxo maior na admissão do veículo.

Como nas válvulas de escape a temperatura pode chegar a números muito altos, cerca de 700°C nos cabeçotes é de suma importância haver uma boa rede de arrefecimento próximo as sedes.

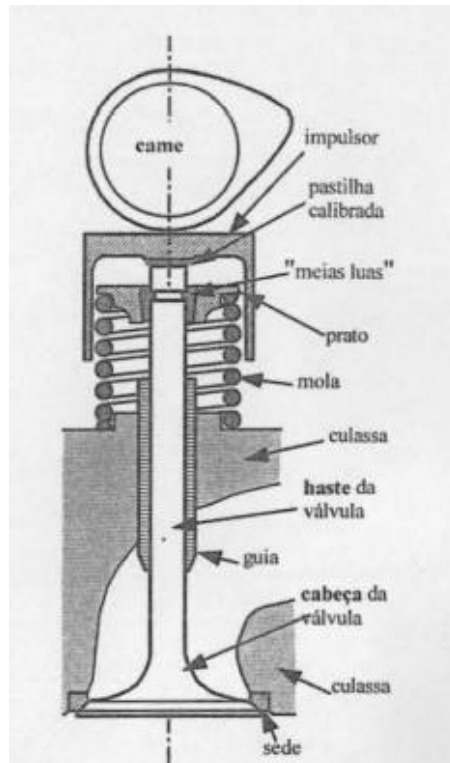
A fabricação das válvulas se dá por materiais que são resistentes o suficiente aos choques e inclusive resistentes à altas temperaturas

A Figura 21 demonstra o corte do sistema de válvulas, elas são divididas em duas partes:

A haste de válvula: Parte superior da válvula, possui a função de guiar, impulsionar a cabeça da válvula e transmitir calor para depois ser dissipado. Em alguns motores a haste de válvula possui um sistema de melhoria de arrefecimento, nesse sistema no interior da haste há uma cavidade que possui algum material com uma alta taxa de transferência de calor como o Sódio, para que a temperatura seja transferida mais facilmente para o guia das válvulas.

A cabeça da válvula: Possui um desenho que varia pouco de acordo com as construções. Esse desenho normalmente é próximo ao desenho de uma tulipa e garante um melhor direcionamento dos gases tanto de admissão quanto de escape.

Figura 21 - Corte do sistema de válvula OHC



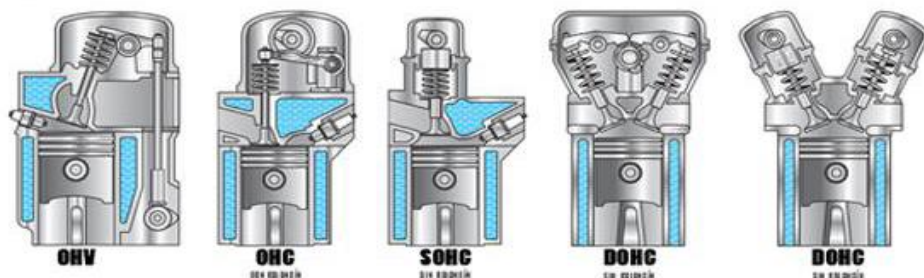
Fonte: MARTINS, 2006, p. 113

6.4 Tipos de Sistemas

Nos veículos atuais, encontram-se os sistemas de válvulas dispostos em duas maneiras: O eixo de comando de válvulas acoplado no cabeçote e o eixo do comando de válvulas no bloco do motor, é possível verificar os variados tipos na Figura 22.

Com o avanço do desenvolvimento do sistema ou distribuição ao longo das décadas, foi possível obter cada vez melhores rendimentos, menores índices de emissão de gases e diminuição de custos estes.

Figura 22 - Tipos de sistemas de válvulas



Fonte: Racing Club, 2019

6.4.1 Over-Head-Valve (OHV)

Em português “válvula Sobre a cabeça”. Significa que a válvula fica no cabeçote do motor, esses motores são conhecidos por possuírem um comando simples, portanto possuem apenas um eixo de comando válvulas e esse é localizado no bloco do motor. Ilustrado na Figura 23, nesse tipo de sistema o eixo de comando, localizado no bloco do motor, por meio do movimento rotacional e dos ressaltos dos comes fazem com que a varetas realizem um movimento linear, acionando assim os balancins, os tuchos e por fim as válvulas que estão presentes no cabeçote.

Esse sistema de distribuição teve grande importância no passado do mercado automotivo, porém, devido a falhas como flutuação de válvulas e o excesso de componentes ele acabou sendo substituído.

Figura 23 - Sistema de válvulas OHV



Fonte: EEWorld Online, 2021

6.4.2 Over-Head-Camshaft (OHC) / Single-Overhead-Camshaft (SOHC)

Em ambos os mecanismos existem apenas um eixo de comando localizado sobre o cabeçote do motor. Assim como no sistema OHV, ele fará seu movimento rotatório por meio de correia dentada ou corrente de comando que está ligada ao eixo da árvore de manivelas do motor.

Analisando a Figura 22, o que acaba distinguindo os dois sistemas é a sua construção de acionamento das válvulas. Enquanto o OHC faz o acionamento das válvulas indiretamente por meio de balancins, o SOHC faz o acionamento mecânico por meio do próprio eixo de comando.

