



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
MATHAUS LIMA DE CARVALHO

ESTUDO SOBRE A IMPORTÂNCIA DOS COMANDOS DE VÁLVULAS VARIÁVEIS
EM MOTORES TRÊS CILINDROS DE BAIXA CILINDRADA

Feira de Santana
2021

MATHAUS LIMA DE CARVALHO

ESTUDO SOBRE A IMPORTÂNCIA DOS COMANDOS DE VÁLVULAS VARIÁVEIS
EM MOTORES TRÊS CILINDROS DE BAIXA CILINDRADA

Projeto de pesquisa apresentado ao curso de engenharia mecânica, da Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana, como requisito avaliativo para a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Orientador: Prof. Me. Luccas Barbosa Carneiro.

Feira de Santana
2021

C331e Carvalho, Mathaus Lima de.

Estudo sobre a importância dos comandos de válvulas variáveis em motores três cilindros de baixa cilindrada/ Mathaus Lima de Carvalho. Edição do autor. – Feira de Santana, 2021.
85f; il.

Orientador: Prof.º Me. Luccas Barbosa Carneiro.

TCC (graduação) Bacharelado em Engenharia Mecânica – Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana – UNEF 2021.

Data da defesa: 01/03/2022.

1. Motor 3 cilindros. 2. Baixa cilindrada. 3. Comando variável. 4. Eficiência volumétrica I. Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana - UNEF. II. Título.

CDU: 621

Ficha Catalográfica Elaborada por: Deivisson Lopes Pimentel Bibliotecário CRB 5/1562



MATHAUS LIMA DE CARVALHO

**ESTUDO SOBRE A IMPORTÂNCIA DOS COMANDOS DE VÁLVULAS
VARIÁVEIS EM MOTORES TRÊS CILINDROS DE BAIXA CILINDRADA**

Feira de Santana, dia/mês/ano

Banca Examinadora:

Prof. Titulação
Nome da Instituição
Orientador(a)

Prof. Titulação
Nome da Instituição
Examinador(a)

Prof. Titulação
Nome da Instituição
Examinador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente a Deus por me permitir chegar até aqui, a minha mãe Maria Nivalda e ao meu pai Antonio Jose, por me proporcionar o privilégio de me dedicar aos estudos, a minha irmã Flávia e minhas sobrinhas e afilhadas Sophia e Elissa, além de familiares e amigos, e aos colegas e professores das instituições onde estudei. Um agradecimento especial para os amigos da JC DIESEL, que com ajuda e apoio me possibilitaram elevar meu trabalho a um outro nível.

“ninguém vai bater tão forte como a vida. Mas não se trata de bater forte. Se trata de quanto você aguenta apanhar e continuar seguindo em frente. O quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando. É assim que se consegue vencer”

Rocky Balboa

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso, busca determinar as razões que justificam, a maioria dos motores automotivos de três cilindros de baixa cilindrada do mercado brasileiro, estarem equipados com comando de válvulas variável. O intuito é entender os motivos da chegada dessa tecnologia nesse segmento de motores de baixa cilindrada, uma vez que tal tecnologia era mais aplicada em motores maiores. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica a cerca dos motores a combustão interna, seu funcionamento, modelos de comandos de válvulas, vantagens de comandos variáveis, além de estudar as características dos motores três cilindros e sua relação com os tipos de comando em questão. A partir desse levantamento de informações foi realizando então, um estudo de caso onde foi comparado os dados coletados de dois motores de baixa cilindrada, um com quatro cilindros sem comando variável e um de três cilindros com comando variável, visando comprovar através de cálculos as contatações feitas através da pesquisa. Os resultados mesmo não sendo esperados, ainda sim comprovaram as razões que foram extraídas da pesquisa bibliográfica que foi desenvolvida.

Palavras-chave: Motor 3 cilindros. Baixa cilindrada. Comando variável. Eficiência volumétrica.

ABSTRACT

This majority determines the completion of the course, a search like the three-cylinder automotive engines of the Brazilian market, designed with the variable work command. The aim is to understand the reasons for the arrival of this technology in this segment of low-displacement engines, since this technology was more applied in larger engines. Literature was carried out on models of internal configuration model models, their operating models, advantages of variable models, study of the relationship with the engines of three issues in question. From this survey of information was done then, a study of data of two variable cylinders was compared with the studies of altered data of two variable cylinders, one through four functions with variable control, one through four variable controls made of the research. The same results are not being expected, but they are still verified as reasons that were projected for the literature that was developed.

Key words: 3-cylinder engine. Low displacement. Variable command. Volumetric efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração do fluxo do que entra e do que sai em um motor de combustão interna – MCI.	15
Figura 2 – Ilustração do sistema biela manivela.	16
Figura 3 – Sistema composto por uma biela e uma manivela.	16
Figura 4 – Nomenclaturas relativa ao posicionamento do pistão dentro do cilindro.	17
Figura 5 – Dimensões do interior do cilindro.	18
Figura 6 – Motor MIF.	19
Figura 7 – Sistema de alimentação de combustível a) Forma direta b) Forma indireta.	20
Figura 8 – Demonstração de cada um dos quatro tempos do motor alternativo.	20
Figura 9 – Tempo de Admissão.	21
Figura 10 – Tempo de Compressão.	21
Figura 11 – Tempo de Explosão.	22
Figura 12 – Tempo de Exaustão.	22
Figura 13 – Esquema de injeção eletrônica automotiva.	25
Figura 14 – Coletor de admissão e corpo de borboleta.	26
Figura 15 – Coletor de exaustão.	27
Figura 16 – Modelo de válvula	27
Figura 17 – Comando de abertura de válvulas	28
Figura 18 – Eixo do comando de válvulas	29
Figura 19 – Ilustração dos tipos de comandos de válvulas.	29
Figura 20 – Ilustração do diagrama teórico das válvulas.	32
Figura 21– Ilustração do diagrama real das válvulas.	33
Figura 22 – Curva de toque com faixa de rotação média.	34
Figura 23 – Curva de torque com avanço do comando de válvulas	35
Figura 24 – Atuação de um sistema de válvulas variável com variador de abertura	37

Figura 25 – Funcionamento de um sistema de válvulas variável com variador de fase.	37
Figura 26– Sistema de válvulas variável com variador de fase, variando: A) Avanço máximo; B) Atraso máximo.	38
Figura 27 – Ilustração de um virabrequim de um motor 3 cilindros.	41
Figura 28 – Ficha técnica motor Kwid sem comando variável.	43
Figura 29 – Ficha técnica do motor dos modelos logan e e sandero com comando variável.	44
Figura 30 – Ficha técnica do motor com quatro e três cilindros do fiat mobi.	44
Figura 31 – Gráfico com a relação entre economia de energia e tempo de uso de tecnologias de motor a combustão.	45
Figura 32 – Ficha técnicas do motor do Celta 1.0, 2008	47
Figura 33 – Ficha técnicas do motor do Up! 1.0 MPI, 2015.	47
Quadro 1 – Motores três cilindros e seus comandos de válvulas	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Resultados dos cálculos de dimensões internas dos motores.	52
Tabela 2 –Tabela com valores coletados com aparelho de diagnostico.	53
Tabela 3–Tabela com valores convertidos.	54
Tabela 4 –Tabela com os resultados das eficiências volumétricas.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAA	Avanço de abertura de admissão
AAE	Avanço de abertura de válvula de escape
FA	Fluido ativo
MCI	Motor de combustão interna
MIF	Motores de ignição por faísca
OBD	On-board diagnostics
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto morto superior
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
RFA	Atraso de fechamento de válvula de admissão
RFE	Atraso de fechamento de válvula de escapamento

LISTA DE SÍMBOLOS

S	Curso do pistão
V_1	Volume total
V_2	Volume morto
V_{du}	Volume útil deslocado
D	Diâmetro do cilindro do motor
π	Numero de Pi
Mm	Milímetros
mm ²	Milímetros quadrados
cm ²	Centímetros quadrados
V_d	Cilindrada total
z	Quantidade de cilindros do motor
η_v	Rendimento volumétrico
$\dot{m}$	Vazão mássica através do conduto de admissão
kg/s	Quilogramas por segundos
ρ_e	Massa específica do ar admitido na temperatura de referência
kg/m ³	Quilogramas por metros cúbicos
$V_{Cilindros}$	Volume deslocado pelo pistão entre PMS E PMI
m ³	Metros cúbicos
N	Rotação do motor
rev/s	Revoluções por segundo
p_e	Pressão no coletor de admissão nas condições de entrada do coletor
kgf/m ²	Quilograma força por metro quadrado
t_e	Temperatura do ar coletor
K	Temperatura em Kelvin
R	Constante de gás para ar seco
J/kgK	Joules por quilograma metro cubico
°C	Graus centígrados
kg/h	Quilos por hora
Mbar	Milibar de pressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Motor de combustão interna	15
3.1.1	Funcionamento de um motor de combustão interna	15
3.1.1.1	Motores quanto a relação entre curso e diâmetro	19
3.1.2	Motores de ignição por faísca (MIT)	19
3.1.3	Motores com funcionamento quatro tempos	20
3.1.4	Propriedades de motores de combustão interna	23
3.1.4.1	Torque	23
3.1.4.2	Potência	23
3.1.4.3	Potência específica	23
3.1.5	Sistema de alimentação de ar nos motores de combustão interna	23
3.1.6	Sistema de gerenciamento eletrônico	24
3.2	Sistema de admissão de ar e exaustão de gases	25
3.2.1	Coletor de admissão e exaustão de motores a combustão interna	26
3.2.2	Válvulas de admissão e válvulas de escape	27
3.2.3	Comando de Válvulas de motores a combustão interna	28
3.3	Funcionamento de um motor alternativo e seu sincronismo	29
3.3.1	Rendimento volumétrico	30
3.3.2	Propriedades do fluido ativo	31
3.3.3	Mistura ar Combustível	31
3.3.4	Diagrama de válvulas teórico e real	32
3.3.5	Avanço e atraso do comando de válvulas	34
3.4	Configuração de um comando de Válvulas tradicional	35
3.5	Configuração de um comando de válvulas variável	36
3.5.1	Atuação de um comando de válvula variável	36
3.5.2	Melhorias geradas pela variação do comando de válvulas	38

3.5.2.1	Melhorias geradas pela variação do comando de válvulas de válvulas de admissão	39
3.5.2.2	Melhorias geradas pela variação de válvulas de escape	39
3.6	Downsizing de motores de combustão interna	39
3.6.1	Motores reduzidos de quatro para três cilindros	40
3.7	Motores três cilindros e comandos de válvulas variáveis	42
4	METODOLOGIA	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIA	58
	APÊNDICE 1– TELA DO APARELHO DE DIAGNOSTICO CELTA	63
	APÊNDICE 2 – TELA DO APARELHO DE DIAGNOSTICO UP!	66
	APÊNDICE 3 – CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA EM PLANILHA DE EXCEL CELTA	71
	APÊNDICE 4 – CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA EM PLANILHA DE EXCEL UP!	74

1 INTRODUÇÃO

As grandes montadoras de automóveis trabalham para que seus produtos sejam competitivos no mercado, acolhendo as demandas de consumidores que ao longo do tempo tem se tornado cada vez mais exigentes. Através do desenvolvimento de novas tecnologias, tornam seus carros mais eficientes, menos poluentes, com melhor desempenho e maior conforto, acatando as exigências das legislações ambientais e níveis de segurança, todas essas melhorias aliadas a um custo inferior. Visando alcançar tais metas, o componente que reúne maior potencial de promover mudanças consideráveis nos automóveis é o seu propulsor, que se trata de um motor de combustão interna (MCI), que vem evoluindo desde os últimos séculos e ainda continua (HORODECKI, 2014).

Tal legislação ambiental impõe regras que regulam os níveis de poluição e estimulam o desenvolvimento de tecnologias que permitam veículos com um funcionamento mais limpo para a natureza. O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT) instituídos respectivamente em 1983 e 2003, tem a intenção de promover a redução da emissão de poluentes e de ruídos de todos os veículos automotores comercializados no território brasileiro (CETESBE, 2020). O Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto) tem o objetivo de fomentar a elevação do nível de competitividade no cenário automotivo, estimulando a produção de carros mais seguros, econômicos, promovendo investimento nas mais variadas áreas que pertencem a indústria automobilística (INOVAR-AUTO, 2013).

Os aperfeiçoamentos aplicados nos projetos dos motores, tem o anseio de melhorar sua performance e economia, respeitando as restrições imposta pelas regulamentações ambientais. Atualmente existem soluções eficientes que se tornam cada vez mais presente no mercado, como o turbocompressor, sistema de alimentação de combustível direto, variação na dinâmica dos comandos de válvulas, entre outros, que são tecnologias empregadas em um novo conceito de motores, chamado de *downsizing*, que propõe motores que são mais compactos e tem menor volume (BONATESTA, 2016).

O *downsizing* pode acontecer de várias formas, inclusive quando um motor quatro cilindros é substituído por outro com apenas três, e ainda assim dispondo do mesmo nível de performance, representando um novo marco na arquitetura dos motores automotivos de baixa cilindrada, pois como afirma Silva (2018), os motores de três cilindros estão se destacando no mercado automotivo por possuírem vantagens como o seu menor peso, menor tamanho e consumo de combustível mais baixo, porém essa configuração apresenta uma série de desvantagens quando comparados aos seus antecessores, por se tratar de motores com um funcionamento menos confortável, com muita vibração e maior ruído.

Atualmente no Brasil os motores de baixa cilindrada de quatro cilindros estão sendo substituídos por motores três cilindros, que vem equipados com sistemas que antes só estavam presentes em motores de maior cilindrada, um deles é o comando de válvulas variável na admissão e na exaustão, desta forma o objetivo deste trabalho é determinar as razões que justificam a aplicação desta tecnologia nessas novas motorizações (MARUM,2014).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar os fatores que justificam a associação de sistemas de comando de válvulas variáveis a motores três cilindros de baixa cilindrada.

2.2 Objetivos específicos

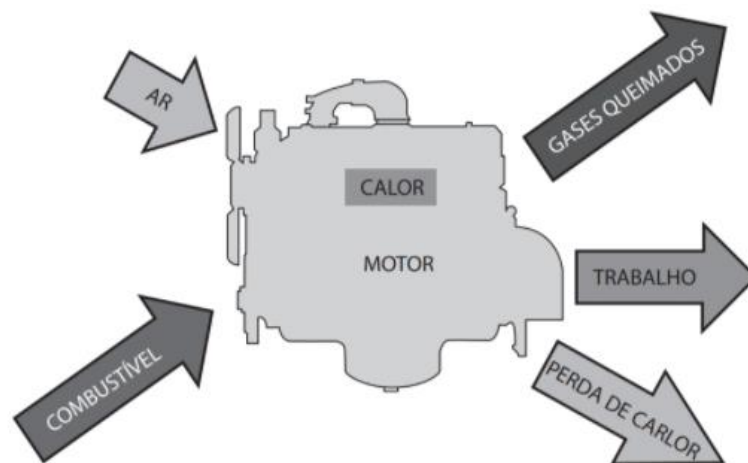
- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre motores a combustão e seus comandos de válvulas;
- Identificar as razões que justificam a associação de motores três cilindros e comandos de válvulas variáveis;
- Realizar um estudo de caso que compara dados entre os novos motores e seus antecessores.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Motor de combustão interna

Os motores de combustão interna (MCI) são classificados como máquinas de natureza térmica, transformadoras do calor gerado na combustão em trabalho, conforme ilustrado o fluxo do que entra e do que sai deste tipo de motor na Figura 1. Uma sequência de processos efetuados sobre uma substância denominada fluido ativo (FA) proporciona a obtenção de trabalho. Quando o FA é um participante direto do processo de combustão então se trata de um MCI (ASSUNÇÃO, 2019).

Figura 1 - Ilustração do fluxo do que entra e do que sai em um motor de combustão interna – MCI



Fonte: BRUNETTI, 2018.

3.1.1 Funcionamento um motor de combustão interna

Motores alternativos são aqueles que viabilizam trabalho por meio do deslocamento do tipo ir e vir de um pistão, impondo uma rotação de caráter contínuo através de um sistema biela-manivela como apresenta a Figura 2 (MARTINS, 2016).

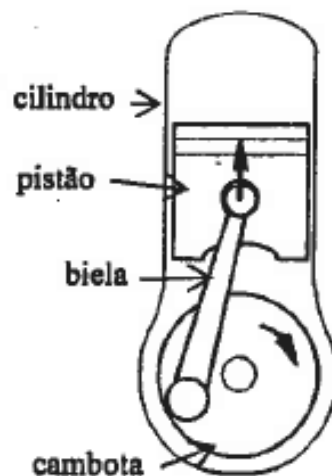
Figura 2 – Ilustração do sistema biela manivela



Fonte: Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=IWtUkm3mnx4> > Acesso em: 2 de novembro de 2021.

O MCI se utiliza do aumento de pressão provocado pela combustão da mistura ar-combustível para provocar rotação no seu eixo. Os cilindros são por onde se deslocam pistões que estão conectados ao eixo virabrequim por meio de bielas. O eixo virabrequim quando se movimenta, empurra o pistão para cima e o puxa para baixo, e quando submetido a alta pressão o embolo a converte em energia cinética transferida para a árvore de manivelas. Para manter o motor em movimento nos instantes em que um embolo está comprimindo ar em um dos cilindros é utilizado um volante de inercia também conhecido como volante do motor ou cambota, para que este acumule energia, como ilustra a Figura 3 (SILVA, 2018).

Figura 3 – Ilustração do sistema do volante de inercia

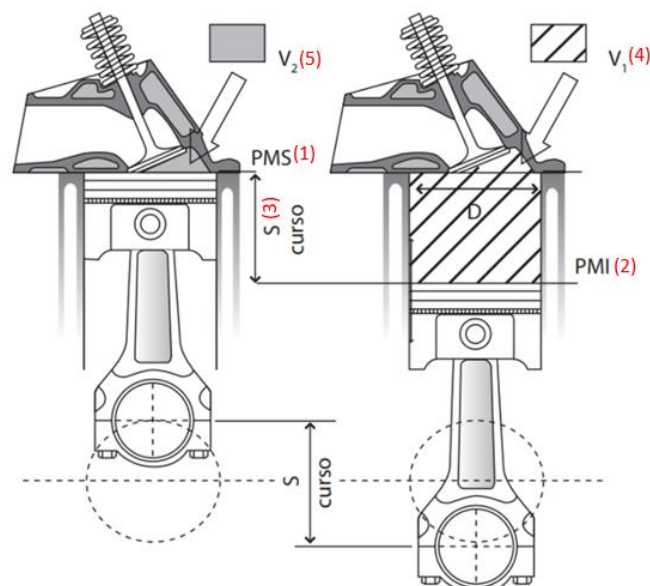


Fonte: Martins, 2005.

Este tipo de motorização é dividida em partes que ficam fixas e as que se movimentam. Os componentes que são chamados de fixos são o bloco, que é a parte estrutural mais importante do motor, todas as peças vão fixadas direta ou indiretamente nele, inclusive é neste componente fixo que são usinados os cilindros. O cabeçote é o componente fixado logo acima do bloco, ele que forma a parede superior que veda o motor, nele estão instalados as válvulas e seu comando, além de ser onde vão fixados os coletores de admissão e de escape: A última peça fixa é o cárter, ele veda a parte inferior do bloco além de ser onde fica reservado o óleo lubrificante do motor. As peças moveis são aquelas conectadas direta ou indiretamente nos componentes estáticos, porem essas não são fixas, pode se citar pistões, bielas, válvulas, eixo virabrequim, entre outros (TILLMANN, 2013).

O posicionamento em que o pistão atinge o máximo de proximidade da parte superior do motor é convencionalmente chamado de ponto morto superior (1-PMS), já o ponto em que o pistão alcança a distância máxima do cabeçote é chamado de ponto morto inferior (2-PMI). O resultado da diferença do PMS pelo o PMI determina o curso do pistão (3- S) que se trata do curso que o pistão se desloca no interior do cilindro. O volume total (4- V_1) e o volume morto (5- V_2) são respectivamente os volumes compreendidos entre o cabeçote e a cabeça do pistão quando ele está posicionado no PMS e entre a face superior do pistão no PMI e o cabeçote, é possível observar a partir da Figura 4 (PINHEIRO; LEME, 2014).

Figura 4 – Nomenclaturas relacionadas a posição do pistão no cilindro



Fonte: Adaptado de BRUNETTI, 2018.

