

CENTRO PAULA SOUZA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Eletrônica Automotiva

Agnaldo Vicente Culler
Gabriel Andrade Ferreira
Pedro Henrique de Moraes Cavalcanti

**Conversão de um Motor movido a gasolina para um Motor totalmente
movido a etanol**

São Paulo

2023

Agnaldo Vicente Culler
Gabriel Andrade Ferreira
Pedro Henrique de Moraes Cavalcanti

Conversão de um Motor movido a gasolina para um Motor totalmente movido a etanol

Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva da FATEC Santo André, orientado pelo professor Prof. Mestre. Cleber Willian Gomes, como requisito parcial para obtenção do título de tecnólogo em eletrônica Automotiva.

São Paulo

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

C967c

Culler, Agnaldo Vicente

Conversão de um motor movido a gasolina, para um motor totalmente movido a etanol / Agnaldo Vicente Culler, Gabriel Andrade Ferreira, Pedro Henrique de Moraes Cavalcanti. - Santo André, 2023. – 72f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2023.

Orientador: Prof. Me. Cleber Willian Gomes

1. Eletrônica. 2. Estudo de caso. 3. Veículos elétricos. 4. Motor de combustão interna. 5. Combustível orgânico. 6. Tecnologia. 7. Soluções energéticas. 8. Etanol. 9. Meio ambiente. I. Ferreira, Gabriel Andrade. II. Cavalcanti, Pedro Henrique de Moraes. III. Conversão de um motor movido a gasolina, para um motor totalmente movido a etanol.

629.2

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 23 DE JUNHO DE 2023.

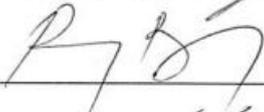
LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: “ETANOL OU GASOLINA” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROFº CLEBER WILLIAN GOMES 

MEMBROS:

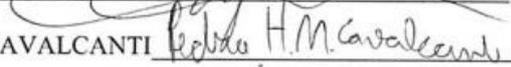
PROF. ROBERTO BORTOLUSSI 

PROF. LUIS ROBERTO KANASHIRO 

ALUNOS:

AGNALDO VICENTE CULLER 

GABRIEL ANDRADE FERREIRA 

PEDRO HENRIQUE DE MORAES CAVALCANTI 

Dedicamos este trabalho aos nossos entes familiares, que nos deram apoio nos momentos mais intensos. Também aos nossos parceiros de sala que nos acompanharam neste longo trajeto. E principalmente ao corpo docente.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Cleber Willian Gomes, por toda a orientação e paciência conosco.

Ao Prof. Dr. Fernando Garup Dalbo, pelo acompanhamento e incentivo para conosco.

Também a todos os companheiros de sala que nos deram suporte durante esta trajetória.

“Um por todos e todos por um”

OS TRÊS MOSQUETEIROS

RESUMO

A evolução das novas tecnologias para motores automotivos, vem reduzindo a permanência do MCI (motor de combustão interna) dentro do mercado em geral. Tem-se que soluções voltadas a geração de energia a partir de combustão para mobilidade urbana está com os dias contados, enquanto o advento do veículo movido a eletricidade, é um avanço natural alimentado por outros seguimentos, porém, uma dura legislação ambiental vem acelerando o ritmo desta inovação em uma escala exponencial. Com toda essa migração ocorrendo de um sistema de propulsão baseado em um modelo de combustão interna para um sistema de propulsão baseado em um modelo elétrico, os principais líderes do segmento vêm investindo na eletrificação e hibridação dos veículos. Mesmo com muito investimento, por fatores externos relacionados a geração de energia para o veículo elétrico, momentaneamente tornam os projetos mais impactantes ao meio ambiente se comparado a um MCI bem projetado. Na busca por soluções energéticas viáveis para um motor de combustão interna, surge como alternativa viável o etanol brasileiro. Tratasse de um combustível orgânico extraído a partir da fermentação da sacarose presente em plantas ricas em açúcares como a cana de açúcar principalmente. Neste material será realizado um estudo de caso à correspondente alternativas energéticas envolvendo à aplicação de etanol como combustível para movimentar motores de combustão por ao menos dez anos mais, ou seja, o período levado para que os veículos elétricos recebam todos os cuidados necessários para que sua análise de ciclo de vida seja a mais limpa possível.

Palavras-chave: Etanol, Combustível Alternativo, Motor a combustão Interna.

ABSTRACT

The advancement of new technologies vehicles engine has been reducing the permanence of the ICE (internal combustion engine) within the market in general. Solutions aimed at generating energy from combustion for urban mobility have their days numbered, while the advent of the vehicle powered by electricity is a natural advance fueled by other segments, however, a harsh environmental legislation has been accelerating the pace of this innovation on an exponential scale. With all this migration taking place from a propulsion system based on an internal combustion model to a propulsion system based on an electric model, the main leaders of the segment have been investing in the electrification and hybridization of vehicles. Even with a lot of investment, external factors related to energy generation for the electric vehicle, momentarily make the projects more impactful to the environment when compared to a well-designed MCI. In the search for viable energy solutions for an internal combustion engine, Brazilian ethanol emerges as a viable alternative. It was an organic fuel extracted from the fermentation of sucrose present in plants rich in sugars, such as sugar cane. In this material, a case study will be carried out on the corresponding energy alternatives involving the application of ethanol as fuel to move combustion engines for at least ten more years, that is, the period taken for electric vehicles to receive all the necessary care so that their lifecycle analysis to be as clean as possible.

Keywords: Ethanol. Alternative fuel. Internal Combustion Engine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Representa a vista frontal de motor alternativo em corte.....	19
FIGURA 2 - Aparência física de um coletor de admissão para motores 4 cilindros...22	22
FIGURA 3 - Vista explodida de uma válvula de controle de admissão de ar.....22	22
FIGURA 4 - Mapa de eficiência volumétrica, de um motor naturalmente aspirado....26	26
FIGURA 5 - Principais elementos construtivos do SuperCharger.....27	27
FIGURA 6 – Curva de torque de diferentes equipamentos X função da rotação.....28	28
FIGURA 7 - Corpo de um turbo compressor em corte.....29	29
FIGURA 8 - Composição de entrada e de saída ideais do combustível no processo de combustão.....30	30
FIGURA 9 - Modelo de um sistema com injeção indireta.....31	31
FIGURA 10 - Modelo de um sistema com injeção indireta monoponto.....32	32
FIGURA 11 - Modelo de um sistema com injeção indireta multiponto.....33	33
FIGURA 12 - Modelo de um sistema com injeção direta estratificada.....34	34
FIGURA 13 - Modelo em corte de uma bomba alta pressão para injeção direta.....35	35
FIGURA 14 - Comportamento do combustível dentro do cilindro, durante um regime de mistura estratificada.....36	36
FIGURA 15 - Composição de um sistema de ignição convencional.....38	38
FIGURA 16 - Sistema de ignição transistorizado sem platinado.....39	39
FIGURA 17 - Sistema de ignição estática.....40	40
FIGURA 18 - Ilustra o fluxo de produção do etanol.....43	43
FIGURA 19 - Fiat 147 sendo abastecido.....45	45
FIGURA 20 - Volkswagen Gol bicombustível.....46	46
FIGURA 21 - Layout de um modelo de motor 1D no software Wave.....49	49
FIGURA 22 - Modelo para ilustrar o coletor de admissão de ar no software Wave.....50	50
FIGURA 23 - Modelo para ilustrar o cilindro e seus componentes no software51	51
FIGURA 24 - Exibe os parâmetros cujo do cilindro programa toma como padrão.....52	52
FIGURA 25 - Exibe os parâmetros do injetor cujo programa toma como padrão.....53	53
FIGURA 26 - Exibe o parâmetro de taxa de compressão alterado.....58	58
FIGURA 27 - Exibe os parâmetros de combustível alterados.....59	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A/C.....	Ar e Combustível
CA.....	Ciclo Atkinson
CM(cm ³).....	Centimetro (Unidade de medida)
ECU.....	<i>Eletronic Control Unit</i>
EFI.....	<i>Engine Fuel Injection</i>
GNV.....	Gás Natural Veicular
GTDI.....	<i>Gasoline Turbo Direct Injection</i>
M(m ³).....	Metros (Unidade de medida)
MCI.....	Motor(es) de Combustão Interna
MPFI.....	Multi-point Fuel Injection
PA.....	Pascal (Unidade de medida)
PMI.....	Ponto Morto Inferior
PMS.....	Ponto Morto Superior
PROALCOOL.....	Programa Nacional do Álcool
RPM.....	Rotações por minuto

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Curva de relação Lambda X curva de consumo específico.....	54
GRÁFICO 2 - Curva de relação de torque X curva de potência.....	55
GRÁFICO 3 - Curva de torque X curva de consumo específico.....	56
GRÁFICO 4 - Relação Lambda X curva de consumo específico para o modelo etanol.....	60
GRÁFICO 5 - Curva de torque X de potência.....	61
GRÁFICO 6 - Curva de Torque X curva de consumo específico.....	62
GRÁFICO 7 - Comparando as curvas de potência dos modelos analisados.....	63
GRÁFICO 8 - Comparando as curvas de lambda dos modelos analisados.....	64
GRÁFICO 9 - Comparando as curvas de torque dos modelos analisados.....	65
GRÁFICO 10 - Comparando as curvas de Consumo específico dos modelos analisados.....	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Especificações técnicas do motor a gasolina.....	48
TABELA 2 - Especificações técnicas do motor a Etanol.....	57
TABELA 3 - Levantamento de dados gerados durante a simulação com gasolina.....	67
TABELA 4 - Levantamento de dados gerados durante a simulação com gasolina.....	67
TABELA 5 - Levantamento de dados gerados durante a simulação com etanol.....	68
TABELA 6 - Levantamento de dados gerados durante a simulação com etanol.....	68

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1- Taxa de Compressão Estática.....	23
Equação 2- Taxa de Compressão Dinâmica.....	24
Equação 3- Eficiência Volumétrica.....	24
Equação 4- Equação de Clapeyron.....	25
Equação 5- Equação do Volume.....	26
Equação 6- Lei de Paschen.....	37

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Motivação.....	16
1.2.	Objetivo	16
1.3.	Resultados Esperados.....	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.1.	Motores de Combustão Interna	18
2.1.1.1.	Motores Ciclo Otto	19
2.1.1.2.	Motores Ciclo Atkinson.....	20
2.2.	Características Geométricas	21
2.2.1.	Geometria do Coletor de Admissão.....	21
2.2.2.	Design do Corpo de Borboleta.....	22
2.2.3.	Taxa de Compressão.....	23
2.2.3.1.	Taxa de Compressão Estática	23
2.2.3.2.	Taxa de Compressão Dinâmica	24
2.2.4.	Eficiência Volumétrica.	24
2.2.5.	Aspiração Convencional.....	25
2.2.6.	Sobrealimentação.....	26
2.2.6.1.	SuperCharger	27
2.2.6.2.	TurboCharger.....	Erro! Indicador não definido.
2.3.	Métodos de Admissão de Combustível	29
2.3.1.	Estequiometria	30
2.3.2.	Método por Aspiração com Injeção Indireta	31
2.3.3.	Método por Aspiração com Injeção Indireta Monoponto	32
2.3.4.	Método por Aspiração com Injeção Indireta Multiponto	33
2.3.5.	Método por Injeção Direta Multiponto	34
2.3.5.1.	Bomba de Alta Pressão	35
2.3.5.2.	Mistura Estratificada.....	35
2.4.	Sistemas de Ignição	37
2.4.1.	Método de Ignição por Centelha	37
2.4.2.	Ignição Convencional.....	38
2.4.3.	Ignição com Semicondutores.....	38
2.4.3.1.	Sistema Transistorizado com Platinado	39
2.4.3.2.	Sistema Transistorizado sem Platinado	39
2.4.4.	Ignição Estática	40
2.5.	Combustíveis	40

2.5.1.	Combustíveis de uso Veicular	40
2.5.1.1.	Combustíveis de Origem Fóssil	41
2.5.1.1.1.	Gasolina	41
2.5.1.2.	Combustíveis de Origem Vegetal	41
3.	ETANOL COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE COMBUSTÍVEL	42
3.1.1.	Processos Industriais	42
3.1.2.	Etanol 2G	43
3.2.	Etanol no Brasil	44
3.2.1.	PROALCOOL	44
3.2.2.	Veículos Flex	45
3.2.2.1.	Tecnologias Desenvolvidas	46
4.	SIMULAÇÃO RICARDO WAVE	47
4.1.	Projeto Base para Simulação	48
4.2.	Simulação com Dados Originais do Motor Utilizando Gasolina	48
4.3.	Simulação com Parâmetros para o Motor Etanol	57
6.	REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

Desde sua origem, o motor de combustão interna, sofre com seu baixo rendimento energético. A cada dia passado, modificações são feitas e novas soluções são implementadas para melhorar a eficiência energética do MCI.

Devido o enrijecimento de leis ambientais, atreladas a emissões de poluentes, os motores de combustão interna perdem cada vez mais sua fatia de mercado para os motores elétricos, pois estes estão ocupando seu lugar com louvor.

Iniciado em países desenvolvidos, o movimento para zerar emissões de gases por veículos tem tomado força e muitas montadoras correm para sair na frente com um projeto mais bem implementado. Países sul-americanos e asiáticos tem dificuldade de acompanhar o avanço da eletrificação de veículos, portanto é necessário criar soluções para manter os motores de combustão interna no mercado atendendo as leis de emissões, enquanto tecnologias para veículos elétricos ficam mais populares.

Em um país como o Brasil, uma solução bastante viável para estender a vida dos motores a combustão interna é o etanol, um combustível orgânico, obtido a partir da fermentação dos açúcares presentes em plantas como a cana de açúcar e o milho, gerando menos emissões e com custo-benefício muito mais interessante do que os combustíveis fósseis convencionais.

1.1. Motivação

A principal motivação para a produção deste trabalho, vem da necessidade de postergar a vida do motor de combustão interna, revelando que com um projeto pensado especificamente para uma aplicação única, é possível implementar para uso do mercado um veículo alternativo equipado com motor a etanol bastante econômico e atrativo.

1.2. Objetivo

O foco deste material é apontar a participação do etanol no mercado, os desafios que pleiteiam a criação de um motor específico para aplicação com etanol, os principais parâmetros construtivos que devem ser levados em conta durante o desenvolvimento de um projeto deste calibre.

Com uma simulação utilizando o *software Ricardo Wave*, é possível gerar curvas de operação muito similares a de um motor real, o que pode ser crucial para a validação do projeto apresentado, pois este é um dos principais simuladores que a indústria utiliza durante as etapas de estudo e abstração em seus projetos.

Nesta simulação, serão realizadas modificações a partir de um modelo já validado, que tem como combustível principal, a gasolina. As modificações realizadas, preveem converter um motor puramente a gasolina, em um motor puramente a etanol.

1.3. Resultados Esperados

Espera-se que ao final da composição deste trabalho, seja possível verificar o quão viável é uma conversão de um motor a gasolina para um motor cem por cento a etanol, alterando apenas os valores de taxa de compressão.

Verificar quais os ganhos proporcionados por este modelo. Com isto é esperado que, um motor Etanol com a calibração certa, seja econômico, tenha baixa emissão de poluentes, e um rendimento energético satisfatório.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na busca por um modelo de motor a combustão mais eficiente do que os velhos ciclos a vapor, vários modelos de MCI foram desenvolvidos antes dos robustos ciclos Otto e Diesel, modelos estes que conquistaram o mundo com sua versatilidade. Após um século de vitalidade, os modelos convencionais de motores de combustão interna estão com os dias contados, perdendo espaço para outros ciclos mais eficientes e finalmente para os motores elétricos.

O incêndio provocado no mercado automotivo pela chegada dos veículos elétricos gerou insegurança em alguns países, pois a implementação deste novo modelo de transporte não depende apenas do poder de compra do cliente, mas também da infraestrutura fornecida pelos centros urbanos. Cientes deste cenário, grandes montadoras focam seus esforços no desenvolvimento de projetos inovadores, capazes de postergar a vida do motor de combustão interna.

Agora com foco em veículos híbridos, fabricantes de veículos veem em países como o Brasil uma ótima oportunidade de continuar lucrando, pois com a grande disponibilidade de combustíveis orgânicos como o etanol e o biodiesel frente a elevação dos preços de combustíveis derivados do petróleo, mantém viável a produção de motores de combustão interna, enquanto os consumidores aguardam pela popularização dos veículos elétricos em território nacional.

2.1.1. Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna (MCI), são equipamentos com a capacidade de transformar a energia química de um combustível em energia mecânica através de um conjunto de peças fixas e móveis para fazer esta conversão (BRUNETTI, Franco, 2013).

Assim como ilustra a figura 1, os motores alternativos, usam um sistema de manivela e biela para converter a energia gerada durante a expansão dos gases em um movimento linear e logo em seguida, em um movimento rotativo.

