

FERNANDO LÚCIO DA COSTA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE EMISSÃO DE
POLUENTES EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA USANDO DIFERENTES MISTURAS ENTRE
ETANOL E GASOLINA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

FERNANDO LÚCIO DA COSTA JÚNIOR

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE EMISSÃO DE POLUENTES EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA USANDO DIFERENTES
MISTURAS ENTRE ETANOL E GASOLINA**

Trabalho de conclusão de curso a ser apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **ENGENHEIRO MECÂNICO**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Marta de Souza.

**UBERLÂNDIA
2018**

FERNANDO LÚCIO DA COSTA JÚNIOR

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE EMISSÃO DE POLUENTES EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA USANDO DIFERENTES MISTURAS ENTRE ETANOL E GASOLINA

Trabalho de conclusão de curso a ser apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de **ENGENHEIRO MECÂNICO**

Data de aprovação: 10/12/2018

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Ana Marta de Souza - Presidente da Banca Examinadora
Universidade Federal de Uberlândia - Orientadora

Prof. Dr. Francisco José de Souza
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. José Antônio Ferreira Borges
Universidade Federal de Uberlândia

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Angela e Fernando, por terem me concedido todas as condições necessárias para a conclusão desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por sempre me proporcionar excelentes oportunidades de crescimento e desenvolvimento, além de ser minha fonte de energia para superar os desafios e obstáculos necessários para se alcançar o sucesso.

Aos meus pais, Angela e Fernando, minha eterna gratidão por todos os ensinamentos, educação, princípios e valores que construíram a minha base e formaram o homem que sou hoje. Além disto, agradeço-lhes pelas oportunidades que me proporcionaram, sem elas, a realização deste trabalho não seria possível.

À Professora Dra. Ana Marta de Souza, meus sinceros agradecimentos pela excelente orientação e supervisão deste trabalho além de todo o aprendizado que adquiri com esta experiência. Não só neste projeto, mas em toda minha jornada na graduação, seu apoio, conselhos e ensinamentos foram imprescindíveis para a minha formação.

Agradeço também à instituição Universidade Federal de Uberlândia que sempre me forneceu uma excelente estrutura e preparação para a minha formação como Engenheiro Mecânico. Um agradecimento em especial também para todo o corpo docente da Faculdade de Engenharia Mecânica e envolvidos, pelo ensino de qualidade e por todas as oportunidades de crescimento acadêmico, profissional e pessoal que nos foi oferecido.

Aos meus colegas da 91ª turma de Engenharia Mecânica, minha sincera gratidão por todo o companheirismo e parceria nos momentos difíceis e desafiadores do curso, sempre incentivando o sucesso e me dando forças para seguir em frente. Merecem destaque os meus grandes amigos: Fábio Marques Ferreira Júnior, João Pedro de Campos Badan, Matheus Rosa Pereira do Couto, Marco Aurélio Matos Júnior e Rodrigo Ferreira Abdulmassih. Muito obrigado pelo apoio e suporte de sempre.

Não poderia deixar de mencionar meu agradecimento especial à University of Kentucky e Illinois Institute of Technology, pela excelente receptividade, por todas as oportunidades de crescimento que me foram oferecidas e por todos os valores que consegui agregar nesta experiência única. Aos amigos que ganhei durante esse período, vale destacar: Carol, Daniella, Diego, Israel, João, Lucas, Marina, Mário,

Paulo, Vinicius e Wendell. Sou muito grato pela família geograficamente dispersa que nos tornamos.

Agradeço também à toda equipe que tive a oportunidade de trabalhar em meus estágios corporativos, com destaque para os gestores João Batista Júnior (Maqnelson Agrícola) e Michelle Zacarias Bellorio (Grupo Algar), que contribuíram bastante para o meu crescimento profissional e pessoal.

Por fim, porém não menos importante, gostaria de agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram e me apoiaram para que essa conquista fosse concretizada. A todos os meus familiares, amigos, mentores e equipes, minha gratidão pelo suporte e auxílio.

