

**CENTRO PAULA SOUZA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecânica Automobilística**

**Renata Behaker
Thainá de Oliveira dos Santos**

**Otimização do Hardware com implementação de combustível
E35 em motores flex**

**Santo André - SP
2023**

Renata Behaker
Thainá de Oliveira dos Santos

**Otimização do Hardware com implementação de combustível
E35 em motores flex**

Monografia apresentada ao Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística da FATEC Santo André como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecânica Automobilística.

Orientador: Prof. MSc. Adriano Ribolla

Santo André – SP
2023

B419o

Behaker, Renata

Otimização do hardware com implementação de combustível E35 em motores flex / Renata Behaker, Thaina de Oliveira dos Santos. - Santo André, 2023. – 70f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2023.

Orientador: Prof. MSc. Adriano Ribolla

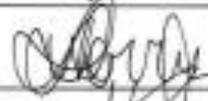
1. Mecânica. 2. Veículos elétricos. 3. Motores a combustão. 4. Etanol anidro. 5. Tecnologia. 6. Desempenho. 7. Combustível E35. 8. Emissões. 9. Flex fuel. 10. Estudo. I. Santos, Thaina de Oliveira dos. II. Otimização do hardware com implementação de combustível E35 em motores flex.

629.2

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 12 DE JUNHO DE 2023

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: "OTIMIZAÇÃO DO HARDWARE COM IMPLEMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL E35 EM MOTORES FLEX" DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCAPRESIDENTE:
PROF. ADRIANO RIBOLLAMEMBROS:
PROF. WESLEY MEDEIROS TORRES

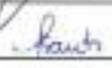
PROF. FERNANDO GARUP DALBO

**ALUNOS:**

RENATA BEHAKER



THAINÁ DE OLIVEIRA DOS SANTOS



DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho à nossa família, que nos acompanhou nessa trajetória, e a todos os professores do curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística da Faculdade de Tecnologia de Santo André, a quem somos gratos por tanto conhecimento e aprendizado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, por nos proporcionar essa conquista importante em nossas vidas acadêmicas.

Ao Sr. Marcus Fraga, Arthur de Oliveira dos Santos e Davi de Oliveira dos Santos, por todo apoio e incentivo nessa jornada.

A Sra. Regina Caires, por proporcionar momentos de aprendizado e desenvolvimento profissional e pessoal combinados nos momentos de trabalho.

Em especial, agradecemos ao Professor Adriano Ribolla, por estar conosco incessantemente, prestando todas as ajudas necessárias para a conclusão, não só deste trabalho, mas do nosso ciclo como estudantes na Fatec Santo André.

“Todas as vezes em que a sorte me procurou, ela me encontrou trabalhando.”

(Pablo Picasso)

RESUMO

Emissões e eficiência energética são os pontos que hoje são questionáveis nos motores a combustão interna, por isso cada dia mais se aproxima a implementação dos veículos elétricos. Partindo dessa realidade, como alternativa para a continuação dos motores a combustão *flex fuel*, o estudo foi elaborado com base em referências bibliográficas sobre adição de etanol anidro na composição da gasolina C e tendências mundiais sobre a produção de etanol. O objetivo é analisar a adição de etanol anidro compondo um combustível E35, propondo assim apresentar reflexões e análises sobre as vantagens dessa alteração em quesitos como desempenho do motor e emissões. Com essas análises entendemos que para conseguirmos otimizar o motor *flex fuel* visando obter valores de autonomia e emissões mais atrativas, não somente a alteração do combustível é necessária, bem como também é fundamental a execução de simulações para adequação dos valores de taxa de compressão e avanço de ignição, listando como um próximo passo.

Palavras chaves: Motor a combustão. Flex fuel. Etanol anidro. Desempenho. Emissões.

ABSTRACT

Emissions and energy efficiency are the today questionable points regarding internal combustion engines, that explain why the implementation of electric vehicles is getting closer every day. Based on this reality, as an alternative to the continuation of flex fuel combustion engines, the study was prepared based on bibliographic references on the addition of anhydrous ethanol in the composition of C gasoline and world trends on ethanol production. The objective is to analyze the addition of anhydrous ethanol composing an E35 fuel, thus proposing to present reflections and analyzes on the advantages of this change in issues such as engine performance and emissions. With these analyses, we understand that in order to be able to optimize the flex fuel engine, seeking for more attractive autonomy and emissions values, not only is it necessary to change the fuel, but it is also essential to run simulations to comply with the fuel effective rate values and ignition advance. combustion, listing as a next step.

Keywords: Combustion engine. Flex fuel. Anhydrous ethanol. Performance. Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Demonstração dos volumes presentes na câmara de combustão	14
Figura 02 - Pistão Gasolina	16
Figura 03 - Pistão etanol.....	16
Figura 04 - Pistão flex.....	17
Figura 05 - Demonstração da relação entre o diâmetro do cilindro e o curso do pistão	18
Figura 06 - Relação do diâmetro do cilindro e do curso do pistão nos motores superquadrados.....	19
Figura 07 - Relação do diâmetro do cilindro e o curso do pistão nos motores subquadrados	20
Figura 08 - Representação da posição do virabrequim	23
Figura 09 - Representação da fase de admissão	25
Figura 10 - Representação da fase de compressão	26
Figura 11 - Representação da fase de expansão	27
Figura 12 - Representação da fase de exaustão	28
Figura 13 - Avanço de Ignição em -15° APMS.....	29
Figura 14 - Sistema de refrigeração <i>intercooler</i>	30
Figura 15 - Interior de um <i>watercooler</i>	31
Figura 16 - Modelo de <i>watercooler</i>	31
Figura 17 - Aplicação de sistema de refrigeração <i>icecooler</i>	32
Figura 18 - Esquema de destilação atmosférica do petróleo	33
Figura 19 - Grupo funcional aldeído.....	42
Figura 20 - Catalisador Veicular	43
Figura 21 - Comparação de emissões com misturas de etanol X gasolina	50
Figura 22 - Variação climática no Brasil.....	53
Figura 23 - Interface GT-POWER.....	56
Figura 24 - Interface AMESIM	57

LISTA DE TABELA

Tabela 01 - Comparativo de calorias de combustíveis	21
Tabela 02 - Energia calorífica dos combustíveis	48
Tabela 03 - Propriedades físicas dos combustíveis utilizados	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APMS	Antes Do Ponto Morto Superior
DPMS	Depois Do Ponto Morto Superior
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HV	<i>Heating Value</i>
HHV	<i>Higher Heating Value</i>
IAD	Índice Antidetonante
KCAL	Quilocaloria
KJ	Quilojoule
KM	Quilômetro
LHV	<i>Lower Heating Value</i>
M	Metro
MM	Milímetro
MON	<i>Motor Octane Number</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMQC	Programa de Monitoramento da Qualidade de Combustíveis
PMS	Ponto Morto Superior
RON	<i>Research Octane Number</i>
RPM	Rotação Por Minuto
TBI	<i>Throttle Body Injection</i>
°C	Grau Célsius

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01.....	14
Equação 02.....	15
Equação 03.....	15
Equação 04.....	25
Equação 05.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo	11
1.2 Motivação	12
1.3 Estrutura	12
2 PARÂMETROS DE IGNIÇÃO DO MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA ..	13
2.1 Taxa de compressão	13
2.1.1 Geometria da câmara de combustão para gasolina, álcool e flex	15
2.1.2 <i>Bore Stroke Ratio</i>	17
2.1.3 Poder calorífico do combustível.....	20
2.2 Avanço de Ignição do Motor a Combustão	21
2.2.1 Detonação e Pré – ignição.....	24
2.3 Ciclos do motor a combustão interna.....	24
2.3.1 Admissão (Isobárica)	24
2.3.2 Compressão (adiabática).....	26
2.3.3 Expansão (Adiabática).....	26
2.3.4 Cedência de massa (isocórica) final do ciclo Otto.....	27
2.3.5 Exaustão (Isobárica).....	27
2.4 Controle do Sistema de Ignição	28
2.5 Temperatura do ar de admissão	29
2.5.1 <i>Intercooler</i>	30
2.5.2 <i>Watercooler</i>	30
2.5.3 <i>Icecooler</i>	31
3 COMBUSTÍVEIS	33
3.1 Propriedades de combustíveis líquidos	34
3.2 Gasolina natural.....	35
3.3 Etanol.....	36

3.3.1 Etanol da Cana-de-açúcar.....	37
3.3.2 Etanol de Milho.....	38
3.3.2.1 Apoio a produtores no plantio de milho para produção de etanol.....	41
3.3.3 Vantagens do etanol:.....	41
3.3.4 Desvantagens da adição de etanol anidro à gasolina	41
3.4 Aldeídos.....	42
3.4.1 Aplicação dos aldeídos.....	42
4 IMPORTÂNCIA DO ETANOL ANIDRO NA COMPOSIÇÃO DA GASOLINA.....	44
4.1 Índice Anti Detonante.....	44
4.1.1 Aditivos.....	45
4.1.2 Métodos de determinação do número de octano	46
4.1.3 Valores típicos de octanagem no combustível brasileiro	46
4.2 Valor de aquecimento do combustível	47
5 AUMENTO DA PORCENTAGEM DE ETANOL ANIDRO NA GASOLINA C.....	49
6 PROPOSTAS FUTURAS	55
7 CONCLUSÃO	59
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil é um dos poucos países no mundo que utiliza gasolina com um percentual elevado de etanol anidro em sua mistura. No ano 2000, esse percentual girava em torno de 20%. Com o lançamento da tecnologia flex, em 2003, o percentual obrigatório de etanol na composição da gasolina nas bombas de combustíveis subiu para 25%. Nos dias de hoje, esse percentual gira em torno de 27%. Embora os motores flex ocupem boa parte da nossa frota, mesmo que essa tecnologia não consiga uma performance 100% eficiente quando falamos em consumo e desempenho, ainda assim a mesma é predominante nos projetos novos e em carros 0Km. Essa inovação tem como princípio proporcionar uma liberdade ao cliente na escolha do combustível que mais atenda a sua necessidade naquele momento do abastecimento. O avanço da tecnologia proporcionou que os motores apresentassem uma evolução em taxa de compressão e calibração, enquanto o combustível não acompanhou o mesmo progresso, tornando-se menos eficiente para atender a demanda dos novos veículos fabricados. A ideia então apresentada seria combinar a otimização do Hardware e a implementação de combustível E35, como evolução da gasolina convencional E27, provando que com o aumento de etanol anidro na composição da gasolina podemos atingir melhores valores de consumo, desempenho e até melhorando níveis de emissões de gases poluentes (CO_2 , $NMOG + NOx$).

1.1 Objetivo

O etanol é considerado um combustível frio com características antidetonantes, diferentemente da gasolina. Com o acréscimo de etanol na gasolina, o combustível tem um comportamento mais resistente a detonação, desta forma permitindo maiores taxas de compressão antes de se iniciar a combustão. Esse fator é muito importante para entendermos a ligação entre o desempenho do combustível versus a taxa de compressão do motor, visto que quanto maior a taxa de compressão, significa que o combustível será mais comprimido. Adotando uma porcentagem de 35% de etanol anidro na gasolina, possibilitamos que a gasolina comum se torne menos detonante, e dessa forma aproveitando melhor a taxa de compressão do motor em questão de desempenho de combustão, resultando na potência gerada. Então, com o uso de

combustível E35, a calibração do motor deve ser refinada especialmente o avanço de ignição quando o combustível escolhido para uso for a gasolina, possibilitando otimização do hardware com aumento da taxa de compressão para que o consumo de etanol seja melhorado.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho é estudar os possíveis ganhos com o aumento de etanol anidro na gasolina e apontar os próximos passos referentes à calibração de motores para que, em conjunto, seja possível uma otimização dos motores flex, tornando-os mais eficientes e mais atraentes nos cenários ambientais.

1.2 Motivação

A evolução dos motores a combustão flex contam com tecnologias que possibilitaram o aumento de taxa de compressão, porém carecem da inovação do combustível comercializado, ainda não acompanhando as inovações do hardware para atingir níveis de consumo e desempenho almejados. O estudo proposto irá analisar o comportamento do combustível E35 e as possíveis calibrações de motores flex com esse cenário. Independente da determinação de uma nova taxa, é esperado que se use este trabalho posteriormente para estudos de melhorias ou desenvolvimento do produto viabilizando a continuação de motores á combustão.

1.3 Estrutura

Este trabalho abordará os seguintes tópicos:

- Taxa de compressão e avanço de ignição;
- Evolução dos combustíveis e cenário atual;
- Utilização etanol mundial, procedência do etanol do mundo, questões de combustível renovável/reciclável (biocombustível).
- Exposição das possibilidades levantadas;
- Exposição das mudanças para atender a mudança de combustível proposta;
- Propostas de estudos para implementação;
- Conclusões obtida

2 PARÂMETROS DE IGNIÇÃO DO MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA

Nos motores a combustão interna ciclo Otto a queima do combustível ocorre por meio de uma centelha, onde a vela de ignição libera esta centelha que, em contato com o combustível e comburente, ocasiona a combustão do mesmo. Para que isso ocorra no melhor tempo do sistema é necessário que dois parâmetros estejam corretamente ajustados de acordo com as características detonantes do combustível usado e a geometria da câmara de combustão. A taxa de compressão do motor é um dos parâmetros que conversa diretamente com a característica geométrica do hardware, e é um dos responsáveis por determinar o ponto de avanço de ignição, que por sua vez é o parâmetro que analisamos para saber se a combustão está sendo feita no melhor tempo para o rendimento do sistema.

2.1 Taxa de compressão

Podemos definir a taxa de compressão como um valor numérico que representa a razão do volume do cilindro e o volume da câmara de combustão do cabeçote, ou então a razão do volume quando o pistão do motor está em ponto morto inferior (PMI) e o volume da câmara de combustão da cabeça do cilindro quando o pistão está em ponto morto superior (PMS). Em outras palavras, a taxa de compressão é o espaço total que o combustível injetado terá para ser comprimido, e essa relação de razão de volumes é o valor da taxa. Por exemplo, quanto o volume em situação de PMI é 10 vezes maior que o volume em PMS, a taxa de compressão é dada como 10:1.

Quando falamos em taxa de compressão precisamos entender todas as variáveis que a fazem acontecer de formas específicas para cada configuração de motor e tipo de combustível usado originalmente. Por exemplo, quando temos um motor de combustão interna à gasolina, por conta de suas características e poder calorífico, temos diferentes geometrias, ponto de combustão do combustível e diferentes temperaturas alcançadas quando comparado com um motor de combustão interna à álcool.