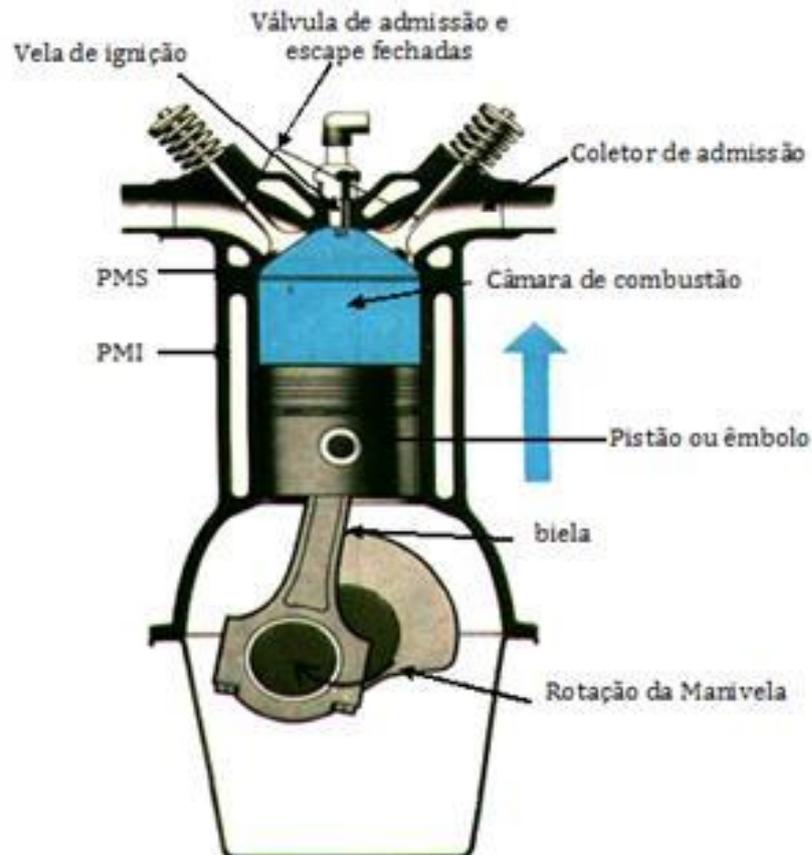


Figura 1. Representa a vista frontal de motor alternativo em corte.

Adaptado de www.highpressuremotor.blogspot.com

2.1.1.1. Motores Ciclo Otto

O ciclo de Otto é um ciclo termodinâmico idealizado que descreve o funcionamento de um típico motor alternativo com ignição por centelha. É o ciclo termodinâmico mais comum em motores de automóveis, funcionando nos chamados quatro tempos: Admissão, compressão, combustão e exaustão (escape) (MIT. Blog 2017).

Em um ciclo de 4 tempos o funcionamento do motor pode ser entendido considerando a ação de qualquer um dos cilindros durante um giro completo do motor. Um giro completo de um motor de quatro tempos requer duas rotações completas do eixo de manivelas. Nas duas revoluções completas do eixo de manivelas, que corresponde a um ciclo de motor, há quatro movimentos do êmbolo do ponto superior do cilindro para o ponto inferior ou vice-versa (MAHLE Manual Técnico, 2016).

Os quatro tempos do motor são:

- Admissão(1ªEtapa): Enquanto o êmbolo caminha do PMS (Ponto Morto Superior) para o PMI (Ponto Morto Inferior), a válvula de admissão é aberta e a baixa pressão criada pelo movimento do pistão aspira para dentro do cilindro a mistura atomizada de ar e combustível.
- Compressão(2ªEtapa): Em seguida, a válvula de admissão é fechada e o êmbolo caminha do PMI para o PMS comprimindo a mistura A/C (Ar e Combustível).
- Combustão(3ªEtapa): Enquanto o êmbolo comprime a mistura A/C, pouco antes de alcançar o PMS o sistema ignição emite uma centelha elétrica através da vela de ignição dentro do cilindro, essa centelha inflama a mistura e inicia a combustão dos elementos dentro da câmara de combustão. A expansão dos gases no interior do cilindro empurra o êmbolo do PMS para o PMI.
- Exaustão(4ªEtapa): Após a queima da mistura e expansão dos gases, o êmbolo caminha do PMI para o PMS, simultaneamente a válvula de exaustão é aberta e o aumento de pressão gerado pelo movimento do pistão expulsa os gases para os dutos de descarga.

2.1.1.2. Motores Ciclo Atkinson

Os motores CA (Ciclo Atkinson), tem eficiência superior em cargas parciais, quando comparado a um ciclo Otto convencional. Para alcançar este desempenho, o CA conta com a capacidade de reduzir duas perdas essenciais do Otto. Uma das perdas ocorre devido o esforço necessário para comprimir a mistura A/C em cargas parciais, pois a taxa de expansão dos gases é baixa. Outra perda ocorre devido o esforço necessário para sugar o ar para dentro do cilindro, devido à pressão de estrangulamento que surge pelo movimento descendente do êmbolo (BOGGS; HILBERT; SCHECHTER, 1995).

Durante o período de admissão a válvula de admissão se abre e o movimento descendente de embolo suga ar para o interior do cilindro, o pistão atinge o PMI e inicia um movimento ascendente, neste ponto destaca-se a grande diferença entre o ciclo Otto e o ciclo Atkinson. O êmbolo vai de PMI para PMS, à válvula de admissão permanece aberta por alguns instantes, enquanto no ciclo Otto a válvula interrompe a passagem de ar assim que o pistão atinge o PMI.

Os instantes em que a válvula de admissão permanece aberta enquanto o pistão ascende, são suficientes para permitir que uma parte da mistura carburante seja expelida para o coletor de admissão, portanto mantendo um menor volume de mistura A/C no interior do cilindro. Isso permite que menos energia seja gasta durante o ciclo de compressão e que mais trabalho seja aproveitado durante a expansão dos gases.

2.2. Características Geométricas

Para extrair o máximo de eficiência de um equipamento, é necessário planejar de forma cuidadosa cada aspecto, para que nada afete negativamente o resultado final. Nos MCI não é diferente, portanto, projetar com cuidado todas as dimensões físicas do equipamento é de suma importância.

A geometria do Motor de Combustão Interna deve ser muito bem pensada, pois cada ângulo e posição das peças influencia diretamente no desempenho do motor, por exemplo, bielas mais longas proporcionam um melhor torque e came maiores deixam as válvulas abertas por mais tempo.

Conhecer as características geométricas do equipamento permite por exemplo dimensionar com maior eficiência toda a eletrônica do veículo para que esta trabalhe em total sinergia com as peças mecânicas.

2.2.1. Geometria do Coletor de Admissão

É muito importante que este equipamento seja bem projetado e bem implementado, pois é pelo coletor de admissão que o comburente é levado ao coração do motor.

Em seu design como na figura 2 é interessante notar que não existem curvas grosseiras, rebarbas ou ressaltos, pois estes podem gerar turbulências que dificultam a fluidez do ar, portanto não permitem que o cilindro seja preenchido com o volume máximo de comburente possível.

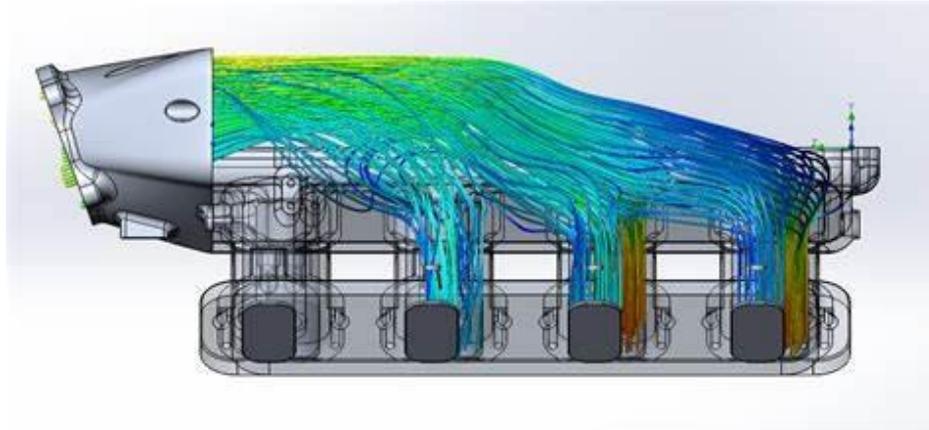


Figura 2. Representa a aparência física de um coletor de admissão para motores 4 cilindros.

Adaptado de www.blog.solidworks.com.br

2.2.2. Design do Corpo de Borboleta

O corpo de borboleta junto da válvula de borboleta exibido na figura 3, são responsáveis por controlar a passagem de ar que adentra o motor, de acordo com a solicitação de potência do motorista.

Este é conectado junto do coletor de admissão e juntos formam o sistema de admissão de ar do motor. É muito importante que exista sinergia entre estes dois componentes, para que não ocorra nenhuma turbulência no percurso do ar até o cilindro.

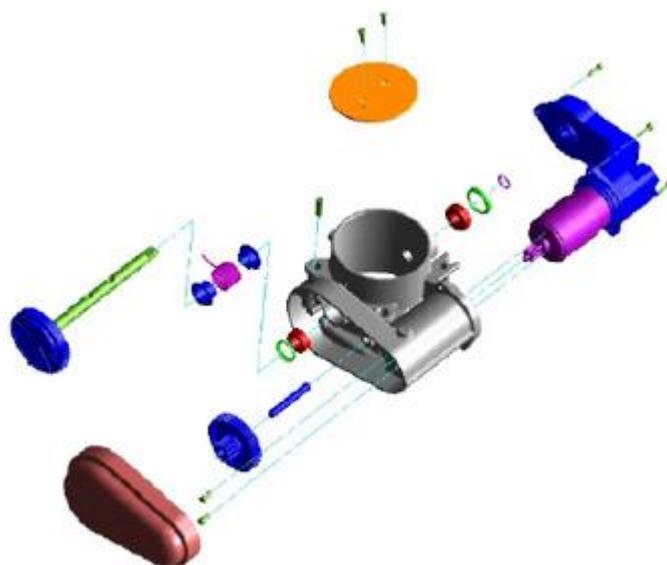


Figura 3. Vista explodida de uma válvula de controle de admissão de massa de ar eletrônica.

Adaptado de Delphi.

2.2.3. Taxa de Compressão

A taxa de compressão é uma característica física dos motores, e deve ser estabelecida logo nas etapas de projeto do motor, pois esse parâmetro varia conforme o combustível a ser utilizado.

Segundo Brunetti (2012, p. 32): “Relação volumétrica ou taxa de compressão – é a relação entre o volume total (V1) e o volume morto (V2) e representa em quantas vezes V1 é reduzido.

A equação 1 mostra como é definido matematicamente o valor da taxa de compressão estática do motor.

2.2.3.1. Taxa de Compressão Estática

A taxa de compressão estática é intrínseca as características físicas e construtivas do motor, portanto, é uma das bases fundamentais que vai determinar o funcionamento do motor. É possível determinar a taxa de compressão, como sendo a divisão entre a soma do volume total do cilindro(V1) e o volume da câmara de combustão(V2) divididos pelo volume da câmara de combustão, assim como na equação 1.

$$T_c = \left(\frac{(V_1) + V_2}{V_2} \right) \quad (1)$$

Onde:

T_c = Taxa de Compressão(adimensional);

V_1 = Volume total de um cilindro(cm³);

V_2 = Volume da câmara de combustão(cm³)

2.2.3.2. Taxa de Compressão Dinâmica

A taxa de compressão dinâmica, leva em conta o rendimento volumétrico no momento em que a admissão de ar está ocorrendo, ou seja, a taxa de compressão dinâmica varia no tempo acompanhando a variação da eficiência volumétrica do motor. É possível definir a taxa de compressão dinâmica, como sendo o produto da taxa de compressão estática e a eficiência volumétrica do motor, assim como ilustrado pela equação 2.

$$Tcd = \left(\frac{(V1)+V2}{V2} \right) \cdot \eta_v \quad (2)$$

Onde:

Tcd = Taxa de Compressão Dinâmica(adimensional);

$V1$ = Volume total de um cilindro(cm^3);

$V2$ = Volume da câmara de combustão(cm^3);

η_v = Rendimento Volumétrico(adimensional).

2.2.4. Eficiência Volumétrica.

Segundo Brunetti (2012, p. 186): “Eficiência volumétrica é a relação entre a massa de ar realmente admitida no motor e a massa de ar que poderia preencher o mesmo volume com propriedades iguais da atmosfera local onde o motor funciona.”

A equação 3 mostra como podemos definir numericamente a eficiência volumétrica.

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_r} \quad (3)$$

Onde:

η_v = Rendimento Volumétrico(adimensional);

m_a = Massa de ar realmente admitida pelo motor(g);

m_r = Massa de ar que poderia preencher o mesmo volume(g).

A equação de Clapeyron (4) abaixo, ilustra os parâmetros envolvidos no rendimento volumétrico, acerca do ambiente em que a máquina térmica está inserida.

$$P = \frac{n.R.T}{V} \quad (4)$$

Onde:

P = Pressão atmosférica (Pa);

V = Volume de massa de ar (m^3);

n = Número de mols (mol).

R = Constante Universal dos gases.

T = Temperatura (K).

2.2.5. Aspiração Convencional

Em baixas rotações, há tempo suficiente para que os gases aspirados percorram os dutos da admissão e adentrem o interior do cilindro preenchendo quase todo o seu volume. Em altas rotações, a válvula de admissão fica aberta apenas por um curto instante, o que impede que o cilindro seja preenchido com o máximo de ar possível (BRUNETTI, Franco, 2013).

A figura 4 ilustra uma tabela, com dados de um motor real, na qual são relacionados a rotação do motor (rpm), a pressão no coletor de admissão (KPa) e entregam os dados de rendimento volumétrico (%).

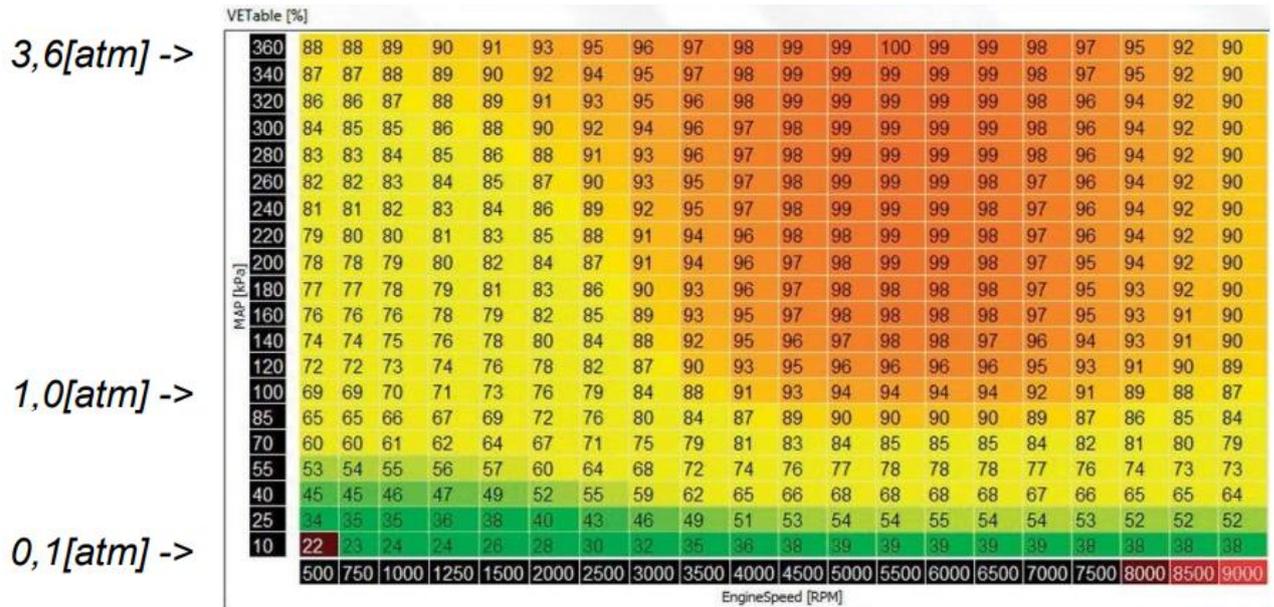


Figura 4. Dados do mapa de eficiência volumétrica, de um motor naturalmente aspirado. Adaptado de Software HIS.

2.2.6. Sobrealimentação

O princípio de funcionamento do sistema de sobrealimentação é baseado na massa específica do ar como mostra a equação 5, pois melhorando este fator consegue-se no mesmo volume uma maior massa de ar. A sobrealimentação consiste em aumentar a concentração das partículas de ar no mesmo volume existente, isto é, no volume do cilindro (MOBIL, 2021).

A admissão forçada pode ser gerada através de super compressores ou de turbocompressores. Uma das principais diferenças entre um turbocompressor e um super compressor é a fonte de energia para o seu acionamento (MOBIL, 2021).

Em um super compressor, há uma correia que o conecta diretamente a polia da árvore de manivelas do motor como na figura 5. Desse modo, ele obtém a sua energia da mesma maneira que a bomba de água ou o alternador.

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Onde:

μ : representa a massa específica do ar.

m : representa a massa do volume de ar.

V : representa o volume compacto do ar.



Elementos que compoem o modelo Roots de três lóbulos helicoidais

Figura 5. Principais elementos construtivos do supercharger.

Adaptado de www.mishimoto.com

2.2.6.1. SuperCharger

O super compressor, *supercharger* ou *blower* é um compressor de ar usado para forçar a entrada de ar nos cilindros de um motor de combustão interna. Como ilustrado na figura 5, um compressor é movimentado pela rotação do motor, através de uma correia ligada a polia do eixo de manivelas, é instalado entre o sistema de alimentação (carburador, injeção mecânica ou injeção eletrônica) e o coletor de admissão. Segundo o portal Canal Da Peça “Sua grande vantagem em comparação ao sistema turbocompressor é que sua rotação de funcionamento é a mesma do motor, ou seja, em baixas rotações não ocorre a obstrução da passagem de ar para o sistema de alimentação”

Os super compressores não possuem nenhum tipo de latência em seu funcionamento, sendo muito eficientes em baixas rotações. Logo que os motores sobrealimentados por super compressores são ligados, seu compressor já está em funcionamento e entregando potência maior em relação a motores aspirados, porém em altas rotações o volume máximo de ar que pode ser comprimido e levado a câmara de combustão fica limitado pela rotação do motor, prejudicando o torque como mostra a figura 6.