Segundo Brunetti (2018), a cilindrada unitária, que pode ser denominada volume útil deslocado ($6-V_{du}$), se referisse ao volume que o pistão desloca ao fazer seu curso do PMS para o PMI e é obtido pela equação 1, como também o volume deslocado do motor ($7-V_d$), também conhecido como cilindrada total que é dado pela equação 2, o diâmetro do pistão (8- D) é representado na Figura 4.

$$V_{du} = V_1 - V_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \quad (1)$$

$$V_d = V_{du} \cdot z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \quad (2)$$

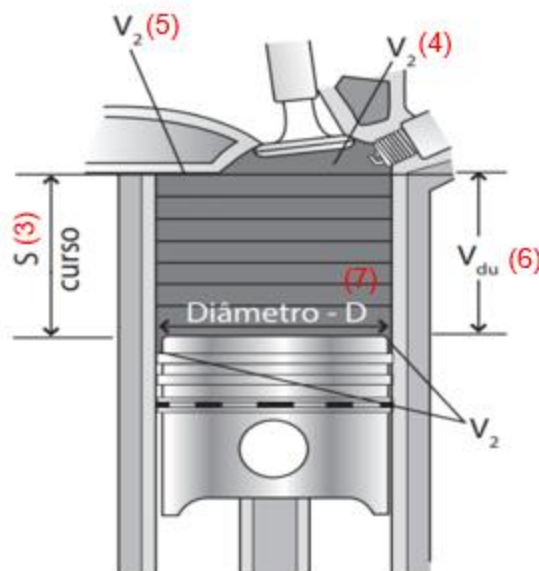
Onde:

D : Diâmetro do cilindro do motor (mm);

z : Numero de cilindros do motor (adimensional).

Na Figura 5 é possível visualizar um motor em corte, onde se encontram descritas medidas das variáveis anteriores.

Figura 5 – Dimensões do interior do cilindro



Fonte: Adaptado de BRUNETTI, 2018.

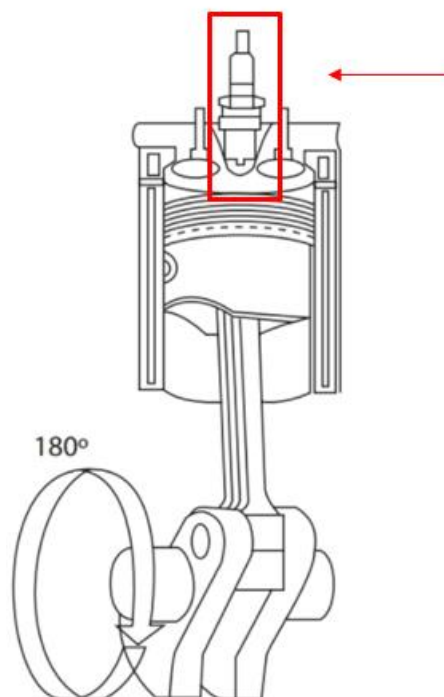
3.1.1.1 Motores quanto a relação entre curso e diâmetro

Segundo Martins (2018) pode se classificar os motores quanto a relação entre as dimensões do curso e do diâmetro do pistão. É chamado de motor quadrado aquele cuja dimensão do diâmetro e do curso do pistão é igual, estes motores tem um bom desempenho em todas as suas faixas de giro. O motor subquadrado é aquele cujo diâmetro é menor que o curso do pistão e isso provoca um rendimento melhor em baixas rotações. O motor super quadrado é característico pelo cilindro ter diâmetro maior que o curso fazendo com que esta motorização entregue torque e potência em altas rotações.

3.1.2 Motores de ignição por faísca (MIF)

Se trata dos motores que a ignição da combustão dentro motor é dada pela centelha gerada pelo eletrodo de uma vela de ignição, e tem a vantagem de ser controlada eletronicamente, conforme a Figura 6 possibilita observar como normalmente se constitui esse sistema (MARTINS, 2016).

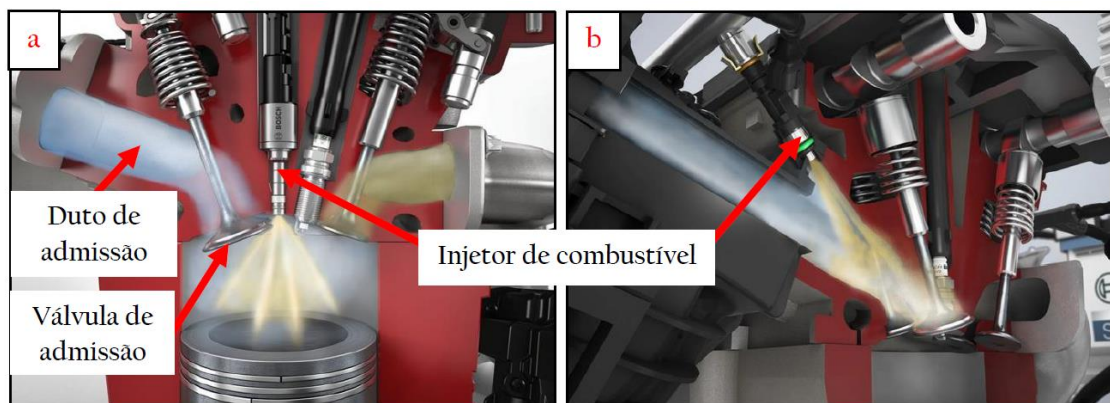
Figura 6 – Motor MIF



Fonte: Adaptado de BRUNETTI, 2018.

O sistema de alimentação pode ser indireto, quando o combustível é injetado fora da câmara de combustão para se misturar ao ar, e os dois serem admitidos juntos, ou, nos sistemas de injeção direta, que o combustível é injetado dentro da câmara de combustão já no tempo de compressão. Com forme a Figura 7 permite comparar as características destas duas configurações (TILLMANN, 2013).

Figura 7 – Sistema de alimentação de combustível: a) Forma direta b) Forma indireta

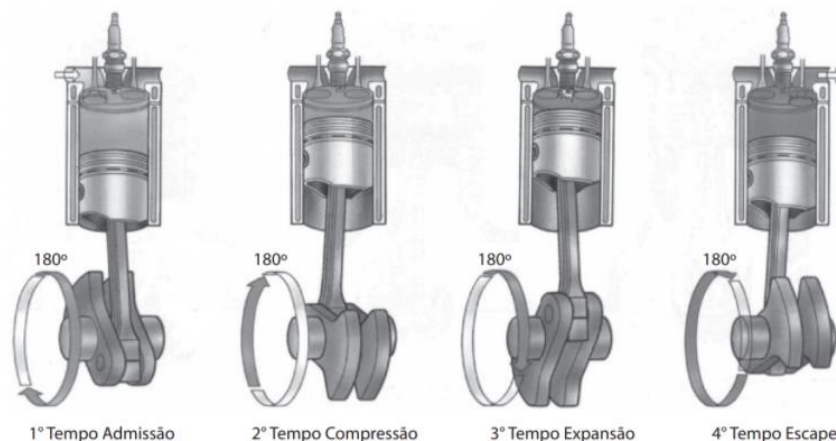


Fonte: DURANGO, 2016

3.1.3 Motores com funcionamento quatro tempos

No caso dos motores com esse funcionamento, o pistão se move em quatro cursos que correspondem a duas voltas do eixo virabrequim para completar um ciclo completo, conforme é demonstrado na Figura 8 (ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A, 2013).

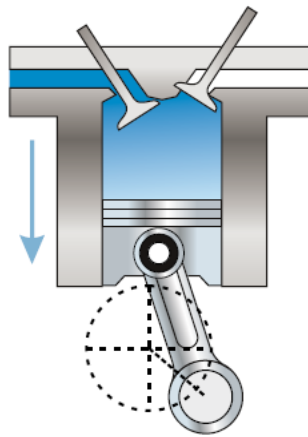
Figura 8 – Demonstração de cada um dos quatro tempos do motor alternativo



Fonte: BRUNETTI, 2018

O primeiro curso que o pistão faz é no tempo de admissão, onde ele se desloca entre o PMS em direção ao PMI tendo as válvulas de admissão abertas e as de exaustão fechadas, fazendo o enchimento do cilindro com mistura combustível-ar, decorrente da pressão negativa gerada no interior do cilindro pelo movimento do embolo, conforme é visto na Figura 9 (FERNANDES, 2016).

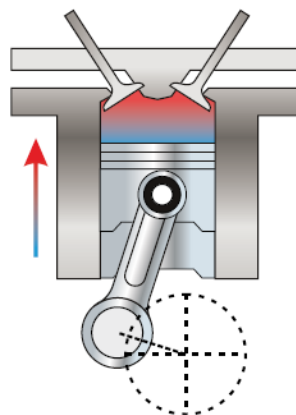
Figura 9 – Tempo de Admissão



Fonte: Adaptado de Maran, 2013.

O Segundo curso do pistão é no segundo tempo, onde ele se desloca do PMI para o PMS com todas as válvulas fechadas, esse tempo é chamado de compressão, pois nesse movimento, o pistão acaba comprimindo a mistura de combustível e comburente, conforme isso é demonstrado na Figura 10 (CABRAL, 2019).

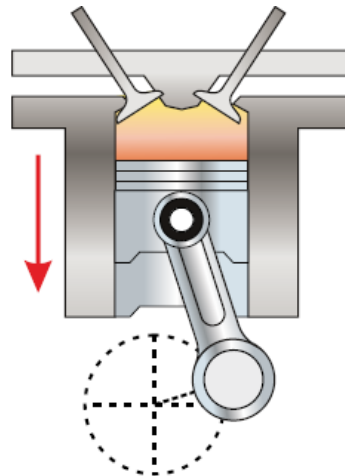
Figura 10 – Tempo de Compressão



Fonte: Adaptado de Maran, 2013.

O terceiro tempo é o de explosão, onde o pistão está no PMS comprimindo a mistura e a combustão é iniciada com a liberação da centelha pela vela de ignição, fazendo com que a energia liberada empurre o pistão para o PMI, é neste tempo que o motor produz trabalho, conforme demonstra a Figura 11 (MATOS, 2014).

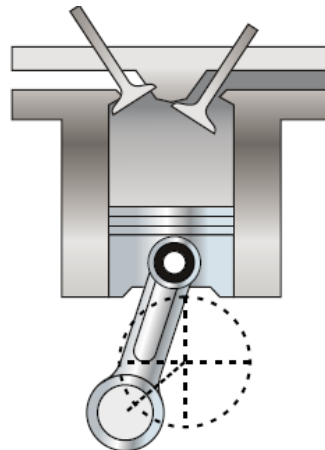
Figura 11 – Tempo de Explosão



Fonte: Adaptado de Maran, 2013.

O último tempo é o de exaustão, onde com as válvulas de exaustão encontram-se abertas e o embolo do pistão se movimenta do PMI com destino no PMS, deslocando todos os gases oriundos do processo de combustão, para o sistema de exaustão de gases do motor, conforme é visto na Figura 12 (BRUNETTI, 2018)

Figura 12 – Tempo de Exaustão



Fonte: Adaptado de Maran, 2013.

3.1.4 Propriedades de motores de combustão interna

Existem uma serie de propriedades que que descrevem as características de um motor, e elas descrevem e determinam o padrão de funcionamento e valores de desempenho (BRUNETTI, 2018).

3.1.4.1 Torque

Segundo TILLMANN (2013) se trata da força feita pelo conjunto de pistões sobre o eixo virabrequim, fazendo com que ele gire, e esse valor varia de acordo com a rotação do motor, chegando ao seu valor máximo em uma determinada rotação e se mantendo em rotações maiores.

3.1.4.2 Potência

Energia fornecida pelo motor em relação ao tempo, assim como o torque, varia de acordo com a rotação do motor atingindo seu valor máximo a uma determinada rotação (TILLMANN, 2013).

3.1.4.3 Potência específica

É a relação entre a potência desenvolvida pelo motor e sua cilindrada total, ou seja, a relação de quanto ele pode produzir com o que ele pode consumir, esse é um importante parâmetro de eficiências motores a combustão (BRUNETTI, 2018).

3.1.5 Sistema de alimentação de ar nos motores de combustão interna

Motores a combustão interna tem seu desempenho intimamente relacionado com a quantidade de ar que eles coletam e retém no interior dos seus cilindros, pois quanto mais ar admitido maior poderá ser a quantidade de combustível adicionado para formação da mistura que vai ser queimada (MARTINS, 2016).

O ar entra nos cilindros no tempo de admissão, onde é sugado através da interação do cilindro com o coletor de ar para a admissão, isso ocorre devido a diferença de pressão criada no interior do cilindro em consequência ao movimento do

pistão, fazendo com que pressão atmosférica pressione o ar para dentro do cilindro. Este tipo de captação de ar caracteriza os motores naturalmente aspirados e a pressão gerada para entrada de ar no motor será no máximo igual a pressão atmosférica (BRUNETTI, 2018).

Visando aumentar a capacidade de ar que o motor aspira para dentro de seus cilindros foram criados motores equipados com dispositivos que empurram o ar para dentro dos motores, estes motores são classificados como sobrealimentados. Um dos dispositivos muito utilizado é o turbo compressor, que aproveita a energia do fluxo de gases de escapamento para através de turbinas, ligadas ao mesmo eixo gerar um fornecimento de ar para o coletor de admissão do motor (PALEARI, 2017)

3.1.6 Sistema de gerenciamento eletrônico

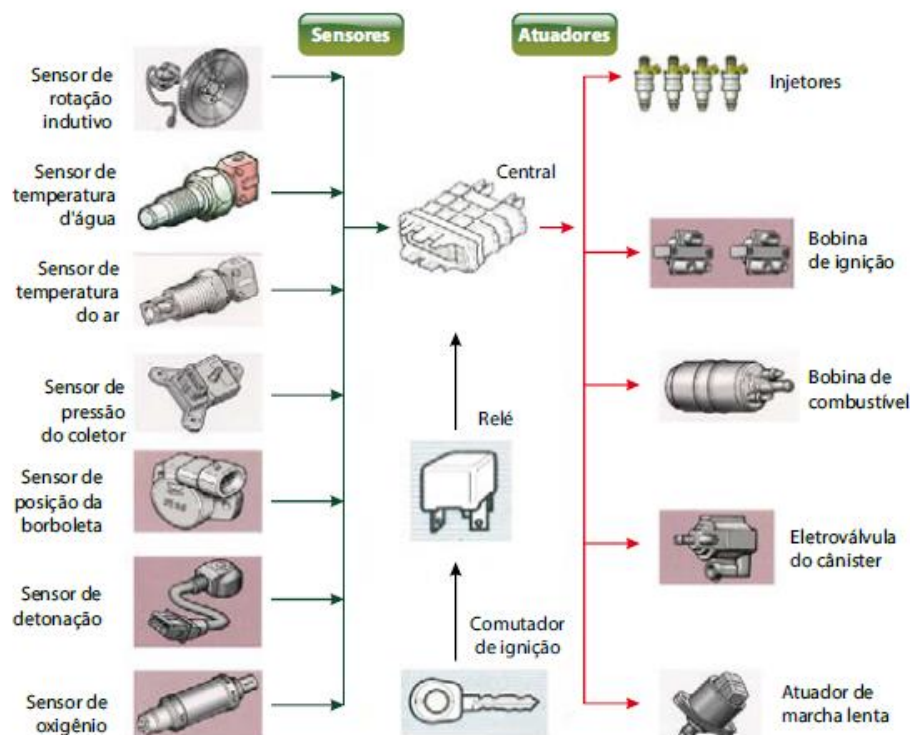
O sistema de injeção de combustível foi um dos primeiros sistemas dos MCI a evoluir de sistemas completamente mecânicos até chegar a modelos eletrônicos avançados, isso devido a necessidade de se controlar melhor a injeção de combustível nos motores para melhorar a economia ou a performance, a injeção eletrônica passou a permitir um controle melhor de combustão, até chegar ao nível de injetar o exatamente o necessário que o motor precisa em suas diferentes situações de funcionamento, Isso só foi possível pois a eletrônica migrou do sistema de injeção para outros, como de ignição, arrefecimento, admissão, entre outros (TILLMANN, 2013).

A intenção foi instalar sensores para coletar dados de funcionamento do motor, que serviriam valores a uma unidade de processamento, que ao recebe-los, automaticamente processaria os cálculos necessários para coordenar os demais sistemas através de componentes chamados de atuadores, que são responsáveis por realizar algum trabalho mecânico ao serem acionados por um sinal eletrônico (SILVA, 2018).

Entre os principais sensores utilizados nos motores a combustão interna, estão os de fase e rotação, eles informam respectivamente a posição do pistão para indicar o momento para ignição e a rotação exata do motor para o sistema de gerenciamento operar em sincronia. Outros sensores medem pressão e temperatura no coletor de admissão possibilitando a centra eletrônica calcular a quantidade de massa de ar entrando nos cilindros, sensor de sonda lambda, que através das gases de

escapamento estimam a relação estequiométrica da mistura, entre outros sensores que funcionam através de um sistema chamado OBD (*on-board diagnostics*) que criam uma rede onde modulo, sensores e atuadores se comunicam, na Figura 13 é possível observar o esquema de um sistema de injeção eletrônica automotiva (BRUNETTI, 2018).

Figura 13 – Esquema de injeção eletrônica automotiva



Fonte: Adaptado de Maran, 2013.

3.2 Sistema de admissão de ar e exaustão de gases

Como exposto anteriormente sobre o funcionamento do motor alternativo de quatro tempos, é demonstrada a relação dinâmica dos componentes participantes, com isso é possível demonstrar a importância dos sistemas que fazem o abastecimento de ar e escape dos gases provenientes da combustão dos cilindros do motor. Alguns componentes importantes desses sistemas, são o coletor de admissão, as válvulas e o comando de válvulas e coletor de escapamento, estes são responsáveis pelo gerenciamento da tomada de massa de ar que entra no motor e a saída dos gases (SORGATO 2014).

3.2.1 Coletor de admissão e exaustão de motores a combustão interna

O coletor de admissão é responsável por interligar, o motor com a válvula que permite regular a quantidade de ar admitido pelo motor, que é controlada pelo acelerador, ela é chamada de corpo de borboleta, e através dos dutos de admissão, tem a intenção de direcionar o ar captado do ambiente para dentro dos dutos do cabeçote, é possível ver um coletor de admissão com corpo de borboleta montado na Figura 14 (BRUNETTI, 2018).

Figura 14 – Coletor de admissão e corpo de borboleta

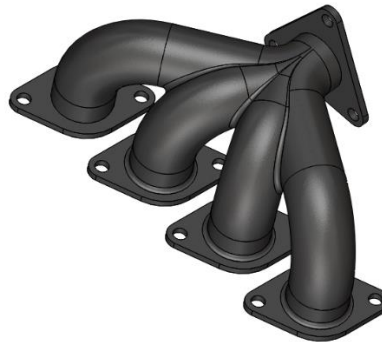


Fonte: Disponível em: < <https://www.zipyshop.com.br/p/ali/billet-intake-manifold-w-fuel-rail-kit-throttle-body-fits-for-bmw-e36-e46-m50-m52-325i/4001042092374/>> Acesso em: 03 de novembro de 2021.

No interior dos dutos do coletor de admissão ocorrem uma serie de fenômenos de ordem aerodinâmica e acústica, a performance do motor em detrimento do período da abertura das válvulas sofre grande interferência desses fenômenos. A dimensão do coletor pode contribuir para o uso destes fenômenos de forma positiva para o funcionamento do motor, fazendo com que no momento em a válvula permita a passagem de ar, esses efeitos se somem ao fluxo e aumentem o suprimento de mistura no cilindro (RESENDE, 2014).

Para ligar o motor ao escapamento existe o coletor de exaustão, que é uma peça bem robusta, capaz de suportar as altas temperaturas dos gases queimados no interior do motor, e leva-los através de seus dutos do interior do cilindro para o sistema de escape do veículo, na Figura 15 é possível ver um modelo de coletor de escape (MARTINS, 2016).

Figura 15 – Coletor de admissão e corpo de borboleta



Fonte: Disponível em: < <https://grabcad.com/library/exhaust-manifold-61> > Acesso em: 03 de novembro de 2021.

3.2.2 Válvulas para admissão e válvulas para escape

São as válvulas que permitem a entrada e a saída do do FA dos gases do motor nos cilindros. Os carros antigos carros populares eram normalmente equipados com motores que utilizam somente um par de válvulas por cilindro, sendo uma destinada a admissão e outra para exaustão, entretanto, de acordo com a intenção do fabricante o motor poder possuir até quatro ou cinco válvulas por cilindro, podemos ver o exemplo de uma válvula na Figura 16 (ZULETA, 2016).