Existem dois tipos de taxa de compressão: estática e dinâmica. A taxa de compressão estática é a relação do volume admitido pelo motor pelo volume comprimido, dada pela Equação 01:

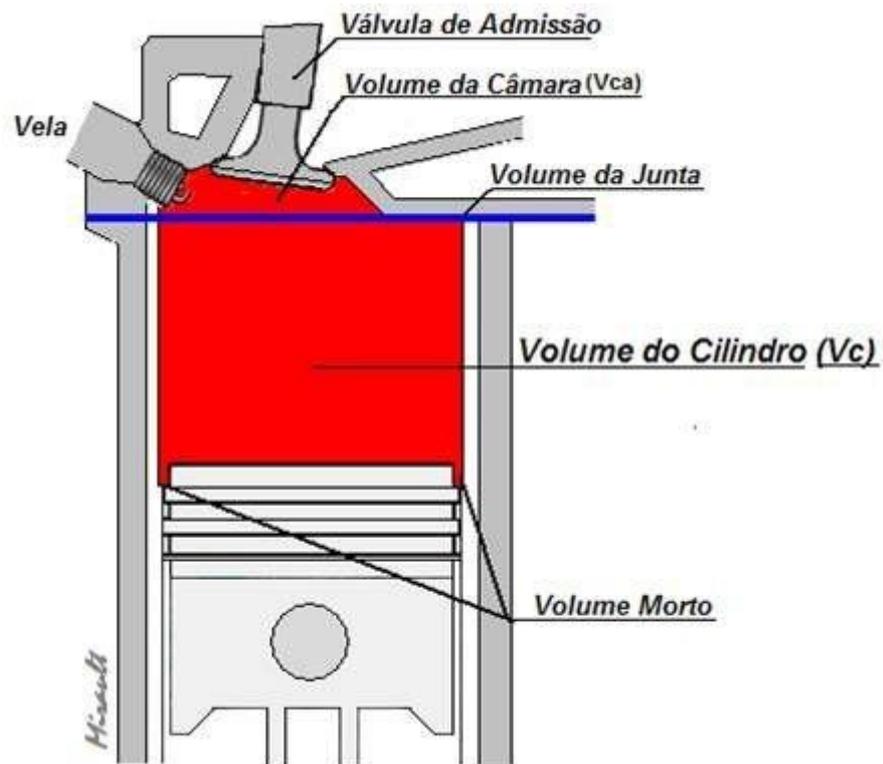
$$TC_{EST} = \frac{Vol.ADM}{Vol.Comp} \quad (01)$$

Onde:

- TC_{EST} = Taxa de Compressão Estática
- Volume admitido (Vol. ADM): é somatório do volume do cilindro, volume da altura da junta e o volume da câmara.
- Volume comprimido (Vol. Comp): é o somatório do volume da câmara com o volume da altura da junta.

Na Figura 01, podemos observar os volumes citados.

Figura 01 - Demonstração dos volumes presentes na câmara de combustão



Fonte: <https://www.fteducation.com.br/blog/taxa-de-compresso-vs-presto-de-compresso-parte-1>

A taxa de compressão dinâmica é influenciada pela eficiência volumétrica do motor em cada regime.

De acordo com o tipo de motor (turbo ou naturalmente aspirado) é possível simular a condição de taxa dinâmica desse motor através das equações logo abaixo. Em casos de motores naturalmente aspirado, é necessário conhecer a eficiência volumétrica (η_v) do mesmo, conforme Equação 02.

$$TC_{DIN}TC_{din} = \eta_v * TC_{EST}. \quad (02)$$

Sendo:

TC_{DIN} = Taxa de compressão dinâmica

η_v = Eficiência energética

Onde η_v é dada pela Equação 03:

$$\eta_v = \frac{Vol.Real.Admitido}{Vol.Cil.} \quad (03)$$

Sendo:

Vol.Real.Admitido = Volume real admitido

Vol.Cil. = Volume do cilindro

A taxa de compressão estática e dinâmica são parâmetros que influenciam diretamente na curva de avanço por rpm, porque motores com maior taxa estática geram mais turbulência e aquecimento da mistura o que acelera o avanço da frente de chama. Taxa dinâmica mais alta ou mais baixa influencia o resultado de torque do motor, requerendo uma mudança no ângulo de ignição a ser aplicado.

2.1.1 Geometria da câmara de combustão para gasolina, álcool e flex

Para definir a taxa de compressão, precisamos considerar diâmetro do pistão, medida do cabeçote e curso de virabrequim.

A geometria do pistão é diferente para cada tipo de combustível. Para gasolina, usa-se pistão côncavo, possui cavidade na parte de cima, conforme Figura 02.

Figura 02 - Pistão Gasolina



Fonte: 3CAutomotive (2014)

Para álcool é usado pistão de cabeça reta, que não possui cavidade, conforme Figura 03.

Figura 03 - Pistão etanol



Fonte: 3CAutomotive (2014)

Os motores flex usam um pistão com côncavo intermediário, possui uma cavidade na parte de cima de menor volume do que o pistão á gasolina, conforme Figura 04, para atender a ambos combustíveis.

Figura 04 - Pistão flex



Fonte: 3CAutomotive (2014)

Os cabeçotes também variam seu volume de combustão. Para gasolina, a cavidade é levemente maior que dos cabeçotes para queima de etanol.

Todas essas medidas entram no cálculo da taxa de compressão, visto que quanto mais volume de compressão disponível, menos o combustível será comprimido, tendo sua taxa menor. No caso do motor a álcool, que possui cavidades menores, tende a comprimir mais o combustível para que ocorra a queima, por isso a taxa dos motores a álcool é maior que a dos motores a gasolina.

Os motores flex tentam alcançar uma média entre os dois mundos. As cavidades são intermediárias, gerando uma taxa de compressão também intermediária que pode queimar tanto o E27 gasolina comum, o E100 etanol, e também misturas entre eles. A desvantagem, é que por não ser específico nem para um, nem para outro, o processo não gera o melhor desempenho e consumo em nenhum dos dois casos.

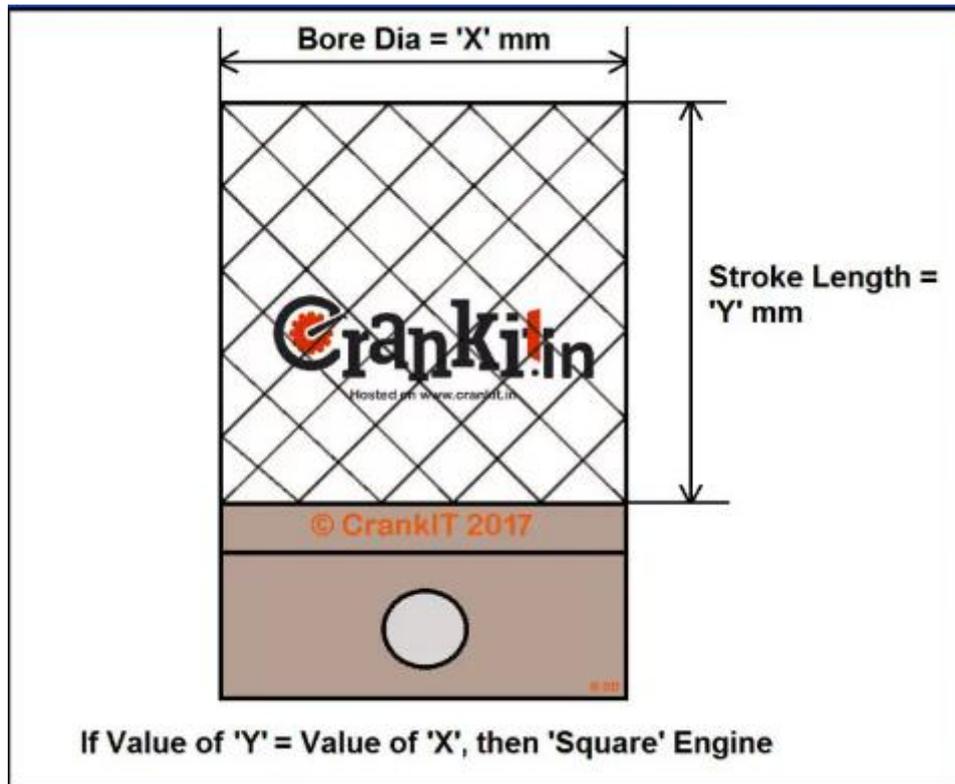
2.1.2 Bore Stroke Ratio

Bore Stroke Ratio é a razão das dimensões do diâmetro do cilindro do motor e do comprimento do curso do pistão, ponto importante para definir potência e torque

do motor. Os motores são classificados em 3 tipos: quadrado, superquadrado e subquadrado.

A configuração quadrada é quando o diâmetro do cilindro é quase igual ao curso do pistão, tendo um Bore Stroke Ratio próximo de 1:1, conforme Figura 05.

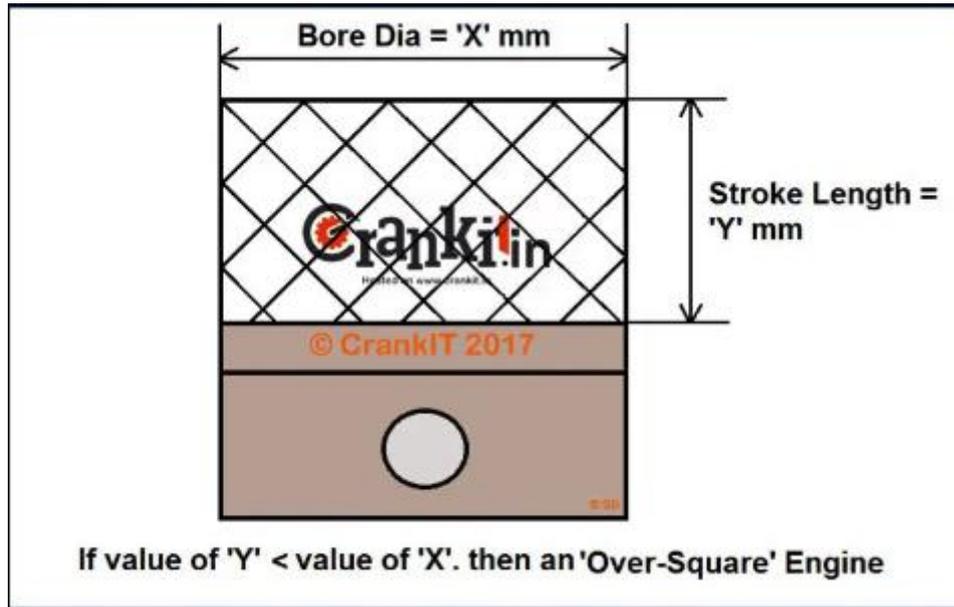
Figura 05 - Demonstração da relação entre o diâmetro do cilindro e o curso do pistão



Fonte: <https://carbiketech.com/bore-stroke-ratio-theory/>

Nos motores de configuração superquadrada, o diâmetro do cilindro é maior que o curso do pistão. Geralmente, nessa configuração, os motores tendem a desenvolver maiores velocidades. Dessa forma, o *Bore Stroke Ratio* dos super quadrados é superior a 1:1. Por exemplo, se o diâmetro do cilindro é de 83mm e o curso do pistão é 67mm, a razão será de 1,23 : 1 (CARBIKETECH, 2017). A Figura 06 ilustra as características dos motores super quadrados.

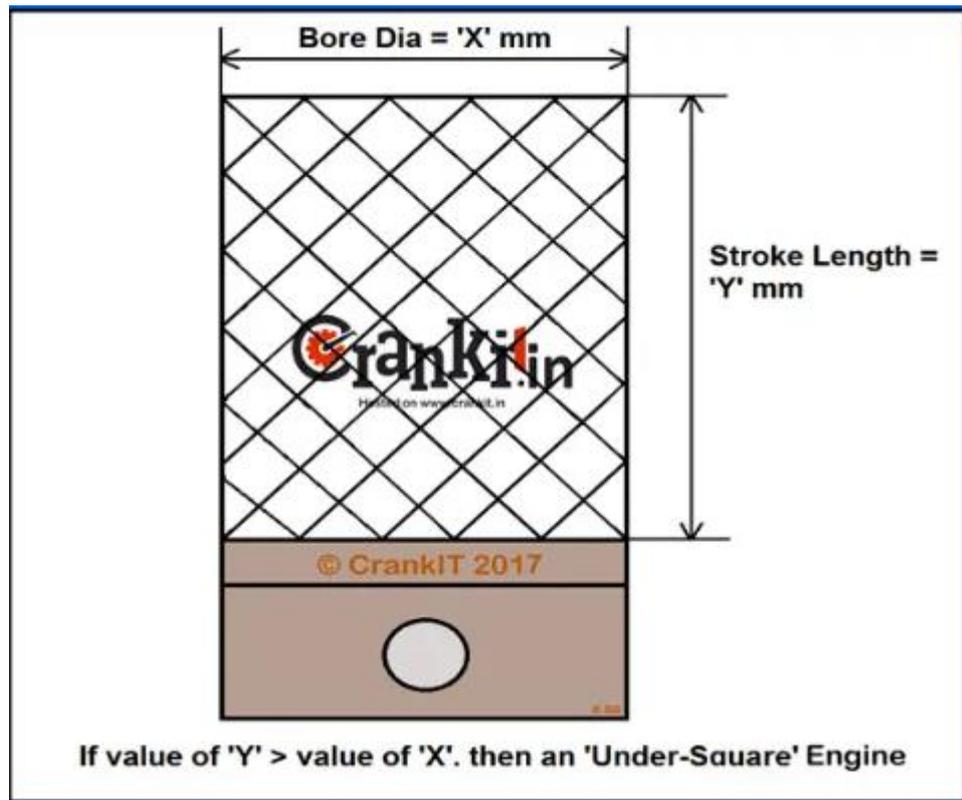
Figura 06 - Relação do diâmetro do cilindro e do curso do pistão nos motores superquadrados



Fonte: <https://carbiketech.com/bore-stroke-ratio-theory/>

A configuração de subquadrado é o inverso da superquadrada, sendo menor o diâmetro do cilindro em relação ao curso do pistão. Por exemplo, se a medida do cilindro for de 70mm e o curso do pistão de 83mm, o *Bore Stroke Ratio* desse motor será 0,84 : 1. Essa configuração traz maiores valores de torque para o desempenho do motor (CARBIKETECH, 2017). A Figura 07 ilustra a situação dessa configuração.

Figura 07 - Relação do diâmetro do cilindro e o curso do pistão nos motores subquadrados



Fonte: <https://carbiketech.com/bore-stroke-ratio-theory/>

Devido cada geometria ter seus benefícios em questão de potência (velocidade) e torque (força), cada projeto tem sua classificação específica para atingir os objetivos idealizados conseguindo, dessa forma, atender melhor as necessidades de cada veículo.

2.1.3 Poder calorífico do combustível

O poder calorífico é definido pela energia dissipada pelo combustível em forma de calor, que pode ser medido com o uso de uma bomba calorimétrica. Quanto maior o poder calorífico do combustível, maior o potencial de auto combustão do mesmo.

Na Tabela 01, podemos comparar o poder calorífico de alguns combustíveis em KJ ou Kcal.