Todos os modelos de *supercharger* possuem efeito colateral negativo, embora ocorra uma contribuição para ganho de potência através de uma melhor admissão de

ar, há em contrapartida uma contribuição para perda de potência através do atrito de todas as peças móveis que compõem o compressor, um exemplo bem simples de um compressor roubando potência durante seu funcionamento é o ar-condicionado. O compressor do ar-condicionado ao ser ligado, rouba parte da energia do motor através do atrito de peças móveis para que os ocupantes recebam um ar gelado e se mantenham confortáveis ao dirigir.

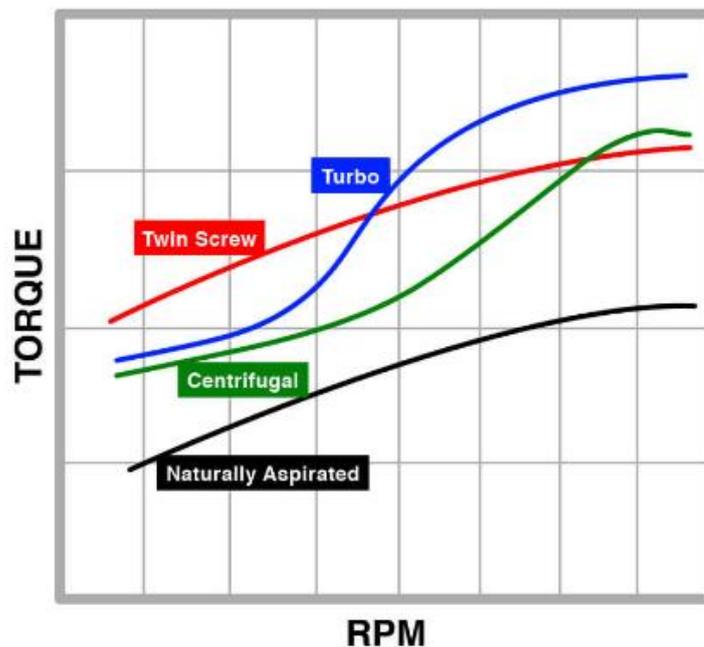


Figura 6. Curva de torque de diferentes equipamentos X função da rotação.

Adaptado de www.cjponyparts.com

2.2.6.2. Compressor

Turbo Compressores são equipamentos utilizados em motores de combustão interna para proporcionar maior eficiência volumétrica ao motor. Uma turbina automotiva é composta por dois corpos, um quente e um frio, interligados por uma haste como na figura 7. Em cada extremidade da haste há um rotor repleto de pás, quando os gases quentes da exaustão passam em alta velocidade pelo lado quente giram as pás que transferem pela haste o movimento até o rotor do corpo frio (MOBIL, 2021).

No lado frio da turbina é onde ocorre todo o processo para gerar uma admissão forçada de ar. O rotor alimentado pelos gases de escape gira em alta velocidade criando uma queda de pressão em seu centro, esse efeito suga o ar do ambiente para o interior

do lado frio e o movimento centrípeto que o ar realiza em seu interior o força pelas paredes do casco até uma abertura por onde esse gás agora em alta pressão é conduzido até o coletor de admissão e posteriormente aos cilindros (MOBIL, 2021).

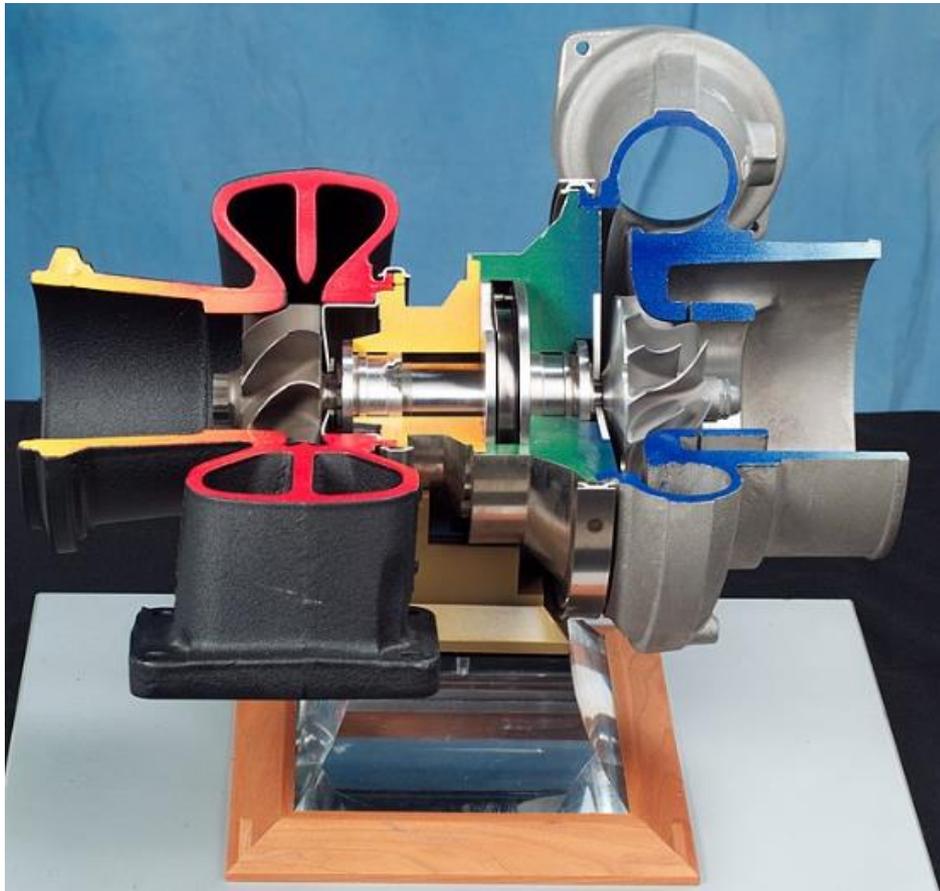


Figura 7. Corpo de um turbo compressor em corte.

Adaptado de www.carthrottle.com

2.3. Métodos de Admissão de Combustível

Para aproveitar da melhor maneira o poder calorífico de um combustível, é necessário misturar as moléculas de combustível junto a moléculas de oxigênio.

Como o combustível é líquido, algumas providências devem ser tomadas para que a união do combustível, com o comburente, é necessária atomizá-lo. É possível gerar seu espalhamento através de pressurização, quanto mais energia na forma de pressão for fornecida a um líquido, maior será o espalhamento das moléculas durante a liberação desta energia, formando então uma névoa de combustível, muito mais fácil de se misturar ao oxigênio do ar.

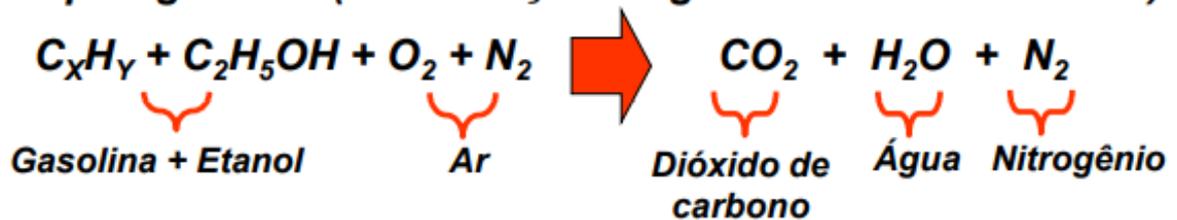
2.3.1. Estequiometria

Para motores, uma mistura estequiométrica é a relação entre as partes de combustível e comburente, necessárias para proporcionar uma reação química completa, onde no final não reste nenhuma molécula de combustível ou oxigênio sem interagir umas com as outras (ISO J1829, 2015).

A figura 8 mostra de maneira ideal, como deve ser a composição química do combustível na entrada antes da combustão, e como seria na saída após a combustão.

Entendendo a combustão

Exemplo: gasohol (combinação de gasolina e álcool etílico)



Exemplo: álcool hidratado

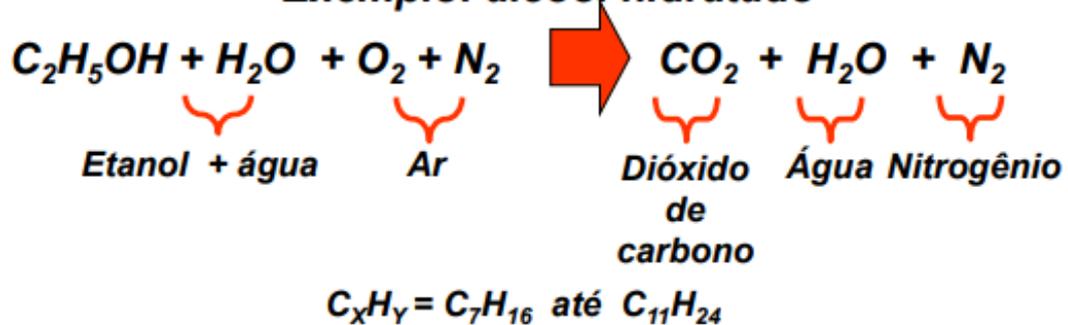


Figura 8. Composição de entrada e de saída ideais do combustível no processo de combustão.

Adaptado Apostila Prof. Mestre Adriano Ribolla.

2.3.2. Método por Aspiração com Injeção Indireta

O método revolucionou nos meados dos anos 90, pois consistia em um gerenciamento simples, porém bastante eficiente para o funcionamento de um motor a combustão, proporcionando maior potência, economia e melhor aproveitamento do combustível, através de um gerenciamento eletrônico simples.

Neste sistema, são instalados solenoides injetores de combustível por de trás das válvulas de admissão, por onde o combustível é pulverizado e sugado para o interior do cilindro. A figura 9 ilustra com precisão o arranjo físico de um sistema de injeção indireto.



Figura 9. Modelo de um sistema com injeção indireta.

Adaptado de www.autoesporte.globo.com

2.3.3. Método por Aspiração com Injeção Indireta Monoponto

O sistema monoponto EFI (Engine Fuel Injection) como revela a figura 10, consistia em um método de injeção indireta de combustível através de um eletro-injetor ou bico injetor, localizado em um corpo junto ao coletor de admissão de ar e combustível, que juntos promoviam a mistura de ambos e proporcionavam a combustão dentro da câmara de combustão do veículo.

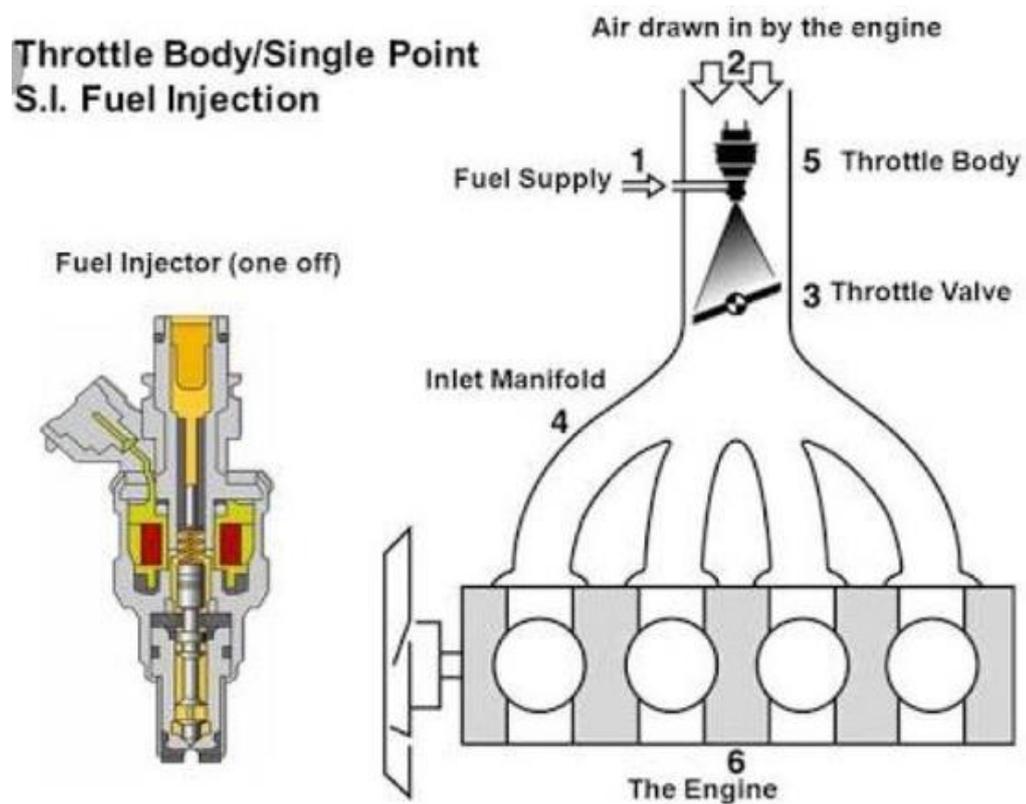


Figura 10. Modelo de um sistema com injeção indireta monoponto.

Adaptado de www.blog.ciclo.eng.br

2.3.4. Método por Aspiração com Injeção Indireta multiponto

O sistema multiponto MPFI (Multi-Point Fuel Injection) consiste em um método de injeção indireta de combustível, na qual as válvulas injetoras ficam localizadas no coletor de admissão logo antes das válvulas de admissão. A figura 11 ilustra a maneira como os injetores são dispostos. O coletor de admissão é projetado para proporcionar o melhor fluxo de ar, fazendo com que o combustível não sofra com grandes dificuldades para adentrar o cilindro.

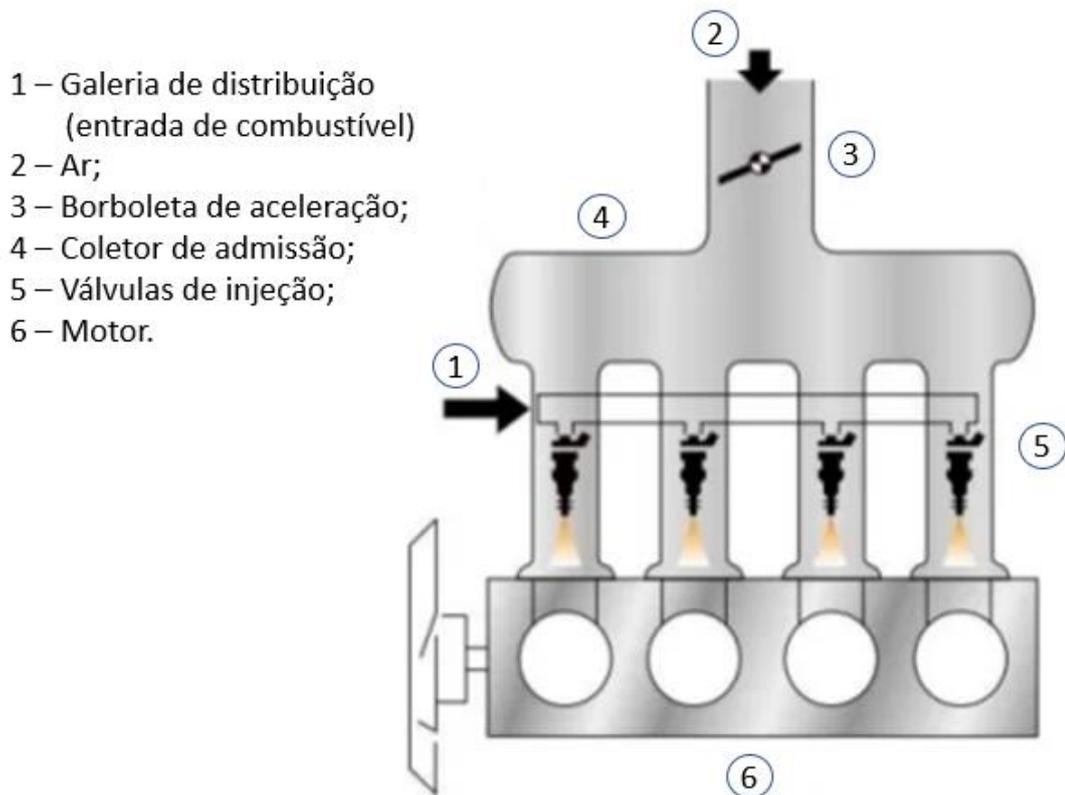


Figura 11. Modelo de um sistema com injeção indireta multiponto.

Adaptado de www.blog.ciclo.eng.br

2.3.5. Método por Injeção Direta Multiponto

Os sistemas de injeção direta, é provavelmente o limite da tecnologia de injeção para os motores de combustão interna, neste sistema, assim como no diesel, a válvula injetora pulveriza o combustível no interior da câmara de combustão à uma pressão de aproximadamente 200 bar, permitindo uma atomização muito eficiente.

Neste sistema, como mostra a figura 12, não há barreiras para o combustível, diferente de um sistema de injeção indireta, onde a cabeça da válvula de admissão acaba muitas vezes por impedir a passagem fluida do ar e do combustível.