6.4.3 *Variable Valve Timing and Lift Electronic Control (VTEC)*

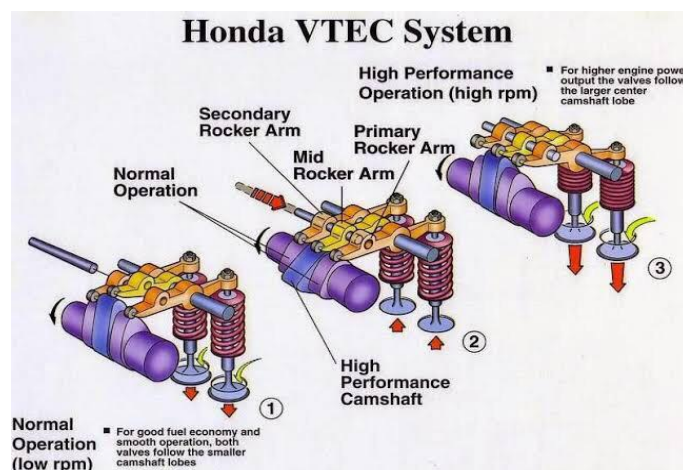
Essa tecnologia foi desenvolvida e implementada primeiramente pela marca japonesa Honda, com a intenção de obter melhores rendimentos do motor, além de reduzir o consumo de combustível. Essa aplicação assim como nos motores DOHC, vai possuir dois eixos de comando em seu cabeçote.

Na prática a sua construção de eixo de comando possui duas medidas de cames, sendo a maior delas para altas rotações, para aumentar o tempo de abertura de válvulas para o motor fazer uma melhor admissão, e outra medida menor para ser usada em baixas rotações quando o motor não solicita grandes cargas. É possível observar essa diferença de medidas pela Figura 24, na qual a primeira operação utiliza uma elevação normal e a segunda operação utiliza o came de alta performance. A alternância dos cames do eixo do comando é feita em relação a rotação, fazendo o uso de acionamentos hidráulicos.

Todo esse processo realizado no sistema de válvulas, não seria possível sem o uso de sensores e *interfaces* para emparelhar o sincronismo das fases e o correto momento de comandos para as válvulas. Por esse motivo o motor que possuir essa tecnologia possui sensores de pressão de massa de ar na admissão (MAP), sensores de posição da borboleta (TPS), sensor de rotação, sensor de fase, sensores de temperatura e sensores de velocidade do veículo.

Os motores equipados com VTEC são conhecidos por alcançarem rotações muito elevadas, acima de 7000 RPM e isso se dá ao fato de sua geometria ser superquadrada, ou seja, o curso da biela é menor que o êmbolo. Neste caso o VTEC entra como uma tecnologia essencial para aproveitamento dessas altas rotações, por ser variável ele consegue atender tanto baixas como altas rotações. De acordo Vilanova (2015), para exemplificar um motor sem o VTEC ao utilizar comes com altos deslocamentos de válvulas, será ótimo para atender a admissão em altas rotações, mas causaria um problema de emissões em baixas rotações, já um came com deslocamentos menores será mais eficiente em baixas rotações, porém em altas rotações será um problema pois a quantidade de ar admitida será reduzida. O VTEC consegue juntar esses dois tipos de comandos em apenas um que varia de acordo com a rotação.

Figura 24 - Sistema Honda VTEC



Fonte: Dust Runner Auto, 2016

6.4.4 MultiAir

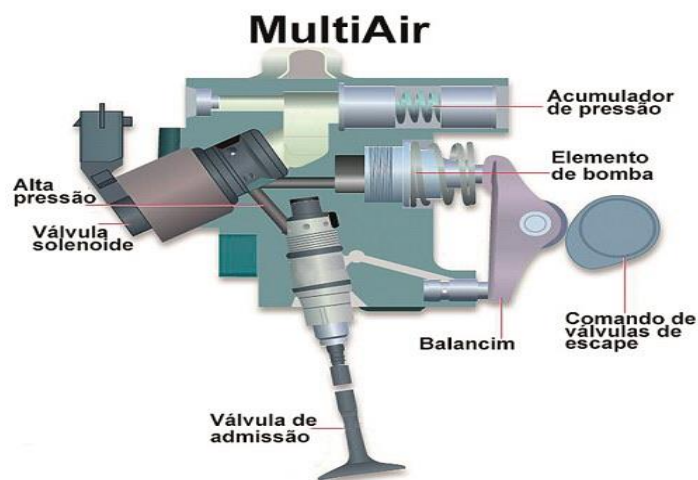
O MultiAir foi desenvolvido pela Fiat Powertrain, como um projeto inovador composto por dois métodos de controle de válvulas como mostra a Figura 25. O primeiro método de acionamento é por um sistema eletro-hidráulico e o outro de acionamento convencional por meio de um eixo de comando.

Enquanto as válvulas de escape são acionadas pela maneira convencional, mediante os comes do eixo de comando, as válvulas de admissão funcionam através

de comando elétrico enviados para uma válvula solenoide que faz com que uma pressão hidráulica seja exercida sobre a linha, realizando assim o controle de um êmbolo que possibilita a passagem e o bloqueio de óleo ao acesso de uma câmara hidráulica. O monitoramento do óleo está totalmente associado ao controle das válvulas, onde é possível se fazer a abertura e fechamento das válvulas de forma variável ao longo dos ciclos do motor. Essa característica possibilitou com que um MCI pudesse abrir a mesma válvula mais de uma vez no mesmo ciclo, para fazer uma maior admissão de mistura.

A principal vantagem do MultiAir é a possibilidade de dispensar o eixo de comando na admissão em diversos momentos, no qual ele não se faz necessário, como em baixas rotações, que acabam gerando um alto índice de dispersão de energia. Além disto ele acaba gerando maiores níveis de eficiência do motor em diferentes rotações.