Tabela 01 - Comparativo de calorias de combustíveis

<i>Combustível</i>	<i>Energia térmica liberada na combustão de 1,0 kg de combustível</i>	
	<i>Em kJ · kg⁻¹</i>	<i>Em kcal · kg⁻¹</i>
<i>Gás de cozinha (GLP)</i>	<i>49 030</i>	<i>11 730</i>
<i>Gasolina (sem álcool)</i>	<i>46 900</i>	<i>11 220</i>
<i>Gasolina (com 20% de álcool)</i>	<i>40 546</i>	<i>9 700</i>
<i>Óleo diesel</i>	<i>44 851</i>	<i>10 730</i>
<i>Carvão</i>	<i>28 424</i>	<i>6 800</i>
<i>Lenha</i>	<i>10 550</i>	<i>2 524</i>
<i>Etanol</i>	<i>29 636</i>	<i>7 090</i>
<i>Álcool combustível</i>	<i>27 200</i>	<i>6 507</i>
<i>Biogás</i>	<i>25 000</i>	<i>6 000</i>
<i>Gás natural</i>	<i>37 800</i>	<i>9 054</i>

Fonte: <https://brainly.com.br/tarefa/26575895>

A gasolina pura dissipa mais energia térmica em sua combustão que a gasolina com 20% de etanol em sua composição. Isso se dá pela característica do etanol ser um combustível com menor poder calorífico, ou seja, dissipa menos energia na sua queima. Dessa forma, a gasolina com aumento de etanol em sua composição se torna cada vez mais difícil de entrar em auto combustão, possibilitando que se comprima mais antes da queima (FRANCESQUETT, 2013).

Com isso, enxergamos o por que as taxas de compressão dos motores a álcool são maiores do que as taxas de compressão do motor a gasolina.

2.2 Avanço de Ignição do Motor a Combustão

Para entender melhor de avanço de ignição é necessário saber os parâmetros que podem influenciar no resultado da combustão, para que ela possa ser eficiente, rápida e completa.

- Regime do motor;
- Taxa de compressão (estática e dinâmica);
- Tipo de combustível;

- Relação ar/combustível e formação da mistura;
- Desenho da câmara de combustão e fenômenos que aumentam sua turbulência;
- Temperatura do motor e do ar admitido;
- Grau térmico, posição, ignibilidade da vela de ignição, potência e corrente do sistema de ignição.

A centelha, ou arco elétrico, que ocorre entre os eletrodos da vela de ignição é o evento que determina o início de uma reação química chamada combustão entre 3 elementos: Ar, combustível e fonte de calor (agente ignitor). O arco elétrico de alta tensão que ocorre entre os eletrodos da vela de ignição deve superar o valor da rigidez dielétrica que pode ser influenciado por vários aspectos. Após gerado o arco elétrico ocorre uma ionização das moléculas de combustível e ar existentes entre os terminais dos eletrodos da vela de ignição. Segundo SILVA (FTEDUCATION, 2021), os dois principais fenômenos para a propagação da frente de chama na câmara de combustão são: a reação química (oxidação do combustível) e o fenômeno de transferência de calor que pode ser chamado de frente de chama.

O ponto de ignição de um motor é o momento em que a centelha é acionada. De início é importante entender que não existe um único acerto para ponto de ignição para todos os motores, sendo cada motor projetado com suas variáveis específicas.

Essas variáveis pré definidas no projeto do motor que irão influenciar na velocidade do avanço da frente de chama durante a combustão. O objetivo principal do ponto de ignição é fazer com que a ignição na vela ocorra no exato momento em que toda a energia da combustão será utilizada para empurrar o pistão para baixo, no sentido correto.

Ainda segundo SILVA (2021), se a ignição ocorrer antes, a mistura ar-combustível irá queimar antecipadamente e desprender essa energia em um momento em que o pistão ainda está subindo, isso irá gerar um contra trabalho freando o pistão ao invés de impulsioná-lo. O mesmo ocorre se a mistura por algum motivo queimar mais rápido, irá causar efeito semelhante ao do ponto adiantado.

O ponto de ignição está atrasado quando a ignição é tardia e acaba não gerando pressão necessária no cilindro para o torque máximo, onde o pistão já está em uma posição após ponto morto superior que direciona a expansão para o escape.

SILVA (2021), estipula que a combustão deve gerar seu pico de pressão cerca de 13° a 15° depois de ponto morto superior (DPMS) para gerar torque máximo e para isso ocorrer temos que iniciar a reação no momento certo. Na Figura 08 é representado a posição do virabrequim em 16° APMS, um avanço de ignição de 24° .

Figura 08 - Representação da posição do virabrequim



Fonte: <https://www.fteducation.com.br/blog/pontodeignicao>

O avanço do ponto de ignição promove uma variação crescente na pressão da mistura carburante e um conseqüente aumento na potência do motor. Entretanto, ele é limitado pelo fenômeno conhecido como detonação.

2.2.1 Detonação e Pré – ignição

A detonação pode ser ocasionada por fatores como combustível adulterado de baixa octanagem, mas também pode ser resultado de mistura pobre, não homogênea, ignição adiantada ou superaquecimento do motor. Ocorre quando, na hora da compressão, uma combustão espontânea cria uma pressão maior que a determinada na combustão normal. Esse processo tende a danificar a cabeça do pistão, que pode vir a soltar partículas do material e criando uma crosta em pontos como paredes do cilindro ou até nas extremidades do próprio pistão. Quando essas partículas se acumulam, formam desníveis dentro da câmara de combustão, se tornando pontos quentes que podem gerar a pré-ignição.

A pré-ignição ocorre quando, uma outra fonte de calor se faz presente na câmara de combustão além da centelha dada pela vela de ignição. Isso faz com que duas frentes de chama se choquem no momento da compressão, queimando o combustível antecipadamente.

2.3 Ciclos do motor a combustão interna

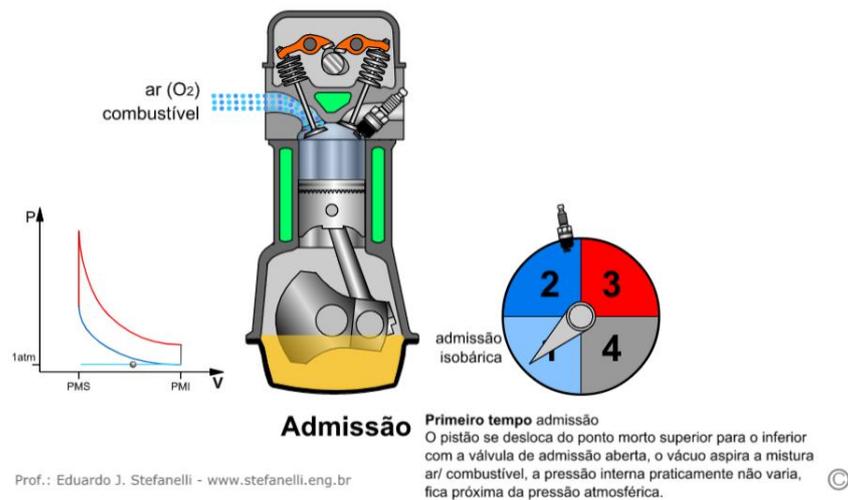
O motor a combustão interna ciclo Otto possui seu funcionamento a partir de 4 ciclos, sendo cada ciclo completado ao término de 2 voltas completas da árvore de manivelas. Os ciclos são divididos em Admissão, Compressão, Combustão e Exaustão.

2.3.1 Admissão (Isobárica)

Com o pistão no ponto morto superior (PMS) o comando de válvulas abre a válvula de admissão, a inércia do virabrequim movimenta a biela que move o pistão a caminho do ponto morto inferior (PMI), ao se movimentar o pistão reduz a pressão no interior do cilindro e, o vácuo criado, aspira a mistura ar-combustível praticamente sem mudança de pressão.

O volume do cilindro é preenchido de mistura ar-combustível com pressão aproximada de uma atmosfera, conforme Figura 09.

Figura 09 - Representação da fase de admissão



Fonte: <https://www.stefanelli.eng.br/ciclo-otto-motor-quatro-tempos>

Nesse algoritmo, é utilizada a equação dos gases ideais para aproximar a relação entre a densidade do ar, a pressão do ar e a temperatura do ar no coletor de admissão. Baseando-se na Equação 04, é possível deduzir que a densidade do ar admitido é proporcional à pressão absoluta do ar dentro do coletor de admissão e inversamente proporcional à temperatura do ar (SILVA, 2018).

$$P_i = \frac{R \cdot T_i}{V_t} (-m_{ap} + m_{at}) + P_i \frac{T_i}{T_i} \quad (04)$$

Onde,

P_i = Pressão absoluta no coletor de admissão [bar]

R = Constante dos gases ideais [kJ/kgk]

T_i = Temperatura no coletor de admissão [K]

V_t = Volume do coletor + passagem da válvula borboleta [m^3]

m_{ap} = Fluxo da massa de ar dentro do coletor de admissão [kg/s]

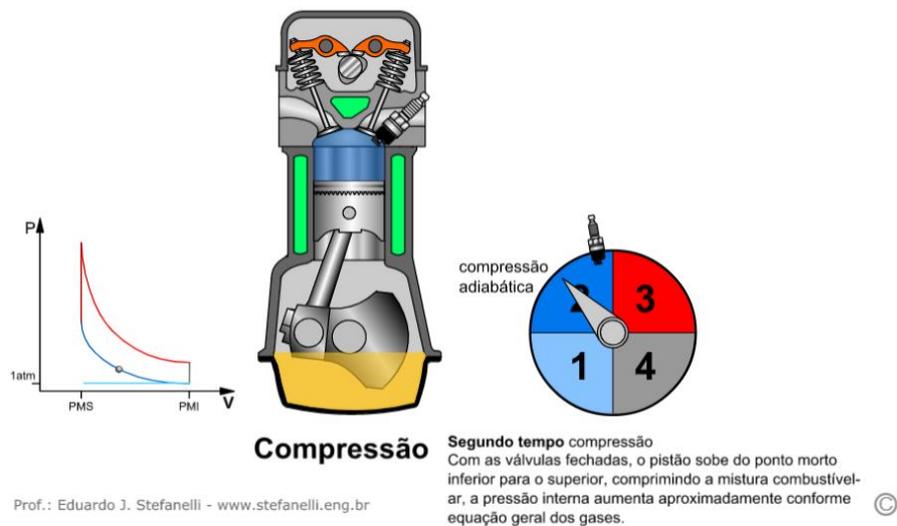
m_{at} = Fluxo da massa de ar sobre a válvula borboleta [kg/s]

2.3.2 Compressão (adiabática)

Com o pistão no PMI a válvula de admissão se fecha e o virabrequim, que continua a girar, empurra o pistão a caminho do PMS comprimindo a mistura ar-combustível na câmara de combustão, sem haver troca de energia térmica com o meio.

Alguns graus, da rotação do virabrequim, antes do pistão atingir o PMS a mistura ar-combustível é inflamada pela centelha, faísca ou fagulha criada pela vela de ignição. O processo químico de combustão da mistura ar-combustível requer algum tempo, constante, por este motivo ela acontece no final do segundo tempo e se adianta quando a rotação por minuto (RPM) do motor aumenta. A Figura 10 demonstra a posição dos componentes no momento da compressão.

Figura 10 - Representação da fase de compressão



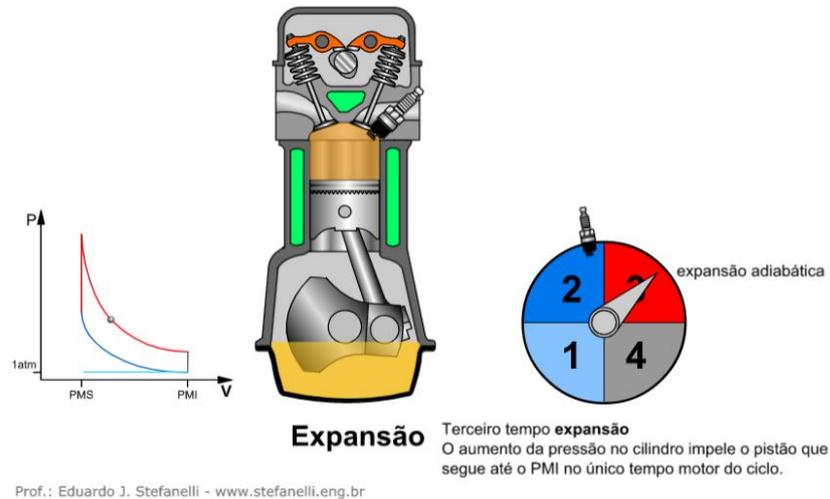
Fonte: <https://www.stefanelli.eng.br/ciclo-otto-motor-quatro-tempos>

2.3.3 Expansão (Adiabática)

A combustão é rápida e intensa e aumenta instantaneamente a pressão e a temperatura no interior da câmara de combustão; numa analogia, dá uma martelada na cabeça do pistão; o empurrando para o PMI, forçando o giro do virabrequim, ao fornecer potência, no único tempo motor do ciclo.

Conforme a Figura 11, que nos ilustra a situação dos componentes quando a expansão ocorre e gera a pressão máxima da combustão.

Figura 11 - Representação da fase de expansão



Fonte: <https://www.stefanelli.eng.br/ciclo-otto-motor-quatro-tempos>

2.3.4 Cedência de massa (isocórica) final do ciclo Otto

A cedência de massa isocórica é quando uma massa gasosa é submetida a mudança de temperatura que resulta em mudanças de pressão, ou vice versa.

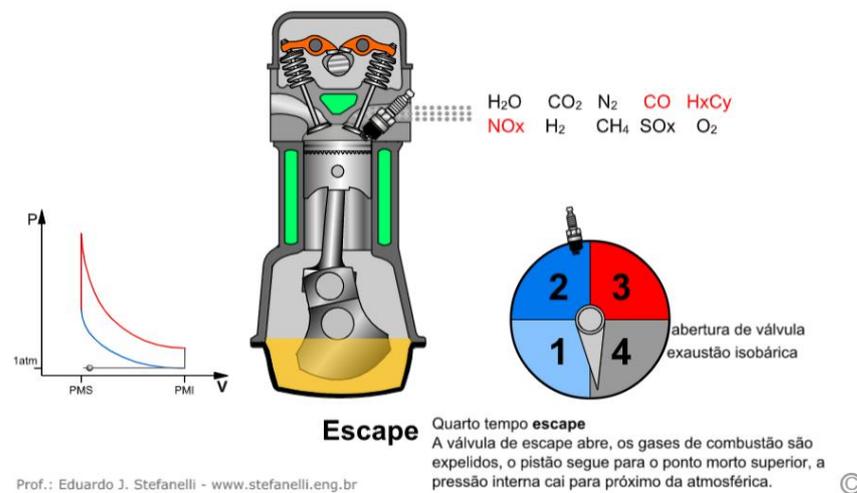
Com o pistão se aproximando do PMI a válvula de escape começa a se abrir, os gases resultantes da combustão, que estão à pressão e temperatura maiores que as atmosféricas, escapam rapidamente para o coletor de escape, a pressão no interior do cilindro cai para 1 atmosfera, de fato, é isto que escutamos num motor bem regulado. O terceiro tempo é o único que fornece energia mecânica ao ciclo motor.