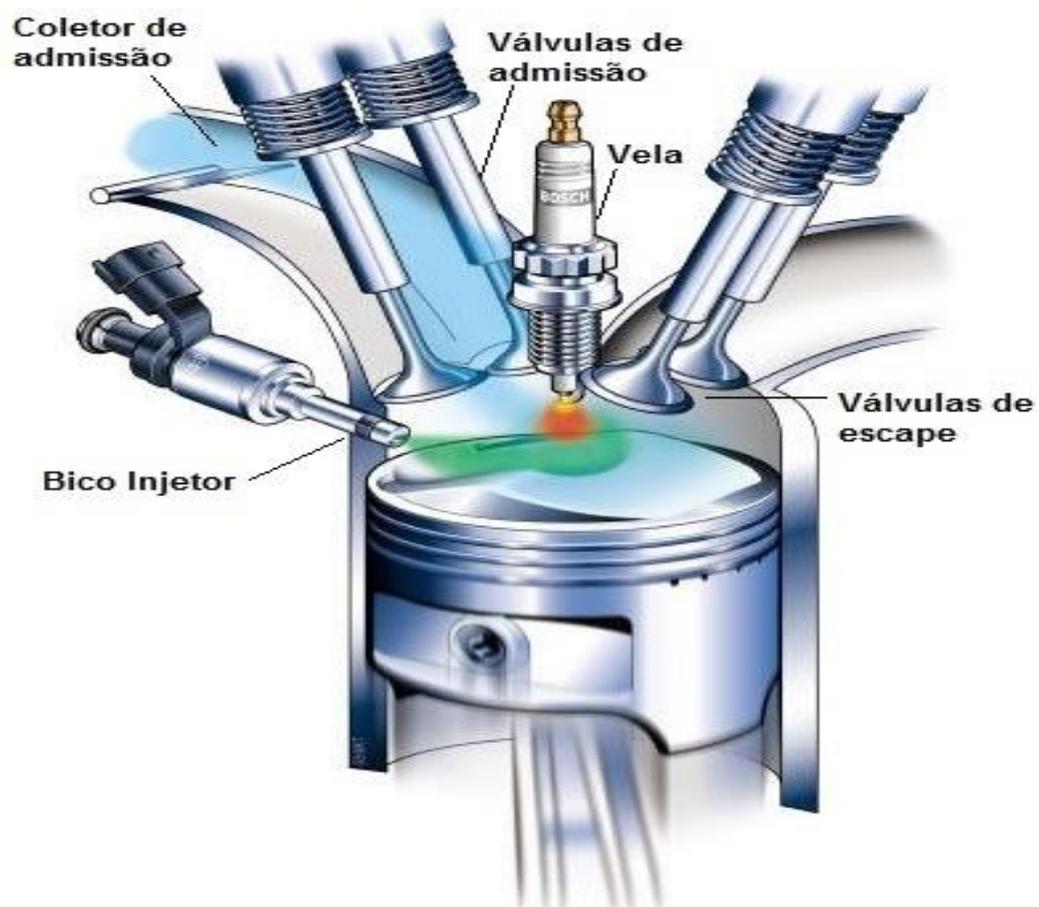


Figura 12. Modelo de um sistema com injeção direta estratificada.

Adaptado de www.troiagas.com

2.3.5.1. Bomba de Alta Pressão

A bomba de alta pressão ilustrada pela figura 13, permite que a galeria de combustível seja pressurizar com até 200 bar de pressão, isso possibilita uma injeção bem-sucedida, pois permite que a pressão do combustível seja maior do que a pressão no interior do cilindro e em uma proporção que permite que o combustível seja atomizado com sucesso.

Estrutura da bomba de alta pressão HDP2

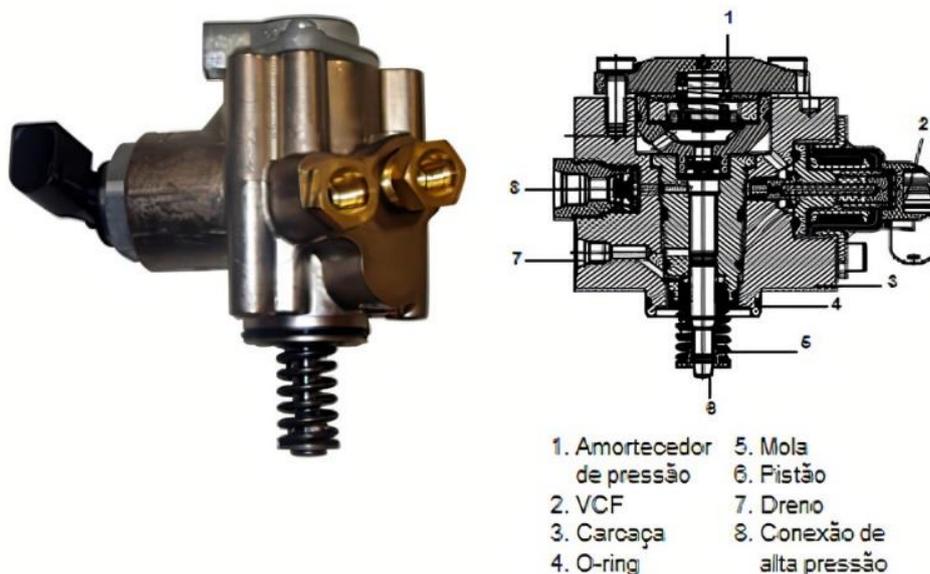


Figura 13. Modelo em corte de uma bomba elevadora de pressão para injeção direta de combustível.

Adaptado de MAHLE Manual Técnico, 2016

2.3.5.2. Mistura Estratificada

Um sistema de injeção direta com mistura estratificada pode ser alcançado através de dois métodos, por meio de um coletor de admissão variável, ou de um êmbolo com superfície ondulada.

A mistura estratificada é um método criado pela indústria para alcançar um melhor nível de autonomia de combustível. O método consiste em concentrar o combustível em um ponto central dentro do cilindro, de modo que pouco combustível fuja para a periferia do compartimento.

A figura 14 ilustra um sistema de injeção com mistura estratificada, onde é possível observar uma concentração de mistura rica no centro do cilindro onde ocorre a centelha da vela de ignição.

O gerenciamento trabalha em baixas rotações e baixa carga de modo a realizar a injeção de combustível enquanto o embolo realiza o ciclo de compressão, não permitindo tempo para que a mistura se torne homogênea. Em regimes de alta demanda de torque, o gerenciamento realiza a injeção de combustível durante a admissão, permitindo que o combustível atomizado tenha tempo de unir-se ao comburente no interior do cilindro.

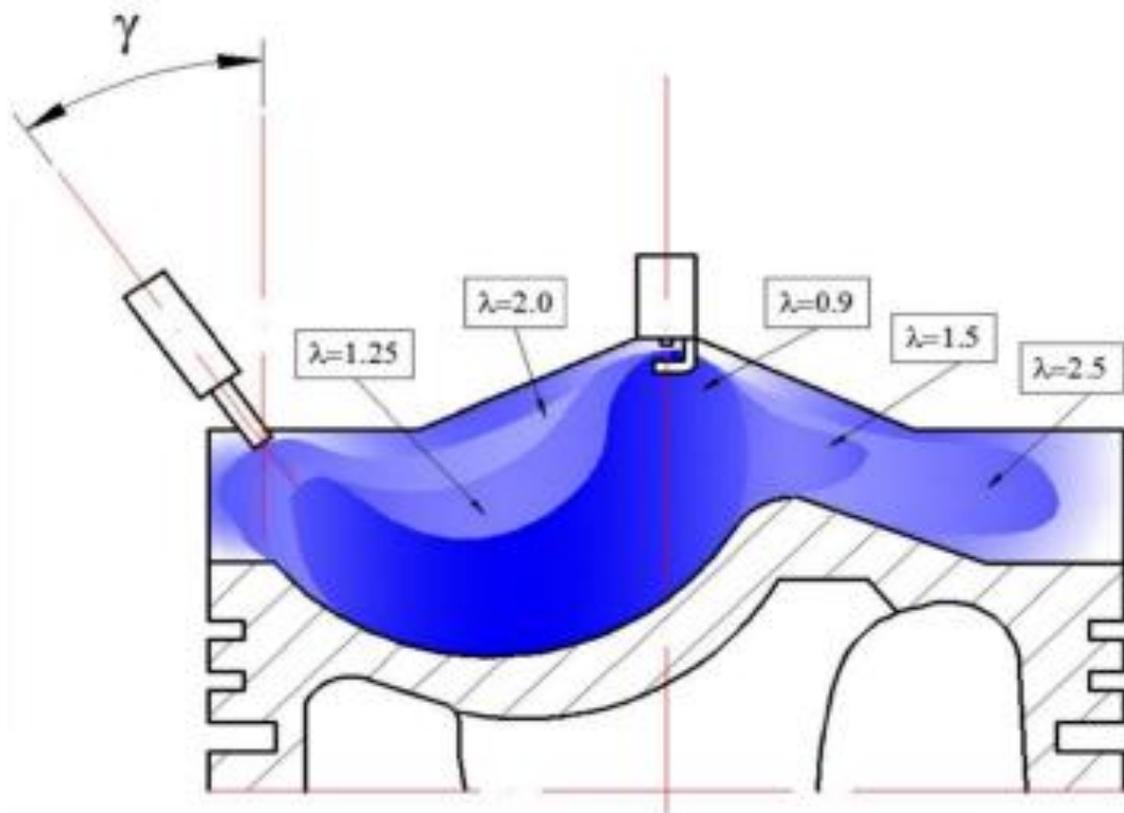


Figura 14. Comportamento do combustível dentro do cilindro, durante um regime de mistura estratificada.

Adaptado de www.troiagas.com

2.4. Sistemas de Ignição

O sistema de ignição é uma ferramenta fundamental para que possa ser inflamado um volume qualquer de Combustível. O momento de ignição é o instante em que é fornecido calor a mistura carburante e inicia-se a queima do combustível dentro da câmara de combustão, promovendo assim, a expansão dos gases e gerando trabalho sobre o êmbolo.

2.4.1. Método de Ignição por Centelha

O objetivo dos sistemas de ignição por centelha é criar uma diferença de potencial elétrico entre os dois eletrodos da vela de ignição que seja suficiente para proporcionar a ruptura do dielétrico entre os eletrodos da vela (FUELTECH blog, 2020).

Segundo a Lei de Paschen, a tensão de ruptura do dielétrico esta principalmente referenciada a diferença de potencial que cai sobre o meio e a distância entre os terminais dos eletrodos, assim como descrito na equação 6.

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln \left[\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right) \right]} \quad (6)$$

Onde:

V_B = tensão de ruptura do dielétrico (V);

p = a pressão do meio (Pa);

d = a distância do intervalo em metros;

γ_{se} = é o coeficiente de emissão de elétrons secundários;

A = é a ionização por saturação no gás em um determinado campo elétrico sobre a pressão;

B = são às energias de excitação e ionização.

2.4.2. Ignição Convencional

Um sistema de ignição convencional é composto por uma fonte de tensão contínua (bateria) que alimenta o circuito com baixo nível de tensão, um elevador de tensão (bobina) que entrega um alto nível de tensão para o distribuidor e conseqüentemente para as velas, um distribuidor de centelha responsável por pulsar o sinal da bobina e entregar alta tensão para as velas, um condensador responsável por limitar o centelhamento gerado pelo platinado, um rotor com a função de entregar aos cabos energia no momento exato que o motor necessita, velas onde ocorre o centelhamento e cabos que conectam o distribuidor as velas, assim como na figura 15 (MAHLE Manual Técnico, 2016).

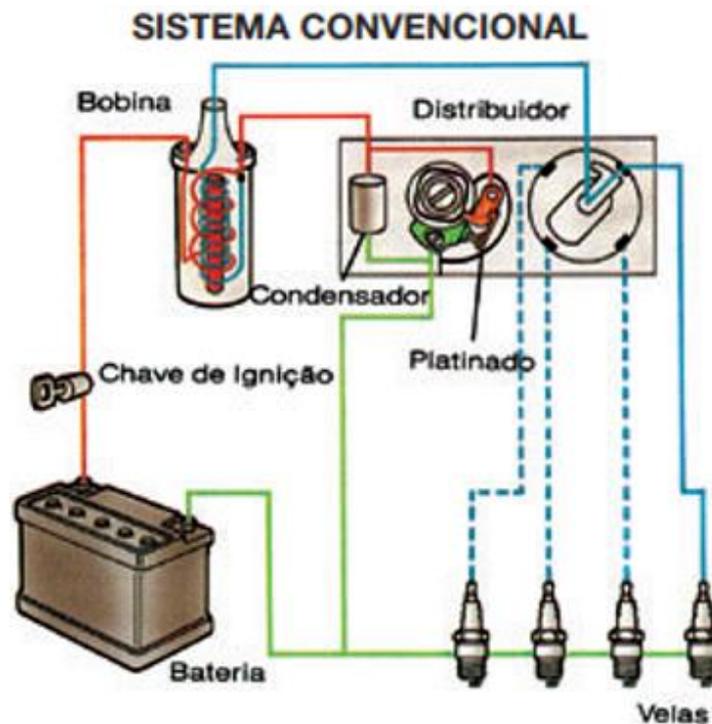


Figura 15. Composição de um sistema de ignição convencional.

Adaptado de MAHLE Manual Técnico, 2016.

2.4.3. Ignição com Semicondutores

Os semicondutores trouxeram uma grande melhoria no desempenho dos sistemas de ignição, afinal eram mais confiáveis e mais duradouros, além de mais eficientes. O sistema é bastante simples e pode ser implementado nos modelos mais antigos que não possuem esta tecnologia.

2.4.3.1. Sistema Transistorizado com Platinado

Nesta configuração, ao invés do platinado alimentar diretamente os cabos e velas de ignição, ele é intermedido por um transistor. Neste modelo o platinado pulsa ativando e desativando um transistor que alimenta os cabos e velas, desta maneira diminuindo a corrente que circula pelo platinado evitando o centelhamento e consequentemente o rápido desgaste do platinado (MAHLE Manual Técnico, 2016).

2.4.3.2. Sistema Transistorizado sem Platinado

Com um toque mais moderno, todo este controle de centelha, passa agora a responder ao sinal de um sensor, o sistema todo é analógico e consiste em um sensor hall posicionado no distribuidor da mesma maneira que os sistemas antigos.

É acoplado um ímã dentado na carcaça do distribuidor, quando em movimento o ímã induz um campo magnético no sensor e este gera uma resposta em tensão que é coletada, amplificada e aplicada na base de um transistor que liga o secundário da bobina elevadora de tensão aos cabos e velas de ignição como na figura 16 (MAHLE Manual Técnico, 2016).

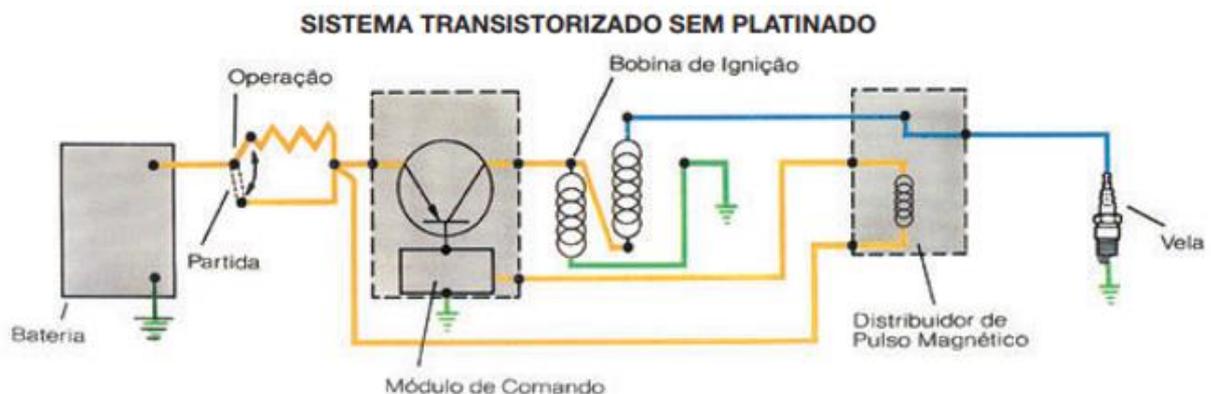


Figura 16. Sistema de ignição transistorizado sem platinado.

Adaptado de MAHLE Manual Técnico, 2016.

2.4.4. Ignição Estática

Neste sistema, é dispensada a necessidade de um distribuidor, e o controle da centelha é feito por um sistema eletrônico. Cada cilindro possui uma bobina como ilustra a figura 17, e através dos sinais recebidos pelos sensores no motor a ECU controla a sequência e o avanço de ignição (MANAVELLA, 2003).



Figura 17. Sistema de ignição estática.

Adaptado MANAVELLA, 2003.

2.5. Combustíveis

Um combustível é qualquer material capaz de produzir energia ao sofrer com uma interação do ambiente, ou entrar em contato com outra substância (EPA, 2022).

2.5.1. Combustíveis de uso Veicular

São utilizados para aplicação veicular alguns combustíveis específicos devido suas características físicas.

Para motores de combustão interna, é necessário que o combustível apresente volatilidade controlada, ou seja, sua armazenagem não pode apresentar altos riscos de acidentes graves. Também precisa ser facilmente atomizado.

2.5.1.1. Combustíveis de Origem Fóssil

São combustíveis extraídos a partir do petróleo existente no ambiente.

O petróleo é uma substância oleosa e inflamável, tem-se como sua origem esteja ligada a decomposição de plâncton, seres orgânicos que flutuam nos oceanos. Devido sua composição química, baseada em hidrocarbonetos, é possível extrair diversos tipos de substâncias ao refinar o petróleo, tais como óleo diesel e gasolina, combustíveis estes muito comuns em aplicações veiculares (Unicamp, 2022).