Figura 16 – Modelo de válvula



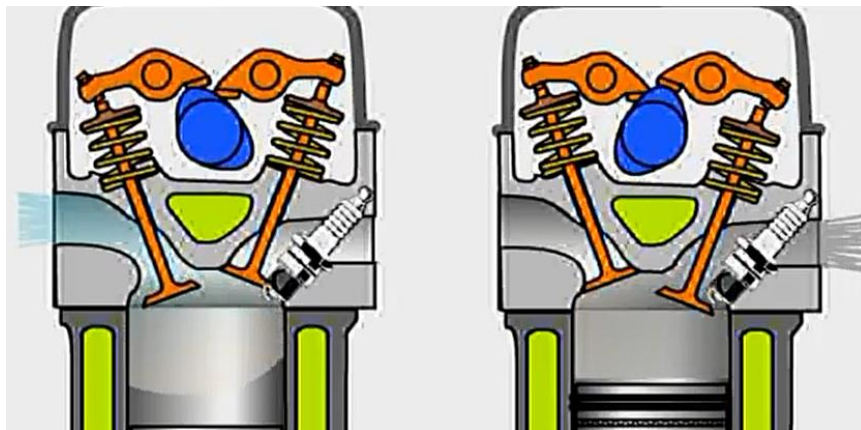
Fonte: Bao, 2015.

A quantidade de válvulas tem relação com o enchimento de ar ou mistura de ar com combustível dentro dos cilindros, dependendo do modelo de sistema de injeção de combustível do motor, quanto maior o número de válvulas maior é a vazão e por consequência maior enchimento em altas rotações (LIMA, 2017).

3.2.3 Comando de Válvulas de motores a combustão interna

O comando de válvulas é responsável por controlar a abertura e o fechamento das válvulas, determinando os momentos em que é permitida a entrada, permanência e saída dos gases da combustão do motor, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Comando de abertura de válvulas.



Fonte: Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=KLzjQyq1t0c> > Acesso em: 03 de novembro de 2021.

Os comandos são constituídos de um ou mais eixos com ressaltos, chamados cames, sendo estruturas ovaladas presentes no eixo de comando, e são elas que vão acionar diretamente ou através de dispositivos de válvulas, hidráulicos ou mecânicos, a ligação entre a válvula em si e o comando, buscando reduzir o desgaste e promover um melhor acionamento, um eixo de comando de válvulas é exemplificado conforme demonstra a Figura 18 (BAO, 2015).

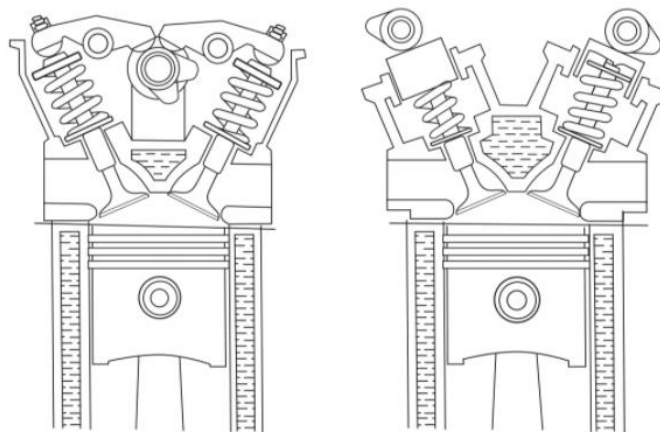
Figura 18 – Eixo do comando de válvulas



Fonte: Bao, 2015.

Dependendo da arquitetura do comando, ele pode ser equipado com um ou dois destes eixos, quando o sistema se constitui apenas de um eixo, ele controla tanto as válvulas de admissão quanto as de exaustão, no caso de comandos com dois eixos, chamados de duplo comando de válvulas, admissão e exaustão tem um eixo independente, conforme ilustrado na Figura 19 (MARTINS, 2016).

Figura 19 – Ilustração dos tipos de comandos de válvulas



Fonte: BRUNETTI (2018)

3.3 Funcionamento de um motor alternativo e seu sincronismo

O motor alternativo de quatro tempos quando está em funcionamento, precisa que seu virabrequim de duas voltas para atingir a completude de um ciclo, teoricamente estes 720° de curso são divididos igualmente entre os seus quatro tempos. Motores para automóveis tem especificidades quanto a variação da rotação

e da carga aplicada, é bem mais desafiante alcançar a eficiência volumétrica, pois ela está subordinada a outras variáveis (SORGATO, 2014).

3.3.1 Rendimento volumétrico

Como fala Brunetti (2018), o rendimento volumétrico é a dado pela relação da massa de mistura nova que entra no cilindro no tempo de admissão e a massa que seria ocupada no volume arrastado pelo embolo do pistão.

Assim a equação (3) determina o rendimento volumétrico:

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}}{\rho_e V_{cilindros} n} \quad (3)$$

Onde:

$\dot{m}$: Vazão mássica através do conduto de admissão (kg/s);

ρ_e : Massa específica do ar admitido que escoar para dentro do motor nas condições de entrada do coletor (kg/m³);

$V_{cilindros}$: Volume deslocado pelo pistão entre PMS E PMI (m³)

n : Rotação do motor (rev/s).

A densidade ou massa específica de entrada (ρ_e) ar admitido leva em consideração a temperatura e a pressão encontrados no coletor de admissão, como expressa a equação (4) (BRUNETTI, 2018).

$$\rho_e = \frac{p_e}{R t_e} \quad (4)$$

Onde:

p_e : Pressão no coletor de admissão nas condições de entrada do coletor (kgf);

R : Constante de gás para ar seco (J/kgK);

t_e : Temperatura do ar coletor (K).

3.3.2 Propriedades do fluido ativo

O ar que circula no interior dos dutos do coletor de admissão possui uma inércia, que se utilizada poderá ajudar a empurrar a mistura para dentro do cilindro no instante exato do fechamento da válvula responsável pela admissão do ar. A pulsação do FA no coletor de admissão é outra variável que pode melhorar o rendimento volumétrico do motor (SORGATO, 2014).

3.3.3 Mistura ar Combustível

Segundo Carvalho (2011) o controle da aceleração se resume a liberação da Massa de ar para o motor, onde será injetado o combustível, porem nos motores ciclo Otto, essa mistura deve respeitar uma proporção. São considerados dois valores, o de relação ar combustível e o de relação estequiométrica de ar combustível, a primeira é a relação entre as massas que formam a mistura real dentro do cilindro, já a segunda é a relação ideal química, considerando a combustão total, sendo referência para determinar o tipo de mistura.

Quando se divide os valores da relação ar combustível real pelo valor de referência, é possível classificar a proporção da mistura e da sua homogeneidade. Quando os valores são iguais é chamada de mistura estequiométrica, por ela ser quimicamente perfeita na realidade, quando o valor real é menor que o valor de referência temos uma mistura pobre e pouco homogenia o contrário, é chamado de mistura rica, com característica de boa homogeneidade (BRUNETTI, 2018).

Essas condições de mistura interferem no funcionamento do motor e nas relações de ar e combustível que trabalham entre limites de mistura rica e mistura pobre, no limite pobre o motor funciona com a menor quantidade possível de combustível em relação ao ar, e isso provoca um funcionamento irregular do motor, no limite rico o motor trabalha com o máximo de excesso de combustível, fazendo com que a queima seja dificultada, com alto consumo e funcionamento instável, caso esses limites sejam ultrapassado provavelmente o motor irá desligar (MARTINS, 2018).

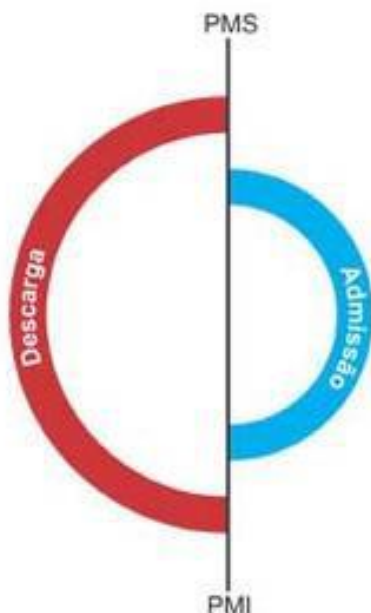
Outras duas condições são importantes a mistura econômica e a de potência máxima, a condição ideal de mistura para a economia, seria levemente empobrecida,

mas ainda assim gerando a combustão total, e um melhor consumo específico, já uma mistura de máxima potência seria uma relação levemente rica de combustível, que adequada a cada motor resultaria no melhor desempenho do propulsor, apesar de aumentar a emissão de gases poluente (BRUNETTI, 2018).

3.3.4 Diagrama de válvulas teórico e real

Quando se imagina o comportamento das válvulas de um motor alternativo de quatro tempos, pensasse logo que abertura e fechamento das válvulas ocorreriam apenas dentro do seu tempo específico, isso significa relatar que na sua chegada ao PMS o pistão encontraria válvula admissão aberta e ao chegar no PMS essa mesma válvula já estaria fechada, mas isso não ocorre na prática devido a inércia do FA, pois é muito difícil deslocar uma massa de ar em um momento exato, de maneira instantânea, o funcionamento com esse padrão decorreria em uma baixa eficiência volumétrica na prática, conforme exposto na Figura 20 (NASSIMBENI; AMORIM; SOUZA, 2018).

Figura 20 – Ilustração do diagrama teórico das válvulas



Fonte: Disponível em: <<http://arquivo.oficinabrasil.com.br/noticias/?COD=380>> Acesso em: 03 de novembro de 2020.

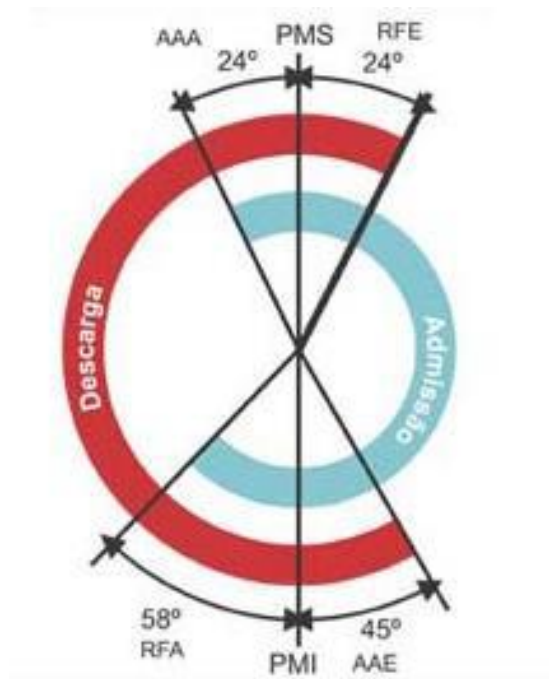
Para evitar os problemas do ciclo teórico na aplicação real das válvulas é feita a defasagem, ou seja, o atraso da abertura e fechamento da válvula em cada

respectivo tempo em detrimento as posições do PMS e PMI. A válvula de admissão vai começar a ser aberta antes do PMS, fazendo que no ponto inicial da movimentação do pistão no tempo de admissão a válvula já esteja aberta em sua totalidade, evitando que exista alguma restrição ao fluxo da mistura nova que está sendo empurrada para dentro do cilindro. (BRUNETTI,2018b).

A válvula de exaustão se fechará após o PMS, fazendo com que ambas estejam abertas num determinado intervalo de tempo, e isso provoca um ganho no rendimento volumétrico em razão da pressão que a nova mistura faz sobre os gases queimados da combustão, que são mais facilmente exauridos de dentro do cilindro, (BRUNETTI,2018).

Conforme a Figura 21 apresenta, o diagrama de abertura de válvulas que acontece na realidade, a admissão com um avanço de 24° de abertura de admissão (AAA) e terminando com 58° de atraso de fechamento de válvula de admissão (RFA) e a de escapamento avança 45° ao se abrir (AAE) tem seu fechamento atrasado em 24° (AAE) (SORGATO, 2014).

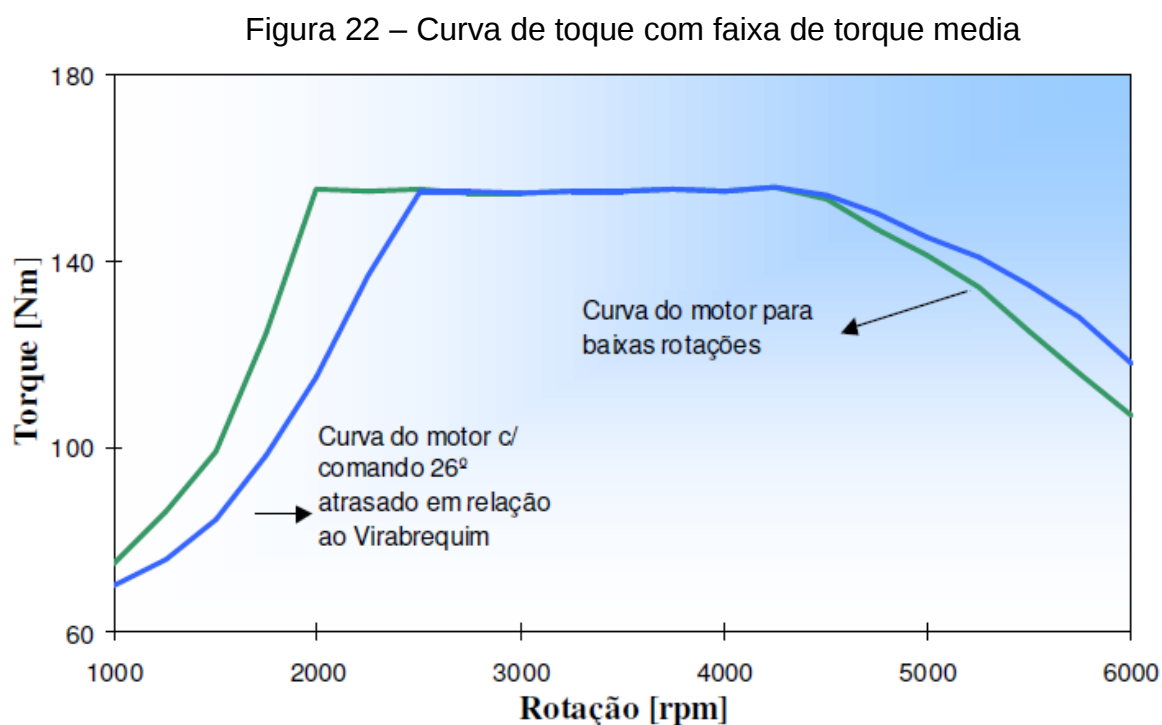
Figura 21 – Ilustração do diagrama real das válvulas



Fonte: Disponível em: <<http://arquivo.oficinabrasil.com.br/noticias/?COD=380>> Acesso em: 01 de novembro de 2020.

3.3.5 Avanço e atraso do comando de válvulas

Segundo Sorgatto (2014), existe uma relação de ganho e perda de torque em determinadas rotações quando se avança ou se atrasa o comando de válvulas, quando se avança o comando, este abre e fecha as válvulas de admissão mais cedo em relação a posição do pistão, e isso tende a trazer uma melhor resposta de torque do motor em baixas rotações em regime de carga parcial, que como afirmar Brunetti (2018) é quando a borboleta está parcialmente aberta, gerando perdas no bombeamento da massa de ar para dentro dos cilindros, justamente o regime mais utilizado em percursos urbanos. Atrasando o comando e consequentemente demorando mais para fechar e abrir as válvulas, isso resulta em maior torque em altas rotações, que é quando se enquadra o regime de plena carga, onde a válvula da borboleta está completamente aberta. Conforme a Figura 22 expõe, o gráfico da curva de torque de um motor operando numa configuração de melhor torque em médias rotações.

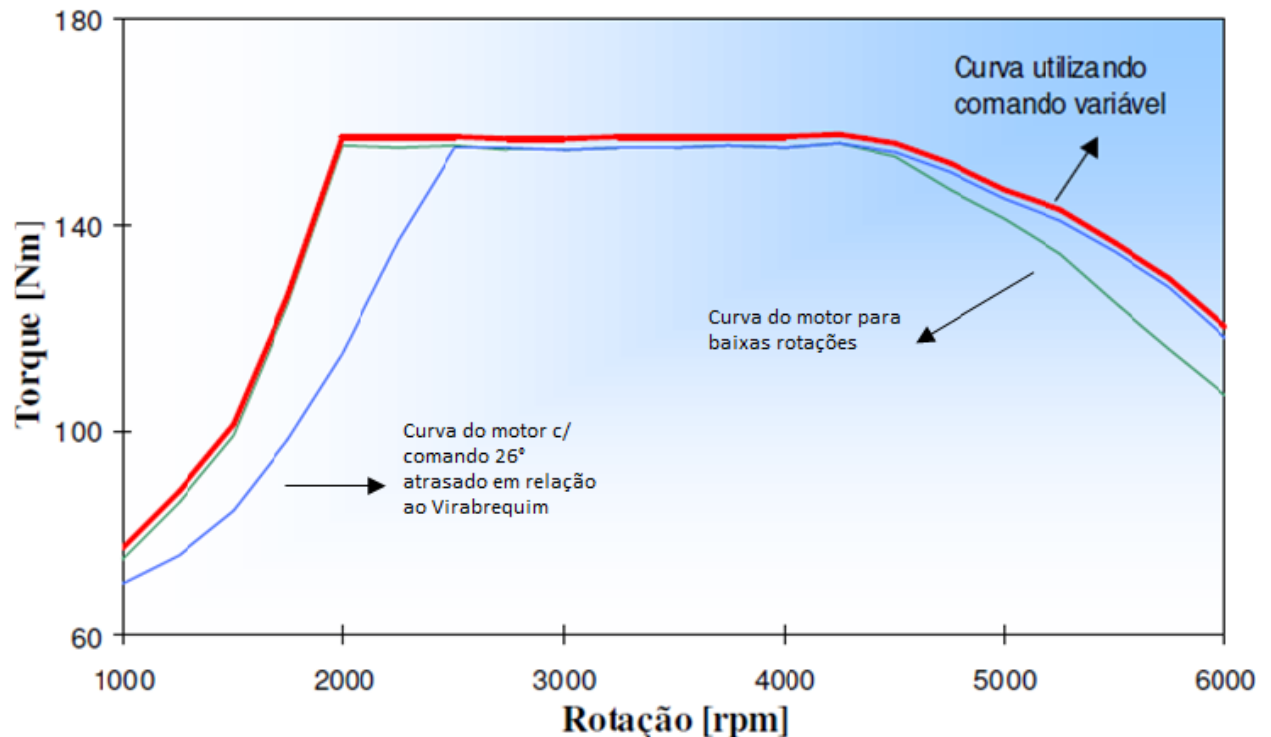


Fonte: NASSIMBENI; AMORIM; SOUZA, 2018.

Conforme demonstra a Figura 23, existe um atraso de 26° no comando de válvulas, onde é possível perceber que alterando o momento de abertura das válvulas

a curva de torque é antecipada, aumentando o torque em rotação mais baixa e antecipando a sua queda em altas rotações (NASSIMBENI; AMORIM; SOUZA, 2018).

Figura 23 – Curva de torque com avanço do comando de válvulas



Fonte: NASSIMBENI; AMORIM; SOUZA, 2018.

3.4 Configuração de um comando de Válvulas tradicional

O comando de válvula tradicional tem por característica não possibilitar a variação do intervalo em que as válvulas permanecem permitindo o fluxo de ar entrando e saindo do motor, já que este apresenta mesmo padrão em todas as faixas de rotação. Comandos dessa natureza só permitem ajustes manuais que podem ser mais ou menos limitados dependendo se são um comando único ou duplo (SORGATTO,2018).

No sistema de comando de válvula com as características convencionais dotado apenas de um eixo único, o ato de avançar a abertura das válvulas de admissão implicam no avanço das válvulas de exaustão também, já que os cames de admissão e exaustão estão no mesmo eixo, e isso pode acabar anulando os efeitos de avanço das válvulas de admissão, com uma possível perda de eficiência com o avanço da de exaustão por consequência (SORGATTO,2018).

Nos comandos denominados duplos, característicos pela existência de dois eixos com cames que comandam as válvulas, um para permitir a admissão de ar e outro para liberação dos gases de exaustão, cada eixo tem um ajuste, o fato de existir o ajuste separado entre válvulas de admissão e escape permite uma configuração mais individual de cada comando, onde um ajuste na admissão não interfere na exaustão (SORGATTO,2018).