Figura 25 - Sistema MultiAir



Fonte: Oficina Brasil, 2021

Hibridização

A ideia de que os veículos híbridos são provenientes de conceitos futurísticos, é totalmente verdadeiro, pelo simples fato de que o primeiro veículo híbrido foi desenvolvido em 1896, sendo projetado por Armstrong Phaeton, segundo o Bonhams (2016).

A essência da palavra híbrido acaba fazendo menção a junção de dois elementos, onde, no automobilismo, mais usualmente, esses elementos seriam um motor elétrico associado ao MCI. Atualmente, no mercado, são encontradas algumas variedades de híbridos, sendo os principais: Veículo Elétrico Híbrido, Veículo Elétrico Meio Híbrido e Veículo Elétrico Híbrido Plug-In. A característica marcante que acaba diferenciando ambos os mecanismos são a sua forma de carregamento e a de ativação de energia no sistema.

O formato de propulsão mais comum em veículos híbridos são os MCI com motores elétricos. Os veículos híbridos elétricos juntam as vantagens do alcance do MCI com os benefícios ambientais dos motores elétricos. A combinação desses dois tipos de fontes cria um veículo muito mais eficiente, aproveitando o melhor dos dois. Grande parte dos problemas de emissões e consumo de veículos movidos apenas a combustão está no deslocamento urbano, onde muitas vezes o veículo anda e para constantemente ou apenas fica parado, gerando um alto consumo de combustível mesmo com o veículo sem se movimentar. Com veículos híbridos os motores a combustão em um deslocamento urbano podem ser desligados, evitando um consumo desnecessário de combustível e podem ser ligados em um trajeto de deslocamento rodoviário, entregando um melhor desempenho, consumo e recarregando as baterias do sistema elétrico por meio do freio regenerativo. Além disso, por possuir dois tipos de propulsão, o MCI pode ser reduzido de tamanho e potência para que haja uma eficiência melhor, esses motores são chamados de motores *downsizing*.

7 FREEVALVE

No ano de 2000 foi criado e instalado em um motor a combustão um protótipo de sistema FVVT (*Fully Variable Valve Train*) lateral, ou seja, sistema de atuação de válvulas totalmente variável e sem eixo de comando, no mesmo ano a Cargine Engineering AB foi fundada. Os 3 fundadores da Cargine puderam sair dos seus empregos em 2003 quando a Koenigsegg fez um investimento em sua patente. Somente em 2012 após vários anos de crise financeira e fundadores abandonando o ramo da indústria automotiva, a Cargine foi comprada pela Koenigsegg e mudou de nome para Freevalve

O sistema FreeValve é um sistema de válvulas totalmente variáveis FVVA (*Fully Variable Valve Actuation*) da montadora de veículos Koenigsegg. Esse sistema dispõe de atuadores nos lugares dos comandos, sendo esses um para cada válvula evidenciado o sistema inteiro na Figura 26. Esse sistema é intitulado PHEA (*Pneumatic Hydraulic Electric Actuator*), ou seja, utiliza um atuador pneumático e hidráulico, acionado eletronicamente, demonstrado na Figura 27.

De acordo com Hamberg (2017) a força pneumática do ar comprimido é utilizada para acionar o atuador que faz com que a válvula abra, o retorno ocorre de forma pneumática pela força de sucção do ar comprimido que sai do pistão atuador e por meio de uma mola de retorno. A retenção da abertura de válvula decorre do sistema hidráulico, ou seja, o sistema pneumático abre a válvula, porém é o sistema hidráulico que mantém a válvula na posição. O mesmo sistema hidráulico também é empregado para controlar a velocidade do assento de válvula enquanto ela retorna, evitando impactos excessivos.

Figura 26 - Trilho Freevalve com atuadores



Fonte: Green Car Congress, 2016

Figura 27 - Atuador Freevalve com válvula acoplada



Fonte: WardsAuto, 2017

7.1 Componentes

7.1.1 Unidade de controle eletrônica

A unidade eletrônica é uma peça que abriga uma placa eletrônica lacrada como demonstra a Figura 28. Ela é utilizada para controle eletrônico dos atuadores e solenoides e transformação dos sinais recebidos de sensores para que a unidade possa interpretar esses dados importantes para o sistema, como por exemplo a posição de abertura da válvula fornecida pelo sensor de posição.

Figura 28 - Foto de unidade de controle eletrônico

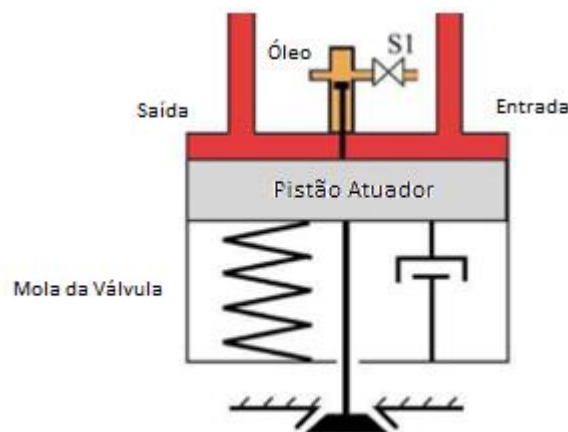


Fonte: BOSCH, 2020

7.1.2 Atuadores

Os atuadores do sistema Freevalve são denominados PHEA (*Pneumatic Hydraulic Electric Actuator*), significa que são atuadores pneumáticos-hidráulicos controlados eletronicamente. O movimento das válvulas ocorre pela conexão do atuador às válvulas, diferentemente de um sistema comum de válvulas que utiliza o acionamento por cames. O atuador pneumático e hidráulico utilizado no sistema Freevalve, como demonstra o esquema da Figura 29, possui uma entrada (*inlet*) e uma saída (*outlet*) pneumática para o ar comprimido e uma válvula hidráulica controlada por um solenoide que determina a entrada e saída do óleo.