2.5.1.1.1. Gasolina

É um combustível derivado do petróleo, ele é uma mistura de hidrocarbonetos de 6 a 10 átomos de carbono, e hoje é a mais utilizada nos veículos, sua octanagem, se comparada a outros combustíveis, é baixa. Segundo o portal Manual da Química “ Além disso, a sua combustão libera uma quantidade de energia potencial muito boa e seu preço é economicamente viável.”

2.5.1.2. Combustíveis de Origem Vegetal

São combustíveis extraídos através de materiais orgânicos, plantas no geral. O etanol por exemplo é extraído da cana de açúcar, uma ótima alternativa para a gasolina derivada do trabalho, há também os óleos vegetais extraídos de sementes e castanhas, alternativa sustentável ao diesel também derivado do petróleo. Segundo a UOL Brasil escola “O "O Brasil é hoje o segundo maior produtor de biocombustíveis do mundo, com destaque para o etanol produzido por meio da cana-de-açúcar.”

3. ETANOL COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE COMBUSTÍVEL

O etanol, ou álcool etílico (C₂H₆O), é constituído por dois átomos de carbono, seis de hidrogênio e um de oxigênio (RAIZEN, 2023), é um combustível natural, obtido através da fermentação dos açúcares presentes em abundância, nas diversas plantas da natureza.

Atualmente, o etanol tem ganhado cada vez mais visibilidade em aplicações veiculares, comparado à grande maioria dos combustíveis fósseis presentes no mesmo ramo de atuação.

O Brasil, sendo um país autossuficiente, com relação a produção de etanol, tem melhor capacidade de se destacar neste caloroso mercado. Em 2018, o etanol bateu recorde de produção chegando a 840 milhões de galões. Países europeus e asiáticos, veem em combustíveis como este, uma ótima oportunidade de ampliar produtividade, e continuar atendendo leis de emissões. (Craig Willis, 2019).

3.1.1. Processos Industriais

O etanol é obtido, majoritariamente, pela fermentação de açúcares (sacarose, a glicose e frutose) e cereais, entre elas está: o milho, trigo, beterraba, arroz etc. Porém a principal fonte de obtenção do etanol no Brasil, é através da fermentação dos açúcares da cana de açúcar (RAIZEN, 2023).

Uma tonelada de cana, por exemplo, pode chegar a produzir 80 litros de etanol de primeira geração (EG1). (RAIZEN, 2023).

No Brasil, o mais convencional tipo de etanol produzido é o hidratado, o mesmo encontrado nos postos de abastecimento.

O processo industrial para produção do etanol é relativamente simples:

1. Inicia-se com a trituração e fermentação da cana de açúcar, com a finalidade gerar a garapa com alto teor de sacarose;
2. Em seguida ocorre a concentração e cristalização desta garapa, o resultado disto é a geração de 2 porções: açúcar escuro (para a produção de açúcar comum), e o melado, que será utilizado para a produção do álcool;

3. Então, a fermentação do melaço ocorre, e com isto se obtém o mosto fermentado, que possui por cerca de 12% de etanol em seu volume;
4. Por fim é realizado a destilação fracionada do mosto fermentado, o resultado disto, é a obtenção do álcool comum a 96°GL (96 graus Gay-Lussac), que é composto por 96% de etanol e 4% de água.

O processo industrial de produção de etanol consiste das seguintes etapas:



Figura 18. Ilustra o fluxo de produção do etanol.

Adaptado.: Raizen, 2003.

3.1.2. Etanol 2G

O etanol de segunda geração(E2G), é um biocombustível obtido através do bagaço restante da produção do açúcar e do etanol de primeira geração.

Através de processos físicos e químicos, é possível acessar os açúcares restantes na palha e ampliar a produção de etanol em até 50%, o que contribui para diminuir em até 80% os gases de efeito estufa (CNPEN, 2021).

3.2. Etanol no Brasil

Em 1925, começam os primeiros estudos por parte do estado para o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de etanol.

Em 1933, o presidente eleito da época fundou o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) e mais tarde em 1938 foi implementado a lei nº 737. Lei está que obrigou os distribuidores a adicionar etanol à gasolina dos postos (Lei 737, 1933).

3.2.1. PROALCOOL

O Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), foi um movimento que o governo federal elaborou em 1975, com o intuito de intensificar a produção do combustível álcool para substituir a gasolina, isto ocorreu por conta do custo elevado do petróleo importado na época. Como resultado, o Brasil, se tornou o primeiro país a produzir veículos a álcool e exportar essa tecnologia renovável para outros países (RAIZEN, 2023).

No ano de 1979, saía da linha de montagem da francesa FIAT o '147', que se consagrou como sendo o primeiro veículo com motor totalmente movido a álcool. Com seu pequeno trem de força de 1300 cilindradas, o 147 trouxe consigo um conceito de motores que perdura até os dias atuais, ilustrado na figura 19.

Entre os anos 1980 e 1986, ocorreu um grande crescimento nas vendas de etanol, em todo o território nacional, pois o governo determinou redução do Imposto sobre o Produto Industrializado (IPI) e do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) para os veículos movidos exclusivamente a etanol (RAIZEN, 2023).



Figura 19. Fiat 147 sendo abastecido.

Adaptado de.: Revista Encontro, 2019

3.2.2. Veículos Flex

São veículos equipados com motores capazes de trabalhar com combustível etanol e gasolina.

A figura 20 ilustra o modelo de 2003 lançado pela montadora Volkswagen. Sendo seu primeiro modelo Flex e também, o primeiro do país, o Gol geração 3 foi um modelo de entrada que fez muito sucesso. Era capaz de trabalhar com os dois combustíveis e dava liberdade de escolha para o proprietário.

Segundo o Consorcio Embraco “Com o vai e vem dos preços dos combustíveis, ficar restrito a uma única opção não é uma boa ideia. E a versatilidade é a principal vantagem dos veículos flex. Basta fazer uma análise entre os custos do etanol ou gasolina e abastecer com o que for mais vantajoso.”



Figura 20. Volkswagen Gol bicombustível.

Adaptado.: MobiAuto, 2023

3.2.2.1. Tecnologias Desenvolvidas

Conforme o avanço da tecnologia, melhorias para os veículos surgiram, tanto em questão da engenharia de materiais, para aguentar a desgaste nos componentes causados pelo etanol e para resistirem a diversas situações de trabalho, quanto também o aperfeiçoamento de componentes do sistema de injeção, como bomba de combustível, bicos injetores, velas etc, estruturados para suportar diversos tipos de regime de trabalho. A aprimoração de calibrações de motores também vem se desenvolvendo, resultando em uma maior eficiência dos motores, reduzindo o consumo de combustíveis dos mesmos.

4. SIMULAÇÃO RICARDO WAVE

Para realizar o estudo, a partir de uma aplicação prática, foi utilizado o *software Wave*, uma ferramenta capaz de gerar análises dinâmicas 1D de motores. Este produto é desenvolvido pela empresa Ricardo Software, especialista em análise e desenvolvimento de *Powertrain* para veículos.

O conceito deste experimento é averiguar, se é possível adquirir algum tipo de ganho, modificando apenas parâmetros físicos e geométricos do motor, assim como o combustível utilizado, tendo como base, um modelo virtual de um motor de combustão interna.

O modelo de Motor Virtual, simulado via *software*, possibilita gerar resultados confiáveis de parâmetros de potência, torque, consumo específico, rendimento volumétrico etc.

Por se tratar de um *software* em versão estudantil, muitas das funções, menus e ferramentas não estão disponíveis para alteração por parte do usuário.

4.1. Projeto Base para Simulação

Como base para a simulação, foi utilizado um modelo já validado, disponibilizado pelo próprio *software* referenciado como 1.0L_GTDI, seguindo todas as especificações da tabela 1.

O modelo em questão, tem implementado em sua estrutura, uma grande porção das implementações mais populares no mercado automotivo atual, como um turbo compressor e injeção direta.

Especificações	Valores
Combustível	Gasolina
Tempos	4
Tipo de Motor	3 em linha
Deslocamento	997,8L
Injeção	Injeção Direta
Sistema de Indução	Turbocompressor Convencional
Válvulas por Cilindro	4
Diâmetro	72 mm
Curso	82 mm
Taxa de compressão	10:01
Volume Câmara	37,07 mm ³
Potência máxima	93,3 kW @ 6000 rpm
Torque	176,9 Nm @ 4000 rpm
Consumo Específico	257,8 g(kW/hr)

A tabela 1 exibe as especificações técnicas do motor a gasolina.

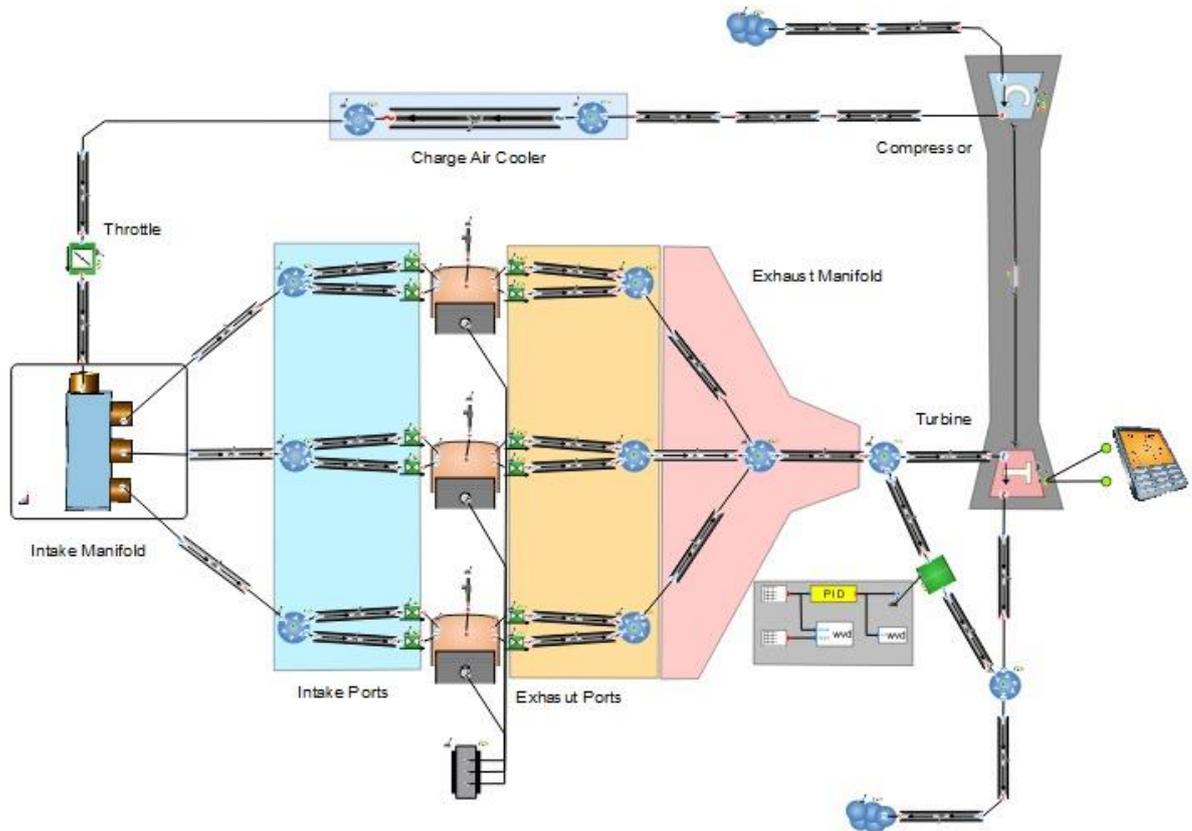
Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Os testes foram realizados apenas alternando o combustível utilizado, e variando a taxa de compressão dos cilindros, sendo relevantes para análise, apenas os dados de torque, potência e consumo específico.

4.2. Simulação com Dados Originais do Motor Utilizando Gasolina

O esquema básico de montagem para o protótipo é disponibilizado pelo *software* seguindo as configurações apresentadas pelo modelo ilustrado na figura 21, quatro válvulas por cilindro, admissão independente de comburente, injeção direta de combustível, controle por sistema de injeção eletrônica e *air-cooler*.

1.0L GTDI Turbo



A figura 21 demonstra o layout de um modelo de motor 1D no *software Wave*.

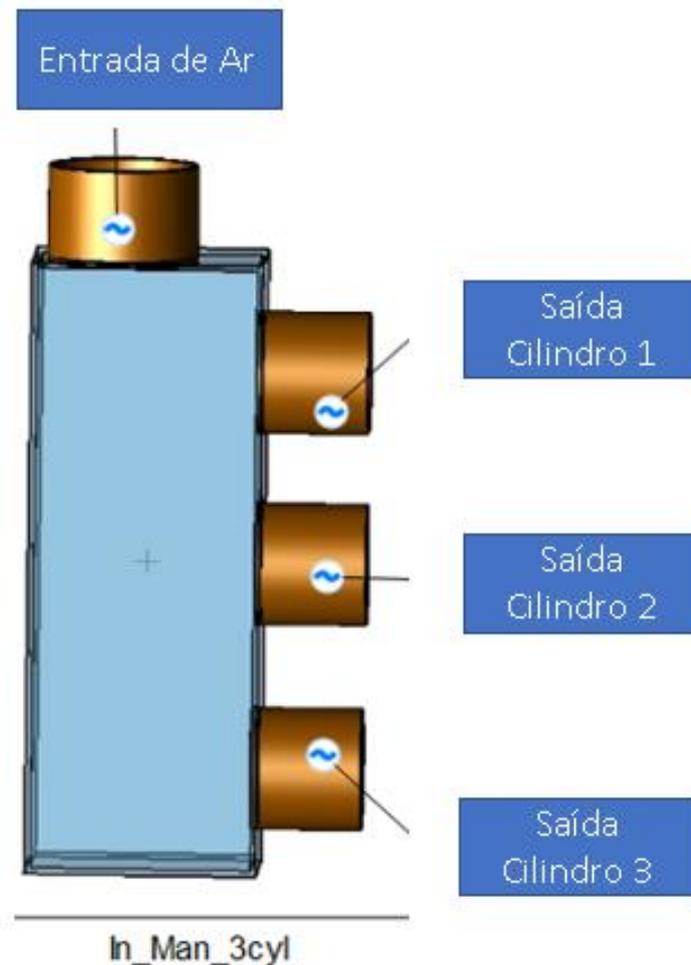
Adaptado de: *Wave_2019 - Manual*.

Para esta simulação, foram utilizados todos os dados originais do motor disponibilizado pelo software, sem realizar qualquer tipo de alteração.

Foram executados 100 ciclos de teste com 13 parâmetros de rotação, distintos (1000, 1250, 1400, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 e 6000 rotações por minuto). O software toma como base para executar suas simulações, os parâmetros de rotações por minutos.

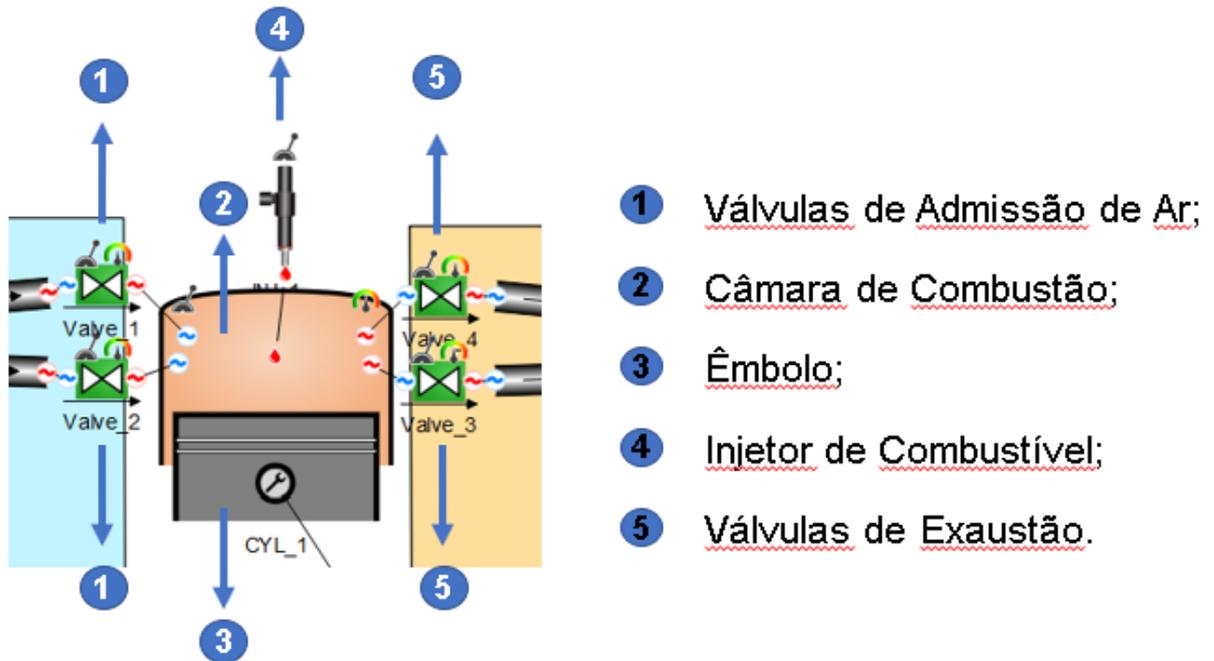
A figura 22 representa o modelo usado pelo software para ilustrar o coletor de admissão de ar. Este equipamento, é desenvolvido passo a passo em um software de modelagem 3D, capaz de simular os fluxos de escoamento de fluidos em determinados ambientes. Estes dados, são exportados para dentro do *Wave*, e portanto a simulação utiliza destes parâmetros para simular casos de funcionamento real do equipamento.