3.5 Configuração de um comando de válvulas variável

A evolução das tecnologias e o advento da eletrônica, se tornou possível controlar dinamicamente sistemas mecânicos, incentivando o desenvolvimento de sistemas como os de comando de válvulas que poderiam variar sua configuração, desde a abertura e fechamento de válvulas até o próprio curso da sua abertura, tudo isso controlado pela central eletrônica do motor do carro de forma automática (SORGATTO,2018).

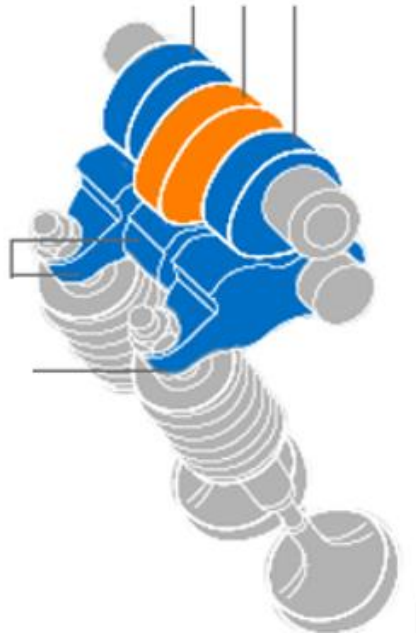
Segundo Scharffler (2011), o acerto do comando de válvulas de acordo com a sua fase pode acarretar um maior torque e potência gerada pelo motor, somado a uma redução de emissão de gases poluentes e consumo de combustíveis fosseis menor.

3.5.1 Atuação de um comando de válvula variável

Segundo Sorgatto (2014), a forma como os comandos proporcionam a mudança de padrão de acionamento das válvulas, varia de acordo com o fabricante, pois cada um utiliza um o mecanismo que desenvolveu para tal, como diz Melo (2014) as duas formas mais difundidas de variação de comando são, a chamada variação de fase e de abertura de válvulas.

Na variação de abertura, o eixo do comando tem mais de uma configuração de ressaltos, e cada um deles gera uma configuração de abertura, A variação vai se dar pela alteração do came que efetivamente aciona as válvulas, existem sistemas com dois ou três ressaltos, sendo eles voltados para as baixas, medias e altas rotações, e através de sistemas de travas e acoplamentos manipulados por atuadores em sua maioria hidráulicos, que vão modificar o came que realmente alcança o acionamento das válvulas, como ilustra a Figura 24 (SORGATTO,2018).

Figura 24 – Atuação de um sistema de válvulas variável com variador de abertura



Fonte: Disponível em: <<https://sites.google.com/site/fl20011evolucaoautomoveis/home/pt/tecnologias-para-reduzir-o-impacto-ambiental/vtec>> Acesso em:14 de novembro de 2020.

Como diz Melo (2014), variação de fase, faz com que todo o comando seja adiantado ou atrasado em relação ao seu próprio eixo, através de um atuador, desta forma também se altera o tempo em que as válvulas ficam abertas como demonstrado na Figura 25.

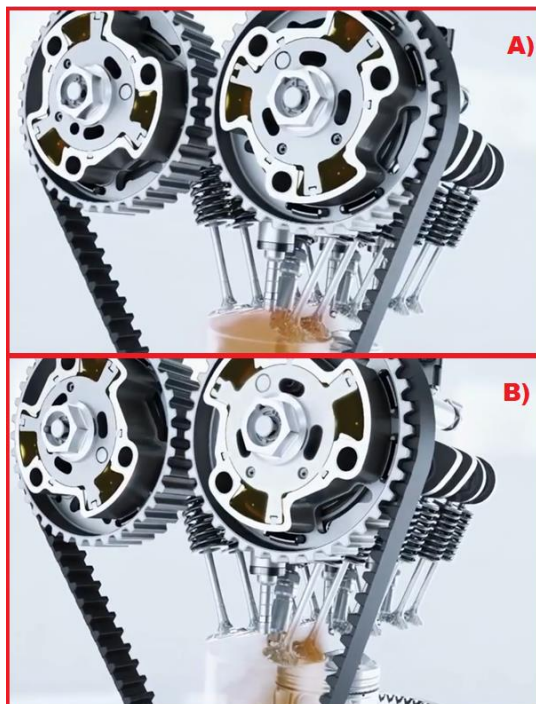
Figura 25 – Funcionamento de um sistema de válvulas variável com variador de fase.



Fonte: Disponível em: <<http://www1.uol.com.br/bestcars/tecprep/comando-variavel-3.htm>> Acesso em:15 de novembro de 2020.

Ambos sistemas são controlados logicamente por uma central eletrônica, que recebe os dados dos diversos sensores empregados no motor, e de acordo com a sua programação elas vão comandando os atuadores que movem os mecanismos responsáveis pela alteração do ressalto que entra em contato com o tucho hidráulico ou então o atuador vai atrasar ou adiantar o eixo do comando sobre o giro da polia como demonstrado na Figura 26 (NASSIMBENI; AMORIM; SOUZA, 2018).

Figura 26 – Sistema de válvulas variável com variador de fase, variando: A) Avanço máximo; B) Atraso máximo.



Fonte: Disponível em: < https://www.youtube.com/watch?v=_njdMqvCHjg&t=110s > Acesso em: 14 de novembro de 2021.

3.5.2 Melhorias geradas pelo uso do comando de válvulas

Como afirma Sorgatto (2018) os comandos variáveis são mais utilizados em motores com duplo comando de válvulas, podendo ter os dois comandos variáveis ou apenas o de admissão, mantendo o padrão tradicional para exaustão. A variação em cada comando trás seus benefícios individuais, que quando se somam melhoram muito a eficiência e o desempenho do motor no geral.

3.5.2.1 Melhorias geradas pela variação do comando de válvulas de admissão

Segundo Nassimbeni; Amorim; Souza (2018), os motores com comando fixo são configurados para obter seu melhor desempenho em faixas de giro media, apresentando um pico de torque e potência nessa região do seu gráfico e perdendo eficiência volumétrica ao se distanciarem dessas rotações ideais. A variação no comando de válvulas de admissão permite que se obtenha esse nível de eficiência mais cedo, e mantendo por mais tempo esse nível de performance, através da melhoria da dinâmica entre a pressão e o volume da mistura de ar-combustível no interior do cilindro, melhorando principalmente o torque alcançado em baixas rotações em que a variação das válvulas consegue contornar o menor fluxo e a baixa turbulência, parâmetros determinantes para uma maior e melhor queima.

3.5.3.1 Melhorias geradas pela variação de válvulas de escape

Como afirma Brunetti (2018), os MCI quando trabalham em altas temperaturas resultam na produção maior de gases poluentes , com o advento da variação de válvulas de exaustão torna-se possível o funcionamento com temperaturas menores e conseqüentemente gerariam menos produtos tóxicos, através de uma defasagem do fechamento das válvulas que permitirá que os gases oriundos da combustão entrassem em contato com os gases admitidos pelo cilindro que em menor temperatura resfriariam os gases queimados como afirma Nassimbeni; Amorim; Souza (2018), que ainda relatam o ganho de eficiência volumétrica devido à redução na pressão interna do cilindro devido a esse fechamento tardio da válvula exautora.

3.6 *Downsizing* de motores de combustão interna

Segundo Gheorghiu (2013) *downsizing* de MCI se trata de atingir o mesmo nível de desempenho com um motor menor, seja pela sua menor cilindrada ou pela quantidade reduzida de cilindros que proporcionam um menor porte que através de outras características consegue valores de torque e potência equiparáveis, e sobre tudo como avalia Brunetti (2018) valores de potência específica menores.

Como conclui Rodrigues (2014), o *downsizing* de propulsores a combustão vai estar sempre associado a uma nova inovação, que adiciona a esta máquina térmica a competência de fazer mais com menos, como os comandos de válvulas variáveis, coletores variáveis, injeção direta de combustível e a própria sobrealimentação de turbocompressores.

Como fala Enoshita (2021) para uma montadora homologar um novo carro, ela tem que atender as normas ambientais vigentes, exigindo que até os carros com ênfase em desempenho tivessem que se adequar, fazendo com que se investisse em desenvolvimento das tecnologias já citadas, em detrimento do tamanho dos motores, esse movimento que partiu das categorias superiores, acabou se popularizando até essas tecnologias alcançarem os carros populares.

3.6.1 Motores reduzidos de quatro para três cilindros

Quando já se tem uma baixa cilindrada como por exemplo um motor de aproximadamente mil cilindradas cúbicas, o *downsizing* acontece mais comumente na redução dos cilindros, deixando de lado o difundido padrão com quatro cilindros para utilizar o com apenas três. A redução de peso e dimensões, redução de atrito pela menor quantidade de componentes móveis, além da melhor eficiência térmica pela menor geração de calor são os grandes benefícios que esta configuração pode trazer, melhorando o desempenho e reduzindo o consumo de combustível e emissão de gases poluentes (ANDRADE, 2017).

Mendonça (2016), afirma que para motores entre novecentas e mil e duzentas cilindradas cúbicas a escolha por três cilindros apresentam a melhor configuração, pois estes possibilitariam cilindradas unitárias entre trezentas a quatrocentas cilindradas cúbicas apresentando um bom rendimento volumétrico, superior ao padrão de duzentas e cinquenta cilindradas cúbicas, da configuração amplamente difundida dos quatro cilindros com mil cilindradas.

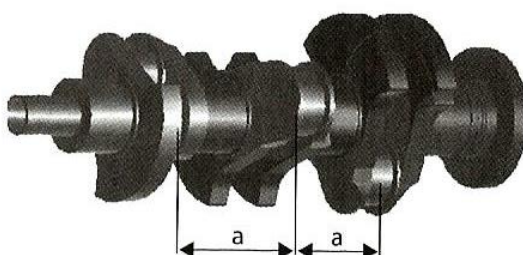
Caruso (2019) relata que os motores três cilindros são antigos, existem modelos de 1957 com essa configuração, mas foi nos anos 90 em que estes começaram a ser produzidos em larga escala, na Europa e na Ásia, mas sempre apresentaram economia em detrimento do desempenho, sempre menor do que os convencionais quatro cilindros. O que diferencia esses motores das décadas passadas para os atuais, são que estes estão enquadrados na tendência *downsizing*

que definida por Gheorghiu (2013), como propulsores que fazem mais com menos, como acontece atualmente com os motores três cilindros, que são mais econômicos e tem melhor performance que os seus antecessores.

Segundo Carneiro (2020) desenvolver um motor com um cilindro a menos é mais caro, visto que esse necessita agregar outras tecnologias para serem competitivos, necessitando de um investimento alto para seu desenvolvimento, que para atingir as metas de desempenho e redução de emissão de gases poluentes precisa ser equipado com uma serie de melhorias que aumentam o seu custo de produção. Em 2011 o Kia Picanto e o Hyundai Hb20 marcaram a entrada dos motores três cilindros no atual mercado brasileiro e hoje já são mais de trinta modelos de sub compactos a sedans e SUVs com motores com essa quantidade de cilindros em suas variações aspirada e sobrealimentada e com volumes que variam de 1 a 1,5 litros (SILVEIRA, 2015).

No caso específico da redução de quatro para três cilindros existem uma serie de complicações no funcionamento como tratam Marum (2014) e Brunetti (2018), quanto menos cilindros maior o grau de irregularidade da rotação do motor, que é a relação entre os momentos de forças gerados pelo seu funcionamento, isso causa mais vibração e tensões. A quantidade ímpar de cilindros provoca um desbalanceamento na aplicação de força e da massa do eixo virabrequim, que quando atinge altas rotações, geram um alto nível de vibração e ruído e um funcionamento menos confortável que um motor com número de cilindros par, exigindo investimento para encontrar soluções para amenizar essas características negativas, que no passado, não existiam tecnologias capazes de contorná-los. Na Figura 27 é possível ver o esquema de balanceamento do virabrequim para um motor 3 cilindros.

Figura 27 – Ilustração de um virabrequim de um motor 3 cilindros.



Fonte: BRUNETTI (2018)

Outro fator demonstrado por Martins (2018) é que um motor quatro tempos necessita de duas voltas completas 720° para realizar um ciclo, quando o propulsor em questão é de quatro cilindros, a cada meia volta (180°) acontece a explosão em um dos cilindros gerando a energia que será convertida em força, no caso dos motores com apenas três essa diferença é de 240° , aumentando o tempo de detonação, isso provoca uma maior vibração e um tempo de resposta relativamente maior do motor.

3.7 Motores três cilindros e comandos de válvulas variáveis

Segundo Andrade (2017), no mercado automotivo brasileiro de compactos, os ditos carros populares que são vendidos novos, já são em sua maioria equipados com a motorização com apenas três cilindros, os modelos que ainda resistem com os antecessores estão justamente esperando o desenvolvimento dos novos motores da sua marca.

Observasse que estes novos motores além da quantidade menor de cilindros apresentam comandos de válvulas mais avançados, sejam pela quantidade de válvulas por cilindro, pela existência de comandos duplos com a possibilidade de pelo menos o de admissão apresentar variação de válvulas (AUGUSTO, 2019).

Essas configurações de motores proporciona uma maior potência específica, onde se aumenta a potência efetiva mantendo a cilindrada total, os tornando mais eficientes e menos poluentes. A diminuição de cilindros, no caso dos motores de baixa cilindrada total, faz com que a cilindrada unitária tenha uma eficiência volumétrica melhor, fazendo com que se tenha cilindros de dimensões que tenham uma eficiência melhor, no que se trata ao volume de mistura que é possível ser admitida pelo motor, e a quantidade que realmente é admitida nas mais variadas faixas de funcionamento.

As menores proporções do motor por ter um cilindro a menos acarreta um menor desperdício de bombeamento do fluido ativo, por consequência das menores distâncias percorridas pelos pistões. Associar motores com essas características com comando de válvulas variáveis promove uma maior pressão no interior da câmara de combustão, aliado com sistemas multiválvulas que aumenta o fluxo, possibilitando com que o enchimento da câmara de combustão com mistura, seja maior e mais rápido melhorando a eficiência volumétrica do motor, resultando em motor que produz uma combustão mais energética com menos perdas (CARVALHO, 2011).

As exceções a associação dos motores três cilindros com comando de válvulas variável, no mercado brasileiro se encontram na categoria de sub compactos, onde a Renault equipa seu modelo da categoria, o Kwid com motor tricilindrico sem a presença dos comandos de válvulas variável, a Figura 28 demonstrada a ficha técnica desse motor.

Figura 28 – Ficha técnica motor Kwid sem comando variável.

CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES

Versões	1.0 12V Flex
Tipo de motor (indicado na placa do motor)	B4D
Cilindrada (cm ³)	999
Diâmetro x Curso (mm x mm)	71 x 84,1
Tipo de combustível Índice de Octano	Utilize somente gasolina tipo C, gasolina aditivada ou etanol hidratado em qualquer proporção entre eles. O motor também aceita gasolina pura com octanagem superior a 95 octanos. O reservatório de partida a frio aceita somente gasolina tipo C ou gasolina aditivada.
Torque máximo (kgf.m/rpm) Gasolina / Etanol	9,38 a 4250 (gasolina) 9,79 a 4250 (etanol)
Potência máxima (cv @ rpm) Gasolina / Etanol	66 a 5500 (gasolina) 70 a 5500 (etanol)

Fonte: Disponível em: < <https://cdn.group.renault.com/ren/br/renault-new-cars/editorial/manuais/2021/manual-do-proprietario-kwid-jul21.pdf>
> Acesso em: 14 de novembro de 2021.

Apesar deste modelo, pelo seu porte menor apresentar um peso que permite que esta versão do motor entregue um desempenho aceitável, o endurecimento da legislação de emissões vai fazer com a versão sem comando variável de lugar a versão aprimorada desse mesmo motor, que conta com duplo comando variável, que equipa os modelos de categorias acima como o hatch compacto Sandero e sedan compacto Logan. Na Figura 29 é demonstrada a ficha técnica deste motor para estabelecer um comparativo (Andreato, 2021)

Figura 29 – Ficha técnica do motor dos modelos Logan e Sandero com comando variável.

CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES

Versões	1.0 12V Flex	1.6 16V Flex
Tipo de motor (indicado na placa do motor)	B4D	H4M
Cilindrada (cm³)	999	1.598
Diâmetro x Curso (mm x mm)	71 x 84,1	78 x 83,6
Tipo de combustível Índice de Octano	Utilize somente gasolina tipo C, gasolina aditivada ou etanol hidratado em qualquer proporção entre eles. O motor também aceita gasolina pura com octanagem superior a 95 octanos. O reservatório de partida a frio aceita somente gasolina tipo C ou gasolina aditivada.	
Torque máximo (Nm @ rpm) Gasolina / Etanol	100 / 103 @ 3.500	156,8 / 156,8 @ 4.000
Potência máxima (kW @ rpm) Gasolina / Etanol	58 / 60,3 @ 6.250	84 / 87 @ 5.500

Fonte: Disponível em: <https://cdn.group.renault.com/ren/br/renault-new-cars/product-plans/sandero-s-edition/x52-sandero-s-edition-ph2-2021.pdf> Acesso em: 14 de novembro de 2021.

Outra exceção é proporcionada pelo concorrente dessa categoria, o Fiat Mobi que tem versões que utilizam o motor 1.0 de quatro cilindros e outras que utilizam o motor com apenas 3, cuja particularidade é apenas um comando e não ser multi válvulas e mesmo assim ter comando variavel, é demonstrada na Figura 30 as especificações técnicas desses dois motores (CARNEIRO, 2020).

Figura 30 – Ficha técnica do motor com quatro e três cilindros do fiat Mobi.

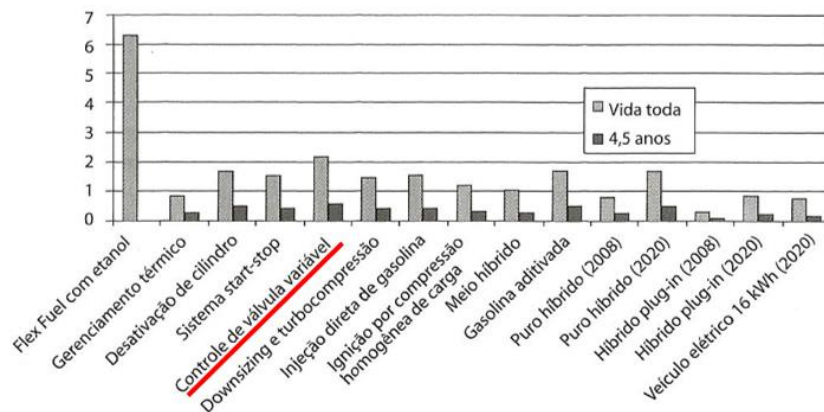
		Fire 1.0 8V Flex		Firefly 1.0 6V Flex	
Ciclo		OTTO		OTTO	
Número e posição dos cilindros		4 em linha		3 em linha	
Diâmetro x curso dos pistões (mm)		70,0 x 64,9		70,0 x 86,5	
Cilindrada total (cm³)		999,1		999,0	
Taxa de compressão		13,0 + 0,15/-0,25 : 1		13,2 ± 0,33 : 1	
Desempenho		Gasolina	Etanol	Gasolina	Etanol
Potência máxima ABNT	cv/kW	73,0/53,7	75,0/55,2	72,0/53,0	77,0/57,0
regime correspondente	rpm	6250	6250	6000	6250
Torque máximo ABNT	kgfm/Nm	9,5/93,1	9,9/97,0	10,4/102,0	10,9/107,0
regime correspondente	rpm	3850	3850	3250	3250
Regime de marcha lenta	rpm	800 ± 50		860 ± 50	

Fonte: Disponível

em: <https://servicos.fiat.com.br/content/dam/fiat/products/handbooks/341/2020/handbook-mobi-firefly2020_2021.pdf> Acesso em: 14 de novembro de 2021.

A Figura 31 demonstra a relação entre motor três cilindros e comando variável é positiva, já que mostra a relação entre a economia de energia e consequentemente redução de emissão de gases poluentes, em detrimento do valor investimento em certas tecnologias disponíveis para motores automotivos, isso considerando 4,5 anos de uso e uma vida útil inteira, afim de estabelecer o potencial de benefício a sociedade e comparar alternativas, para as perspectivas dos consumidores. Comandos de válvulas variáveis é uma das tecnologias que entregam o maior retorno de investimento em motores, sendo seguida pelas vertentes *downsizing* (BRUNETTI, 2018).

Figura 31 – Gráfico com a relação entre economia de energia e tempo de uso de tecnologias de motor a combustão.