2.3.5 Exaustão (Isobárica)

Com o pistão no PMI, e a válvula de escape aberta, o pistão, movido pela inércia do virabrequim, retoma seu caminho rumo ao PMS expulsando do cilindro os gases resultantes da queima, praticamente sem mudança de pressão.

Um pouco antes de o cilindro atingir o PMS a válvula de admissão começa a se abrir, a diferença de temperatura e densidade entre os gases da admissão e do escape, e a inércia dos gases, levam o resquício dos gases queimados para o coletor de escapamento e a válvula de escape se fecha, em preparação para o reinício do ciclo de quatro tempos, ilustrado pela Figura 12.

Figura 12 - Representação da fase de exaustão



Fonte: <https://www.stefanelli.eng.br/ciclo-otto-motor-quatro-tempos>

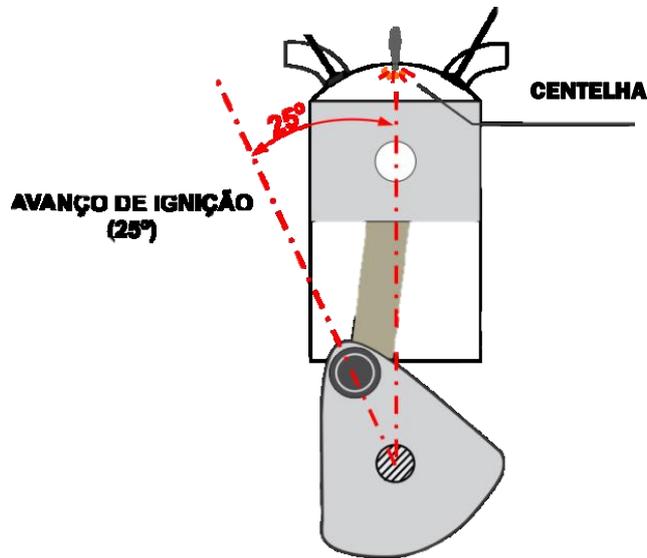
2.4 Controle do Sistema de Ignição

O sistema de ignição deve realizar, com confiabilidade, a combustão da mistura comprimida com precisão, mesmo sob condições operacionais dinâmicas, com as flutuações substanciais nos padrões de fluxo da mistura ar/combustível. O tempo que o primário deve permanecer energizado pelo sistema de controle, ou seja, o tempo de carga da bobina, deve ser o suficiente para garantir a centelha capaz de iniciar a combustão da mistura carburante dentro da câmara de combustão.

Segundo HOFFMANN (2016), os motores flex atuais usam avanço de ignição menos adiantado que os monocombustíveis, sendo mais comum alguns carros com “avanço de ignição negativo” da ordem de -4° antes do ponto morto superior (APMS) em marcha-lenta com gasolina, o que antes o comum era 8° a 9° APMS. Felipe também ressalta que, em 2.000 rpm estáveis em quinta marcha, era comum ver 30° a 40° , mas hoje é possível obter entre 20° e 30° , mesmo com álcool, e possibilidade

de avanços negativos na saída da imobilidade chegando a -15° APMS. Na Figura 13 é representado o avanço de ignição de -15° APMS.

Figura 13 - Avanço de Ignição em -15° APMS



Fonte: Felipe Calixto (Banco de questões ATC,2018)

O sistema de controle atua no ângulo de ignição ao avanço de ignição. Esse é o principal parâmetro de controle do sistema de ignição. Esse parâmetro não é constante e está diretamente associado à rotação e carga aplicada ao motor. O avanço do ponto de ignição promove uma variação crescente na pressão da mistura carburante e um conseqüente aumento na potência do motor. Entretanto, ele é limitado pelo fenômeno detonação, visto anteriormente no capítulo 2.2.1.

A modelagem matemática deste sistema de controle é bastante complexa e envolve diversos parâmetros de controle do motor como, por exemplo, a variação da tensão da bateria, a qualidade do combustível, a pressão atmosférica, o desgaste natural do motor, dentre outros fatores.

2.5 Temperatura do ar de admissão

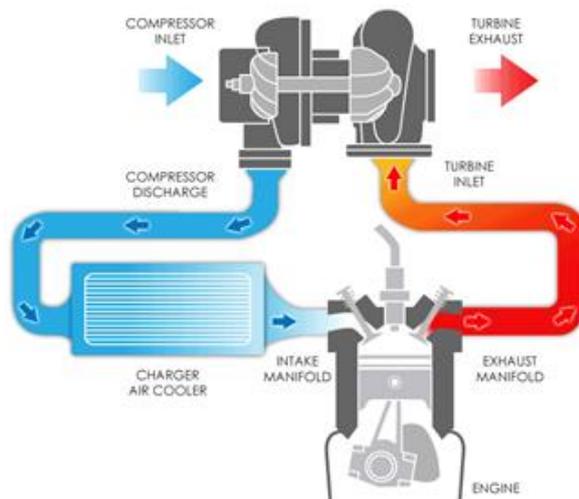
A temperatura do ar admitido tem influência direta na densidade do ar. Segundo PASSOS (2015), colunista da revista automotiva *FlatOut*, se a captação for feita dentro do cofre do motor, onde a temperatura chega a ser 15°C maior que a temperatura ambiente, a densidade do ar será menor. Sendo assim, menor

densidade do ar significa menor potência, pois menos combustível poderá ser injetado. Em motores sobre alimentados, quando o ar admitido pelo sobre alimentador passa para o motor, ele sofre um aumento de temperatura devido a compressão do mesmo. Esse aumento de temperatura é proporcional ao aumento da pressão. Dessa forma, existem tecnologias que são utilizadas para resfriar o ar após a admissão pela turbina ou pro charger: *Intercooler*, *Watercooler* e *Icecooler*.

2.5.1 *Intercooler*

O *intercooler* é o sistema de refrigeração por ar., ou seja, o ar é refrigerado pela própria ação do ar atmosférico, conforme Figura 14.

Figura 14 - Sistema de refrigeração *intercooler*



Fonte: <https://www.fteducation.com.br/blog/sistema-resfriador-ar-motores-turbo>

2.5.2 *Watercooler*

O sistema *watercooler* é semelhante ao *intercooler*, porém a refrigeração do ar admitido é realizada através de água, parecido com o sistema de radiador. O reservatório do *watercooler* é blindado e dentro dispõe de canais onde a água circula. O ar captado pelo sobre alimentador passa pelas aletas onde a água circula e segue para o corpo de borboleta (TBI) entrando na câmara de combustão. Nas Figura 15 e 16, podemos observar um modelo de *watercooler*.

Figura 15 - Interior de um *watercooler*

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 16 - Modelo de *watercooler*

Fonte: Autoria própria (2023)

2.5.3 Icecooler

Seguindo o sistema do *watercooler*, o *icecooler* se diferencia devido a refrigeração ser realizada através de água e gelo. No reservatório, além de se colocar

água também há o uso de gelo. Esse sistema é mais utilizado em veículos de alta performance, devido necessitar de temperaturas de admissão mais baixas do que o convencional. Na Figura 17 é representado uma aplicação do sistema *icecooler*.

Figura 17 - Aplicação de sistema de refrigeração *icecooler*



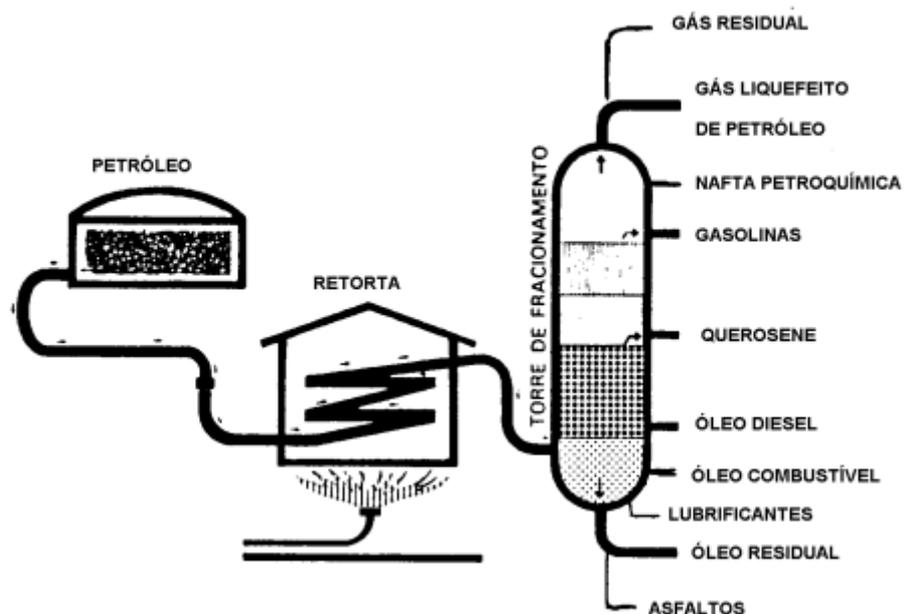
Fonte: <https://www.fteducation.com.br/blog/sistema-resfriador-ar-motores-turbo>

3 COMBUSTÍVEIS

Segundo FOGAÇA (2023), escritora da matéria Combustíveis Fósseis, atualmente a maior parte da demanda mundial de energia, que representa cerca de 75%, é suprida por meio da utilização de combustíveis fósseis, que são aqueles originados da decomposição de organismos animais e vegetais durante milhares de anos em camadas profundas do solo ou do fundo do mar. Os principais combustíveis fósseis são o petróleo, o gás natural e o carvão, sendo o petróleo o de maior comércio.

Nas refinarias, é possível obter do petróleo os combustíveis gasolina, o óleo diesel, o querosene e o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Entre esses, a gasolina é a de maior importância econômica. Todos os combustíveis fósseis são formados por compostos orgânicos que, quando queimados, liberam gás carbônico e água, se a combustão é completa. Isso é um grande problema, pois, desde o século XIX, a concentração de gás carbônico na atmosfera vem aumentando cada vez mais, o que tem intensificado o problema do efeito estufa. A Figura 18 detalha os passos de refino para obtenção dos produtos citados.

Figura 18 - Esquema de destilação atmosférica do petróleo



Fonte: <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>

Além disso, a combustão incompleta dos combustíveis fósseis libera o monóxido de carbono, um gás extremamente venenoso que não pode ser lançado na atmosfera.

Além dos combustíveis fósseis, temos opções de combustíveis renováveis, como o etanol, também muito presente comercialmente ao lado da gasolina.

3.1 Propriedades de combustíveis líquidos

- Ponto de fulgor: é a temperatura mais baixa onde um líquido se vaporiza em quantidade suficiente para se tornar uma mistura inflamável em contato com o comburente (ar) quando em contato com uma chama.

- Temperatura de auto-ignição: temperatura mínima de uma mistura ar/combustível na qual a combustão é iniciada e se mantém, sem a presença de uma chama escorvadora. Cada combustível tem seu ponto de ignição, ou seja, a temperatura onde ele se aquece a ponto de queimar sem uma fonte de calor.

- Ponto de fluidez: temperatura mínima necessária para que o combustível se torne um fluido.

- Viscosidade: importante propriedade que vai determinar as temperaturas de armazenamento, bombeamento econômico e pulverização (atomização) para combustão.

- Octanagem: índice de resistência do combustível à pressão que ele sofre dentro da câmara de combustão do motor. Em outras palavras, é o quanto o motor resiste sob alguns fatores, como a mistura do ar, aumento de pressão e temperatura, sem detonar.

- Período de indução: Estipulação da ANP (Nº 807 DE 23/01/2020) da garantia da gasolina dado por um teste de indução de oxigênio com duração de 6 horas, no mínimo, onde cada hora é estimado 1 mês da garantia da eficácia do produto. Esse ensaio de período de indução deve ser realizado após a adição de etanol anidro combustível (EAC) à gasolina A, no teor de um ponto percentual acima do valor em vigor na data da produção da gasolina A.

- Cetanagem: Qualidade do combustível diesel, medida através do número cetano, onde, um combustível com baixo número de octanas entra em combustão quando em contato com a devida compressão e calor dentro da câmara de combustão.

3.2 Gasolina natural

Corresponde à 2ª fração da torre de fracionamento com ponto de ebulição abaixo de 200°C (ECLONIQ, 2022). É composta dos hidrocarbonetos com cinco a dez átomos de carbono, ou seja, pentano (C_5H_{12}) e decano ($C_{10}H_{26}$). Estes compostos são obtidos através do refino de correntes do petróleo e suas moléculas podem variar de 5 a 12 átomos de carbono. A ebulição dessa mistura complexa se inicia a partir de 30 °C aproximadamente, com um ponto final de ebulição de até 215 °C (ANP, 2020).

De acordo com a ANP, uma gasolina de boa qualidade deve atender integralmente às especificações técnicas estabelecidas pela Resolução nº 807/2020, independentemente de sua origem.

As gasolinas disponíveis para comercialização no Brasil são: gasolina A comum, gasolina A premium, gasolina C comum e gasolina C premium.

A gasolina A é produzida nas refinarias, centrais petroquímicas e formuladores sem adição de etanol anidro, que por sua vez é adicionado conforme estabelecido para compor a gasolina C, esta que irá para os revendedores (postos de combustíveis) disponibilizada para uso nos automóveis. Atualmente, o teor de etanol anidro na gasolina C é de 27% em volume para gasolina C Comum e 25% para gasolina C premium conforme Portaria MAPA nº 75/2015.

A gasolina premium possui número de octanas (RON) superior às encontradas na gasolina comum. É indicada para veículos que requeiram ou exijam combustível de maior octanagem para o correto aproveitamento da capacidade automotiva, de acordo com a ANP.

A gasolina aditivada é a gasolina C automotiva (comum ou premium) acrescida de um detergente/dispersante, não deve ser confundida com gasolinas premium e não são uma categoria de qualidade conforme a regulamentação da ANP. Cada

distribuidora é responsável pela comercialização de sua própria gasolina aditivada, que contém um aditivo próprio cuja função primária é manter limpo o motor e evitar ou minimizar a formação de depósitos.

A ANP possui um programa de monitoramento da qualidade de combustíveis (PMQC) que avalia continuamente algumas das principais características físico-químicas da gasolina automotiva e a observância à regulamentação.

3.3 Etanol

Quando pensamos em etanol temos basicamente duas definições na definição química, cujo etanol, também chamado de álcool etílico, é um composto orgânico da família dos álcoois representado pela fórmula molecular C_2H_6O (que é a junção de $CH_3 - CH_2 - OH$). O álcool se diferencia dos demais produtos químicos devido às suas características sendo um líquido transparente, com cheiro forte e sem cor, cuja característica principal é ser um líquido inflamável.

Já na definição corriqueira, o etanol é um biocombustível produzido através da fermentação do amido ou de outros açúcares, de origem vegetal. No Brasil, a maior parte da produção de etanol etílico é por fermentação a partir da cana de açúcar. Já nos Estados Unidos, a matéria-prima é o milho.