Para a simulação do modelo de motor a gasolina não foram realizadas modificações no modelo do coletor de admissão de ar, todos os parâmetros originais foram preservados, pois por se tratar de um recurso externo importado para dentro do software, não é possível tratar estes dados.



A figura 22 representa o modelo usado pelo software para ilustrar o coletor de admissão de ar
Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

A imagem 23 ilustra a representação utilizada pelo software para amostrar os componentes do cilindro simulado. Anexos aos cilindros estão as válvulas injetoras, assim como as válvulas de exaustão e admissão de ar. Manipulando parâmetros geométricos como o diâmetro das válvulas, quantidade de válvulas, abertura e diâmetro, possível variar a eficiência com que o ar e o combustível são entregues aos cilindros.



A figura 23 representa o modelo usado pelo software para ilustrar o cilindro e seus componentes
Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Para esta simulação com o modelo a gasolina, foram mantidos os parâmetros alheios aos injetores de combustível, geometria dos cilindros, das válvulas de admissão e exaustão. A imagem 24 é um recorte do software e exibe os parâmetros cujo programa toma como padrão.

Para o estudo em questão, o parâmetro mais importante a ser levado em conta, é a taxa de compressão (Compression Ratio). Este valor vai definir como será o comportamento de eficiência volumétrica do motor. O software toma como valor padrão para taxa de compressão do cilindro um valor de 10 partes para 1.

Geometry

Bore	<input type="text" value="72"/>	<input type="text" value="mm"/> ▾
Crank Stroke	<input type="text" value="82"/>	<input type="text" value="mm"/> ▾
Clearance height	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="mm"/> ▾
Head area multiplier	<input type="text" value="1.527"/>	
Piston area multiplier	<input type="text" value="1.21"/>	
<input type="checkbox"/> Sinusoidal Movement		
Connecting rod length	<input type="text" value="136.5"/>	<input type="text" value="mm"/> ▾
Wrist pin offset	<input type="text" value="7.45"/>	<input type="text" value="mm"/> ▾
Compression ratio	<input type="text" value="10"/>	

A figura 24 é um recorte do software e exibe os parâmetros do cilindro cujo programa toma como padrão.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Para alcançar um deslocamento de aproximadamente 333mm^3 por cilindro, foram dimensionados três cilindros com as seguintes características, um diâmetro de 72mm, um curso de 82 mm, um volume de câmara de combustão de $37,07\text{mm}^3$ uma taxa de compressão de 10:1.



Injector Data	Outputs
General	
Injector Type	Mass Flow Rate
Operating Point	
Start of injection	720-SOI
Initial injection rate	Inj_Flow_Rate/3
Properties	
Mixture temperature	310 K
Nozzle diameter	0.2 mm
Mean fuel drop diameter	AUTO
Injector sac volume	0 mm ³
Spray spread angle	AUTO
Initial fuel injection velocity	Calculate automatically
Fuel Composition	
Fuel composition	Fluid Composition_3
Profiles	
Injection rate	Injection Rate Profile_1
Injection pressure	Injection Pressure Profile_1

A figura 25 é um recorte do software e exibe os parâmetros do injetor cujo programa toma como padrão.

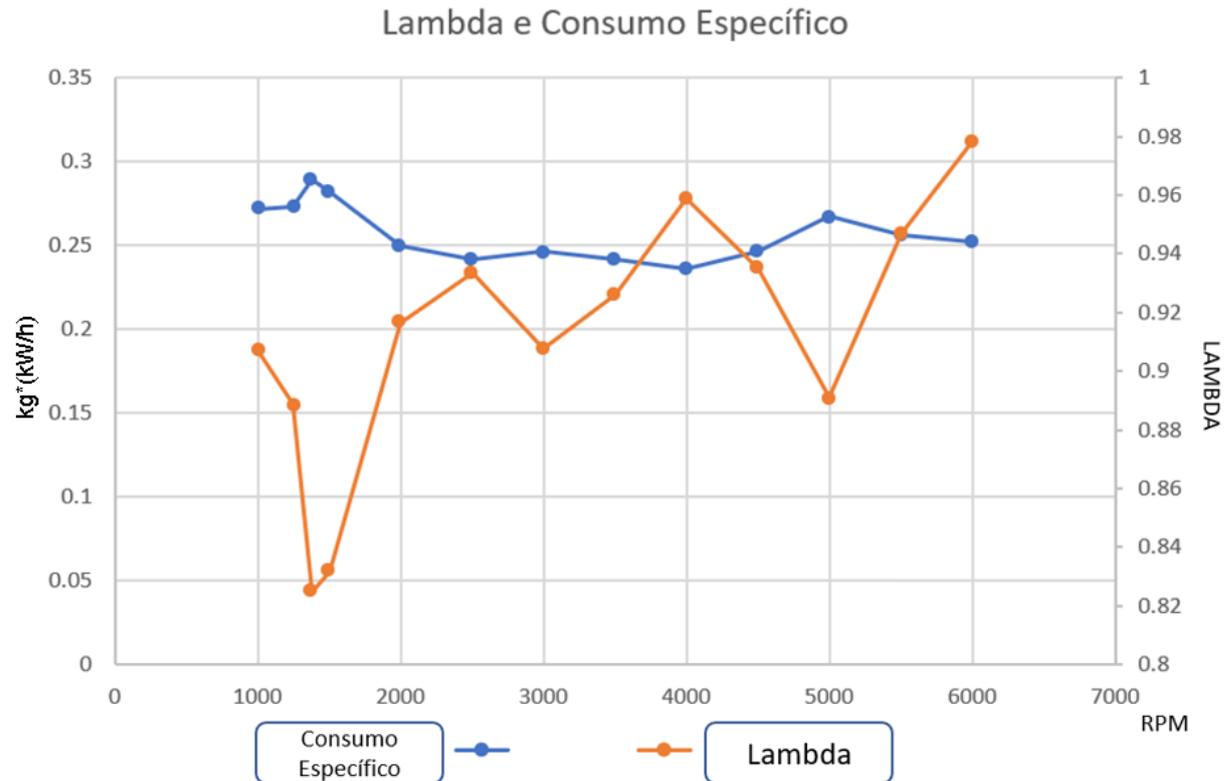
Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Fatores muito importantes levados em conta durante a simulação, foram as características dos injetores de combustível. A figura 25 ilustra como o software representa e parametriza as medidas que dão forma ao injetor.

Para os estudos com o modelo a gasolina, foram mantidas as referências geométricas do injetor, portanto a vazão, diâmetro e combustíveis são os disponibilizados pelo software.

A composição do combustível para a simulação é ideal, ou seja, uma gasolina C_8H_{18} , composta por oito átomos de carbono e dezoito átomos de hidrogênio.

O protótipo apresentou os dados de consumo específico, eficiência volumétrica, torque e potência exibidos nos gráficos abaixo, nas condições descritas no gráfico 1.

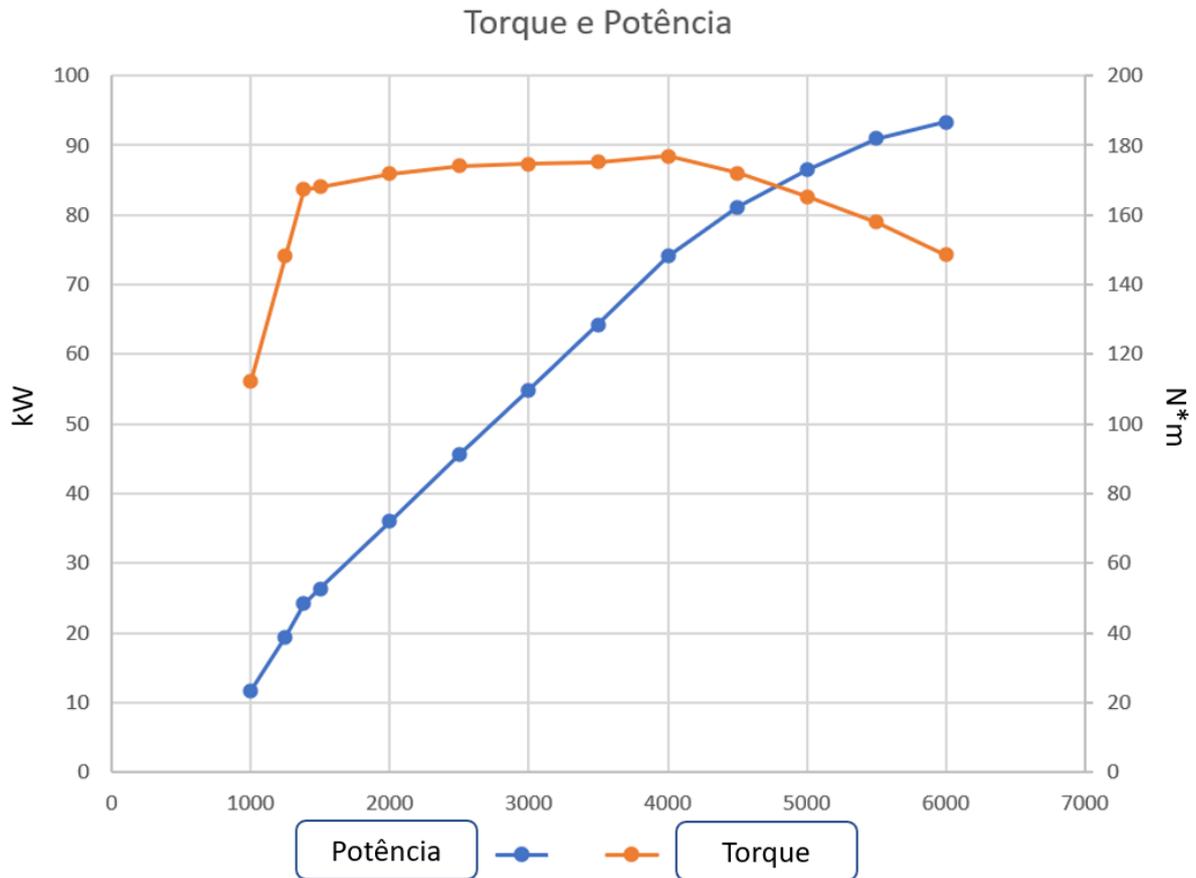


O gráfico 1 traz uma curva de relação Lambda em comparação à uma curva de consumo específico.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

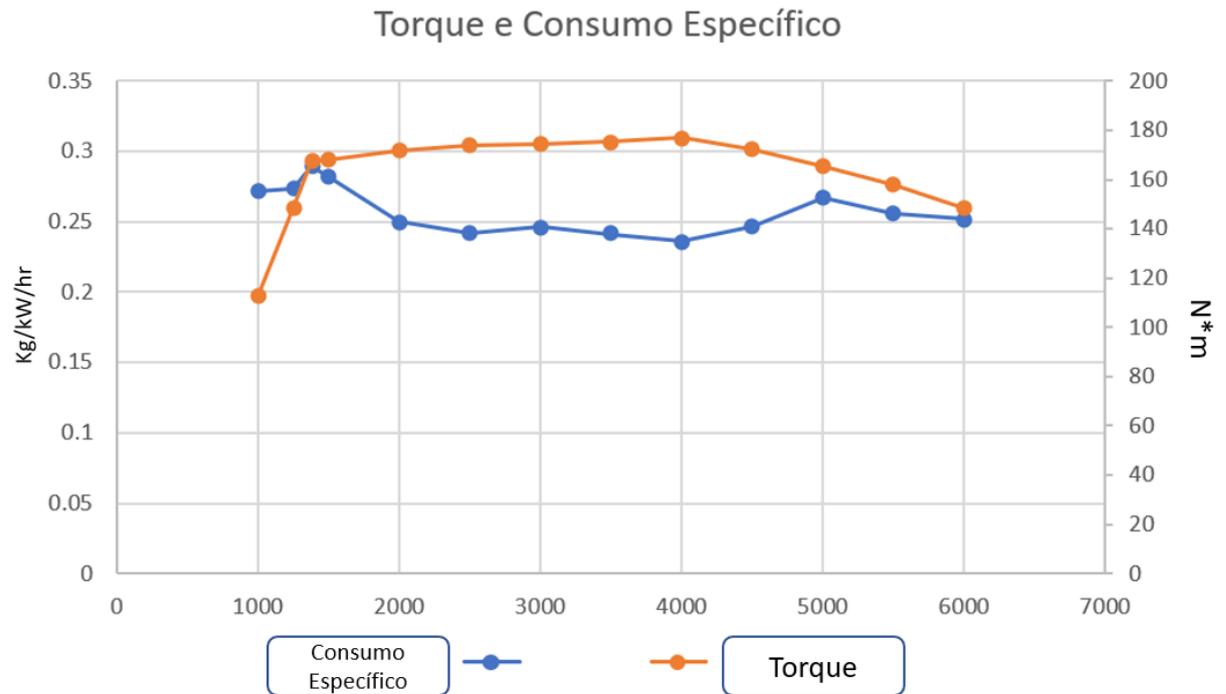
Analisando os dados coletados, é possível notar que a relação lambda se manteve levemente rica durante todo o teste, sendo a mais próxima da estequiometria ideal, por volta de 1250 RPM, sendo também está a região em que o modelo apresenta menor consumo específico, ou seja a região onde há a melhor eficiência energética apresentada pelo modelo.

No gráfico 2, é possível notar uma área de torque plano em relação a uma curva de potência ascendente, também levemente plana no topo, características estas comuns em motores GTDI (*Gasoline Turbo Direct Injection*).



O gráfico 2 traz uma curva de relação de torque em comparação à uma curva de potência.
daptado de: Wave_2019 - Manual.

O modelo apresentou uma curva de torque extremamente satisfatória, em termos de homogeneidade, afinal de contas, o torque se mantém constante durante uma larga faixa de rotação. Esta característica fundamental, mostra que o modelo simulado é capaz de operar sempre com boa eficiência em baixas rotações, afinal o torque é quase máximo, logo quando o modelo apresenta sua região de baixo consumo específico. Nota-se no gráfico 3, que logo em 2000 RPM, a simulação atinge relação ótima de torque e consumo específico.



O gráfico 3 traz uma curva de torque em comparação à uma curva de consumo específico.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Analisando os apêndices A e B, é possível perceber outros dados gerados a partir da simulação, como por exemplo, *total volumetric efficiency* (Eficiência volumétrica total). A tabela 3 deixa claro que a eficiência(%) é máxima por volta de 1380 rotações por minuto, o que faz sentido, já que quanto maior a rotação, menor o tempo disponível para preencher o volume do cilindro com a mesma massa de ar anterior a rotação atual.

Olhando, por exemplo para *Mass Airflow* (Fluxo de massa de ar), é possível notar na tabela 1, que a máxima vazão de massa de ar (kg/h), ocorre no momento de maior velocidade do motor, ou seja, a 6 mil rotações por minuto, quando o turbo compressor está operando em seu momento mais vigoroso.

Ao final desta primeira bateria de testes, foi possível revalidar etapa por etapa, a veracidade do modelo utilizado para estudos, modelo este disponibilizado pelo fabricante do software.

Os dados levantados nos gráficos e tabelas *plotados* pelo software combinados com conhecimentos e teorias aplicadas aos motores de combustão interna, revelam que de fato os números gerados pelo modelo operam como esperado.

4.3. Simulação com Parâmetros para o Motor Etanol

Para esta simulação, foram utilizados todos os dados originais do motor disponibilizado pelo software, realizando apenas a mudança dos parâmetros de combustível utilizado e relação da taxa de compressão.

A tabela 2, ilustra os máximos valores obtidos na simulação com os parâmetros alterados para a realização desta nova rodada de testes.

Especificações	Valores
Combustível	Etanol
Tempos	4
Tipo de Motor	3 em linha
Deslocamento	997,8L
Injeção	Injeção Direta
Sistema de Indução	Turbocompressor Convencional
Válvulas por Cilindro	4
Diâmetro	72 mm
Curso	82 mm
Taxa de compressão	12,7:1
Volume Câmara	28,53 mm ³
Potência máxima	65,8 kW @ 6000 rpm
Torque	146,5 Nm @ 1380 rpm
Consumo Específico	306,1 g(kW/hr)

A tabela 2 exibe as especificações técnicas do motor

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Devido a capacidade natural do etanol de resistir a combustão espontânea, nesta simulação com etanol, foi alterado em primeira mão a taxa de compressão de 10:1, para uma taxa de compressão de 12,7:1, veja a figura 26.

Para obter uma taxa de compressão mais alta, foi reduzido o volume da câmara de combustão, pois as medidas alheias as dimensões do cilindro não podem ser alteradas, caso contrário o deslocamento volumétrico do modelo seria alterado, algo não desejado.

Geometry		
Bore	<input type="text" value="72"/>	<input type="text" value="mm"/>
Crank Stroke	<input type="text" value="82"/>	<input type="text" value="mm"/>
Clearance height	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="mm"/>
Head area multiplier	<input type="text" value="1.527"/>	
Piston area multiplier	<input type="text" value="1.21"/>	
<input type="checkbox"/> Sinusoidal Movement		
Connecting rod length	<input type="text" value="136.5"/>	<input type="text" value="mm"/>
Wrist pin offset	<input type="text" value="7.45"/>	<input type="text" value="mm"/>
Compression ratio	<input type="text" value="12.7"/>	

A figura 26 recorte do software e exibe o parâmetro de taxa de compressão alterado.

Adaptado de: Wave_2019 – Manual

Para os estudos com o modelo a etanol, foram mantidas as referências geométricas do injetor, portanto vazão e diâmetro são os mesmo disponibilizados pelo software, assim como foram mantidas também características elétricas da peça.