Fonte: BRUNETTI (2018)

4 METODOLOGIA

Este trabalho na área de engenharia, sobre motores de combustão interna consiste em estudo de caso que segundo Gil (2017) é o estudo de um fenômeno dentro do seu contexto real, composta pela extração de dados reais, através do uso de um aparelho de diagnóstico, do funcionamento de dois motores de mesma categoria, mas de características diferentes, afim de utilizar esses dados para comprovar os resultados, da pesquisa bibliográfica feita em materiais já publicados, sejam livros, revistas, teses dissertações além de conteúdo fornecido via internet com fim de estabelecer as razões que promovem a aplicação de comando de válvulas variáveis em motores *downsizings* de três cilindros com baixa cilindrada.

O presente trabalho foi dividido em três etapas, com o intuito de direcionar melhor a pesquisa.

A primeira etapa foi relativa a pesquisa bibliográfica que segundo Santos (2021) é composta pela extração de informações em materiais já publicados, sejam livros, revistas, teses, dissertações além de conteúdo fornecido via internet sobre o funcionamento dos motores de combustão interna e seus comandos de válvulas, sejam eles convencionais ou variáveis, obtendo o entendimento dos seus funcionamentos, as vantagens e desvantagens que cada uma dessas configurações de comando impõe, e a estimar os possíveis desdobramento da combinação destas tecnologias com as diferentes arquiteturas de motores.

A segunda etapa foi a pesquisa sobre motores de três cilindros de baixa cilindrada, sendo feito levantando de informação em livros, revistas e portais sobre suas particularidades, tanto de projeto, quanto de construção e funcionamento, organizando essas informações e as comparando com motores mais antigos de mesma cilindrada, que eram equipados com quatro cilindros, associando esses conhecimentos aos pesquisados anteriormente sobre comandos de válvulas variáveis, com fim de identificar as razões da maioria dos motores 1.0 com três cilindros terem pelo menos o comando de válvulas variável na admissão.

A terceira e última etapa desta pesquisa foi a coleta de dados de funcionamento dos motores de dois carros, um equipado com um motor três cilindros 1.0 com comando de válvulas variável e de um outro com motor quatro cilindros 1.0 equipado

comando de válvula convencional, ambos, necessariamente dotados de sistema injeção eletrônica.

Um dos carros utilizados foi um Chevrolet Celta 2008, com 1.0 VHC, montado com um comando de válvula simples, na Figura 32 tem-se a ficha técnicas deste motor presente no manual do proprietário.

Figura 32 – Ficha técnicas do motor do Celta 1.0, 2008.

MOTOR	1.0L MPFI Flexpower
Tipo	Transversal, dianteiro
Número de cilindros	4, em linha
Número de mancais principais	5
Ordem de ignição	1 – 3 – 4 – 2
Diâmetro interno do cilindro	71,1 mm
Curso do êmbolo	62,9 mm
Razão de compressão	12,6:1
Cilindrada	999 cm ³
Rotação de marcha lenta	850 – 950 rpm
Potência máxima líquida*	70 CV (51,5 kW) a 6.400 rpm
Torque máximo líquido*	86 N.m (8,8 kgf.m) a 3.200 rpm (gasolina) 88 N.m (9,0 kgf.m) a 3.200 rpm (álcool)

* NBR ISO 1585

Fonte: Disponível

em: <<https://www.chevrolet.com.br/content/dam/chevrolet/mercosur/brazil/portuguese/index/services/owner-manuals/05-pdf/celta/manual-celta-2008.pdf>> Acesso em: 14 de novembro de 2021.

O outro carro utilizado foi um Volkswagen Up! 2015, com motor 1.0 MPI, equipado com duplo comando de válvulas, variável no comando das válvulas de admissão, na Figura 33 temos a ficha técnica desse motor presente no manual do proprietário.

Figura 33 – Ficha técnicas do motor do Up! 1.0 MPI, 2015.

1.0 TOTALFLEX 55/60 kW - MPI		
	Gasolina	Etanol
Potência do motor	55 kW (75 cv) a 6.250 rpm	60 kW (82 cv) a 6.250 rpm
Torque máximo	95 Nm (9,7 kgfm) a 3.000 rpm	102 Nm (10,4 kgfm) a 3.000 rpm
Código do motor	CSEA	
Cilindros, Cilindrada	3 cilindros, 999 cm ³	
Relação de compressão	11,5:1	

Fonte: Disponível em: < https://www.vw.com.br/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/br/literatura-de-bordo/manual-up/MY%202015_153.5B1.BUP.66.pdf > Acesso em: 01 de novembro de 2021.

Com os dados técnicos dos motores, foram comparadas as diferenças de dimensões de cilindros e considerada as relações entre essas medidas e o funcionamento do motor, foram feitos os cálculos da cilindrada unitária através equações 1 e cilindrada total pela equação 2.

Através do uso do aparelho de diagnostico RASTER modelo TM40 da fabricante TECNOMOTOR, que é capaz de ler os valores de funcionamento do motor, foi coletado os dados necessários para o calcular a densidade da massa de ar na entrada do motor pela equação 4, e consequente mente o rendimento volumétrico com a equação 3, sendo analisado os resultados encontrados nos cálculos juntamente com as informações estudadas na pesquisa bibliográfica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ponto de partida da pesquisa é o fato da maioria dos motores 1.0 comercializados no mercado brasileiro na atualidade, terem migrado de arquiteturas com quatro cilindros para com apenas três, e essa redução de cilindros, salvo exceções, vem sempre acompanhada com comando de válvulas, com pelo menos o comando da admissão variável, e isso é demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Motores três cilindros e seus comandos de válvulas

Modelo	Montadora	Motor	Válvulas por cilindro		Tipo de comando	Variável	
			Admissão	Exaustão		Admissão	Exaustão
KA	FORD	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	SIM
HB20	HYUNDAI	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	Não
HB20S							
March	NISSAN	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	Não
Versa							
UP	VOLKSWAGEN	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	Não
Gol							
POLO							
VOYAGE							
KWID	RENAULT	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	NÃO	NÃO
KWID 2022						SIM	Sim
LOGAN							
SANDERO							
PICANTO	KIA	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	SIM
208	PEGOUT	1.2, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	SIM
C3	CITROËN						
MOBI	FIAT	1.0, aspirado, 4 cilindros	1	1	ÚNICO	NÃO	NÃO
ARGO		1.0, aspirado, 3 cilindros				SIM	SIM
UNO							
ONIX	GM	1.0, aspirado, 3 cilindros	2	2	DUPLO	SIM	SIM
ONIX PLUS							

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

O processo de pesquisa demonstrou que motores que são destinados a automóveis, tem a particularidade de trabalhar com condições de carga muito variáveis, por diversos fatores como por exemplo o peso do automóvel, o peso dos ocupantes e bagagens, inclinação do terreno e velocidade desenvolvida pelo automóvel, isso faz com o motor necessite ter um bom desempenho em todas suas faixas de rotação,

A limitação do nível tecnológico para desenvolvimento do projeto e a capacidade de produção, fez os motores mais antigos, serem pensados para funcionar melhor nas rotações que mais eles seriam utilizados, que para motores de baixa cilindrada seria em rotação media, em torno das 2500 e 3000 rotações por minuto, logo , todo projeto era voltado prioritariamente para as medias rotações, em detrimento das mais baixas e altas.

Essa questão interferia diretamente no comando de válvulas, pois sua configuração acaba priorizando rotações medias, e como as limitações técnicas impediam, não tinha como desenvolver sistemas de comando de válvulas que pudessem funcionar melhor em outras faixas de rotação. Porém fazendo alterações de sincronismo do comando de válvulas em relação ao eixo de manivelas, era possível notar, relações de ganha e perda de desempenho, ao adiantar ou atrasar o eixo de comando, poderia melhorar o desempenho do motor em baixas rotações e piorar em altas, ou o inverso, e foi querendo aproveitar essas condições que surgiu o comando de válvula variável.

Dentro da evolução do comando de válvulas, você tem os sistemas com mais de uma válvula para admissão e exaustão, os duplos comandos e por fim o comando variável, que podem ser na admissão e exaustão, caso seja um sistema com comando único, já nos duplos, variação pode ser só admissão ou no de exaustão também, e esses comando por serem mais complexos eram instalados apenas em motores maiores e de maior valor. Com a popularização da tecnologia e as exigências de desempenho e de legislação ambiental, obrigou as montadoras a utilizar esse tipo de comando em motores menores.

O surgimento do *downsizing* foi justamente durante esse processo, motores maiores que reservavam seu desempenho na litragem do motor, passaram a dar lugar a motores menores com mais tecnologia, e uma das principais era o comando de válvula variável. O processo de redução de tamanho de motores chegou ao que atualmente é o limite, os motores de baixa cilindrada, em torno de 1000 cm³, sem

poder reduzir a cilindrada , a alternativa foi reduzir as dimensões do motor através da redução de cilindro, saindo do modelo quatro cilindros , que tem muita afinidade com o funcionamento de quatro tempos, para tricilíndrico, que por característica vibra mais e gera mais ruído, sem contar no desempenho, que em nivelamento tecnologia não tem não supera a arquitetura com um cilindro a mais.

Pelos mesmos problemas de desenvolvimento citados dos comandos variáveis, também não eram viáveis as soluções que um motor com apenas três cilindros necessitava, nas gerações passadas de motores. Com a evolução tecnológica, problemas com ruído e vibração já eram passíveis de correção e a questão de desempenho também já poderia evoluir visto, a popularização de sistemas mais modernos, materiais mais resistentes e leves disponíveis, e um salto de capacidade de projeto e produção.

Quando as desvantagens dos motores três cilindros foram superados, suas vantagens, o tornaram mais atrativo, menores dimensões, menor peso, menor quantidade de peças e conseqüentemente menos atrito e calor gerado, e uma distribuição de cilindrada entre cilindros mais eficiente, isso tudo unido a um sistema de comando de válvula variável representaria um desempenho melhor e mais eficiente.

Por esta razão que os motores três cilindros de baixa cilindrada via de regra vem equipados com comando de válvulas variável, pois só assim é possível aproveitar um dos seus maiores trunfos, o melhor rendimento volumétrico, possibilitado pela cilindrada unitária maior que dos motores quatro cilindros.

É possível notar isso, comparando os valores de rendimento volumétrico encontrados, ao calculá-los em cada faixa de rotação, em um comparativo de um carro com motor 1.0 com quatro cilíndricos sem comando variável e um com motor com três cilindros com comando variável.

Na Tabela 1 constam os valores das dimensões internas dos motores que estão sendo comparados.

Tabela 1 –Resultados dos cálculos de dimensões internas dos motores

Dimensões	Celta 1.0	UP! 1.0
Nº DE CILINDROS (Z)	4	3
Diâmetro interno do cilindro (D)	71,1 mm	74,5 mm
Curso do pistão (S)	62,9 mm	76,4 mm
Cilindrada unitária (V_{du})	249,735 cm ³	333,039 cm ³
Cilindrada total (V_d)	998,940 cm ³	999,118 cm ³
Relação diâmetro do pistão e curso do pistão	$D > S$ Superquadrado	$D < S$ Subquadrado

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

A tabela comparativa deixam claras as diferenças de dimensões entre os cilindros dos motores e consequentes de seus conjuntos de pistões, a diferença entre o diâmetro dos cilindros não é tão grande porem a diferença no curso do pistão é considerável, que faz como que o motor do Celta seja classificado como superquadrado, por ter o diâmetro maior que curso do pistão dando a ele a característica de render melhor em altas rotações, essa característica não favorecem muito ao uso urbano, pois se caracteriza por uma condução mais cheia de retomadas, paradas e saídas e baixas velocidades, fazendo com que o motor trabalhe sempre em regime de carga parcial, que não favorece ao melhor fluxo de ar na admissão do motor, a cilindrada baixa é mais voltada justamente para o uso em perímetro urbano, visto que o uso rodoviário exige velocidades mais altas, e baixa cilindrada faz com que o motor tenha uma baixa capacidade de desenvolvê-las e um tempo de resposta reduzido, fazendo com que o veículo tenha um limite maior e precise de mais tempo para executar tarefas como ultrapassagens, retomadas e subidas.

No caso do Up!, o motor apresenta um diâmetro menor que curso do pistão, classificando este como subquadrado, com um melhor desempenho em baixas rotações, esta característica está muito mais alinhada com o a proposta de um motor 1.0 aspirado, que é muito mais utilizado em carros compactados para uso urbano, o

melhor desempenho em baixas rotações favorece muito o uso do transito com muitos paradas e retomadas, esse tipo de motor trabalha muito melhor em regimes de cargas parciais, e com o advento do comando de válvulas variável ele vai conseguir ter um fluxo de muito melhor em todas faixas de rotação, fazendo com que o desempenho do carro seja ágil no tráfego da cidade e seja menos demorado em velocidades mais altas no uso rodoviário quando comparada por exemplo com o Celta estudado.

Essas características dimensionais dos motores interferem diretamente em fatores como enchimento do cilindro e o bombeamento, os dados permitem afirmar que o motor com três cilindros pode passar mais tempo admitindo mistura e em uma quantidade maior.

Sabendo que o motor com três cilindros tem uma capacidade maior de admitir ar é interessante comparar também a eficiência volumétrica desses motores, que nada mais é, que a relação entre a volume disponível para mistura do motor e aquilo que realmente é utilizado.

Na Tabela 3 é apresentado os valores colhidos através de um aparelho de diagnostico captado pelos sensores dos motores, com fim de calcular o rendimento volumétrico, os carros estavam com os motores em temperatura de trabalho e os dados foram coletados com os motores sem carga.

Tabela 2 –Tabela com valores coletados com aparelho de diagnostico

Rpm	Celta 1.0		UP! 1.0	
	Temperatura do ar no coletor			
	°C		°C	
	66		66	
rot/m	$\dot{m}$: Vazão mássica através do conduto de admissão	p_e : Pressão de ar no coletor	$\dot{m}$: Vazão mássica através do conduto de admissão	p_e : Pressão de ar no coletor
	Kg/h	Mbar	Kg/h	Mbar
1000	4	490	7,3	300
2000	8	330	12,4	250
3000	13	360	20,6	240
4000	14	350	26,1	210
5000	20	350	34,5	250

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

Foram coletados os dados com as unidades de medidas fornecidas pelo aparelho diagnostico, todas as leituras estão presentes no apêndice 1 e 2. Foram necessárias conversões para alcançar as unidades pedias pelas equações 3 e 4. No caso da equação 4, foi necessária uma análise dimensional, com fim de estabelecer para quais unidades de medida deveriam ser convertidos os valores coletados.

Abaixo a equação 9 demonstra a analise dimensional feita para definir a unidades em que os valores iriam ser convertidos.

$$\rho_e \frac{kg}{m^3} = \frac{\frac{kgf}{m^2}}{\frac{kgfm}{kgK} \cdot K} = \frac{\frac{1}{m^2}}{\frac{m}{kg}} = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{kg}{m} = \frac{kg}{m^3} \quad (9)$$

Sabendo as unidades para conversão das equações 3 e 4, foi montada a Tabela 3 com os valores coletados e convertidos.

Tabela 3 –Tabela com valores convertidos

Rpm		Celta 1.0				UP! 1.0			
		Temperatura do ar no coletor							
		°c		K		°c		K	
		73		346,15		66		339,15	
rot/m	rev/s	$\dot{m}$: Vazão mássica através do conduto de admissão		p_e : Pressão de ar no coletor		$\dot{m}$: Vazão mássica através do conduto de admissão		p_e : Pressão de ar no coletor	
		Kg/h	kg/s	mbar	Kgf/m²	Kg/h	kg/s	mbar	Kgf/m²
1000	16,6	4	0,00111111	360	3670.98	7.3	0,00202778	300	3059.15
2000	33,3	7	0,00194444	330	3365.06	12,4	0,003444444	250	2549.29
3000	50	11	0,00305556	330	3365.06	20,6	0,005722222	240	2447.32
4000	66,6	14	0,00388889	350	3569.01	26,1	0,00725	210	2141.4
5000	83,3	21	0,00583333	380	3874.92	34,5	0,009583333	250	2549.29

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

Com os dados de massa de ar coletados referentes a cada rotação, o valor de massa especifica calculado através da equação 4 com os valores de pressão, temperatura coletados via aparelho de diagnostico, e o valor da constante da massa

de ar seco que é de 286,9 J/kgK, que também teve que ser convertido segundo a análise dimensional da equação 9, foi possível calcular a eficiência volumétrica para cada rotação do motor.

Abaixo a Tabela 4 apresenta os percentuais de eficiência volumétrica de cada motor de acordo com a sua rotação, os cálculos feitos para alcançar esses resultados então contidos nos apêndices 3 e 4.

Tabela 4 –Tabela com os resultados das eficiências volumétricas

RPM	CELTA	UP!
	η_v % Eficiência volumétrica	
1000	36,82%	79,10%
2000	35,1899 %	80,60%
3000	36,85%	93%
4000	33,179%	101,07%
5000	36,67%	89,71%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

Sobre os valores de eficiência volumétrica encontrados após os cálculos, é necessário considerar uma margem de erro, por eventuais delay entre leitura do aparelho e a exibição dos dados na sua tela, devido à dificuldade de manter o giro do motor através do pedal do acelerador.

No caso do celta, os valores encontrados estão abaixo do esperado, visto que os valores circulam próximo dos 35%, e as variações são muito pequenas, e isso se deve ao fato do motor não está com carga no momento da coleta de dados, o que fez com ele atingisse as rotações, sem alcançar seus valores de eficiência máxima a cada rotação, mesmo assim é possível notar a grande diferença de valores para o motor do outro carro testado.

Se tratando dos números encontrados do Up!, é provável que os números estejam um pouco mais altos, pois é muito difícil um motor aspirado atingir uma eficiência maior que os 100%, mas a diferença mostra justamente a capacidade do comando de válvulas se adaptar a situação de funcionamento sem carga do motor, e também sua grande superioridade quanto a eficiência volumétrica.

6 CONCLUSÃO

Diante de tudo que foi exposto é possível concluir a partir da pesquisa bibliográfica, que os motores a combustão interna aspirados tem como agente limitante da combustão o fornecimento de ar, já que o combustível e o calor são controlados diretamente, grandes responsáveis pelo processo de admissão de ar, os comandos de válvulas evoluíram com o fim de melhorar o fluxo de ar para dentro dos motores, o grande problema é que a necessidade do fornecimento de ar para os motores varia de acordo com seu funcionamento, fazendo surgir o comando variável, que consegue se adequar as variações impostas pelo funcionamento do motor para admissão do ar.

A pesquisa bibliográfica sobre os motores três cilindros de baixa cilindrada possibilitou concluir, que este motor por não ter o número de tempos igual ao de cilindros sofre ainda mais, com dimensões de cilindros maiores, os problemas de escoamento e bombeamento do ar para dentro do cilindros seriam maiores caso não tivessem comandos variáveis, teriam eficiência volumétrica pior que os motores quatro cilindros, além de ter mais vibração e ruído, sem que suas menores dimensões, peso, atrito e geração menor de calor fossem capazes de compensar. Com comandos de válvulas variáveis as situações se tornam completamente oposta, pois o projeto concebido já com essa possibilidade, permite que seja projetado um motor com capacidade de obter a melhor eficiência volumétrica possível, pois o fornecimento de ar vai ser mais adequado para cada rotação, resultando em massa de ar sempre suficiente para uma boa combustão, resultado em um desempenho melhor em todas as faixas de funcionamento, com volumes de cilindros mais eficientes, menor peso, menos atrito e menos calor, o resultado são motores com torque em baixas rotações e uma maior potência, fazendo com que mesmo tendo baixa cilindrada tenham respostas rápidas em baixas rotações e desenvolvam melhor em velocidades mais altas, devido a maior potência, além de serem mais eficientes, por sua potência efetiva maior, e sobre tudo menos poluentes e mais econômicos por conseguir utilizar misturas com mais ar do que combustível em todas as faixas de rotação.

As constatações feitas pelas pesquisas bibliográficas foram comprovadas pelo estudo de caso, pois o comparativo entre os dados dos motores estudados revelaram como o motor três cilindros com comando variável tem números melhores, devido a

sua capacidade de alimentar o motor com mais massa de ar, sem necessitar pressiona-la tanto para dentro dos cilindros, visto seus menores valores de pressão no coletor de admissão, os cilindros maiores possibilitam aspiração de mais ar por mais tempo a cada ciclo, resultando em uma melhor aproveitamento, e isso é comprovado nos valores de eficiência volumétrica , que são maiores em todas as faixas de rotação, fatores diretos para números de torque e potência maiores, sendo o de torque alcançado em rotações menores, assim como a potência máxima que acaba sendo oferecida mais cedo e se mantém por mais tempo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Leonardo. **Motor com 3 cilindros: carros que já usam esse motor (no Brasil)**. Notícias automotivas, 2019. Disponível em: <<https://www.noticiasautomotivas.com.br/motor-com-3-cilindros-carros-que-ja-usam-esse-motor-no-brasil/>>. Acesso em: novembro de 2020

ANDREATA, Alessandro. **Novo Renault Kwid chega com motor 1.0 mais potente**. Frota e mercado, 2021. Disponível em: <<https://frotaemercado.com.br/novo-renault-kwid-chega-com-motor-1-0-mais-potente/>>. Acesso em: novembro de 2020.