Figura 29 - Esquema de atuação do Freevalve



Fonte: Adaptado de Gundersen, 2009

7.1.3 Válvulas direcionais

Válvulas direcionais são componentes que podem ser pneumáticos ou hidráulicos que tem a função de direcionar o sentido do fluxo do ar ou fluido. Essas podendo ser acionadas de várias formas.

7.1.4 Solenoides

Para fazer o controle adequado do ciclo das válvulas, são utilizados dois tipos de solenoides: Solenoide de Temporização (ST) e Solenoide de Elevação (SE).

Ambas exercem a mesma função de fazer o controle da entrada de ar para o pistão atuador, porém a primeira também executa o travamento hidráulico do circuito.

7.1.5 Sensores de posições

Para registrar o movimento da válvula do motor, utilizam-se sensores de posição que enviam os dados à central eletrônica, dado importante para a central entender qual a posição de cada válvula no motor.

7.1.6 Linhas pneumáticas e hidráulicas

Um trilho ou *rail* pneumático conectado ao compressor de ar possui mangueiras de saída que são conectadas cada uma em um atuador, veja o *rail* inferior da Figura 30. O trilho ou *rail* hidráulico conectado ao fornecimento de óleo, no qual cada atuador possui 2 mangueiras de óleo, sendo uma de entrada e outra de saída, veja a linha mais a direita da Figura 30.

Figura 30 - Linha pneumática e hidráulica



Fonte: GUNDERSEN, Øyvind. **Freevalve Technology**. 2009

7.2 Funcionamento

Segundo Gundersen (2009), para explicar de forma mais simplificada o funcionamento do Freevalve, é possível dividi-lo em 3 etapas: A fase de carregamento

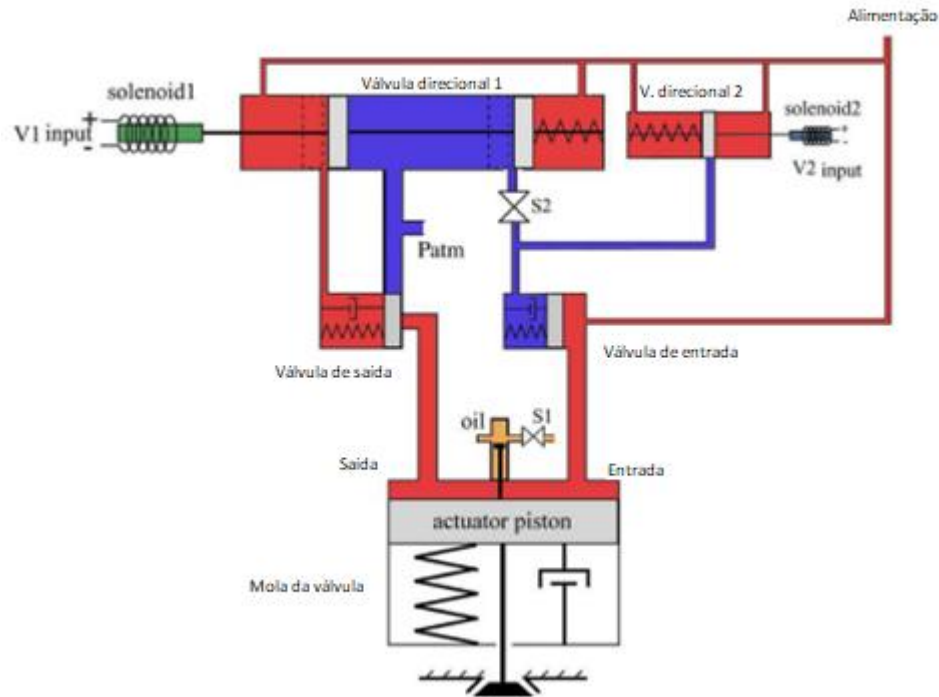
de ar, a fase de expansão e permanência e a fase de descarga de ar. Essas fases caracterizam a abertura e fechamento completo de cada válvula.

7.2.1 Fase de carregamento de ar

A fase de carregamento do ar comprimido é a fase que o ar comprimido é direcionado ao pistão atuador, com a alta pressão do ar, o atuador executa o movimento linear abrindo a válvula do pistão.

No carregamento de ar comprimido o ST ou S1 é energizado, esse aciona uma válvula direcional 1 (VD1) que abre e direciona o ar comprimido a uma outra válvula chamada de válvula de saída, que controla a saída de ar do pistão atuador, essa se fecha fazendo o ar que vem da válvula de entrada se mantenha no atuador. Na Figura 31 é possível observar todos os componentes e as linhas pneumáticas, sendo a vermelha de ar comprimido e a azul de ar atmosférico. Quando a pressão aumenta no atuador ao ponto de vencer a força contrária da mola de retorno, esse se movimenta fazendo com que a válvula do motor ligada a ele se abra. Simultaneamente ao S1 uma válvula solenoide hidráulica é energizada, tornando-se uma válvula de fluxo único que evita que o óleo retorne pela linha para o reservatório. Esse óleo começa a ocupar o volume da haste do pistão. Para permitir que as válvulas realizem o seu ciclo de funcionamento variável, com o máximo possível de aproveitamento, o tempo de acionamento é um dos fatores primordiais que deve ser levado em consideração. O Freevalve com todo o seu aperfeiçoamento no funcionamento, para realizar o processo de energização do solenoide, até o fechamento da válvula vai apresentar o intervalo típico de cerca 4ms.