O comportamento elétrico e a geometria do injetor de combustível são importadas para dentro do *software Wave*, através do carregamento de bibliotecas geradas em *software* externo, portanto algumas destas características não são passíveis de alteração.

A composição do combustível para a simulação é ideal, ou seja, um etanol C_2H_6O (figura 27), composto por dois átomos de carbono, seis átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio.

Os diferentes tipos de combustíveis disponibilizados para uso pelo software, estão travados para alteração por parte do usuário, portanto não é possível trabalhar com muitas das diferentes composições possíveis de cada combustível, apenas composições ideais cujo *software* toma como padrão.

The screenshot shows the 'Injector Data' window with two tabs: 'Injector Data' and 'Outputs'. The 'Injector Data' tab is active and contains several sections:

- General:** Injector Type is set to 'Mass Flow Rate'.
- Operating Point:** Start of injection is '720-SOI' and Initial injection rate is 'Inj_Flow_Rate/3'.
- Properties:**
 - Mixture temperature: 310 K
 - Nozzle diameter: 0.2 mm
 - Mean fuel drop diameter: AUTO
 - Injector sac volume: 0 mm³
 - Spray spread angle: AUTO
 - Initial fuel injection velocity: Calculate automatically
- Fuel Composition:** Fuel composition is 'Fluid Composition_3'.
- Profiles:**
 - Injection rate: Injection Rate Profile_1
 - Injection pressure: Injection Pressure Profile_1

A figura 27 é um recorte do software e exibe os parâmetros de combustível alterados.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

O software é projetado para trabalhar através de modelos matemáticos, portanto o sistema é capaz de se auto ajustar. Quando é manipulado o valor de alguma entrada, o modelo ajusta a saída.

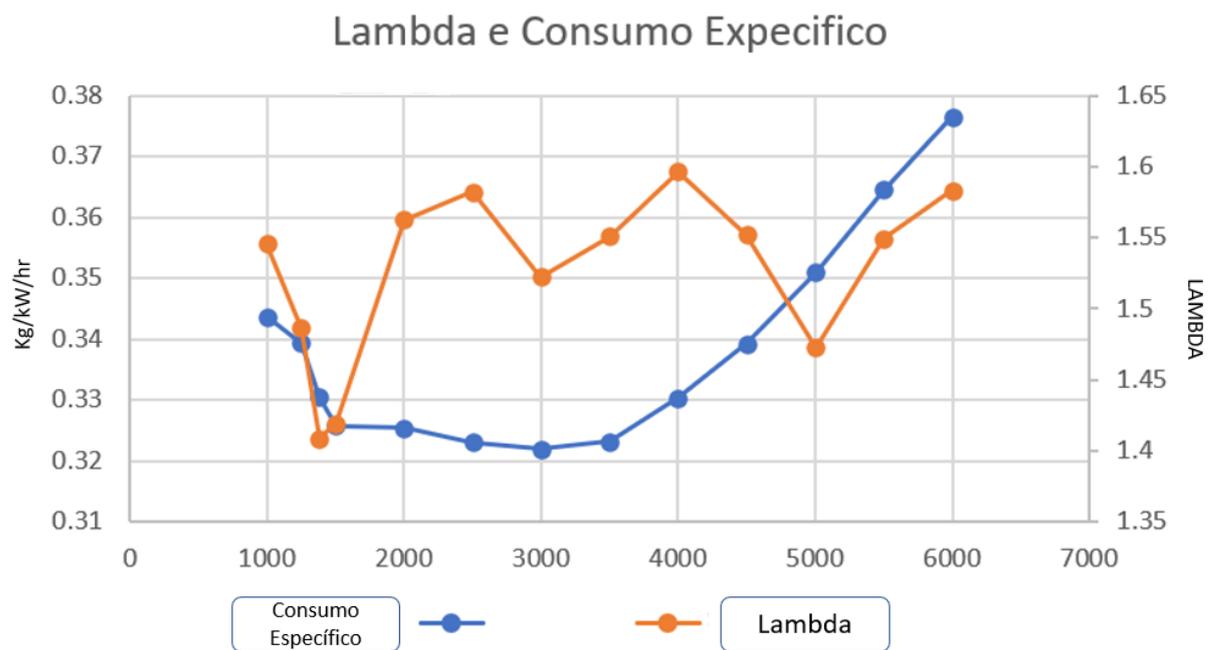
Alterando a taxa de compressão e o combustível, esperasse de que o sistema inteligente de ignição e injeção de combustível trabalhem em conjunto para trazer uma condição ótima de funcionamento.

No gráfico 4, nota-se uma aparência diferente, principalmente na curva de consumo específico.

Analisando os valores, nota-se também que o consumo aumentou, assim como a relação lambda está extremamente pobre, portanto não ocorreu nenhum tipo de ganho nestes parâmetros, apenas perdas.

Para compensar a relação lambda, é necessário trabalhar melhorar a eficiência com o qual o combustível é entregue ao cilindro. É possível importar bibliotecas externas para alterar as características físicas e elétricas dos injetores de combustível.

Com injetores capazes de entregar um maior volume de combustível, a relação lambda ficaria mais próxima da estequiometrica, por consequência, o torque e a potência também iriam atingir patamares mais elevados.



O Gráfico 4 curva de relação Lambda em comparação à uma curva de consumo específico para o modelo etanol.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Olhando agora para os dados de torque e potência do modelo, é evidente no gráfico 5 que ocorreram perdas severas tanto em torque, quanto em potência.

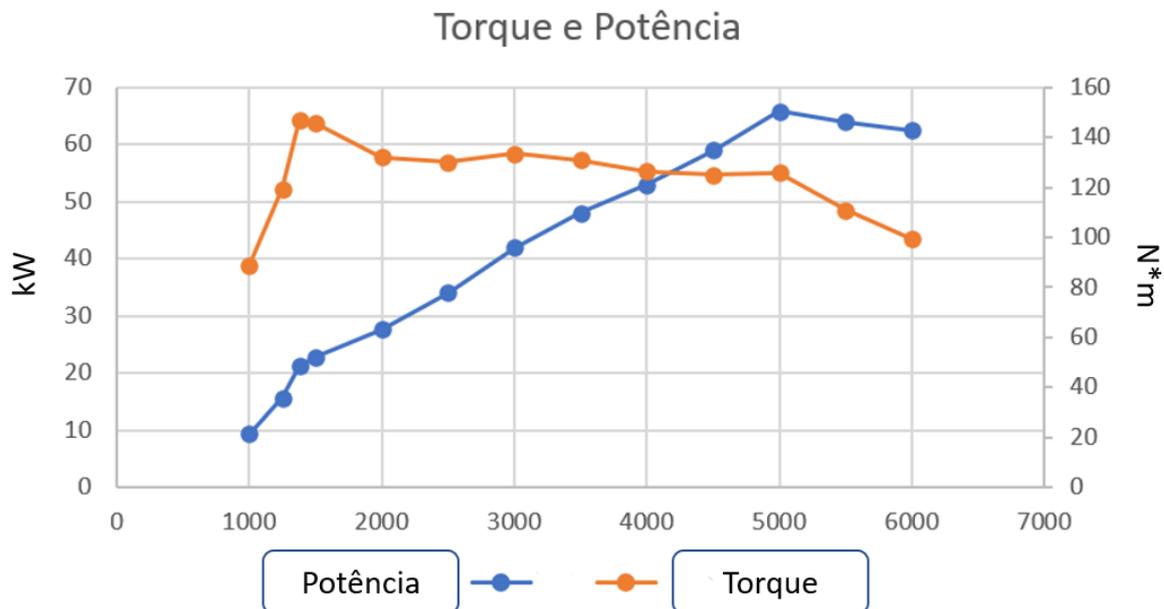
O novo modelo, foi capaz de operar sem grandes problemas, trazendo consigo resultados, também condizentes com as teorias de funcionamento dos motores de combustão interna.

O modelo conseguiu manter suas características de torque plano e potência ascendente, porém agora com picos de máximo bastante diferentes do modelo *default*, testado anteriormente.

Estas perdas estão relacionadas a incapacidade de manipular as características do sistema de injeção e ignição, devido bloqueios por parte do software.

E etanol possui uma velocidade de chama inferior a velocidade de chama da gasolina, portanto, é necessário um avanço no tempo de ignição para compensar o tempo que o combustível leva para queimar por completo.

Com um sistema de ignição adequado e um sistema de injeção de combustível de maior vazão seria esperado que as curvas de torque e potência deste novo modelo superassem as mesmas curvas do modelo a gasolina.



O Gráfico 5 traz uma curva de torque em comparação à uma curva de potência para o modelo etanol.

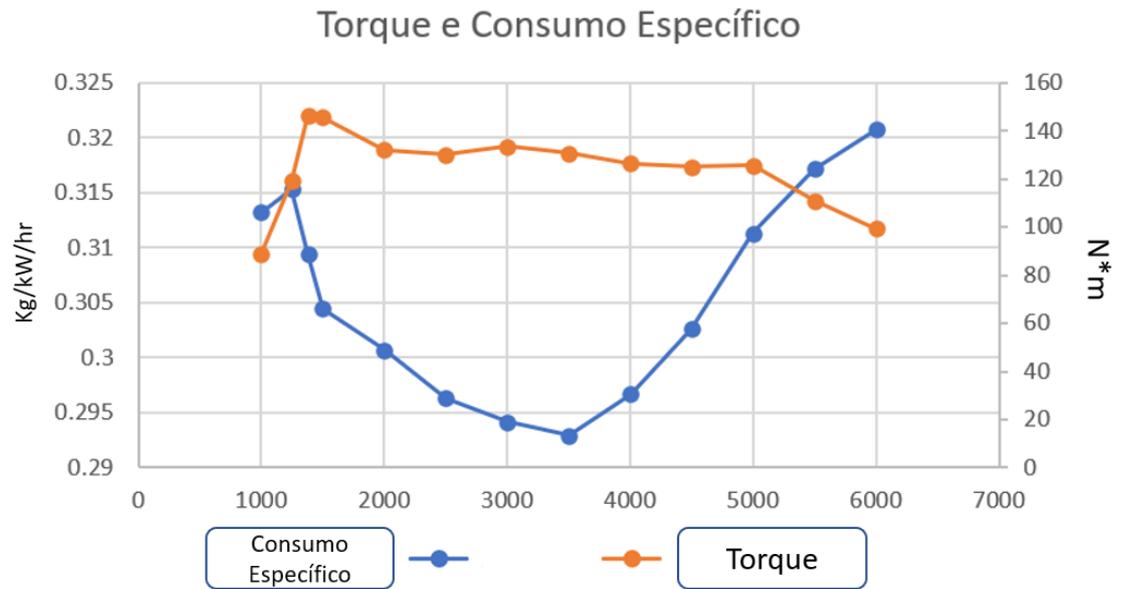
Adaptado de: Wave_2019 – Manual

O consumo específico também permaneceu assumindo um comportamento desejado, porém sofreu com perdas de rendimento. O gráfico 6 ilustra a relação entre torque e consumo.

Anteriormente, se mostrava quase plana a curva de consumo, acompanhando a curva de torque. Neste novo modelo, nota-se que ocorre uma grande oscilação, quase que exponencial no comportamento da curva de consumo, isso se dá devido o etanol possuir um oxigênio em sua composição química.

O software impede a inserção de uma nova biblioteca carregada com ajustes para a leitura da relação lambda. Devido um átomo de carbono sobressalente, o software que interpreta os dados lidos pelo sensor de oxigênio, enxerga a mistura ar combustível sempre como mais pobre do que o normal, o que não necessariamente é verdade. Neste caso, em resposta a alta concentração de O_2 nos gases de escape, o sistema de injeção de combustível deveria atuar injetando mais combustível, no intuito de enriquecer a

mistura e compensar a relação lambda, levando-a para mais próxima da estequiométrica.



O Gráfico 6 traz uma curva de torque em comparação à uma curva de consumo específico.

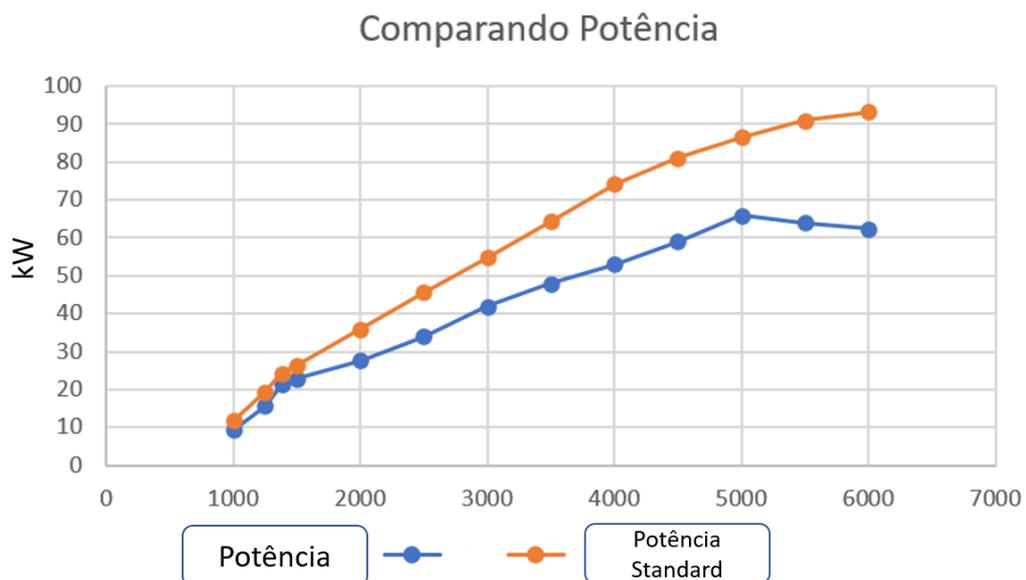
Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

5. Conclusões

Logo em primeira mão, é possível notar uma piora significativa nos números, quando comparados os resultados de cada modelo frente a frente.

Ocorreu uma perda de aproximadamente 22,2% de potência entre o ponto de máxima do modelo *default* (93,3 kW) e o ponto de máxima do modelo modificado (65,8 kW). Em permissão do software, seria possível melhorar esta condição, importando bibliotecas com novas características para um sistema de injeção de combustível com maior vazão e um sistema de ignição com maior avanço.

Do ponto de vista mecânico, também seria se suma impotência a permissão de modificar o diâmetro e tempo de abertura das válvulas de admissão de ar e exaustão. Estas duas características mecânicas são capazes de alterar muito da dinâmica de um motor de combustão interna.



O gráfico 7 Compara as curvas de potência dos modelos analisados.

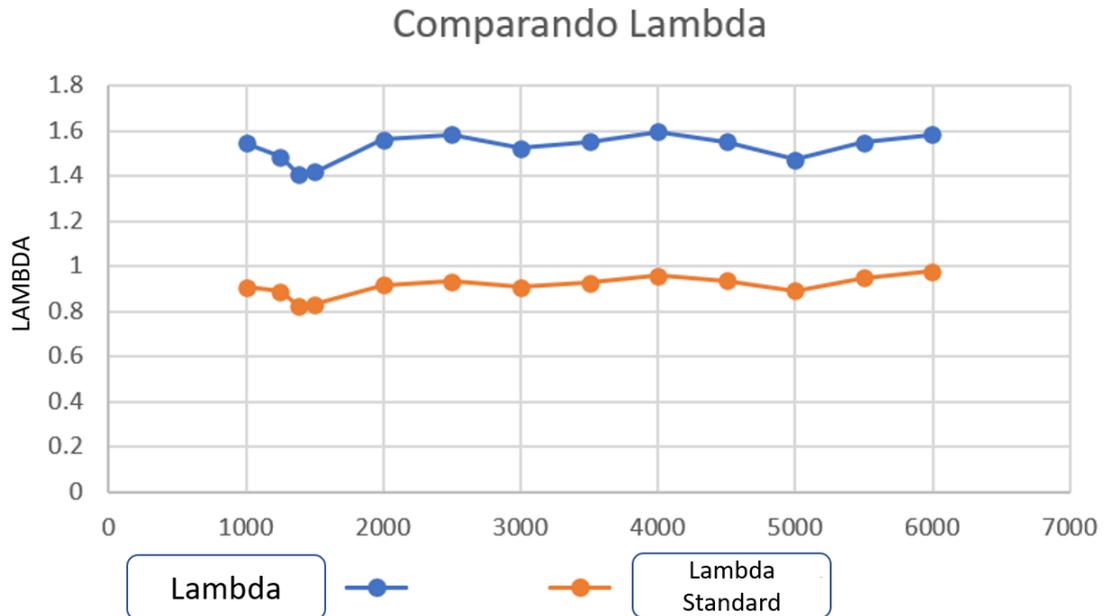
Adaptado de: Wave_2019 – Manual

Comparando as curvas de relação lambda, dos dois exemplos, temos que cada amostra performou em regiões completamente diferentes de mistura ar e combustível.

Enquanto o modelo *standard* permaneceu trabalhando com mistura levemente rica, mas sempre próxima da estequiometria, ou seja, relação lambda igual a um. O modelo modificado operou em outro extremo da relação A/C. Com uma mistura ar

combustível extremamente pobre, este modelo performou com baixa eficiência e temperatura de combustão elevada, como demonstrado nas tabela 5 e 6.

Com um sistema de injeção de combustível de maior vazão, a relação A/C melhora consideravelmente, e portanto a potência e torque do motor.