AUGUSTO, Jorge. **Por que o motor 3 cilindros da Fiat têm apenas 6 válvulas?** Comprecar, 2017. Disponível em: <<https://www.comprecar.com.br/revista/por-que-o-motor-3-cilindros-da-fiat-tem-apenas-6-valvulas>>. Acesso em: novembro de 2020.

BONATESTA, F. et al. **Fuel economy analysis of part-load variable camshaft timing strategies in two modern small-capacity spark ignition engines**. Applied Energy. v. 164. fev. 2016.

BORETTI, A. **Towards 40% efficiency with bmep exceeding 30 bar in directly injected, turbocharged, spark ignition ethanol engines**. energy conversion and management. Energy Conversion and Management. v. 57. mai. 2012.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 1. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**: volume 2. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2018.

CABRAL, Luciana. **Estudo do desempenho do motor fiat fire 1.0**. 2019. Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

CARNEIRO, Alexandre. **Motor de 3 cilindros é mais barato para os fabricantes?** Autopapo, 2020. Disponível em: <<https://autopapo.uol.com.br/noticia/motor-de-3-cilindros-e-mais-barato/>>. Acesso em: novembro de 2021.

CARUSO, Ricardo. **Motores de três cilindros: sim ou não?** Auto & técnica, 2019. Disponível em: <<http://autoetecnica.band.uol.com.br/motores-de-tres-cilindros-sim-ou-nao/L>>. Acesso em: novembro de 2020.

CARVALHO, Marcio. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis.** Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

CETESB - **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>> Acesso em: setembro 2020

CONTANTIN, Luis Claudio Paleari. **Dimensionamento de turbocompressor para aplicação em motor de combustão interna.** 2017. Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluídos: fundamentos e aplicações.** 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

DURANGO, Deisson Alexander Zuleta. **Influência da temperatura, velocidade e força no desgaste e no coeficiente de atrito de materiais para válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel.** 2016. Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ENOSHITA, Evandro. **Você sabe o que é downsizing?**. Instacarro, 2020. Disponível em: <<https://www.instacarro.com/blog/tecnologia-automotiva/o-que-e-downsizing/>>. Acesso em: novembro de 2021.

FERNANDES, Heder **Investigação experimental da recirculação de gases de exaustão em um motor de combustão por centelha com atuação de válvula variável operando com gasolina e etanol**. 2017. Universidade federal de minas gerais, Belo Horizonte, 2017.

GIL, A. Carlos, **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**, 6. ed. – São Paulo: Atlas, 2018.

GHEORGHIU, Victor. **Ultra-Downsizing of Internal Combustions Engines**. SAE Technical Paper, 2013.

GUEDES, P. **Downsize, onde menos é mais**. Disponível em <<http://www.formula.ufscar.br/blog/downsize-onde-menos-e-mais/>>UFSCar Universidade Federal de São Carlos. Acesso em setembro de 2020.

HORODECKI, Yuri Moss. **Comparação do desempenho de um motor de combustão interna normalmente aspirado movido a gasolina e turbocomprimido operando com etanol**. Universidade tecnológica federal do paraná, Ponta Grossa, 2014.

INOVAR-AUTO. **Programa de Incentivo   Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm>. Acesso em: setembro 2020.

LIMA, Renato Gavassa. **Evolução dos motores a combustão interna ciclo otto no Brasil**. Faculdade de tecnologia de Santo André, Santo André, 2017.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 5. ed. Guimarães: Engebook, 2016.

MARUM, Denis. **Econômico, motor de 3 cilindros é a ‘bola da vez’ para carros.** 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/carros/oficina-dog1/noticia/2014/02/economico-motor-de-3-cilindros-e-bola-da-vez-para-carros.html>>. Acesso em: novembro de 2020.

MELO, Inácio Costa. **Downsizing - redução de consumo de combustível com aumento de potência e torque em motores de combustão interna.** 2014. Universidade do Rio Verde, Rio Verde, 2014.

MENDONÇA, Douglas. **Motor com 3 ou 4 cilindros: Qual é o melhor?.** Motor show, 2016. Disponível em: < <https://motorshow.com.br/motor-com-3-ou-4-cilindros-qual-o-melhor/>>. Acesso em: dia, novembro de 2020.

NASSIMBENI, Gabriel; AMORIM, Matheus Martins; SOUZA, Remou. **Comando de válvulas variável elétrico.** FATEC Santo André, Santo André, 2018.

NOGUEIRA, Nuno. **O que é downsizing?.** 2014. Disponível em: <<http://www.portalgestao.com/gestao/item/6319-o-que-%C3%A9-o-downsizing.html>>. Acesso em: setembro de 2020.

RESENDE, Tiago Alceu. **Estudo da Dinâmica das Válvulas e Desempenho dos Coletores de Admissão e de Escape de um Motor de Combustão Interna de Ignição por Centelha.** Universidade federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2017.

RODRIGUES, Thiago de Matos. **Downsizing” em motores de combustão interna: uma abordagem de inovação tecnológica.** Centro universitário do instituto Mauá de tecnologia, São Caetano do Sul, 2014.

SANTOS, João. A.; FILHO, Domingos. P. **METODOLOGIA CIENTÍFICA.** Cengage Learning Brasil, 2012

SANTOS, Marcelo. **Motores de três cilindros: o preço da vibração no downsizing.** Carros, 2017. Disponível em: <<https://carros.ig.com.br/colunas/escola-de-restauracao/2017-08-28/motores-tres-cilindros.html>>. Acesso em: novembro de 2020.

SCHAEFFLER BRASIL LTDA, **Componentes do trem de válvulas e variadores de fase do eixo comando.** Tecnologia e diagnóstico de falha. Brasil, 2011.

SILVA, Paulo E. de A. **Modelo para a predição da proporção dos combustíveis que alimentam um motor de três cilindros em um veículo compacto.** Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2018.

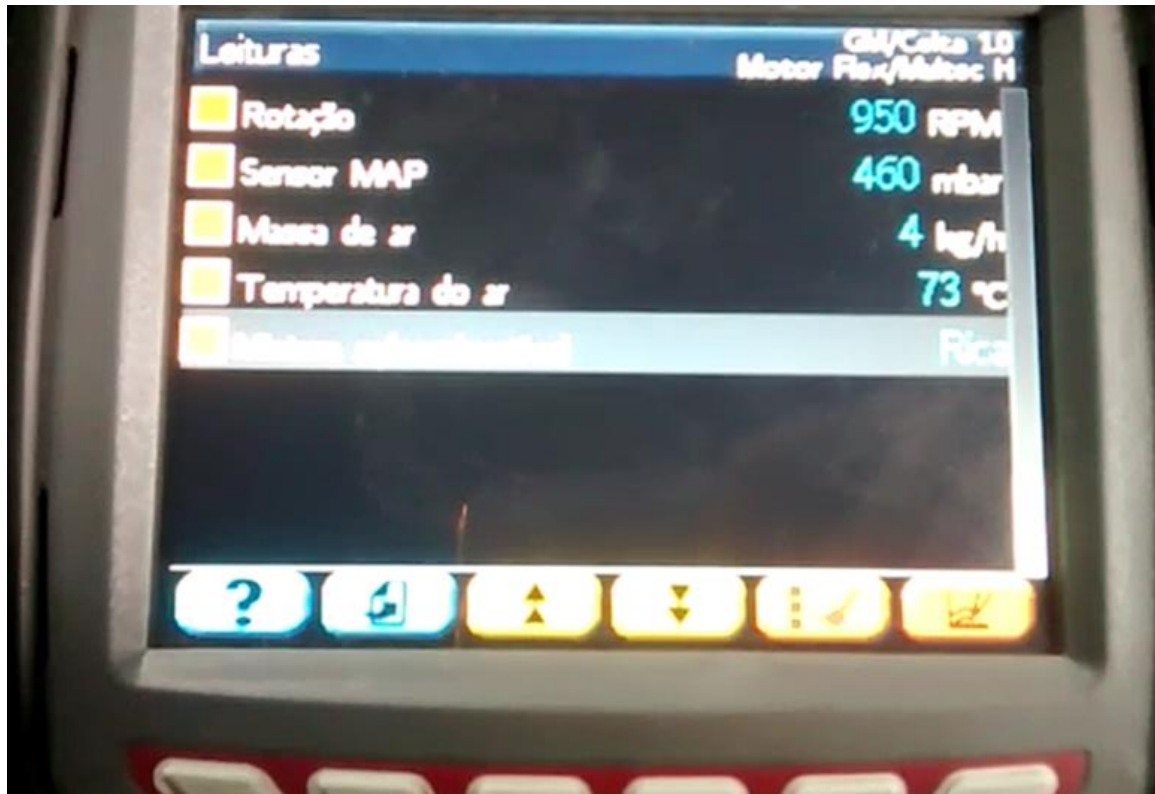
PINHEIRO, Filipe Ribeiro; LEME, Flávio Mateus **Eficiência de motores sobrealimentados turbo.** FATEC Santo André, Santo André, 2014.

SORGATO, Rodrigo. **Análise da variação de fase do comando de válvulas em um motor de combustão interna de ciclo otto turbo alimentado.** Universidade de Caxias do sul, Caxias do Sul, 2014.

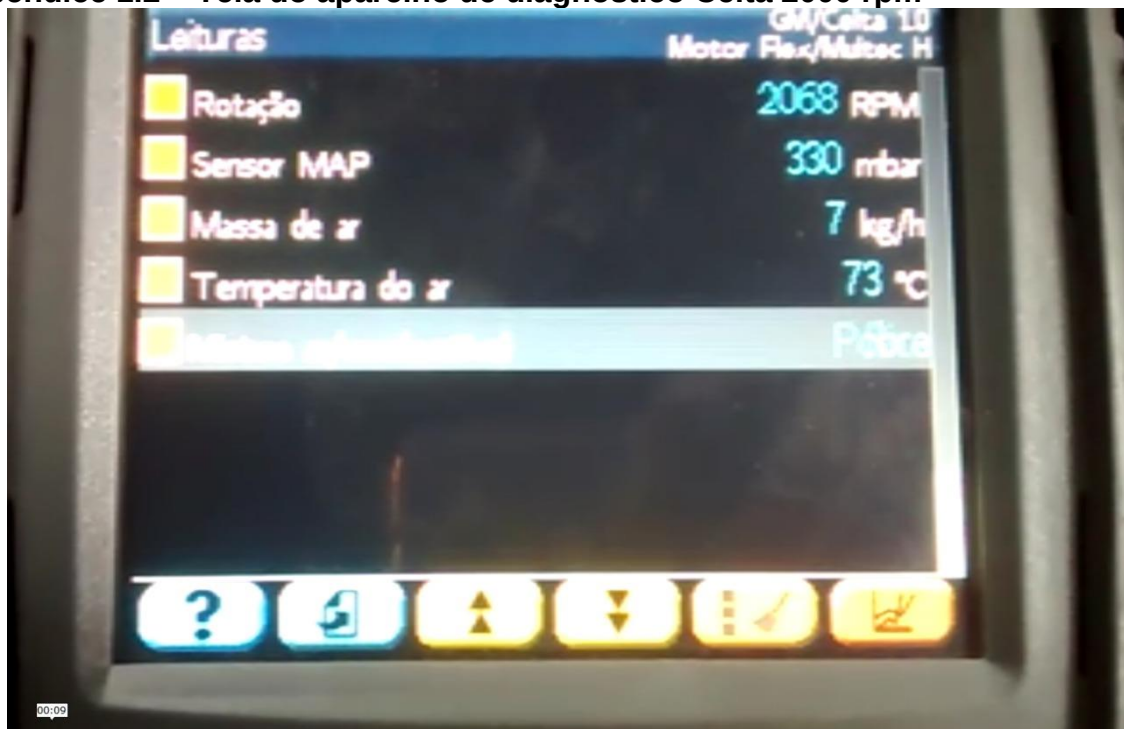
TILLMANN, Carlos Antônio da Costa. **Motores de combustão interna e seus sistemas.** Santa Maria: Rede e-tec brasil, 2013.

APÊNDICE 1– TELA DO APARELHO DE DIAGNOSTICO CELTA

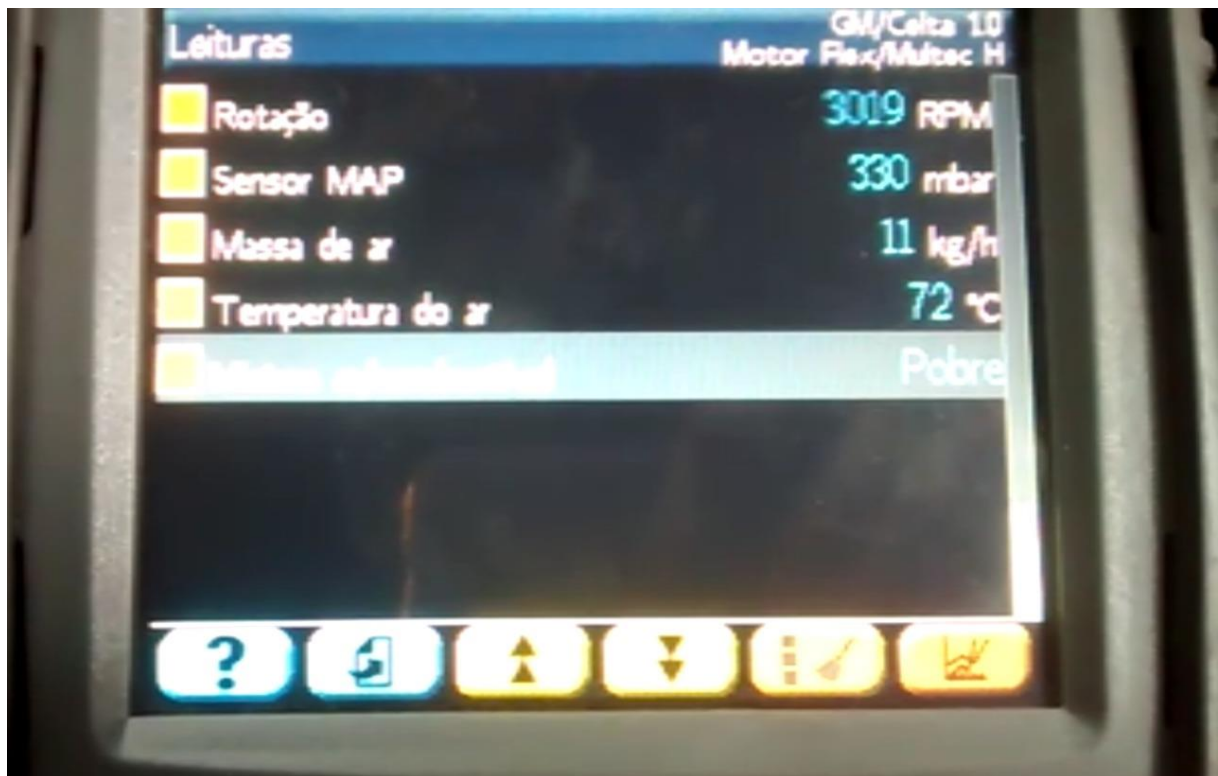
Apêndice 1.1 – Tela do aparelho de diagnostico Celta 1000 rpm



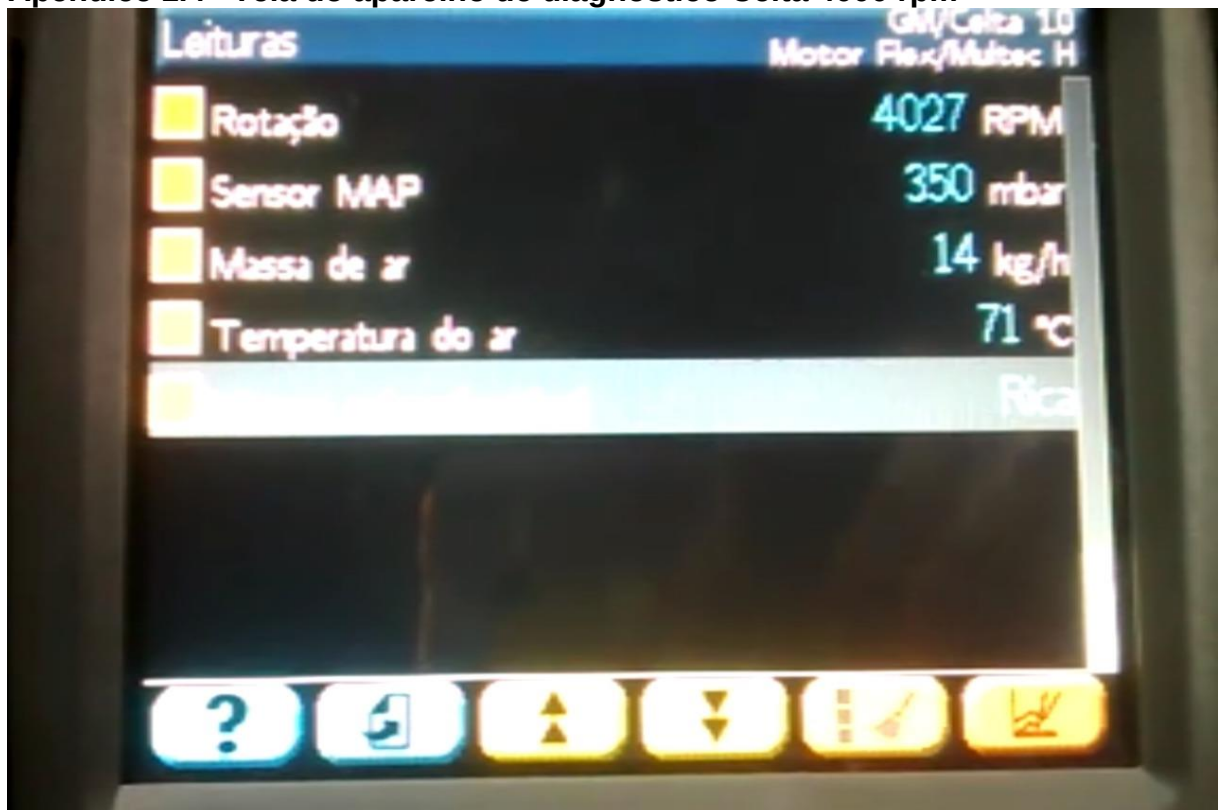
Apêndice 1.2 – Tela do aparelho de diagnostico Celta 2000 rpm



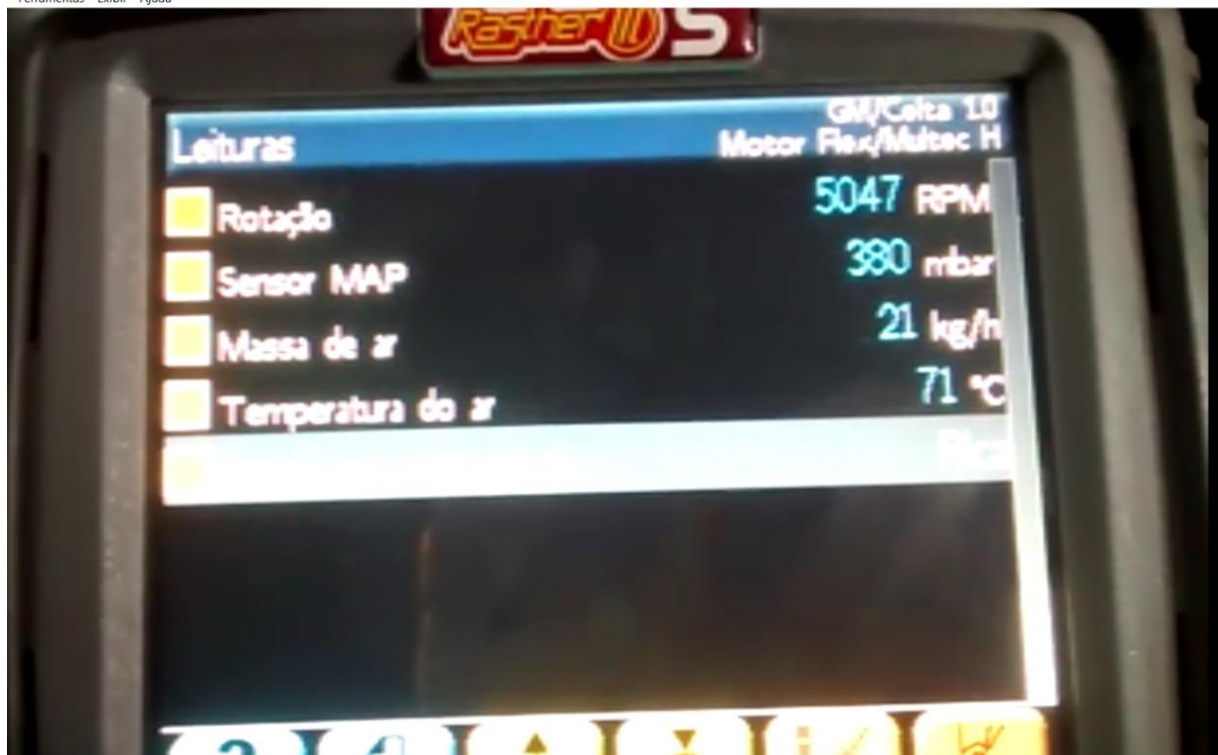
Apêndice 1.3 – Tela do aparelho de diagnostico Celta 3000 rpm