Por definição da ANP (Resolução Nº 40 DE 25/10/2013), existem dois tipos básicos de etanol: o anidro e o hidratado. O que difere esses dois tipos é a concentração de água: no hidratado, a água pode chegar a 5% e, no anidro, a 0.5%.

Conhecendo essas definições, pode-se dizer que o etanol anidro contém muito mais álcool do que água na composição, o que o torna praticamente um álcool puro. Por isso, ele é destinado a outras finalidades, como a produção de tintas, solventes e para composição da gasolina C, encontrada nos postos de combustíveis. Já o álcool hidratado pode ser usado diretamente como combustível (comercializado nos postos de combustíveis como etanol), contendo mais água na sua composição.

3.3.1 Etanol da Cana-de-açúcar

Dentre todas as matérias-primas do etanol presentes na natureza, a cana-de-açúcar é a mais simples e produtiva, o que dá ao Brasil uma grande vantagem comparada a outros países. A produtividade média de geração de etanol por hectare de cana, por exemplo, é de 7500 litros, enquanto a mesma área de milho, principal matéria prima do álcool produzido por fermentação nos Estados Unidos, produz 3 mil litros do combustível. Sendo assim, a produção de etanol por cana-de-açúcar se faz mais vantajosa e barata (NOVACANA, 2014).

Basicamente, através da fermentação é produzido o álcool utilizado para todos os fins, inclusive como combustível. Esse processo consiste em adicionar ao caldo da cana-de-açúcar micro-organismos que quebram moléculas de açúcar ($C_6H_{12}O_2$), transformando-as em duas moléculas de etanol (C_2H_5OH) mais duas moléculas de gás carbônico (CO_2).

De acordo com o portal (NOVACANA, 2014), a cana-de-açúcar passa por diversos processos, até se obter delas os álcoois anidros e hidratados.

- 1) Lavagem: A cana de açúcar pura é colocada em uma esteira rolante onde é submetida a uma lavagem a fim de retirar poeira, areia, terra e outros tipos de impurezas. Após, a cana é picada e passa por um eletroímã, retirando materiais metálicos do produto.
- 2) Moagem: A cana passa por rolos trituradores produzindo um líquido chamado melado. Cerca de 70% da cana se transforma nesse caldo, enquanto os 30% de parte sólida se torna o chamado bagaço. O melado segue o processo para fabricação de etanol e o bagaço é destinado para outras aplicações, como geração de energia na própria usina.
- 3) Eliminação de impurezas: Nessa etapa o líquido passa por uma peneira para retirar resíduos do melado. Em seguida, ele segue para um tanque para decantação (processo onde as impurezas se depositam ao fundo). Depois de decantar, o melado puro é extraído e recebe o nome de caldo clarificado. O último processo de extração de impurezas é a esterilização, onde o caldo é aquecido para eliminar os micro-organismos presentes.
- 4) Fermentação: Quando completamente puro, o caldo é levado a tanques, onde é misturado a eles um fermento com leveduras (fungos, sendo mais comum a levedura de *Saccharomyces cerevisia*). Esses microorganismos

se alimentam do açúcar presente no caldo. Nesse processo, as leveduras quebram as moléculas de glicose, produzindo etanol e gás carbônico. Esse processo dura diversas horas, e como resultado produz o vinho, chamado também de vinho fermentado, que possui leveduras, açúcar não fermentado e cerca de 10% de etanol.

- 5) Destilação: Nesse processo, o líquido é colocado em colunas de destilação, onde ele passa por aquecimento até se evaporar. Na evaporação, seguida da condensação (transformação em líquido), é separado o vinho do etanol. Assim, o álcool hidratado está pronto para ser usado como etanol combustível, com grau alcoólico em cerca de 96%.
- 6) Desidratação: Com o álcool hidratado pronto (etanol combustível), basta retirar o restante de água contido nele para se fazer o álcool anidro (utilizado na composição da gasolina C). Na etapa da desidratação a técnica utilizada consiste no uso de um solvente colocado ao álcool hidratado que mistura apenas com a água, com os dois sendo evaporados juntos. Outros sistemas, chamados peneiração molecular e pervaporação, utilizam tipos especiais de peneiras que retêm apenas as moléculas da água. Após ser desidratado, o álcool anidro está pronto com graduação alcoólica em cerca de 99,5%, utilizado misturado à gasolina como combustível.
- 7) Armazenamento: Nesta etapa, o etanol anidro e o hidratado são armazenados em enormes tanques, até serem transportados por caminhões até as distribuidoras.

Uma das vantagens do etanol é que os resíduos produzidos durante toda a fabricação do etanol também podem ser aproveitados pelas indústrias. Os resíduos sólidos, como bagaço, podem ser reutilizados energeticamente como biomassa. Já o dióxido de Carbono (CO_2), derivado do processo de fermentação, pode ser utilizado à produção de refrigerantes.

3.3.2 Etanol de Milho

Com o passar dos anos, estudos, problemas climáticos, torna a demanda por energia limpa ser procurado por todos os países, principalmente como forma de combater os efeitos do aquecimento global. Tentando se enquadrar nesse cenário, a

produção do etanol de milho está se expandindo no Brasil. Essa metodologia de produção do etanol traz retorno mais rapidamente quando comparado às usinas de cana-de-açúcar.

Essa evolução foi demonstrada pela União Nacional do Etanol de Milho (Unem), (AGRISHOWDIGITAL, 2023), que em 2022 levantou os seguintes dados: a produção nacional do combustível deve chegar a 4,5 bilhões de litros, um avanço de 31% em comparação ao ano anterior, além de corresponder a 13% do total de biocombustível produzido. Também levantado pela Unem, a participação do etanol de milho não passava de 6% em 2021, evidenciando uma rápida evolução na participação no mercado nacional. Já para os próximos anos, a previsão da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) espera que 11 novas usinas sejam colocadas em prática e sete ampliações envolvendo especificamente a fabricação de etanol de milho. Diante desses números, a expectativa é que sejam acrescentados 11,69 milhões de litros de etanol proveniente de milho à capacidade de produção. Dessa forma, a ANP, considerando um total atual de 376,58 milhões de litros diários, afirma a representação de um aumento de até 3,1% na produção nacional.

Se analisarmos a produção de etanol de milho, o maior produtor mundial são os Estados Unidos. Eles detêm tecnologia e total expertise na produção desse combustível. Por essa razão, a produção no Brasil tem origem na tecnologia americana, mas com algumas diferenças, como indica Guilherme Nolasco, presidente-executivo da União Nacional do Etanol de Milho (Unem): “O processo de produção norte-americano é caracterizado pelo uso de milho de primeira safra. Essas características são diferentes do setor de biocombustível brasileiro, que possui vantagens quanto ao uso do milho, principalmente de segunda safra e fontes renováveis”. (AGRISHOWDIGITAL, 2023)

Assim, o milho que entra no processo de transformação é 100% aproveitado, ou seja, nada se perde.

Ainda segundo Guilherme Nolasco, existem três modelos de usinas no Brasil:

- Full: exclusiva de etanol de milho;

- Flex: produz etanol de milho durante a entressafra de cana-de-açúcar;
- Full Flex: produz etanol de milho e de cana simultaneamente.

Além de se destacar com a maior capacidade de competição com outros combustíveis e biocombustíveis, o etanol de milho traz ainda diversas vantagens que estimulam sua produção e o fazem ganhar espaço no cenário nacional. Dentre essas vantagens, (AGRISHOWDIGITAL, 2023) lista como as mais significativas:

- Disponibilidade de matéria-prima, principalmente por utilizar milho de segunda safra, que ainda traz benefícios quanto à proteção da terra, reciclagem de nutrientes e carbono orgânico no solo;
- Eficiência industrial;
- Diversificação e agregação de valor pela fabricação de coprodutos, como óleo de milho e DDGS (grãos secos de destilaria com solúveis), que são ricos em nutrientes;
- Agregação de valor à produção de milho;
- Fomento à cadeia produtiva de florestas plantadas;
- Contribuição para processo de descarbonização da mobilidade como alternativa ao combustível fóssil.

Mesmo com as muitas vantagens e possibilidades associadas ao etanol de milho, Nolasco (AGRISHOWDIGITAL, 2023) alerta que ainda existem algumas desvantagens e desafios que requerem maior planejamento de produtores e usinas. De acordo com o executivo da Unem, a maior desvantagem da produção de etanol de milho está ligada ao rendimento, principalmente quando há a comparação com o etanol de cana-de-açúcar, destacando que o milho produz mais etanol, no entanto é necessária uma maior área para seu plantio. Como dito anteriormente, no capítulo 3.3.1, a produtividade média do etanol é 7500 litros por hectare, enquanto, de acordo com o cenário revelado pela Unem, a mesma tonelada de milho produz de 390 a 410 litros. Uma grande diferença produtiva, entretanto, a cana produz em média 77 ton/ha (toneladas por hectare), e o milho apenas 6 ton/ha.

Mas existem outros grandes desafios citados pelo presidente-executivo da Unem como infraestrutura logística ainda falha e a necessidade de aprimoramento da legislação tributária brasileira. Segundo Nolasco (AGRISHOWDIGITAL, 2023), “isso dará mais segurança aos investidores e competitividade aos produtos brasileiros, seja no mercado interno ou externo”.

3.3.2.1 Apoio a produtores no plantio de milho para produção de etanol

O mercado de etanol é crescente em nosso país e as expectativas para o futuro são animadoras. Mesmo diante dos muitos desafios, os produtores passaram a ter maior valor agregado e capital para investir em tecnologias e até ampliar produção. E, juntamente com as usinas, empresas fornecedoras de insumos e pesquisadores da área acompanham e dão suporte a todo o processo de cultivo do milho.

3.3.3 Vantagens do etanol:

- Preço acessível;
- A queima do álcool produz em média 25% menos monóxido de carbono e 35% menos óxido de nitrogênio (*NO*) que a gasolina, segundo Wilson Alves de Oliveira (ESALQ/USP, 2010);
- Alto índice de octanas.
- Libera grande quantidade de energia ao ser queimado. O poder calorífico do álcool combustível é de 6300 cal/g. Num motor de combustão interna, é o vapor de combustível que sofre combustão, por isso, um combustível é bom quanto maior for sua facilidade em passar para o estado gasoso.

3.3.4 Desvantagens da adição de etanol anidro à gasolina

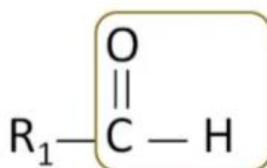
- Aumento do consumo do volume de combustível devido poder calorífico do etanol ser menor que o da gasolina;
- Aumento da produção de óxidos de nitrogênio (NO_x), entre os quais o principal é o dióxido de nitrogênio (NO₂). Ele reage com a água formando o ácido nitroso (HNO₂) e o ácido nítrico (HNO₃): $NO_2 (g) + H_2O (l) \rightarrow HNO_2 (aq)$

3.4 Aldeídos

Definido pela pesquisadora no Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica (LIMA, 2022), temos os Aldeídos como uma função orgânica caracterizada pela presença de grupo carbonila (C=O) na extremidade de uma cadeia carbônica, cujo, carbono possui um ligante hidrogênio.

Os aldeídos enquadram-se como espécies reativas, polares e inflamáveis. Sendo uma de suas principais características são seus aromas. Estes por fim, variam em função do tamanho da cadeia carbônica. Em resumo aldeídos de cadeia curta possuem cheiro irritante. Conforme aumentamos o número de carbonos na cadeia, os aromas se tornam mais adocicados e agradáveis para o olfato humano. Na Figura 19 abaixo podemos ver o grupo funcional aldeído (-CHO), que sempre está localizado na extremidade da cadeia carbônica.

Figura 19 - Grupo funcional aldeído



Fonte: MANUAL DA QUÍMICA – ALDEÍDOS

Como dito acima os aldeídos têm a característica de queimar com facilidade (serem altamente inflamáveis) e têm caráter polar e suas propriedades se alteram levemente com o aumento da cadeia carbônica, como o odor e o estado físico. Aldeídos são extremamente reativos, sofrendo diversos tipos de reações químicas, dentre elas reações de polimerização, originando polímeros de condensação.

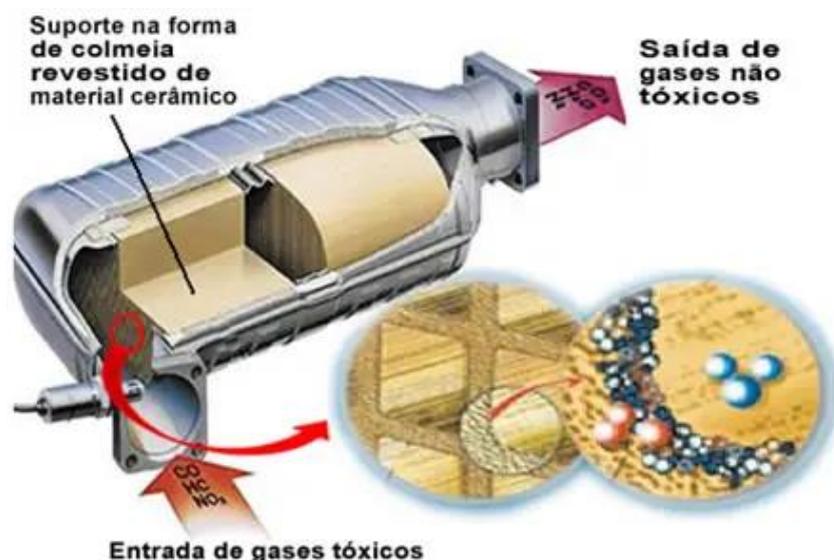
3.4.1 Aplicação dos aldeídos

Os aldeídos têm inúmeras aplicações industriais. Alguns deles são usados como agentes de preservação e conservação, por isso são empregados em processos de curtimento e embalsamento. Também participam da composição de fungicidas e inseticidas para plantas. Aldeídos estão envolvidos na produção de alguns polímeros,

como a baquelite (material rígido que compõe o cabo de panelas e frigideiras), formada pela reação química entre o formaldeído (aldeído) e um fenol, dando origem a uma estrutura polimérica tridimensional. A fórmica é um material laminado usado para revestimentos de móveis e que deriva da reação de aldeídos. Alguns tipos de aldeído são utilizados na fabricação de revestimentos, adesivos, solventes, perfumes e agentes flavorizantes. Aldeídos também participam de diversos processos industriais, podendo atuar como intermediários da síntese de fármacos. Alguns aldeídos podem ocorrer de forma espontânea na natureza e se manifestam no sabor e odor de amêndoas, no óleo de amêndoas, no óleo de canela (cinamaldeído) etc. Aldeídos também estão presentes nos organismos animais, na forma de vitaminas, hormônios e carboidratos (LIMA, 2022).