Figura 31 - Fase de Carregamento



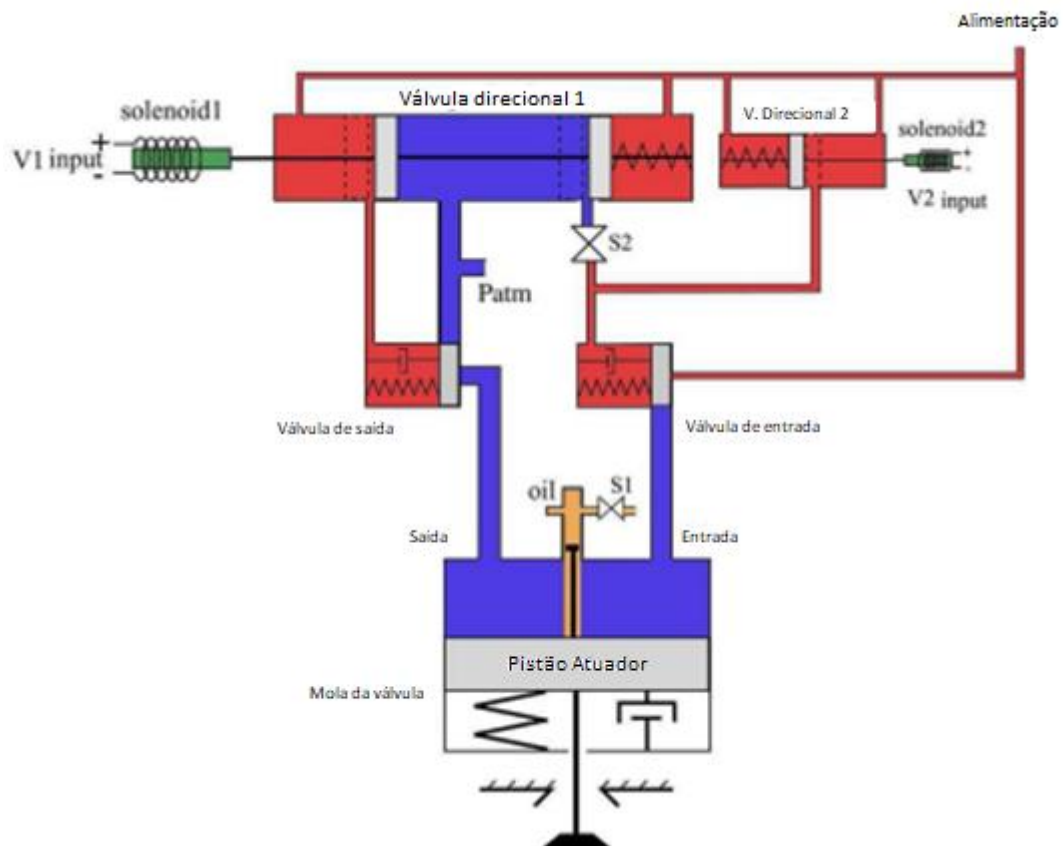
Fonte: Adaptado de Gundersen, 2009

7.2.2 Fase de expansão e permanência

A fase de expansão e permanência é a fase que o ar comprimido e o óleo são aprisionados no atuador e igualados a força da mola de retorno e outras forças, mantém o atuador e válvula do motor abertos na posição estipulada como é possível ver na Figura 32.

Na expansão/permanência o SE ou S2 é energizado, abrindo a válvula direcional 2 (VD2) que direciona o ar comprimido a uma outra válvula chamada de válvula de entrada que controla a entrada de ar no atuador, essa ao fechar, impede a entrada do ar comprimido e aprisiona o ar presente no atuador. A válvula hidráulica mantém o atuador na posição impedindo o óleo de retornar ao reservatório pois ela está atuando como válvula de fluxo unidirecional.

Figura 32 - Estado de expansão/permanência

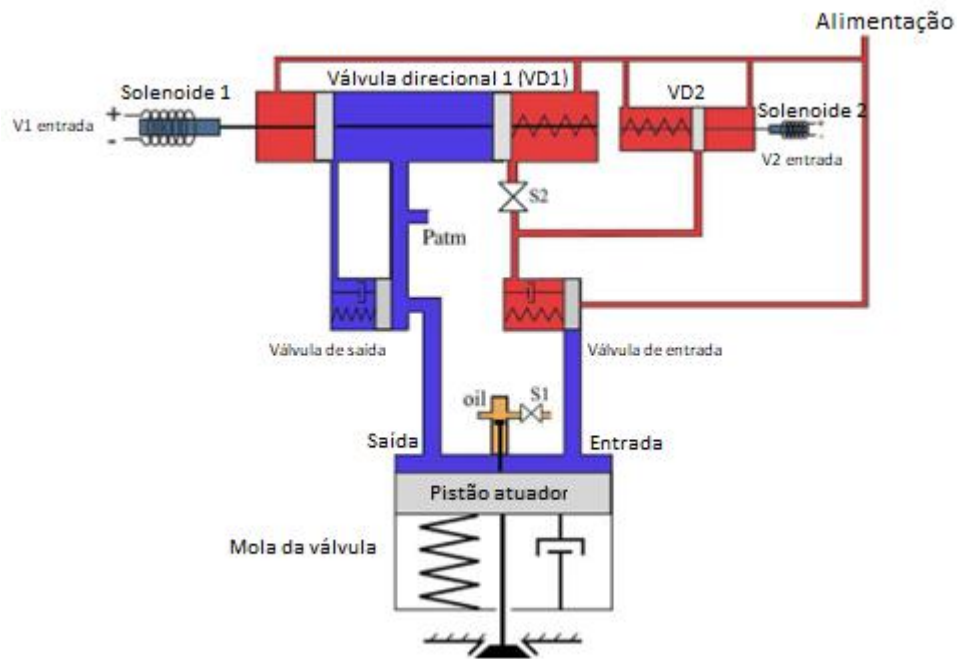


Fonte: Adaptado de Gundersen, 2009

7.2.3 Descarga de ar

Após a fase de expansão e permanência, ocorre a desenergização do ST, fazendo com que a VD1 volte a sua posição inicial, assim a válvula de saída abre e o ar que estava no atuador é liberado para a atmosfera. A desenergização do ST também faz com que a válvula hidráulica do óleo abra, deixando de ser uma válvula unidirecional ela permite que o óleo retorne pela linha. A Figura 33 demonstra o estado do sistema na fase de descarga do ar.