Apêndice 1.4– Tela do aparelho de diagnostico Celta 4000 rpm

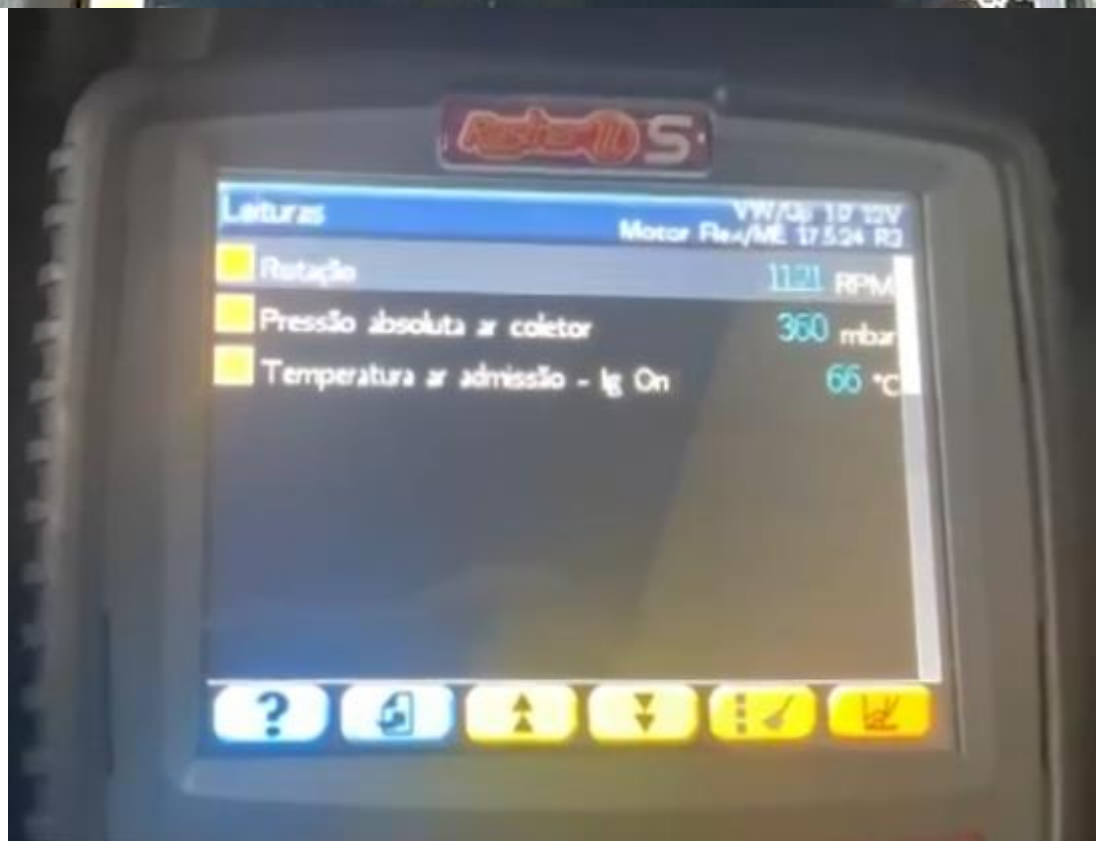
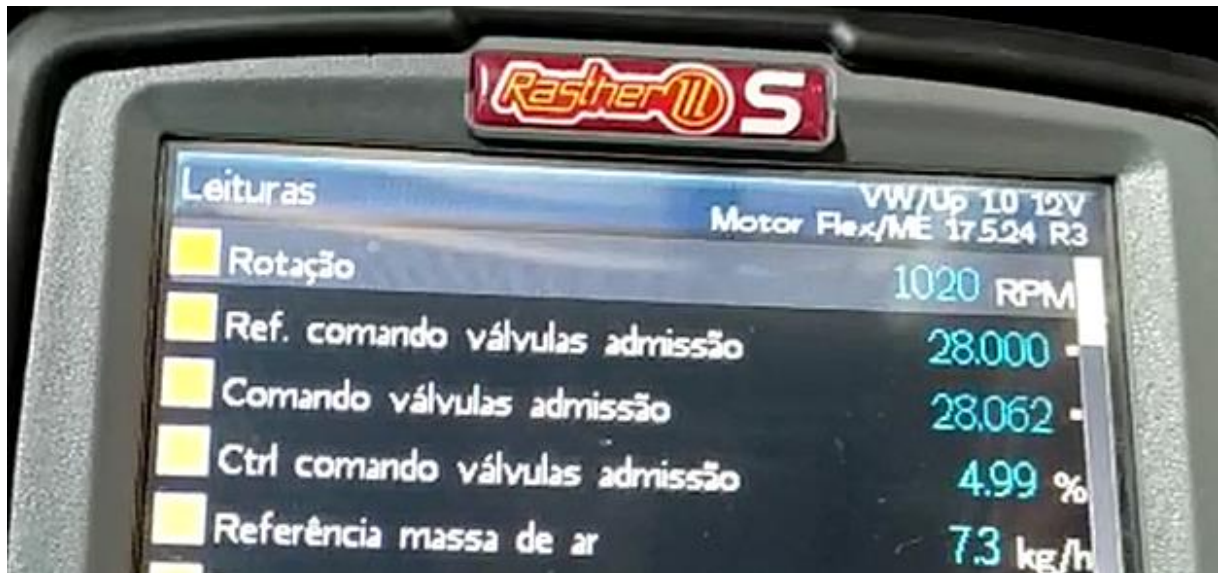


Apêndice 1.5 – Tela do aparelho de diagnostico Celta 5000 rpm

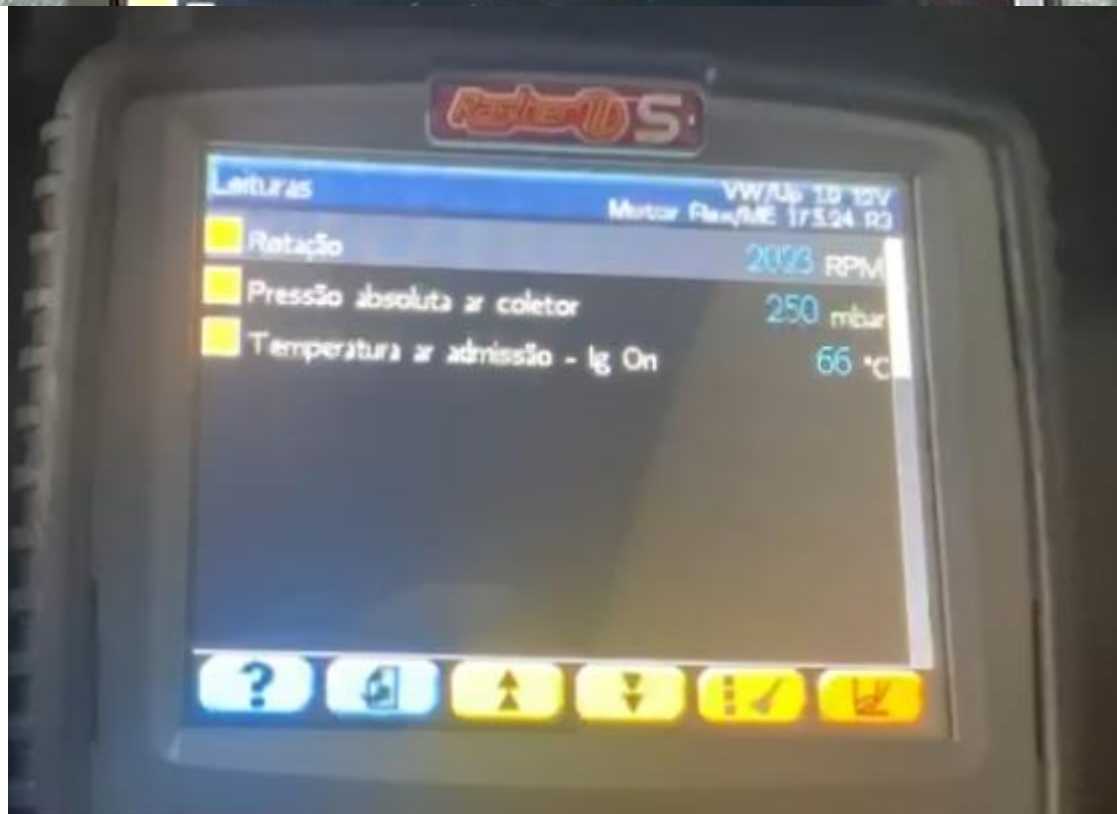
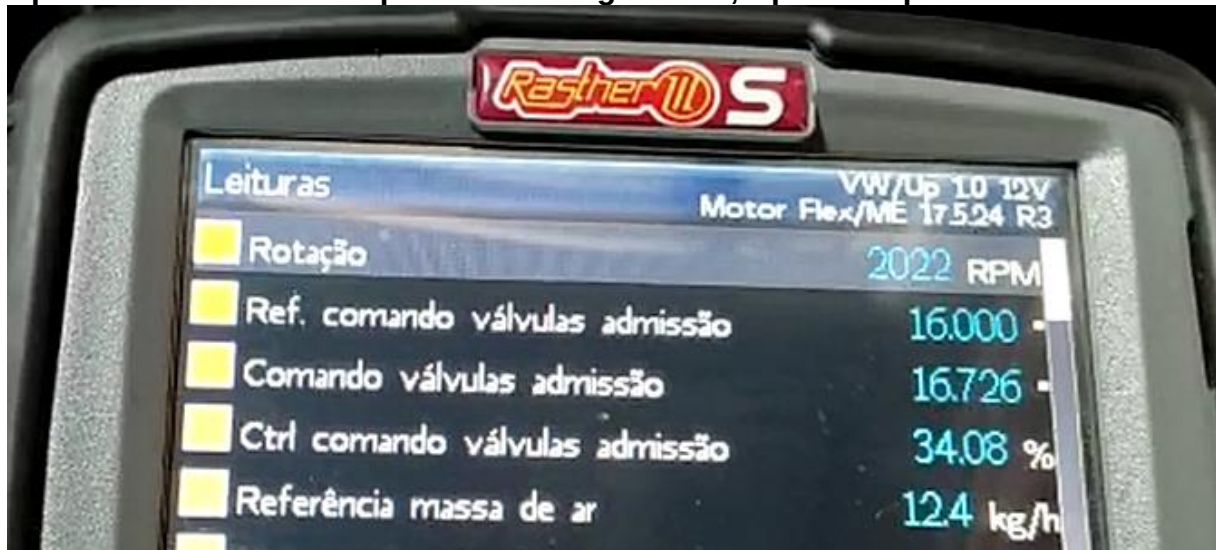


APÊNDICE 2– TELA DO APARELHO DE DIAGNOSTICO UP!

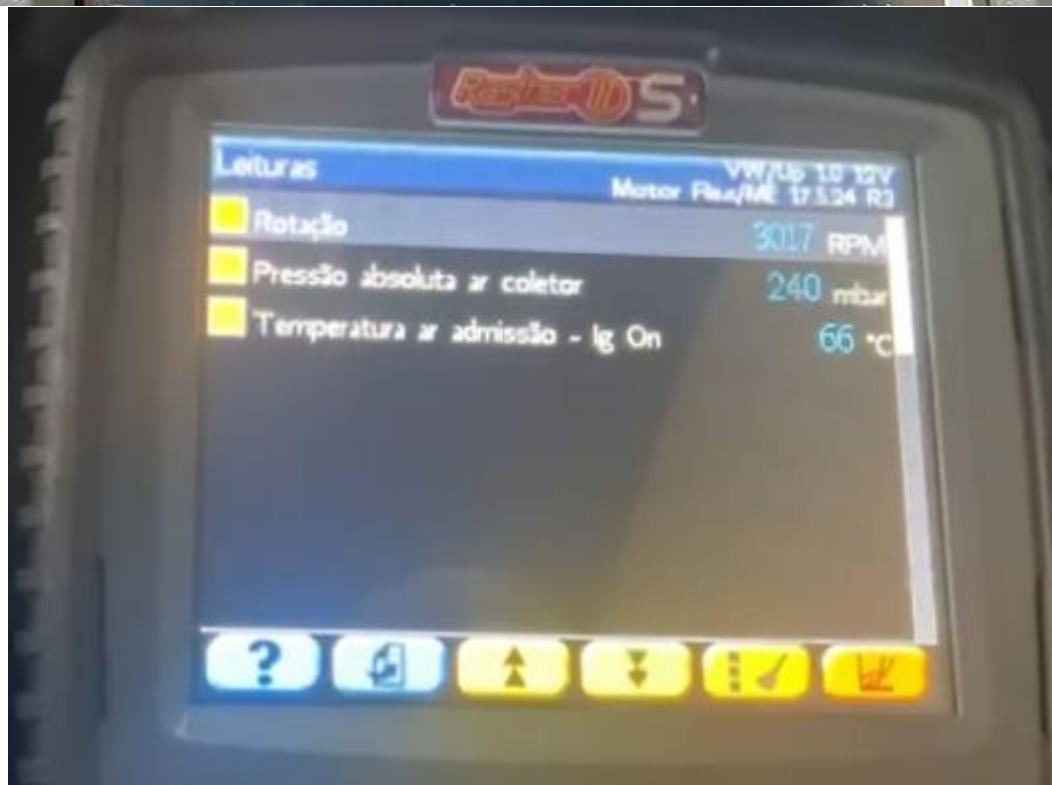
Apêndice 2.1 – Tela do aparelho de diagnostico Up! 1000 rpm



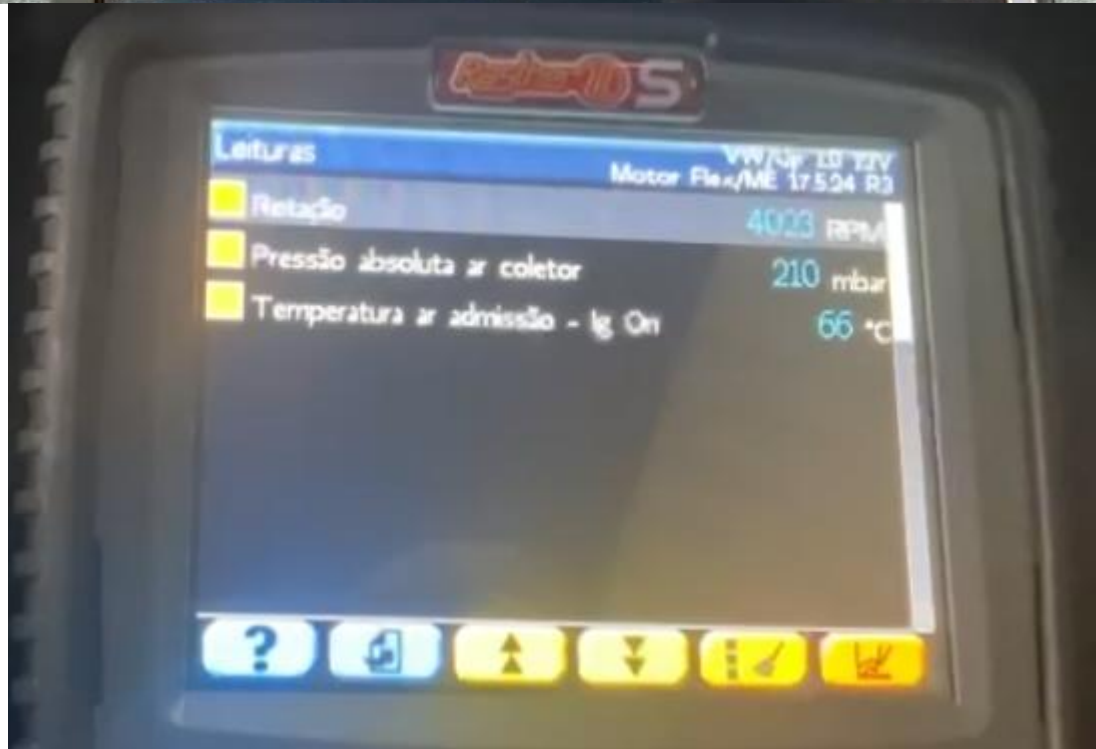
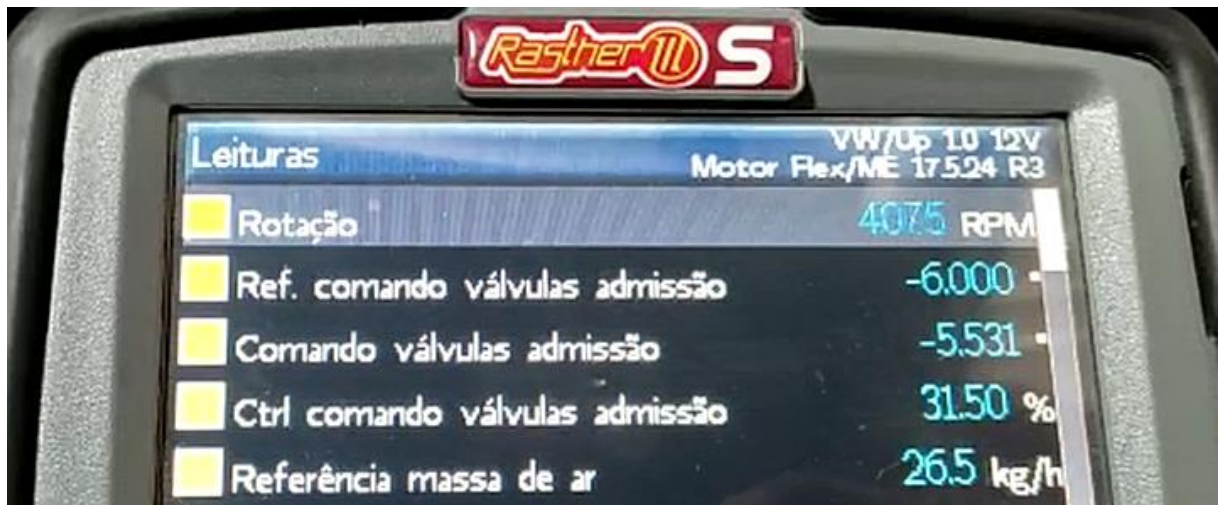
Apêndice 2.2 – Tela do aparelho de diagnostico, Up! 2000 rpm