Segundo AMARAL e SODRÉ (2015) os aldeídos e álcoois apresentam características tóxicas e elevada atividade fotoquímica quando não queimados corretamente. Dos aldeídos existentes hoje, somente a soma do formaldeído (CH_2O) e do acetaldeído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) são considerados atualmente como poluentes. Como forma de reduzir as emissões de aldeídos pelo escape do veículo, é utilizado um pré-catalisador próximo ao coletor de escape. Dessa forma, os aldeídos emitidos pela combustão passam por dois catalisadores antes de ser liberado para atmosfera. Na Figura 20, podemos ver composição de um catalisador e sua função em um veículo.

Figura 20 - Catalisador Veicular



Fonte: Renato Duarte Plantier (Como Funciona o Catalisador?, 2015)

4 IMPORTÂNCIA DO ETANOL ANIDRO NA COMPOSIÇÃO DA GASOLINA

Como vimos anteriormente, a gasolina C disponível nos postos de combustível não é uma gasolina pura, tendo 27% da sua composição de etanol anidro. Essa determinação se dá pela lei Nº 8.723 que desde 1993 aponta a quantidade de etanol anidro necessária na composição. Medido em porcentagem, essa quantidade iniciou em 22% e passou por alterações de acordo com as necessidades principalmente ambientais. Em 2021, essa porcentagem alcançou o valor de 27% na gasolina C comum e 25% na gasolina C premium (ANP, 2021).

Além dos benefícios para atender as demandas ambientais, como diminuição da emissão de CO_2 , a adição de etanol anidro na gasolina traz vantagens econômicas e energéticas.

No ponto de vista econômico, a adição de etanol anidro contribui também para que o preço da gasolina não se eleve tanto com a variação dos custos do petróleo. Além disso, proporciona o aumento de produção de etanol no Brasil, que é o pioneiro na tecnologia de produção por cana-de-açúcar.

Falando em eficiência energética, uma das grandes vantagens do etanol na composição da gasolina é exercer um papel antidetonante, aumentando a octanagem da gasolina. Quando analisando no sistema, mais compressão esse combustível virá a resistir, conseguindo extrair uma potência maior do sistema.

4.1 Índice Anti Detonante

Antidetonante é definido como uma substância ou um composto, como por exemplo o tetraetilo de chumbo, adicionado à gasolina com a finalidade de reduzir a detonação. Isso significa basicamente que adicionamos uma ao combustível de motores de combustão interna para reduzir ou eliminar o ruído resultante da combustão explosiva demasiado rápida (FILHO. Vol 1, 2020).

Se analisarmos fatos históricos, em 1931 um decreto do Governo Federal, tornou obrigatória a adição de álcool a toda gasolina fabricada no Brasil. Para que tudo fosse implementado, muitos estudos foram feitos para desenvolver motores com melhor desempenho usando o álcool como um combustível e também como aditivo na gasolina (CORTEZ, 2016).

Buscando mais um fato sabemos que desde 1922, o chumbo tetraetila era misturado à gasolina, visando a melhoria do rendimento dos motores, mas isso tornou o automóvel a maior fonte de poluição do ar, por emitir partículas de chumbo (MELLO, 2008). De acordo com a OMS, o chumbo é um dos elementos químicos mais danosos à saúde humana (VANZ et al, 2003). Já em 1989, o Brasil foi o primeiro país a banir 100% o chumbo tetraetila da composição da gasolina (MELLO, 2008). Basicamente a substituição do chumbo tetraetila por álcool anidro, na gasolina, trouxe ganhos ambientais expressivos comprovados.

Com base em dados extraídos do manual Gasolina Informações Técnicas versão 2021, a gasolina produzida pela Petrobras atende plenamente aos requisitos da especificação técnica contida na Resolução ANP 807/2020, dentre os quais se destacam:

Teor de enxofre máx. = 50 mg/kg;

Octanagem mínima da gasolina comum: MON = 82 e RON = 93;

Massa específica mín.= 715 kg/m³

Conforme dados da Petrobras (Gasolina Informações Técnicas, 2021), o Índice Antidetonante (IAD) das gasolinas produzidas no país são:

Gasolina Comum: 87%.

Gasolina Aditivada Supra: 87%.

Gasolina Podium: 95%.

4.1.1 Aditivos

Segundo a ANP (GASOLINA, 2022), aditivos podem ser substâncias ou misturas de substâncias utilizadas em pequenas proporções que agregam benefícios à gasolina sem interferir em sua qualidade. Os aditivos trazem benefícios na melhora da combustão, ajudam na limpeza de válvulas e bicos injetores e aumenta o número de octanagem. Em 2017, a ANP retirou a obrigatoriedade de registrar os aditivos para

combustíveis automotivos (Resolução ANP nº 704/2017). Os principais aditivos utilizados hoje são o etanol, o cloreto de etileno e o metil-tecbutil-éter.

4.1.2 Métodos de determinação do número de octano

Distinguem-se dois tipos de números de octano (popularmente referidos por octanagem). Método MON (Motor Octane Number) ou método Motor - ASTM D2700 - avalia a resistência da gasolina à detonação, na situação em que o motor está em plena carga e em alta rotação. Método RON (Research Octane Number) ou método Pesquisa - ASTM D2699 - avalia a resistência da gasolina à detonação, na situação em que o motor está carregado e em baixa rotação (até 3000 rpm).

Alguns países utilizam a octanagem MON, RON, e outros o Índice de Octanagem $IAD = (MON + RON)/2$. Para uma mesma gasolina, o RON tem um valor típico superior ao MON de até 10 octanas. Portanto, ao comparar gasolinas de diferentes países é importante verificar se está sendo utilizada a mesma base (MON, RON ou IAD). Por exemplo, 95 a gasolina de octano tem a mesma resistência à auto-ignição como uma mistura de octano a 95% e 5% de heptano.

4.1.3 Valores típicos de octanagem no combustível brasileiro

A gasolina tipo A é a gasolina sem álcool, ou seja, conforme ela é produzida nas refinarias ou petroquímicas, não comercializada. No Brasil, por lei, é obrigatória a adição de álcool (27%), obtendo assim a gasolina C, que é vendida nos postos.

- Valores da gasolina tipo C (Sem chumbo):

Comum - 87 IAD (91 RON)

Premium - 93 IAD (98 RON)

Podium (BR Distribuidora) - 95 IAD (102 RON)

OctaPro (Ipiranga) - 96 IAD (103 RON)

Algumas gasolinas oficiais, de acordo com a Petrobras:

- Gasolina do tipo C comum, por exemplo Gasolina Especial C/Texaco - índice de octano 87 IAD
- Gasolina do tipo C aditivada, por exemplo Gasolina Plus/Texaco: índice de octano 87 IAD
- Gasolina do tipo C premium, por exemplo Gasolina Premium/Texaco - índice de octano 91 IAD:
- Gasolina do tipo C, por exemplo Podium/BR: índice de octano 95 IAD
- Gasolina de aviação: índice de octano 80 - 145 Resolução ANP n° 5 de 2009
- Álcool etílico anidro: índice de octano 100.

4.2 Valor de aquecimento do combustível

Segundo OLIVEIRA (2020), o poder calorífico (HV) é uma medida de dissipação de calor a partir da queima do combustível e é um parâmetro importante para qualificar o combustível utilizado. O HV possui dois limites: *Lower heating value* (LHV), que em português significa menor valor de aquecimento, e *higher heating value* (HHV), que em português significa maior valor de aquecimento.

Todo combustível tem em sua composição uma quantidade de água devido ao hidrogênio existente, alguns mais, como o etanol hidratado, e outros menos, como a gasolina C, gerando a água como produto dessa combustão em forma de vapor contendo uma fração de energia liberada durante o processo de combustão.

O HHV é a dissipação de calor que ocorrem durante o processo de queima do combustível, incluindo o calor armazenado no vapor a água. Já o LHV é a quantidade de calor disponível do combustível após o calor da vaporização do mesmo, sendo um parâmetro deduzido do HHV. O LHV é responsável por definir a eficiência do combustível em relação à queima e geração de energia no motor a combustão interna. Ou seja, o LHV do combustível determina o fluxo necessário do mesmo para atender a energia e potência ao motor através da combustão previamente definida.

A relação entre HHV e LHV se dá pela Equação 05 (OLIVEIRA, 2020):

$$HHV = LHV + m * hfg \quad (05)$$

Onde:

m (kg) = massa de água como produto da combustão

h_{fg} (kJ/kg) = Calor latente de vaporização da água

Na Tabela 02 abaixo, podemos ver um comparativo entre diversos tipos de combustíveis e seus valores de LHV.

Tabela 02 - Energia calorífica dos combustíveis

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density ¹ , kg/L	Enthalpy of vaporization ² , kJ/kg	Specific heat ¹ , C_p , kJ/kg · C	Higher heating value ³ , kJ/kg	Lower heating value ³ , kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH ₄ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C ₂ H ₆ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	420	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C _n H _{3.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000

¹At 1 atm and 20°C.

²At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.

³At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.

Fonte: Helton Oliveira (Câmara de combustão – turbina a gás, 2020)

5 AUMENTO DA PORCENTAGEM DE ETANOL ANIDRO NA GASOLINA C

Em 2015, diante da possibilidade da determinação do aumento do etanol anidro na gasolina de 25% para 27,5% pelo governo federal, a Petrobras fez um estudo com misturas de gasolina-etanol de 22, 25, 27,5 e 30% de etanol anidro (VILELLA, 2015). Esse estudo foi realizado em automóveis e motos com motores à gasolina, sem alteração nos parâmetros de taxa de compressão e avanço de ignição e abordou os parâmetros de emissões, dirigibilidade, partida a frio, retomadas de velocidade, potência e autonomia.

Segundo VILELLA (2015), as conclusões desses testes não identificaram qualquer contraindicação ao aumento de etanol anidro para 27,5%, porém apresentaram algumas oportunidades. Em relação às emissões, a tendência foi de redução de hidrocarbonetos CO , CO_2 e NO_x , porém para aldeídos o resultado mostrou um aumento em 3 dos 8 veículos testados. Em relação a autonomia, todos os veículos apresentaram uma tendência a redução, ou seja, aumento de consumo. Quanto aos testes de dirigibilidade e partida a frio, alguns veículos apresentaram falhas. E, por último, referente ao teste de retomada de velocidade que foi baseado em 3 faixas de velocidade (40 – 80 km/h, 60 – 100 km/h e 80 – 120 km/h), foram obtidos resultados com variações de 2% para mais ou para menos em relação ao uso da gasolina com 25% de etanol com a alteração da gasolina com teor de etanol anidro para 27%. Ou seja, alguns veículos demonstraram ganho em 2% utilizando E27 do que apresentavam utilizando E25 em determinada faixa de velocidade, enquanto alguns veículos demonstraram uma perda utilizando E27 em relação ao E25. É importante ressaltar que, nesse teste realizado em 2015, não foram envolvidos testes com alteração de taxa de compressão e avanço de ignição.

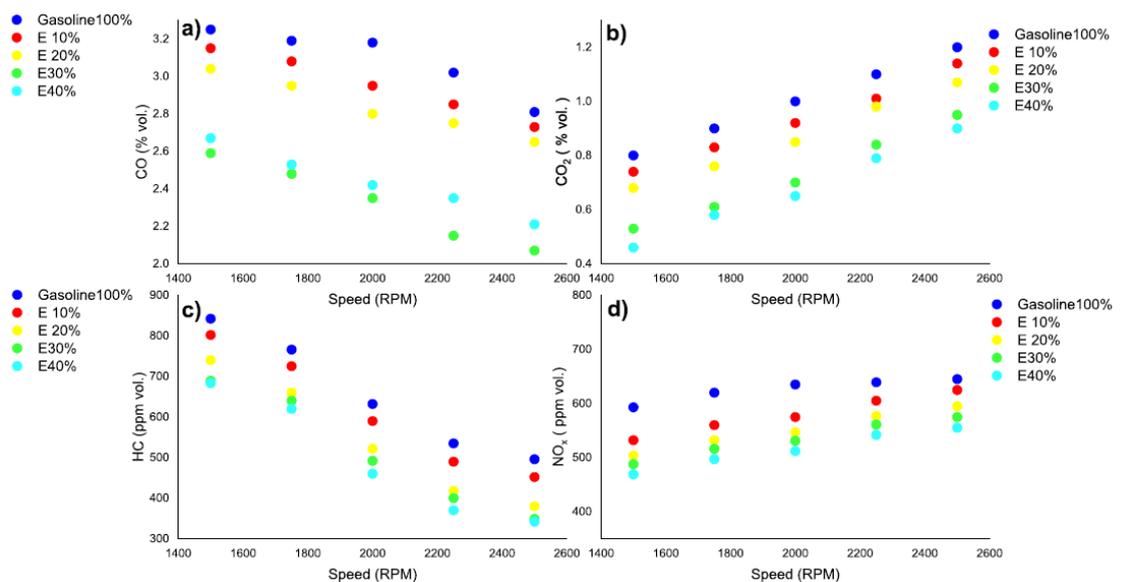
Com base nesse histórico, e na necessidade de otimizar os motores *flex-fuel* hoje disponíveis no mercado visando emissões, autonomia e potência, encontramos a possibilidade de estudo de um combustível E35, considerando a necessidade de ajuste na calibração dos motores para obtenção de melhores resultados.

Um estudo feito por um grupo de pesquisadores no Iraque aponta os resultados da adição de etanol misturado à gasolina em diferentes proporções (10% etanol + 90% gasolina, 20% etanol + 80% gasolina, 30% etanol + 70% gasolina, 40% etanol +

60% gasolina) utilizando banho ultrassônico para garantir uma mistura perfeita que, por sua vez, aumentará o conteúdo de energia do combustível (MOHAMMED, 2020).

Nesse estudo realizado pelo grupo citado, utilizou-se um motor de um cilindro, quatro tempos e ignição por centelha para estudar e analisar o efeito da mistura etanol/gasolina na potência, eficiência e gases de escape. Os resultados mostraram que a potência, o consumo específico de freio e a eficiência térmica são melhorados com o aumento da concentração de etanol. Por outro lado, o etanol apresentou efeito negativo na eficiência volumétrica. Além disso, a adição de etanol reduz os gases de escape nocivos. Verificou-se que mais etanol é acompanhado de menos gases de escape, como podemos ver na Figura 21, representando os gases CO como gráfico “a”, CO_2 como gráfico “b”, hidrocarbonetos como gráfico “c” e NO_x como gráfico “d”. As emissões de CO e CO_2 são menores com a mistura de combustível comparadas com a gasolina. As emissões de hidrocarbonetos diminuem conforme o teor de etanol aumenta. Também houve redução em emissão de NO_x , apresentando menor valor com mistura de combustível.

Figura 21 - Comparação de emissões com misturas de etanol X gasolina



Fonte: Sience Direct (2021)

Finalmente, o número de octanas de pesquisa e o número de octanas do motor são muito com misturas de etanol. Embora o poder calorífico inferior tenha sido maior para a gasolina pura, descobriu-se que todos os outros parâmetros são aprimorados com a adição de etanol ao combustível do motor (MOHAMMED, 2020). Na Tabela 03, podemos ver o comparativo resultante do estudo.