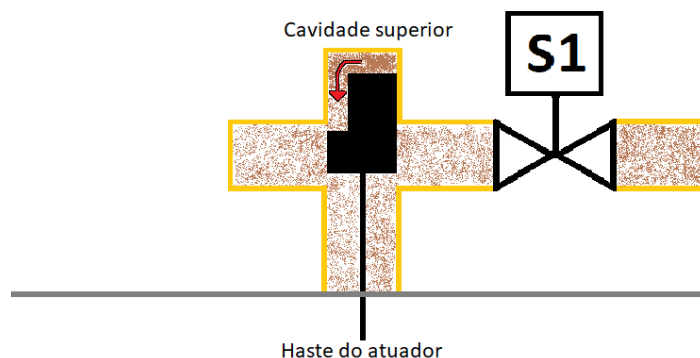
Figura 33 - Estado de descarga



Fonte: Adaptado de Gundersen, 2009

Quando o atuador está retornando para sua posição inicial, na extremidade superior de sua haste existe uma fenda utilizada como freio hidráulico, ilustrada na Figura 34. A haste entra numa cavidade e o óleo começa a ser pressurizado, porém como há essa fenda, o óleo é forçado a passar por essa ranhura e quanto mais a haste se desloca por essa cavidade superior, menor é o fluxo de óleo. Assim o óleo serve como um freio para que a velocidade do assento de válvula seja diminuída, fazendo com que seu retorno seja mais suave e evitando choques.

Figura 34 - Freio Hidráulico



Fonte: Autor, 2021

7.3 Vantagens do Freevalve

O Freevalve possui inúmeras vantagens, entre as principais a serem destacadas são:

Cabeçote com dimensões reduzidas: O cabeçote do motor acaba se tornando muito menor pois não há necessidade de áreas para abrigarem os eixos de comando de válvula e as correias ou correntes. Isso também acaba deixando cabeçote mais leve. De acordo com Christian Von Koenigsegg, CEO da Koenigsegg, um cabeçote Freevalve de um motor 4 cilindros pode ser de 15 a 20kg mais leve se comparado a um cabeçote comum.

Aumento de torque e potência: Os motores equipados com essa tecnologia possuem torque e conseqüentemente potência elevada. Cada válvula possui um livre controle de abertura e fechamento, com isso, o motor possui uma eficiência volumétrica maior visto que diferente de um motor com abertura de válvulas fixas, o Freevalve consegue abrir e fechar as válvulas de acordo com a rotação e requisição de trabalho.

Não necessita de corpo de borboleta: Os motores equipados com o Freevalve dispensam a utilização de borboleta de aceleração do motor. As válvulas podem abrir e fechar para controlar a aceleração do motor, os motores BMW equipados com *Valvetronic* possuem a mesma característica, dispensando a borboleta de aceleração.

Desligamento de cilindros: Com a tecnologia do Freevalve é possível realizar o desligamento de cilindros, dessa forma há um menor consumo de combustível do motor.

Utilização do ciclo Atkinson: O Freevalve consegue alternar o ciclo do motor entre Otto e Atkinson, alterando principalmente a eficiência energética do motor quando se utiliza o ciclo Atkinson. Com a utilização do ciclo Atkinson o motor equipado com Freevalve pode se tornar uma ótima opção para motor em um veículo híbrido.

Utilização de diversos tipos de mapas: Por ser totalmente variável e controlado por diversos parâmetros, existem diversas possibilidades para as estratégias de acionamentos de válvulas.

7.4 Desvantagens do Freevalve

Alto consumo energético: O sistema Freevalve mesmo não necessitando de comandos mecânicos de válvulas que causam fricção no motor, possui um alto

consumo energético visto que os atuadores necessitam de ar comprimido a todo instante e o sistema necessita de uma linha sempre pressurizada de óleo. Dessa forma, se faz necessário o uso de componentes que consomem energia como compressor de ar e bomba hidráulica.

Custo elevado: Por se tratar de uma tecnologia não convencional, o custo acaba sendo elevado pois a produção desse sistema não é barata e comum. Além disso os componentes e outros periféricos acabam elevando o custo de instalação dessa tecnologia.

Complexidade de construção: comparado aos motores com sistemas de válvulas comuns, o freevalve possui uma imensa complexidade de construção pois necessita de diversos sistemas adjacentes a ele, como o sistema pneumático e linhas para os atuadores e diversas linhas hidráulicas para a parte hidráulica do sistema, além de todo controle eletrônico do sistema por meio de centrais eletrônicas.

7.5 Aplicações

A tecnologia não ficou apenas no papel, no salão do automóvel de Pequim, foi apresentado um veículo protótipo Qoros 3 com o primeiro motor com o comando PHEA, que foi nomeado Qamfree. Segundo a Freevalve AB o motor 1.6 turbo da marca chinesa o sistema resultou em 47% mais potência, 45% mais torque e consumo 15% menor que na versão deste mesmo powertrain equipado com comandos de válvulas convencionais. O motor Qamfree de 1.6 cilindradas sobrealimentado produz 230 cv e 32,5 kgfm. A Figura 35 indica o veículo Qoros 3 no evento Beijing Motor Show em 2016 com o motor com a tecnologia Freevalve ao lado.