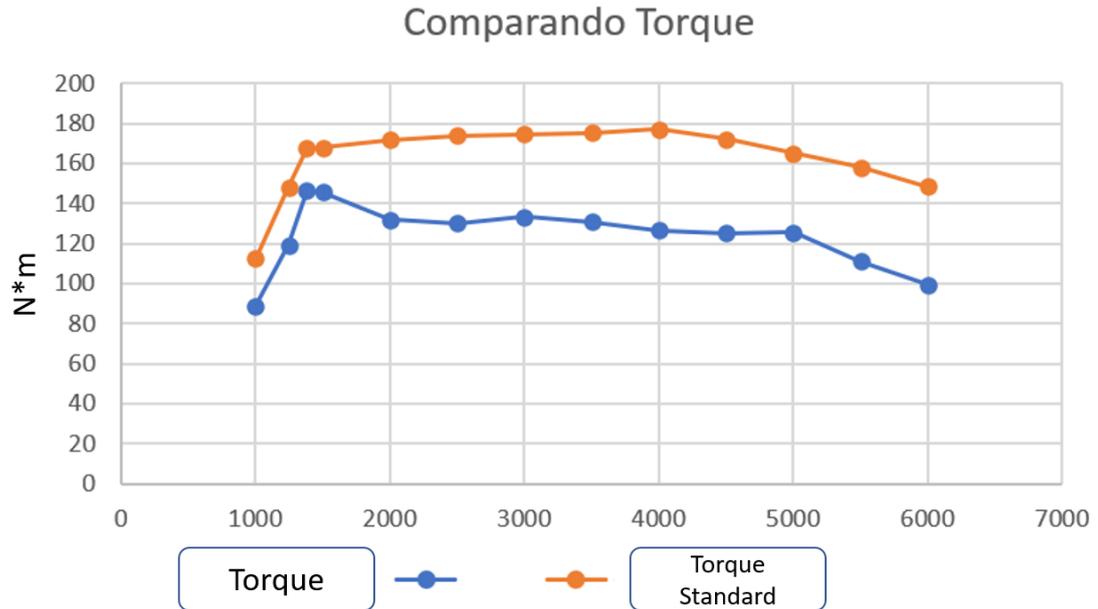
O gráfico 8 compara as curvas de lambda dos modelos analisados.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

O torque obtido nos dois motores, também sofreu com a troca do combustível e com a elevação da taxa.

Nota-se que foi preservado a característica de curva plana, porém com uma perda de 17,1% de torque em relação a 176,9 N*m a 4000 RPM na simulação *default* e 146,5 N*m a 1380 RPM na simulação modificada.

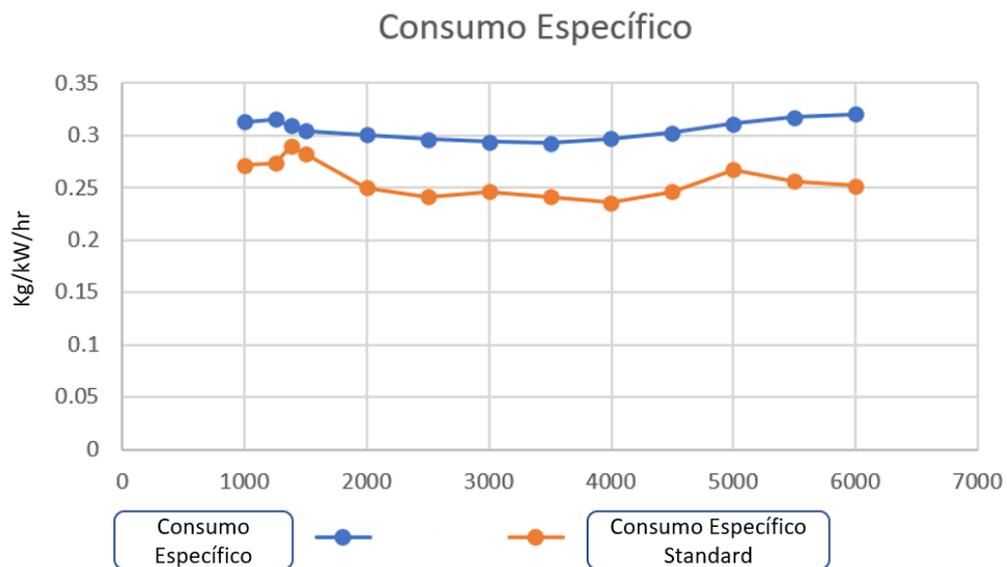
Novamente, nota-se que sem a possibilidade de manipular as peças reponsáveis por entregar o combustível e o oxigênio no cilindro, apenas altrar a taxa de compressão não é o suficiente para se montar um motor de combustão interna, que funcione em condições adequadas.



O gráfico 9 compara as curvas de torque dos modelos analisados.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Comparando o consumo específico dos dois modelos, temos novamente uma perda de eficiência. O novo modelo consome em média, cerca de 0,3061 kg/kW/hr frente ao modelo padrão que consome uma média de cerca de 0.2578 kg/kW/hr, ou seja, o novo modelo trouxe um aumento de 17,19% no consumo do motor, novamente um resultado negativo.



O gráfico 10 compara as curvas de Consumo Específico dos modelos analisados.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

Ao fim desta bateria de simulações, foi concluído que apenas uma mudança no combustível do veículo e na taxa de compressão do motor, não trazem diretamente um ganho de torque ou potência. Muito pelo contrário, o modelo sofreu com uma perda do desempenho e eficiência de cerca de 20 % para os principais parâmetros monitorados.

O software de simulação prevê o comportamento de todo o sistema de controle do motor. Essenciais para seu funcionamento estas ECUs detectam mudanças e trabalham para trazer os resultados para dentro da faixa esperada, porém há um limite para isso onde a eletrônica já não é mais capaz de atuar.

A partir desta faixa, começam estas tais perdas colocando o módulo de força em uma condição de trabalho ruim, não sendo mais possível controlar o comportamento sem grandes alterações físicas e alterações de software.

O fato do software estudantil impedir que grandes mudanças sejam realizadas, impede que melhores resultados sejam obtidos. Em um ambiente livre de impedimentos, com devidas modificações no volume da câmara de combustão, diâmetro das Válvulas de admissão e escape, injetores de maior vazão, um sistema de ignição adequado e um software de gerenciamento adequado, esperava-se que este modelo ao final dos testes alcançasse curvas de torque e potência similares ou superiores aos modelos gasolina e consumo um pouco mais elevado.

6. Apêndices

APÊNDICE A – Dados gerados durante a simulação com o modelo de motor a gasolina entre 1000 rpm e 3500 rpm

Engine speed	3499	2999	2500	2000	1499	1380	1250	1000
Case	6	7	8	9	10	11	12	13
Subcase	0	0	0	0	0	0	0	0
Case title	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13
Stoichiometric A/F	140.193	140.193	140.193	140.193	140.193	140.193	140.193	140.193
Trapped A/F	129.836	127.237	130.859	128.496	116.599	11.563	124.595	127.177
Mass Airflow	201.268	171.794	145.029	125.316	106.979	100.102	824.863	497.431
BMEP	216.876	21.604	215.346	212.637	207.994	20.717	183.331	13.91
Brake Power	642.341	548.457	455.579	359.879	264.014	241.932	193.924	117.711
BSFC	0.241305	0.246145	0.241452	0.250084	0.282181	0.289337	0.273303	0.271854
Fuel mass flow	15.5	13.5	11	900.002	744.999	699.999	5.3	320.002
Fuel volume flow	206.392	17.976	146.472	11.984	992.009	93.209	705.726	426.101
ISFC	0.223188	0.228714	0.225341	0.234397	0.265525	0.272603	0.256648	0.251347
Indicated Torque	189.482	187.885	186.46	183.33	178.621	177.689	157.762	121.577
Lambda	0.926125	0.907587	0.933424	0.916562	0.831706	0.82479	0.888739	0.907154
Brake Torque	175.255	174.58	174.019	171.83	168.078	167.412	148.148	112.406
Trapping ratio (air-only)	0.999896	0.999866	0.991318	0.915327	0.810248	0.802697	0.789144	0.811411
Trapped air volumetric efficiency	163.182	162.495	163.207	162.766	163.998	165.245	147.789	114.547
Total volumetric efficiency	163.199	162.517	164.637	177.823	202.404	205.862	187.277	141.171

A tabela 3 acima, ilustra um levantamento de dados gerados durante a simulação com gasolina.

Adaptado de.: Wave_2019 - Manual.

APÊNDICE B – Dados gerados durante a simulação com o modelo de motor a gasolina entre 4000 rpm e 6000 rpm

Engine speed	rpm	6000	5499	4999	4499	3999
Case	-	1	2	3	4	5
Subcase	-	0	0	0	0	0
Case title	-	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Stoichiometric A/F	-	140.193	140.193	140.193	140.193	140.193
Trapped A/F	-	137.117	132.765	124.894	131.078	134.409
Mass Airflow	kg/hr	322.225	309.343	288.505	262.155	235.216
BMEP	bar	183.764	195.556	204.403	212.955	21.9
Brake Power	kW	933.039	910.166	864.859	810.936	741.294
BSFC	kg/kW/hr	0.251865	0.255997	0.267095	0.246627	0.236073
Fuel mass flow	kg/hr	23.5	23.3	230.999	199.999	17.5
Fuel volume flow	L/hr	312.916	310.253	307.589	26.631	233.022
ISFC	kg/kW/hr	0.224375	0.230664	0.242658	0.225786	0.217459
Indicated Torque	N*m	166.692	175.383	181.811	187.971	192.12
Lambda	-	0.978062	0.947019	0.890875	0.934984	0.958745
Brake Torque	N*m	148.498	158.027	165.176	172.087	176.972
Trapping ratio (air-only)	-	100.002	100.001	100.001	100.001	100.001
Trapped air volumetric efficiency	-	152.415	159.624	163.758	165.334	166.887
Total volumetric efficiency	-	152.412	159.621	163.755	165.332	166.886

A tabela 4 acima, ilustra um levantamento de dados gerados durante a simulação com gasolina.

Adaptado de.: Wave_2019 - Manual.

APÊNDICE C – Dados gerados durante a simulação com o modelo de motor a etanol entre 1000 rpm e 3500 rpm

Engine speed	3499	2999	2500	2000	1500	1379	1250	999
Case	6	7	8	9	10	11	12	13
Subcase	0	0	0	0	0	0	0	0
Case title	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13
Stoichiometric A/F	89.463	89.463	89.463	89.463	89.463	89.463	89.463	89.463
Trapped A/F	138.762	136.186	141.571	139.777	126.945	126.002	132.965	138.275
Mass Airflow	215.097	183.872	156.727	134.624	113.645	106.285	848.996	52.073
BMEP	163.257	166.505	162.269	164.753	181.589	182.856	148.833	110.929
Brake Power	47.965	419.307	340.533	276.597	228.646	211.822	156.168	931.173
BSFC	0.323153	0.321959	0.323024	0.325384	0.32583	0.330465	0.339379	0.343654
Fuel mass flow	15.5	13.5	11	900.003	744.999	699.998	530.002	320.001
Fuel volume flow	196.359	171.022	139.352	114.015	943.789	88.678	671.424	405.388
ISFC	0.292921	0.294123	0.296316	0.300691	0.304484	0.309429	0.315349	0.313251
Indicated Torque	144.373	146.102	141.798	142.911	155.766	156.542	128.395	975.511
Lambda	155.105	152.226	158.245	15.624	141.897	140.842	148.626	154.561
Brake Torque	130.867	133.47	130.074	132.066	145.561	146.577	119.304	889.209
Trapping ratio (air-only)	0.999934	0.999887	0.992666	0.926807	0.830738	0.824646	0.819822	0.841264
Trapped air volumetric efficiency	17.576	175.279	177.987	178.429	180.015	181.654	159.257	125.294
Total volumetric efficiency	175.772	175.299	179.302	19.252	216.692	220.281	194.258	148.935

A tabela 5 acima, ilustra um levantamento de dados gerados durante a simulação com etanol.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

APÊNDICE D – Dados gerados durante a simulação com o modelo de motor a etanol entre 4000 rpm e 6000 rpm

Engine speed	rpm	6000	5499	5000	4500	3999
Case	-	1	2	3	4	5
Subcase	-	0	0	0	0	0
Case title	-	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Stoichiometric A/F	-	89.463	89.463	89.463	89.463	89.463
Trapped A/F	-	141.658	138.617	131.736	13.884	142.829
Mass Airflow	kg/hr	332.897	322.979	304.31	277.679	249.951
BMEP	bar	123.914	138.455	156.834	15.609	157.795
Brake Power	kW	624.103	639.227	658.254	589.617	52.983
BSFC	kg/kW/hr	0.376541	0.364503	0.350928	0.339203	0.330294
Fuel mass flow	kg/hr	23.5	23.3	23.1	20	17.5
Fuel volume flow	L/hr	297.706	295.172	292.638	253.367	221.695
ISFC	kg/kW/hr	0.32073	0.317202	0.31131	0.302631	0.296708
Indicated Torque	N*m	116.614	127.536	141.717	140.242	140.806
Lambda	-	158.343	154.944	147.251	155.192	159.651
Brake Torque	N*m	993.294	110.985	125.718	125.121	126.488
Trapping ratio (air-only)	-	100.003	100.002	100.002	100.002	100.001
Trapped air volumetric efficiency	-	158.691	167.959	174.075	176.491	178.724
Total volumetric efficiency	-	158.687	167.956	174.072	176.488	178.722

A tabela 6 acima, ilustra um levantamento de dados gerados durante a simulação com etanol.

Adaptado de: Wave_2019 - Manual.

7. REFERÊNCIAS

FUELTECH. Injeções Eletrônicas Programáveis FuelTech, 2020. Blog. Disponível em: <<https://fueltech.com.br/pages/sistemas-de-ignicao-para-motores-de-alto-desempenho-%E2%9A%A1>>.

Acesso em 19 de nov. de 2021.

MAHLE. Curso MAHLE Metal Leve Motores de Combustão Interna. **MAHLE** Metal Leve S.A. novembro de 2021.

JENNIFER ROCHA VARGAS FOGAÇA, gasolina. Manual da química. Disponível em: Acesso em: 23 nov de 2021 14:30

GOV.BR MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, etanol. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 23 nov de 2021 14:00

MUNDO EDUCAÇÃO UOL, óleo diesel. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/oleo-diesel.htm>>. Acesso em: 26 nov de 2021 16:00

BRASIL ESCOLA UOL, gnv, Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/gnv.htm>
Acesso em: 26 nov de 2021 17:56

GAZETA POVO, a evolução dos motores. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/conteudo-publicitario/motorbull/a-evolucao-dos-motores-automotivos-ao-longo-dos-Anos/>>. Acesso em: 28 nov de 2021 17:13

KBB, comando variável de válvulas – o que é e como funciona? 09 Ago 2018
Disponível em: <https://www.kbb.com.br/detalhes-noticia/comando-variavel-valvulas-como-funciona/>
Acesso em: 28 nov de 2021 17:51

TSUYOSHI GOTO, KOICHI HATAMURA, SHINOBU TAKIZAWA, NOBUHIRO HAYAMA, e HIROSHI ABE. Development of V6 Miller Cycle Gasoline Engine. Hiroshi Kanesaka, Kanesaka Technical Institute Ltd. Mazda Motor Corp. 28 de Fevereiro à 3 de Março de 1994, Acessado em: 07 Maio 2022

TheOtto-AtkinsonCycleEngine-

FuelEconomyAndEmissionsResultsAndHardwareDesign, Acessado em: 07 Maio 2022

FROM THE MARCH ISSUE. North and South America, as well as Asia, are strong markets for ethanol. Acessado em : 01 Nov 2022

MIT, The Internal combustion engine (Otto Cycle), Disponível em:

<https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node26.html>

Acesso em: 5 jun de 2023 19:05

EPA -United States Environment Protection Agency, Definition of Fuel, Disponível em:

<https://www.epa.gov/rmp/definition-fuel>

Acesso em: 6 jun de 2023 19:15

RAÍZEN, Etanol: entenda o que é, para que serve e como é usado no Brasil!,

Disponível em:

<https://www.raizen.com.br/blog/etanol>

Acesso em: 6 jun de 2023 19:18

MOBIL, Superchargers Vs. Turbochargers – How they work? Disponível em:

<https://www.mobil.com/en/sap/our-products/why-mobil/driving-performance-and-protection/turbochargers-vs-superchargers-how-they-work>

Acesso em: 6 jun de 2023 19:22

SAE international, Stoichiometric Air-Fuel Ratios of Automotive Fuels, Disponível em:

https://www.sae.org/standards/content/j1829_201503/

Acesso em: 6 jun de 2023 19:41

CNPEM, Etanol brasileiro polui menos do que se pensava, diz estudo, Disponível em: <https://cnpem.br/etanol-brasileiro-polui-menos-do-que-se-pensava-diz-estudo/>

Acesso em: 6 jun de 2023 19:45

CONSÓRCIO EMBRACON, Como funcionam os carros Flex e quais são as suas vantagens?, Disponível em:

<https://www.embracon.com.br/blog/como-funcionam-os-carros-flex-e-quais-sao-as-suas-vantagens>

Acesso em: 6 jun de 2023 19:59

MOBI AUTO, Carro flex 20 anos: ele moldou o Brasil e será pedra no sapato dos elétricos, Disponível em: <https://www.mobiauto.com.br/revista/carro-flex-20-anos-ele-moldou-o-brasil-e-sera-pedra-no-sapato-dos-eletricos/2756>

Acesso em 9 jun de 2023 18:05

ENCONTRO, Lançado em 1979, Fiat 147 completa 40 anos, Disponível em:

<https://www.revistaencontro.com.br/canal/veiculos/2019/07/lancado-em-1979-fiat-147-completa-40-anos.html>

Acesso em 9 jun de 2032 28:07