Tabela 03 - Propriedades físicas dos combustíveis utilizados

Item	Gasolina	E10%	E20%	E30%	E40%
Pressão de vapor Reid a 38 °C kPa)	53,7	55,2	56,8	58,3	59,6
Índice de Octanas (RON)	93,00	92,30	92,30	91,80	91,40
Índice de Octanas (MON)	83,10	83,70	84,30	84,60	84,80
Relação A/F estequiométrica	15,05	14,44	13,83	13,22	12,61
Valor de aquecimento inferior (MJ/kg)	43,8	42,11	40,42	38,73	37,04
Densidade a 15 °C (kg/m ³)	754	758	764	768	771

Fonte: Adaptado de Science Direct (2021)

O estudo apresentado por Mohammed (2020), comprovou as seguintes afirmações a partir de testes realizados com os combustíveis E10, E20, E30 e E40 em um motor monocilíndrico com valores entre 1500 e 2500 rpm:

1. Houve um aumento significativo em RON e MON para todos os combustíveis de mistura, mas tem um poder calorífico inferior para gasolina pura.
2. Ocorreu um aumento de eficiência térmica, quando utilizada a mistura E40, sendo esta melhora de (25,8%) em relação à gasolina.
3. Notamos que a eficiência volumétrica apresenta comportamento negativo com o aumento da rotação do motor e a diminuição do percentual de mistura de etanol.
4. A redução máxima no consumo específico de combustível na frenagem com a mistura de combustível foi para mistura E40, mostra diminuição de 17,21% em comparação com o combustível gasolina. Isso devido a mistura fornecer

o efeito de “epobrecimento” da mistura para melhorar a relação de equivalência ar – combustível.

5. Há uma redução significativa nas emissões dos gases de escape HC , NO_x , CO_2 e CO com o aumento da proporção de etanol em relação à gasolina. A queda máxima de emissões de CO foi encontrada em E30 (26,33% a menos), em emissões de CO_2 foi encontrada em E40 (25% a menos), em emissões de HC foi encontrada em E40 (31,05% a menos) e em emissões de NO_x foi encontrada em E40 (20,91% a menos).

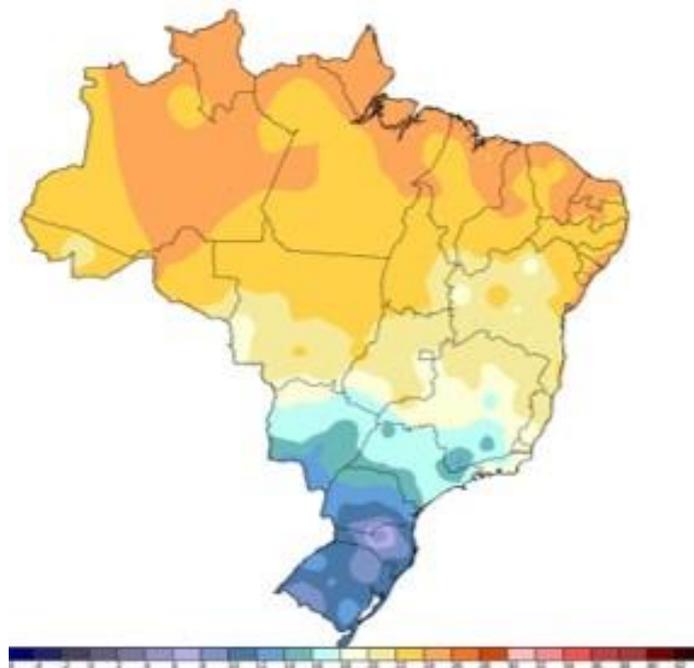
Analisando as vantagens da adição de etanol anidro na gasolina C, o primeiro pensamento para se otimizar o motor a combustão interna é elevar ao máximo a adição do álcool para mais próximo do 100%, devido a características produtivas e químicas que o etanol possui. Porém, devido as características geográficas e sociais do nosso país, encontramos dificuldades de padronizar o uso desse combustível. A tecnologia *flex fuel* no Brasil é um importante fator para atender a economia, diferenças climáticas e gosto do público.

Segundo o Ministério da Infraestrutura (FROTA DE VEÍCULOS, 2023), há uma vasta frota de veículos com motores somente à gasolina ou até mesmo veículos flex, mas com tecnologias mais antigas consideradas popularmente como as primeiras gerações de motores bi combustível produzidos a partir de 2003. De acordo com o Ministério da Infraestrutura (QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR UF MUNICÍPIO E COMBUSTÍVEL, ABRIL/2023), existem 98.209.603 veículos movidos a gasolina C ou álcool e gasolina (*flex fuel*). Dessa quantidade, 60.817.228 são automóveis (FROTA POR UF E TIPO DE VEÍCULO, ABRIL/2023). Se formos utilizar como base os veículos movidos a gasolina C que poderiam ser prejudicados com a alteração da porcentagem de etanol anidro na composição, seriam 49.758.556 veículos afetados, totalizando cerca de 50% da frota atual do país. Os motores monocombustível a gasolina são calibrados de forma a atender uma porcentagem de etanol anidro no combustível de acordo com a legislação vigente. Sendo assim, aumentar o teor de etanol na gasolina de forma agressiva poderia acelerar a desvalorização desses veículos e também a degradação de componentes.

Falando da questão climática, no Brasil temos uma grande diversidade de temperatura, não só entre as 4 estações do ano, mas também dentre as regiões do

país. Considerando as regiões, o aumento dessa porcentagem de etanol anidro também poderia gerar problemas para algumas regiões mais frias, como por exemplo, na região Sul, formada pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, cuja temperatura média anual é de 14 °C (Virtuous Tecnologia da Informação, 2007-2023) sendo que nos locais com altitudes acima de 1.100 m, cai para aproximadamente 10 °C. Com o uso de um combustível com mais de 50 % da sua composição sendo etanol, isso torna o combustível mais resistivo a detonação, prejudicando o funcionamento desses motores nessas características climáticas, principalmente após dias com temperaturas extremamente baixas. A Figura 22 representa a média climática do país, ilustrando as diferenças de temperatura:

Figura 22 - Variação climática no Brasil



Fonte: Bianca Lobo (2017)

Com base nos resultados gerados pelo estudo apresentado, reforça-se a ideia de que elevando o teor de etanol anidro na composição da gasolina podemos obter ganhos significativos principalmente em emissões e desempenho de combustão. Portanto, considerando as condições climáticas do país, estabelecemos a alteração da gasolina C, hoje com 27% de etanol anidro em sua composição, para a gasolina C com 35% de etanol anidro, como melhor opção para implementação atualmente, representando um aumento de 30% em relação ao teor atual e o teor proposto.

Referindo-se a demanda de produção de etanol no Brasil, que é destaque na produção mundial, possui elevada competitividade no setor pois o custo da produção de etanol de cana é significativamente menor que o custo do etanol do milho dos Estados Unidos e do etanol da beterraba na Europa. A vantagem da adição do etanol na gasolina é que suas emissões são isentas de enxofre e material particulado, além disso, esse biocombustível possui elevada octanagem e teor de hidrogênio, viabilizando o uso de gasolina de baixa octanagem que é mais barata. Porém, sendo a tendência mundial de crescimento do mercado de carros elétricos, um dos grandes desafios para o setor no Brasil será consolidar a tecnologia de motores movidos a etanol que seja competitiva perante as outras tecnologias já disponíveis (VIDAL, 2021).

Nas safras de 2018/19 e 2019/20 as usinas produtoras de açúcar e etanol tenderam a priorizar a produção de etanol, devido o fim da política de manutenção da estabilidade do preço da gasolina no Brasil aumentar a competitividade do biocombustível nesse período. Com isso, o consumo do etanol hidratado usado nos veículos *flex fuel*, que em 2017 era de aproximadamente 13 bilhões de litros, saltou para mais de 20 bilhões de litros em 2019 (VIDAL, 2021).

A tendência do uso dos biocombustíveis deverá ser maior nos países em desenvolvimento, nos quais, cada vez mais são implementadas políticas públicas que favorecem o uso dos biocombustíveis. O Brasil continua sendo destaque no cenário mundial de produção e consumo de biocombustíveis e já possui uma base institucional, arcabouço legal, capacidade instalada, corpo científico de excelência em áreas como biocombustíveis e bioquímica e conhecimento técnico que são ferramentas importantes para a superação de boa parte dos desafios para a ampliação da participação dos biocombustíveis na matriz energética do país (VIDAL, 2021). Sendo assim, podemos considerar que o país tem uma grande oportunidade de implementar opções de combustíveis com maior teor de etanol em sua composição como uma contraproposta aos veículos elétricos.

6 PROPOSTAS FUTURAS

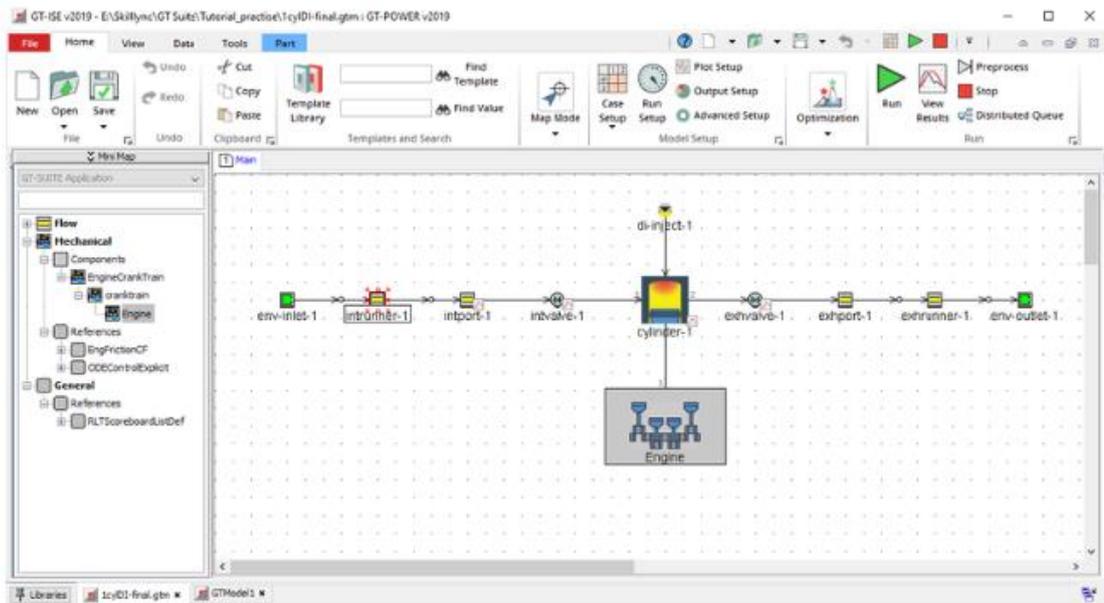
Entendemos que, não somente o aumento do teor de etanol anidro na gasolina C de 27% para 35% é o suficiente para atingir resultados significativamente atraentes para se manter em uso o motor *flex fuel*, visto que a taxa de compressão e o avanço de ignição são pontos cruciais na calibração dos motores para atingir parâmetros mais justos de eficiência e controle de emissões. Aumentando a resistividade à combustão do combustível utilizado, a taxa de compressão pode ser elevada sem causar o efeito de detonação pois, segundo LEITE (2014), um combustível com baixo índice de octanagem não resistem a altas razão de compressão, como a gasolina, já acrescentando etanol em sua composição adquirir características menos detonantes, assim também alterando o avanço de ignição, que por sua vez pode ser aproximado do APMS, aproximando a liberação da centelha o mais perto possível do ponto máximo de compressão suportado pelo combustível. Falando em motores *flex fuel*, quanto maior a taxa de compressão e maior o grau no avanço de ignição, menor a distancia de valores obtidos comparando a queima quando abastecido com gasolina C e quando abastecido com etanol hidratado. Dessa forma, o usuário do motor *flex fuel* sentiria menos as mudanças de comportamento do veículo. No etanol, o motor flex teria chance de se tornar mais econômico, e na gasolina, apresentaria melhora de desempenho em potência do que temos hoje. Com o estudo feito por MOHAMMED (2020), a adição de etanol na gasolina melhorou a potência do motor.

Em pesquisas realizadas para a proposta de estudos futuros, dois softwares foram propostos para efetuar a simulação que, com base na teoria aqui desenvolvida, podem comprovar a aplicação dessa proposta e seus ganhos. O software usado na indústria automotiva chama-se GTPower (GAMMA TECHNOLOGIES), não encontrado para compra ou uso particular. Como outra opção para a simulação, foi encontrado o software AMESIM (SIEMENS), este disponível para com lidença escolar. Os dois softwares realizam as simulações a partir da elaboração de um sistema onde o usuário determina os valores que pretende utilizar para os testes. Os resultados são gerados em forma de gráficos, cabendo ao usuário fazer a leitura e designação do melhor resultado.

O software GT-POWER é usado para simular desempenho dos motores em potência, torque, fluxo de ar e outros parâmetros importantes para a calibração dos

motores projetados (GAMMATECHNOLOGIES, 2023). A Figura 23 representa a interface deste software:

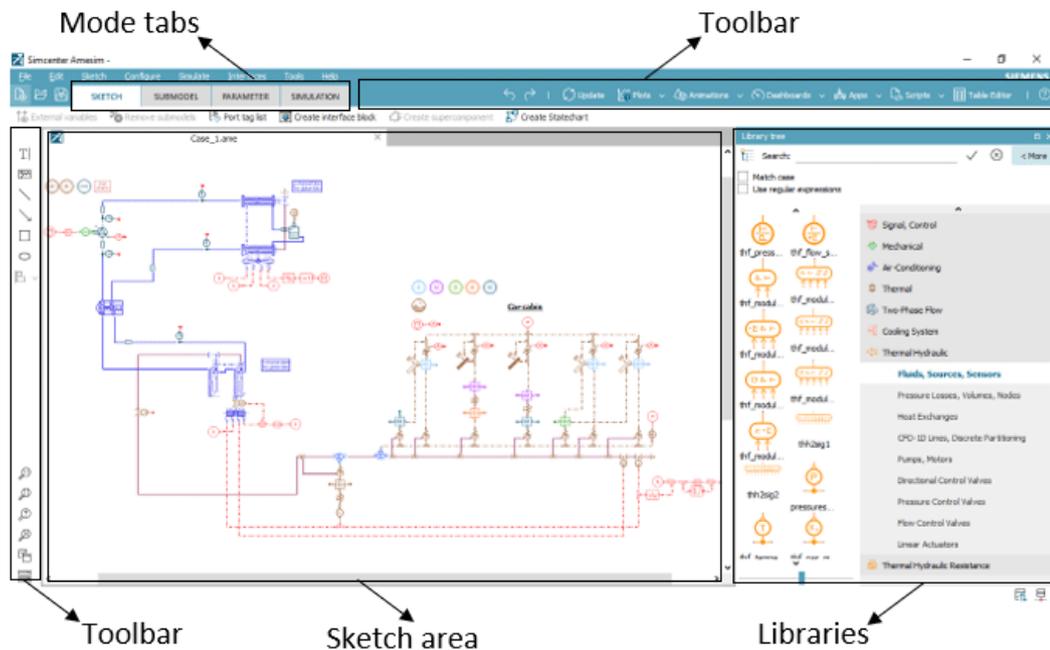
Figura 23 - Interface GT-POWER



Fonte: Venkata Akhil Varma Mantena (2021)

O software AMESIM também é usado para simulação e testes de sistemas, permitindo aos engenheiros avaliar e melhorar o desempenho dos sistemas testados (SIEMENS, 2021). A Figura 24 ilustra a interface do software:

Figura 24 - Interface AMESIM



Fonte: Muhsin Kılıç (2021)

Podemos também propor o uso de tecnologias aquecedoras de combustível, principalmente para uso nas regiões mais frias do país, para otimizar o funcionamento com o teor ainda mais elevado de etanol anidro na gasolina. Isso se dá perante algumas tecnologias como bicos aquecedores e sistemas de aquecimento na galeria de combustível.