Figura 35 – Beijing Motor Show 2016: Qoros demonstrou o motor *camless*



Fonte: Digital Trends, 2016

Uma outra aplicação realizada foi no veículo Gemera, ilustrado na Figura 36, da empresa fabricante de superesportivos Koenigsegg. Veículo apresenta 3 motores elétricos sendo um em cada roda traseira e um terceiro no virabrequim do motor MCI, Só os motores elétricos podem chegar a 1100 cv.

Segundo a própria montadora em seu site oficial, o motor nomeado como TFG (*Tiny Friendly Giant*) que utiliza também a tecnologia Freevalve 2.0 de 3 cilindros, com 2 turbo compressores, entregando 600 cavalos a 7.500 rpm e 61 Kgf·m entre 2.000 e 7.000 rpm, sendo considerado os três cilindros mais potente do mundo. Segundo a Koenigsegg, sua eficiência é 20% maior que a de motores 2.0 comuns.

Figura 36 - Koenigsegg Gemera



Fonte: Koenigsegg

8 CONCLUSÃO

No desenvolver do trabalho, o motor foi o principal componente abordado, no qual foi possível por meio de fontes nacionais e internacionais compreender todos os seus sistemas de funcionamento, expondo desde as suas grandezas físicas até os métodos de acionamento de válvulas.

A tecnologia proposta pelo trabalho visivelmente se mostra ser promissora, em seu projeto de funcionamento é perceptível notar a grande diferença entre os rendimentos gerados em relação ao padrão e sua total capacidade de atender as normas globais ao combate aos índices de emissões de gases poluentes. No entanto, o mecanismo ainda enfrenta uma grande barreira que é a própria evolução da tecnologia. Sistemas de acionamento de válvulas por árvore de cames já existem há décadas e mesmo sendo complexo, ele é bastante confiável visto que já existem há tempos e sofreu refinamentos ao longo desses anos, o Freevalve por ter sido desenvolvido recentemente, cerca de 19 anos, ainda não foi submetido a impactantes refinamentos. A implantação de um sistema que altera drasticamente a construção do cabeçote do motor, dispensando componentes e adicionando outros, acaba desencadeando impressões negativas por parte das indústrias, pois os custos de produção e desenvolvimento de novos componentes, como compressores e linhas pneumáticas serão elevados.

Desta forma conclui-se que com a forte contraposição que os veículos movidos a combustíveis fósseis estão recebendo e com a crescente dos veículos híbridos e elétricos, o Freevalve é promissor apenas para aplicação em motores de ciclo Atkinson ou Otto em veículos híbridos. Visto que as montadoras estão cada vez mais diminuindo a pesquisa e desenvolvimento de veículos movidos apenas com MCI, não se torna vantajoso o desenvolvimento para aplicação dessa tecnologia nesses veículos.

8.1 Propostas Futuras

Na busca de meios de aprimoramento da tecnologia abordada no trabalho, acredita-se que para a parte de funcionamento pneumático do sistema, o uso de atuadores pode não ter sido a melhor opção, pois ao longo de sua vida útil ele pode encontrar determinadas limitações sendo uma das principais: Contaminações e perda de compressões que podem acabar ocasionando perdas de sincronia. Portanto, um

dos meios alternativos de proposta para esse problema, seria o remanejamento de atuadores por solenoides.

Em contrapartida ao que já é utilizado, pesquisas com o uso de solenoide resultariam em tempos de respostas mais curtos e uma ampla faixa de utilização. Sendo capazes de gerar na prática, melhor aproveitamento energético e eficiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGPTEA. **Princípios básicos de lubrificantes e lubrificação**. Lubrificantes Petronas. Disponível em: <<https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/mecanizacao/livros/PRINCIPIOS%20BASICOS%20DE%20LUBRIFICANTES%20E%20LUBRIFICACAO.pdf>>. Acesso em 17 mai. 2021.

BiologiaTotal. **Segunda lei da termodinâmica: Conceitos e fórmulas**. Biologia Total, São Paulo, 01 set. 2020. Disponível em: <<https://blog.biologiatotal.com.br/segunda-lei-da-termodinamica/>>. Acesso em 12 mai. 2021.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo – SP: Editora Blucher, 2018. 1232 p.

Bosch Mobility Solutions. **Eletronic engine control unit**. Disponível em: <<https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/control-units/eengine-control-unit/>> Acesso em: 25 nov. 2021.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna** Vol. 1. São Paulo: Editora Blucher, 2013. 553 p.

CARDOSO, Mayara. **Ciclo Otto**. Info Escola. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/ciclo-de-otto/>>. Acesso em 12 mai. 2021.

CONTESINI, Leonardo. **Koenigsegg apresenta na china os primeiros motores sem comando de válvulas**. Disponível em: <<https://flatout.com.br/koenigsegg-apresenta-na-china-os-primeiros-motores-sem-comando-de-valvulas/>>. Acesso em: 15 nov. 2021

EEworld Online. **Eletronic engines valves a idea whose time has come and gone**. Disponível em: <<https://www.eeworldonline.com/electronic-engines-valves-an-idea-whose-time-has-come-and-gone-part-1-conventional-engine-design-faq/>> Acesso em: 15 out. 2021

FRAS-LE. “**Óleo sintético, semissintético ou mineral: qual a diferença**”. Disponível em: <<https://blog.fras-le.com/oleo-sintetico-ou-mineral/>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

Freevalve. **Camless valve train opportunities**. Disponível em: <<https://www.freevalve.com/insights/cam-less-valve-train-opportunities/>> Acesso em 15 out. 2021.