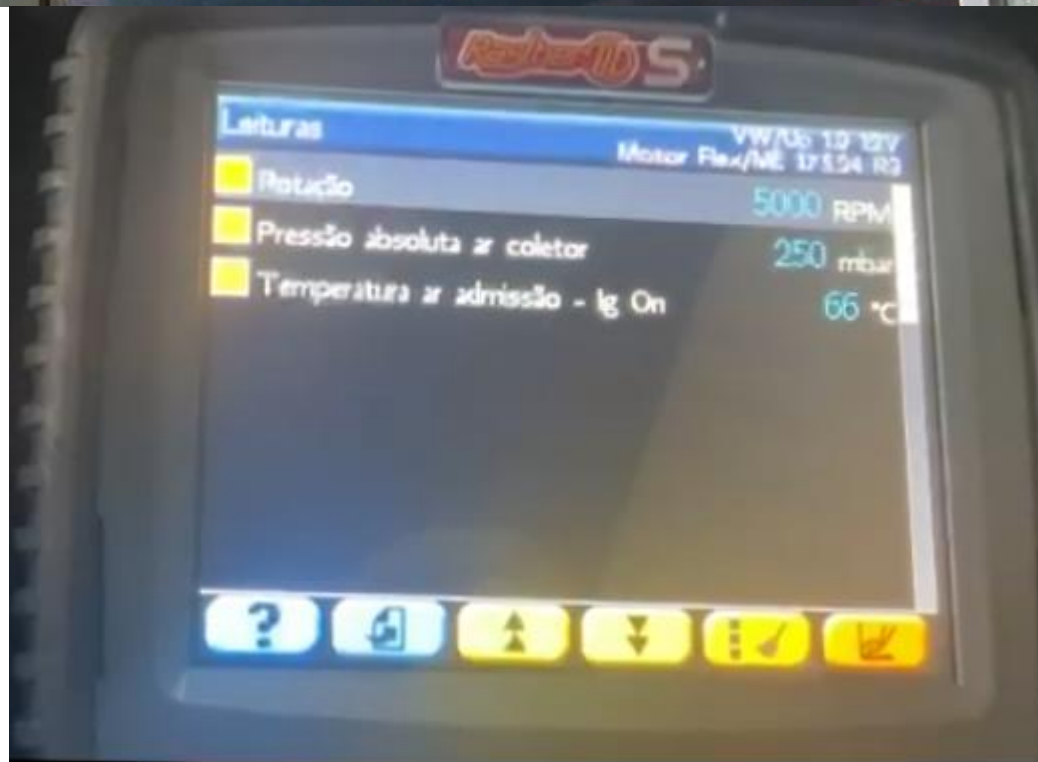
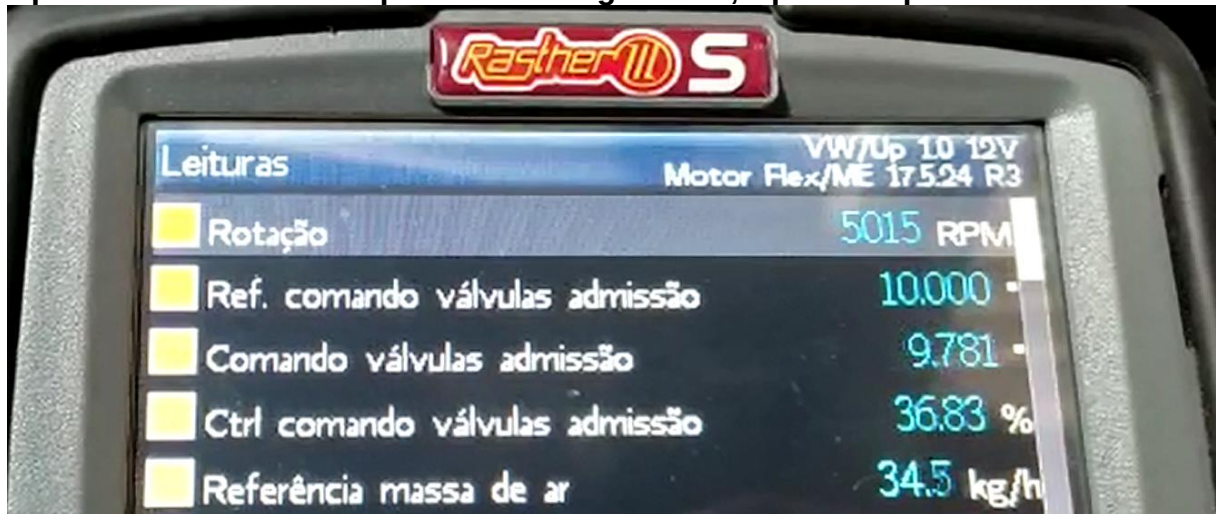
Apêndice 2.3 – Tela do aparelho de diagnostico Up! 3000 rpm



Apêndice 2.4 – Tela do aparelho de diagnostico, Up! 4000 rpm

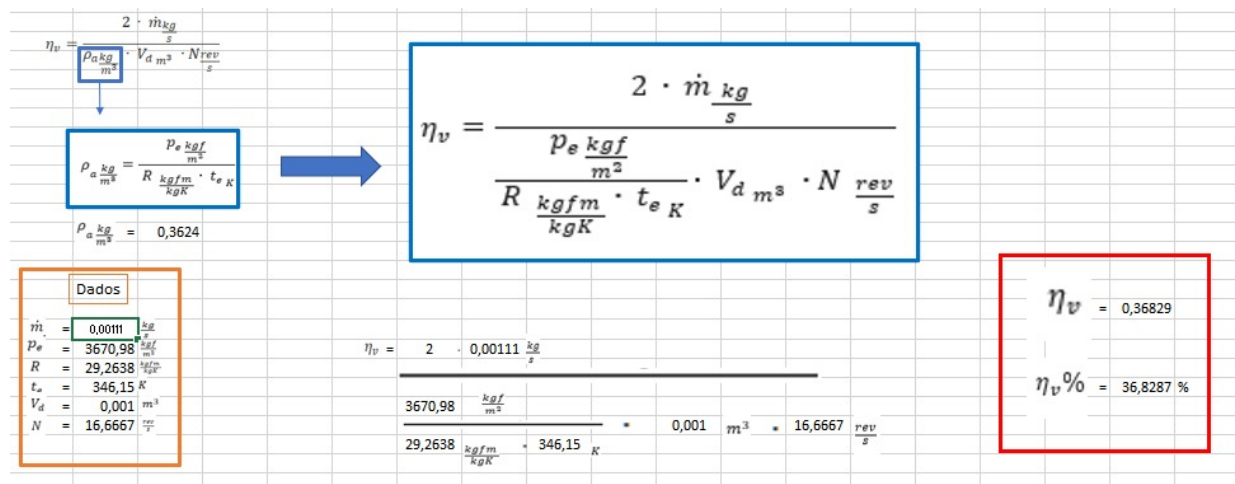


Apêndice 2.5 – Tela do aparelho de diagnostico, Up! 5000 rpm

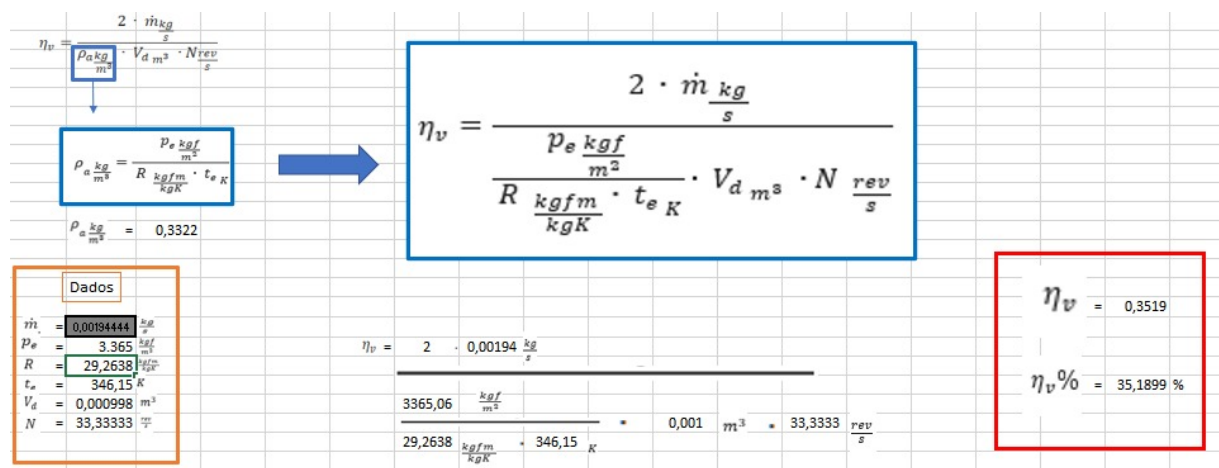


APÊNDICE 3 – CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA EM PLANILHA DE EXCEL CELTA

Apêndice 3.1 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel Celta 1000 rpm



Apêndice 3.2 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Celta 2000 rpm



Apêndice 3.3 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel Celta 3000 rpm

Diagram illustrating the calculation of volumetric efficiency (η_v) for a Celta 3000 rpm engine.

The general formula for volumetric efficiency is:

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m} \frac{kg}{s}}{\frac{p_e \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_e K} \cdot V_d m^3 \cdot N \frac{rev}{s}}$$

Intermediate calculation for density:

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = \frac{p_e \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_e K}$$

Given data (Dados):

- $\dot{m} = 0,0030566 \frac{kg}{s}$
- $p_e = 3365,06 \frac{kgf}{m^2}$
- $R = 29,2638 \frac{kgfm}{kgK}$
- $t_e = 346,15 K$
- $V_d = 0,001 m^3$
- $N = 50 \frac{rev}{s}$

Intermediate calculation for density:

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = 0,3322$$

Calculation of volumetric efficiency:

$$\eta_v = \frac{2 \cdot 0,00306 \frac{kg}{s}}{\frac{3365,06 \frac{kgf}{m^2}}{29,2638 \frac{kgfm}{kgK} \cdot 346,15 K} \cdot 0,001 m^3 \cdot 50 \frac{rev}{s}}$$

Result:

$$\eta_v = 0,36866$$

$$\eta_v \% = 36,8657 \%$$

Apêndice 3.4 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Celta 4000 rpm

Diagram illustrating the calculation of volumetric efficiency (η_v) for a Celta 4000 rpm engine.

The general formula for volumetric efficiency is:

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m} \frac{kg}{s}}{\frac{p_e \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_e K} \cdot V_d m^3 \cdot N \frac{rev}{s}}$$

Intermediate calculation for density:

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = \frac{p_e \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_e K}$$

Given data (Dados):

- $\dot{m} = 0,0038883 \frac{kg}{s}$
- $p_e = 3569,01 \frac{kgf}{m^2}$
- $R = 29,2638 \frac{kgfm}{kgK}$
- $t_e = 346,15 K$
- $V_d = 0,001 m^3$
- $N = 66,6667 \frac{rev}{s}$

Intermediate calculation for density:

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = 0,35233$$

Calculation of volumetric efficiency:

$$\eta_v = \frac{2 \cdot 0,00389 \frac{kg}{s}}{\frac{3569,01 \frac{kgf}{m^2}}{29,2638 \frac{kgfm}{kgK} \cdot 346,15 K} \cdot 0,001 m^3 \cdot 66,6667 \frac{rev}{s}}$$

Result:

$$\eta_v = 0,33179$$

$$\eta_v \% = 33,179 \%$$

Apêndice 3.5 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Celta 5000 rpm

Diagram illustrating the calculation of volumetric efficiency (η_v) in Excel, showing the derivation of the formula and the input data.

Derivation of the Formula:

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m} \frac{kg}{s}}{\rho_a \frac{kg}{m^3} \cdot V_d m^3 \cdot N \frac{rev}{s}}$$

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = \frac{p_a \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_a K}$$

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = 0,38253$$

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m} \frac{kg}{s}}{\frac{p_a \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_a K} \cdot V_d m^3 \cdot N \frac{rev}{s}}$$

Input Data (Dados):

$\dot{m}$	= 0,0058333	$\frac{kg}{s}$
p_a	= 3874,92	$\frac{kgf}{m^2}$
R	= 29,2638	$\frac{kgfm}{kgK}$
t_a	= 346,15	K
V_d	= 0,001	m^3
N	= 83,3333	$\frac{rev}{s}$

Calculation:

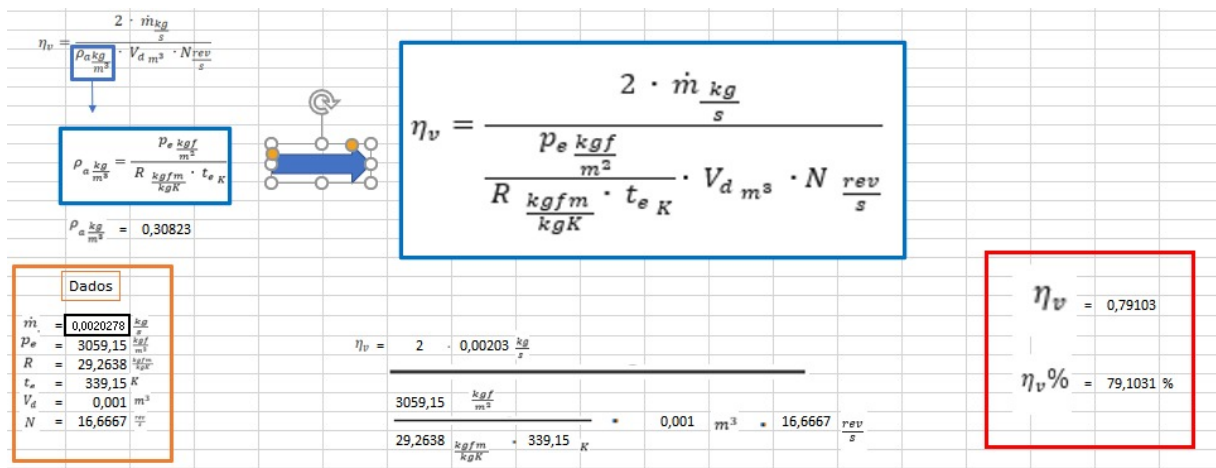
$$\eta_v = \frac{2 \cdot 0,00583 \frac{kg}{s}}{\frac{3874,92 \frac{kgf}{m^2}}{29,2638 \frac{kgfm}{kgK} \cdot 346,15 K} \cdot 0,001 m^3 \cdot 83,3333 \frac{rev}{s}}$$

Results:

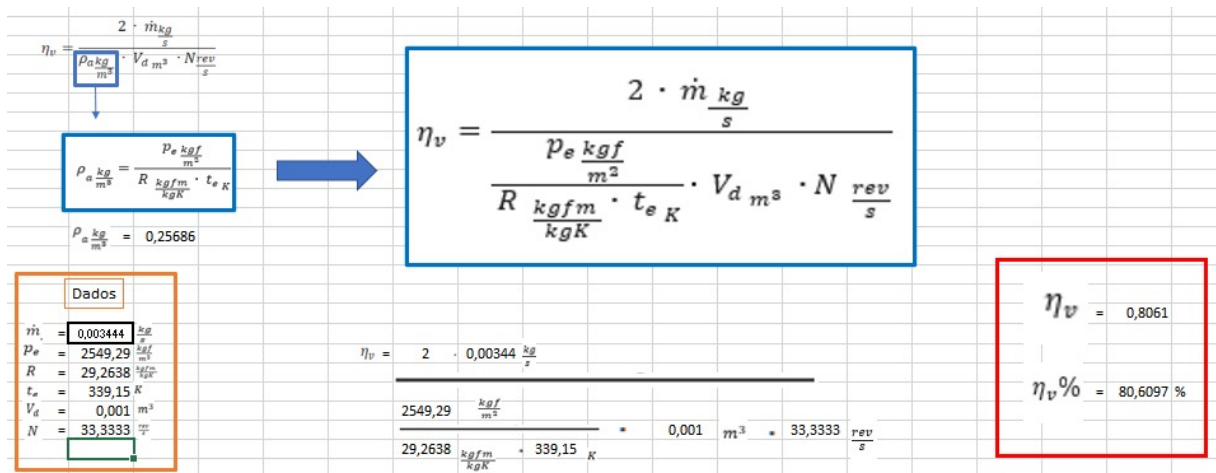
η_v	= 0,36672
$\eta_v \%$	= 36,6716 %

APÊNDICE 4 – CÁLCULOS DE EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA EM PLANILHA DE EXCEL, UP!

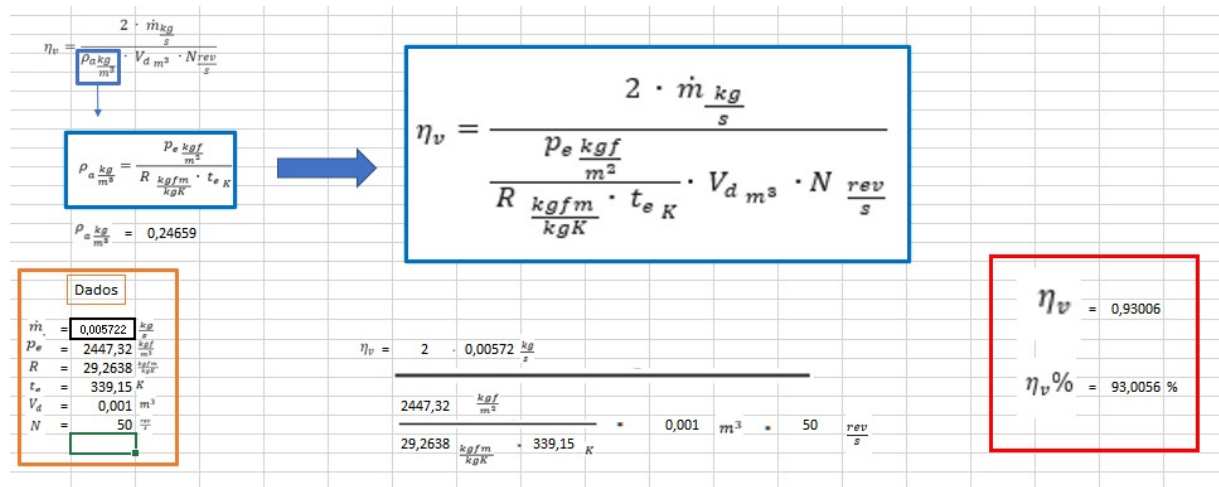
Apêndice 4.1 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Up! 1000 rpm



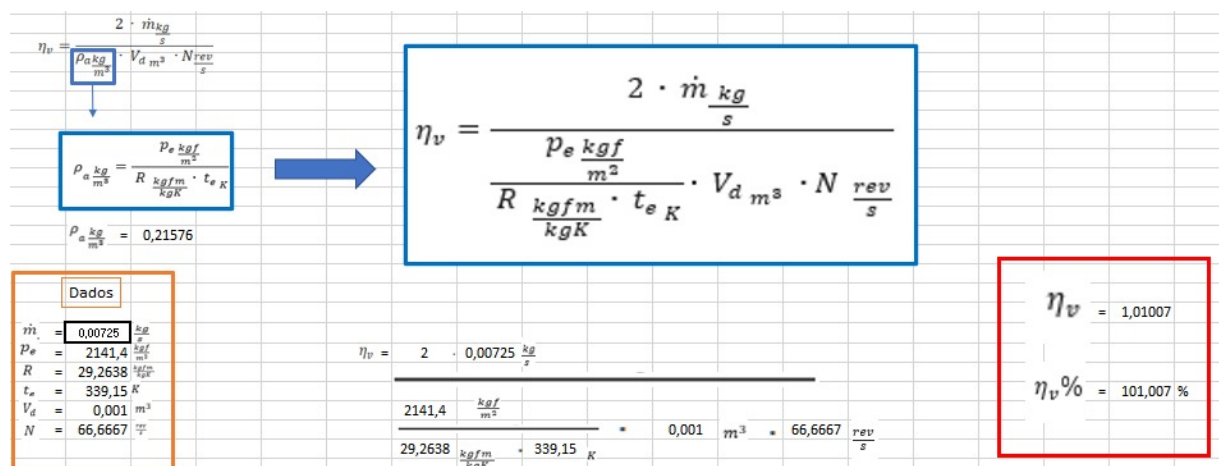
Apêndice 4.2 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Up! 2000 rpm



Apêndice 4.3 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Up! 3000 rpm



Apêndice 4.4 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Up! 4000 rpm



Apêndice 4.5 – Cálculos de eficiência volumétrica em planilha de Excel, Up! 5000 rpm

Diagram illustrating the calculation of volumetric efficiency (η_v) in an Excel spreadsheet, showing the formula, input data, and the final result.

Formula for Volumetric Efficiency (η_v):

$$\eta_v = \frac{2 \cdot \dot{m} \frac{kg}{s}}{\frac{p_e \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_e K} \cdot V_d m^3 \cdot N \frac{rev}{s}}$$

Input Data (Dados):

$\dot{m}$	= 0,009583	$\frac{kg}{s}$
p_e	= 2549,29	$\frac{kgf}{m^2}$
R	= 29,2638	$\frac{kgfm}{kgK}$
t_e	= 339,15	K
V_d	= 0,001	m^3
N	= 83,3333	$\frac{rev}{s}$

Intermediate Calculation:

$$\rho_a \frac{kg}{m^3} = \frac{p_e \frac{kgf}{m^2}}{R \frac{kgfm}{kgK} \cdot t_e K} = 0,25686$$

Final Result:

$$\eta_v = 0,89719$$

$$\eta_v \% = 89,7192 \%$$