Os bicos aquecedores funcionam da seguinte forma: ao detectar que o combustível não está se vaporizando, as paredes dos bicos se aquecem transmitindo o calor para o combustível, proporcionando a vaporização correta para melhor queima do líquido injetado. Essa determinação é feita pelo módulo eletrônico de gerenciamento do motor do veículo. O aquecimento do combustível pode acontecer antes, durante e depois da partida do motor, dependendo das condições ambientais e do veículo, permitindo a diminuição da quantidade a ser injetada, economizando e poluindo menos (OFICINANEWS, 2019).

Além da melhora do consumo do combustível, os bicos aquecedores apresentam vantagens relacionadas ao desperdício do etanol não queimado principalmente na partida do veículo em baixas temperaturas, atendendo as legislações de emissões Proconve L7 e Proconve L8, previstas para entrarem em vigência em 2022 e 2025, respectivamente, já que aquecimento ocorre na parte inferior do bico, onde está o combustível a ser injetado, não demandando a purga de

combustível frio antes que o combustível quente possa ser disponibilizado pela parte superior do injetor (OFICINANNEWS, 2019).

Uma outra tecnologia para aquecimento de combustível chama-se Flex Start, que permite a primeira partida no motor em baixas temperaturas onde o veículo utiliza proporções acima de 85% de etanol. O conceito do sistema é aquecer o combustível em sua galeria antes de ser injetado na câmara de combustão. São incorporadas velas aquecedoras individuais para cada cilindro, utilizando o mesmo conceito de um motor a diesel, com resistência de coeficiente de temperatura positiva, ou seja, quando recebe corrente elétrica, a vela fica responsável por aquecer o combustível e prepará-lo para ser injetado à câmara de combustão em temperatura já de trabalho, melhorando a eficiência da queima na primeira partida do veículo (VILANOVA, 2015). O sistema possui um módulo de controle no qual monitora o aquecimento das velas. Dessa forma o combustível é pulverizado em temperatura de trabalho não só na primeira partida do veículo, mas nos primeiros momentos de funcionamento do motor, evitando solavancos e funcionamento irregular, garantindo o conforto e dirigibilidade ao condutor do veículo logo no início de sua condução. A estratégia de aquecimento do combustível não segue um padrão, o mesmo é ajustado conforme a central eletrônica de monitoramento informa a necessidade do aquecimento da galeria em função do clima, e quanto tempo o aquecimento vai ser necessário, regulando por meio de pulsos elétricos (VILANOVA, 2015).

Diferente do sistema a diesel, o Flex Start é controlado visando a não fadiga do sistema, onde dependendo do clima não é necessário o aquecimento ou então o aquecimento não em potência máxima. O sistema também reduz a emissão de poluentes em carros abastecidos com 100% de etanol, podendo chegar até 40% de redução, pois no momento da primeira partida é quando ocorre a maior liberação de gases devido a elevada quantidade de combustível necessária para manter o motor em funcionamento. (VILANOVA, 2015).

Com base nas propostas dessas tecnologias de aquecimento do combustível utilizado, é possível elaborar um estudo visando elevar o teor de etanol anidro na composição da gasolina acima do estudado nessa tese.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o propósito de sugerir uma melhoria ao motor a combustão interna *flex fuel* com a implementação do combustível gasolina com acréscimo de etanol anidro na composição para que essa tecnologia se torne uma atrativa opção aos veículos monocombustíveis ou elétricos. A proposta foi de aumentar o teor de etanol anidro na composição da gasolina de 27% para 35%. O estudo foi embasado através de referências bibliográficas que evidenciaram vantagens do acréscimo do etanol anidro na composição da gasolina C, e também fatores climáticos e socioeconômicos do país.

Para atingir uma compreensão da implementação desse novo combustível ser viável foram definidos dois parâmetros principais para a análise. O primeiro parâmetro considerado foi o nível de emissões de gases poluentes, onde foi identificado um resultado positivo. O segundo parâmetro, também com resultados positivos, foi o aumento do índice de octanas do combustível que pode gerar um aumento de desempenho quando a otimização da taxa de compressão e o avanço de ignição podem ser aplicados no motor. Dessa forma, a hipótese de aumento do teor de etanol anidro na gasolina se mostra eficiente e atrativa para a redução de emissões de gases poluentes e também uma melhora no desempenho do motor.

Como proposta futura, a fim de comprovar efetivamente essa tese, se faz indispensável a simulação de calibração dos parâmetros de combustão do motor a combustão *flex fuel*, sendo assim possível a obtenção de resultados físicos e reais para comprovação e testes prévios da proposta aqui desenvolvida teoricamente.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3CAUTOMOTIVE. **TAXA DE COMPRESSÃO (álcool, gasolina e flex)**. Disponível em: <https://3cpreparacoesautomotivas.blogspot.com/2014/11/taxa-de-compressao-alcool-gasolina-e.html>. Acesso em: 7 abr. 2023.

AGRISHOWDIGITAL. **Etanol de milho: como é feito e quais são suas vantagens?** 15, jun. 2023. Disponível em: <https://digital.agrishow.com.br/graos/etanol-de-milho-como-e-feito-e-quais-sao-suas-vantagens>. Acesso em: 11 abr. 2023.

ALE. **Octanagem de combustíveis: o que é e qual a importância?**. Disponível em: <https://www2.ale.com.br/octanagem-de-combustiveis/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

AMARAL, Rinaldo Antunes. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE OPERAÇÃO DO MOTOR NAS EMISSÕES DE ALDEÍDOS POR UM VEÍCULO A ETANOL. **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas**, Belo Horizonte, MG, Brasil, v. 17, n. 15, p. 1-2, mar./2015. Disponível em: <https://abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2000/arquivos/s17/s17p15.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2023.

BRAINLY. **Qual dos combustíveis apresenta maior poder calorífico?**. Disponível em: <https://brainly.com.br/tarefa/26575895>. Acesso em: 8 abr. 2023.

CARBIKETECH. **What Is Bore-Stroke Ratio and Square Engine Design?**. Disponível em: <https://carbiketech.com/bore-stroke-ratio-theory/>. Acesso em: 30 mar. 2023.

CHAVES, Rafael Teixeira. Estudo do uso de misturas de etanol hidratado e gasolinas automotivas em um motor ASTM-CFR. **Pantheon Repositório Institucional da UFRJ**, RJ - Brasil, mar./2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9319>. Acesso em: 19 mai. 2023.

ECLONIQ, **Qual a fórmula molecular do GLP? Confira isto.** 11, mar, 2022. Disponível em: < <https://ecloniq.com/qual-a-formula-molecular-do-glp-confira-isto-composicao-quimica-do-glp/>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

EDUARDO V STEFANELLI. **Motor de quatro tempos à centelha ou fagulha – Ciclo Otto.** Disponível em: <https://www.stefanelli.eng.br/ciclo-otto-motor-quatro-tempos/>. Acesso em: 1 abr. 2023.

EDUCAÇÃO AUTOMOTIVA. **Taxa de compressão e sua influência na performance.** Disponível em: <https://educacaoautomotiva.com/2017/04/18/taxa-de-compressao/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

EMBRAPA. **Etanol de cana-de-açúcar.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/socioeconomia/etanol-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 11 abr. 2023.

FEM.UNICAMP. **Cap. 2 - COMBUSTÍVEIS.** Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023.

FLATOUT. **Sistemas de admissão: coletores, CAIs, filtros e roncos!** Disponível em: <https://flatout.com.br/sistemas-de-admissao-coletores-cais-filtros-e-roncos/>. Acesso em: 17 abr. 2023.

FRANCESQUETT, Janice Zulma. Determinação do Poder Calorífico de Amostras de Gasolina Utilizando Espectroscopia no Infravermelho Próximo e Regressão Multivariada. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, RS - Brasil, v. 5, n. 2, p. 1-1, jun./2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/142488/000895013.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 abr. 2023.

FTEDUCATION. **INTERCOOLER - FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE PÓS RESFRIADOR DE AR EM MOTORES TURBO.** Disponível em:

<https://www.fteducation.com.br/blog/sistema-resfriador-ar-motores-turbo>. Acesso em: 24 abr. 2023.

FTEDUCATION. **PONTO DE IGNIÇÃO**. Disponível em: <https://www.fteducation.com.br/blog/pontodeignicao>. Acesso em: 23 mar. 2023.

FTEDUCATION. **Taxa de compressão vs Pressão de compressão - Parte 1**. Disponível em: <https://www.fteducation.com.br/blog/taxa-de-compresso-vs-presso-de-compresso-parte-1>. Acesso em: 20 mar. 2023.

GAMMATECHNOLOGIES. **GTPower**. Disponível em: <https://www.gtisoft.com/gt-power/>. Acesso em: 17 jun. 2023.

GLOBORURAL. **Desoneração levou indústria de etanol de milho a produzir mais anidro**. Disponível em: <https://globorural.globo.com/agricultura/milho/noticia/2023/01/desoneracao-levou-industria-de-etanol-de-milho-a-produzir-mais-anidro.ghtml>. Acesso em: 10 abr. 2023.

GOV. **Gasolina**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/gasolina>. Acesso em: 11 abr. 2023.

GOV.BR. **Frota de Veículos - 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>. Acesso em: 22 mai. 2023.

KILIÇ, Muhsin. **The screen shot of the LMS Imagine Lab Amesim software interface**. Research Gate. Mai, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/The-screen-shot-of-the-LMS-Imagine-Lab-Amesim-software-interface_fig1_339674045. Acesso em: 16 jun. 2023.

LEGISWEB. **Resolução ANP Nº 807 DE 23/01/2020**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=389184>. Acesso em: 20 mai. 2023.

LEITE, Heronildo Souza. **ANÁLISE DO AUMENTO DA RAZÃO DE COMPRESSÃO DE MOTORES CICLO OTTO.**, PR - Brasil, p. 22-23, dez./2014. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28230/1/CP_COEME_2014_2_06.pdf. Acesso em: 28 mai. 2023.

LIMA, Ana Luiza Lorenzen. **Aldeídos**. Manual da Química, 2022. Disponível em: <<https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/aldeidos.htm#:~:text=Alde%C3%ADdos%20s%C3%A3o%20uma%20fun%C3%A7%C3%A3o%20org%C3%A2nica%20definida%20pela%20presen%C3%A7a%20do%20grupo,ao%20menos%20um%20ligante%20hidrog%C3%AAnio.&text=Alde%C3%ADdos%20s%C3%A3o%20reativos%2C%20polares%20e,subst%C3%A2nci>>. Acesso em: 14 mai. 2023.

LOBO, Bianca. **Temperaturas baixas no Sul**. Clima Tempo. 30 abr. 2017. Disponível em: < <https://www.climatempo.com.br/noticia/2017/04/30/temperaturas-baixas-no-sul-2354>>. Acesso em: 01 jun. 2023

MANTENA, Venkata Akhil Varma. **IC-Engine Calibration Using GT-Power and GT-Suite**. 06, ago. 2021. Disponível em: < <https://skill-lync.com/student-projects/assignment-1-201>> Acesso em: 16 jun. 2023.

MOHAMMED, Mortadha K.. Efeito das misturas etanol-gasolina no desempenho e nas emissões do motor SI. **ELSEVIER**, Najaf, Iraque, v. 25, p. 2-9, fev./2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X2100054X>. Acesso em: 18 mai. 2023.

NOVACANA. **Processos de fabricação do etanol**. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/fabricacao>. Acesso em: 11 abr. 2023.

OFICINANNEWS. **Como é o funcionamento de injetores de combustível aquecidos**. 11 jun. 2019. Disponível em: < <https://www.oficinaneews.com.br/como-e>

o-funcionamento-de-injetores-de-combustivel-aquecidos/>. Acesso em: 22 jun. 2023.

OLIVEIRA, Helton. **Câmara de Combustão – turbina a gás**. LinkedIn, 25, mar, 2020. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/c%C3%A2mara-de-combust%C3%A3o-turbinas-g%C3%A1s-helton-oliveira>. Acesso em 08 abr. 2023.

PORTAL AUTOMOVEIS. **O que é taxa de compressão?**. Disponível em: <https://www.portalautomoveis.com.br/que-e-taxa-compressao/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

QUATRO RODAS. **Qual a diferença entre pré-ignição e detonação?**. Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-pre-ignicao-e-detonacao>. Acesso em: 7 abr. 2023.

SIEMENS. **Software Simcenter Amesim**. Disponível em: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/systems-simulation/amesim/>. Acesso em: 16 jun. 2023.

SILVA, Cynthia Thamires Da. **Controle eletrônico do sistema de injeção de combustível e um motor de combustão interna**. Embarcados. 2018. Disponível em: <https://embarcados.com.br/control-eletronico-do-sistema-de-injecao-de-combustivel/>. Acesso em 10 abr. 2023

TERRANA. **Qual o prazo de validade para combustíveis armazenados?**. Disponível em: <https://www.terranacombustiveis.com.br/post/qual-o-prazo-de-validade-para-combustiveis-armazenados>. Acesso em: 20 abr. 2023.

THERMAL ENGINEERING. **O que é taxa de compressão – Ciclo Otto – Definição**. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-taxa-de-compressao-ciclo-otto-definicao/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

TOURNIER, Diego Riquero. Como identificar falhas nos circuitos primário e secundário? Saiba a importância do correto diagnóstico no sistema de ignição em veículos de ciclo Otto. **o mecanico**, SP - Brasil, dez./2022.

VIDAL, Maria de Fátima. **PRODUÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL**. Caderno Setorial ETERNEM. 08, 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/914/1/2021_CDS_184.pdf>. Acesso em: 21 jun 2023.

VILANOVA, Carolina. **Flex Start: Agora é sem tanquinho**. O MECANICO. 18 ago. 2015. Disponível em:< <https://omecanico.com.br/agora-e-sem-tanquinho/>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

VILELLA, A. C. S. EFEITOS DO E27,5 EM VEÍCULOS, MOTOCICLETAS E MOTOR A GASOLINA. **SIMEA**, Brasil, v. 2, n. 1, p. 5-19, set./2015. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/simea2015/PAP180.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2023.