GUNDERSEN, Øyvind. **Free Valve Technology**: Development of a control system for an electronically controlled pneumatic-hydraulic valve actuation system for an automotive engine. 2009. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) Escola de engenharia e gestão KTH, Estocolmo – Suécia. 2009. Disponível em: <<http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:542744/FULLTEXT01>> Acesso em: 2 set. 2021.

GOUVEIA, Rosimar. “**Ciclo de Carnot**”. Toda matéria. Disponível em:<<https://www.todamateria.com.br/ciclo-de-carnot/>>. Acesso em 14 mai. 2021.

HAMBERG, Robin. **Optimization of FreeValve’s fully variable valve control system for a four-cylinder engine**. 2017. 2017. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) Escola de engenharia e gestão KTH, Estocolmo – Suécia. 2009. 2009. Disponível em: <<http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1150545%22&dswid=-6778>> Acesso em 2 set. 2021.

HELERBROCK, Rafael. “**Primeira Lei da Termodinâmica**”. Brasil Escola. Disponível em:<<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/primeira-lei-da-termodinamica.htm>>. Acesso em 12 mai. 2021.

INDUSTRIE MODERNE, Verlag. **Sistemas de comando de válvulas para motores de combustão interna**. Munique – Alemanha: Süddeutscher Verlag. Acesso em: 19 mai. 2021

MAHLE. **Manual técnico - Motores de combustão interna.**

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna:** 2ª ed. Porto – PT: Publindústria, 2006. 437 p.

Principais Características físicas dos lubrificantes. Disponível em:<<https://www.sogilub.pt/caracteristicas-fisicas-lubrificantes/#page>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

VARELLA, Carlos Alberto. **Sistema de Lubrificação dos Motores de Combustão Interna.** Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/apresenta/sistema%20de%20lubrificacao.pdf> Acesso em: 16 mai. 2021.

VILANOVA, Carolina. **Por dentro do Honda VTEC.** <> Acesso em: 15 out. 2021.

GREISEN, Jakob. **1896 Armstrong Phaeton Gasoline eletric hybrid.** Disponível em: <<https://www.bonhams.com/auctions/23133/lot/152/>> Acesso em: 20 nov. 2021

REFERÊNCIA DE IMAGENS

WardsAuto. **Freevalve camless engine promises efficiency gains.** Disponível em: <<https://www.wardsauto.com/engines/freevalve-camless-engine-promises-efficiency-gains>> Acesso em: 30 out. 2021

Racing Club. **OHC, SOHC OU DOHC qual as diferenças.** Disponível em: <<https://racingclub.com.br/ohv-sohc-ou-dohc-qual-as-diferencas/>> Acesso em: 15 out. 2021

Oficina Brasil. **Tecnologia MultiAir valve lift da fiat retorna aos novos motores small engines GSE.** Disponível em: <<https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/tecnologia-multi-air-valve-lift-da-fiat-retorna-aos-novos-motores-global-small-engines-gse-parte-1>> Acesso em: 15 out. 21

Green Car Congress. **Freevalve.** Disponível em: <<https://www.greencarcongress.com/2016/04/20160429-freevalve.html>> Acesso em: 29 out. 2021

ClubAutoDoc. **Árvore de cames: função, avarias, sintomas.** Disponível em: <https://club.auto-doc.pt/magazin/arvore-de-cames-funcao-avarias-sintomas?__cf_chl_captchaTk__=EE4K3zfiOg5Vi_7m05qq5EvLL9UdHoSjoWNX9YpjG9M-1636419129-0-gaNycGzNCL0> Acesso em: 15 set. 2021

Dust Runners Auto. **VTEC vs iVTEC.** Disponível em: <<https://dustrunnersauto.com/vtec-vs-ivtec/>> Acesso em: 15 out. 2021

Koenigsegg. **Gemera.** Disponível em: <<https://www.koenigsegg.com/gemera/cvk-interview/>>. Acesso em 10 nov. 2021

HayabusaZone. **Cylinder head.** Disponível em: <<http://www.hayabusazone.com/cylinderheads.html>> Acesso em: 15 out. 2021

Carros in Foco. **Sistema de lubrificação dos motores de combustão interna.**
 <<https://carrosinfoco.com.br/2014/07/sistema-de-lubrificacao-dos-motores-de-combustao-interna/>> Acesso em: 27 mai. 2021

SILVEIRA, Matheus. **Emulação do ciclo Atkinson utilizando uma válvula de pistão.** 2015. 70 f. Dissertação. (Trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica). Universidade federal do Pampa, Alegrete – Rio Grande do Sul. 2015. Disponível em: <<https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/932/1/Emula%a7%a3o%20do%20ciclo%20atkinson%20utilizando%20uma%20v%a1lvula%20de%20pist%c3%a3o.pdf>> Acesso em: 20 nov. 2021

Digital Trends. **Koenigsegg qamfree.** Disponível em: <<https://www.digitaltrends.com/cars/koenigsegg-qamfree-engine-news-specs-performance/>> Acesso em: 15 nov. 2021

Carros in Foco. **Sistema de lubrificação dos motores de combustão interna.** Disponível em: <<https://carrosinfoco.com.br/2014/07/sistema-de-lubrificacao-dos-motores-de-combustao-interna/>>. Acesso em: 27 de maio de 2021

R19Club. **Sistema de lubrificação.** Disponível em <<http://r19club.com/motor/sistema-de-lubrificacao/>> 27 de maio de 2021