COSTA JÚNIOR, F. L. **Análise Computacional de Emissão de Poluentes em Motores de Combustão Interna usando Diferentes Misturas entre Etanol e Gasolina.** 2018, 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

RESUMO

O combate à poluição atmosférica vem ganhando força nos dias atuais. Existe uma preocupação em se usar os recursos naturais de maneira sábia, e mitigar os impactos ao meio ambiente e à saúde humana desempenha uma importante função para criar condições sustentáveis para futuras gerações. Assim, esse trabalho teve como objetivo o estudo de uma simulação computacional de um motor a fim de avaliar sua performance, resultados característicos e respostas às emissões de poluentes, utilizando diferentes tipos de combustíveis: gasolina comum, etanol, e uma mistura de 50% gasolina comum e 50% etanol. O motor utilizado como inspiração para a construção do modelo foi o Fire 1.0, fabricado pela Fiat, que se trata de um motor Flex utilizado em alguns modelos de carros populares como o Uno e o Palio. Este motor se encontra na Universidade Federal de Uberlândia, disposto em uma bancada experimental para a realização de testes e estudos. Utilizando o software AVL BOOST, o modelo virtual foi concebido com base nos parâmetros conhecidos da bancada experimental e também com dados recomendados pelo guia do usuário oferecido pela ferramenta. Após a criação do modelo, foi realizada uma série de simulações e adaptações de modo que a resposta atingisse os resultados esperados e fosse devidamente validada para o objetivo do trabalho. Uma vez que os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, a simulação das emissões de poluentes foi realizada e seus resultados foram analisados de acordo com trabalhos já publicados e conceitos obtidos na literatura. Durante o trabalho nota-se o grande desafio de representar fielmente um motor físico em um modelo virtual, assim como o poder que a ferramenta possui no auxílio para testes e desenvolvimento de novas tecnologias dentro da indústria automobilística.

Palavras-chave: *Emissão de poluentes. Combustíveis. Simulação computacional. AVL BOOST. Fiat Fire 1.0.*

COSTA JÚNIOR, F. L. **Computational Analysis of Pollutants Emission in Internal Combustion Engines using Different Combinations between Ethanol and Gasoline.** 2018, 84 f. Monograph, Federal University of Uberlandia – MG.

ABSTRACT

The battle against atmospheric pollution is gaining strength nowadays. There is a concern about using natural resources wisely, thus, mitigating environment and human health impacts, plays an important role in creating sustainable conditions for future generations. Based on this idea, this paper has the objective to study a computer simulated engine in order to evaluate its performance, characteristics results and responses to pollutant emissions using different types of fuel: regular gasoline, ethanol, and a mixture of 50% regular gasoline and 50% ethanol. The engine used as inspiration for the model construction was the Fire 1.0, manufactured by Fiat, which is a Flex engine used in some popular car models such as Uno and Palio. This engine is located at the Federal University of Uberlândia, arranged in an experimental bench for conducting tests and studies. Using the AVL BOOST software, the virtual model was designed based on known parameters from the experimental bench and also with data recommended by the users guide offered by the tool. After the model's creation, a series of simulations and adaptations were carried out so that the response could reach the expected results and then validated for the purpose of the work. Once the results were considered satisfactory, the pollutant emission simulation was performed and its results were analyzed according to published works and concepts obtained in the literature. During the work, it was noticed the great challenge was to reliably represent the physical engine in a virtual model, as well as the power that this tool has in order to aid tests and new technologies development within the automobile industry.

Keywords: *Pollutant emissions. Fuels. Computational simulation. AVL BOOST. Fiat Fire 1.0.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Representação esquemática de uma máquina térmica.	22
Figura 2.2 - Os quatro tempos de um motor de ciclo Otto.....	26
Figura 2.3 - Sincronismo dos tempos de cada cilindro em um motor do ciclo Otto. ...	27
Figura 2.4 - Representação das principais partes de um motor.	28
Figura 2.5 - Detalhes do cilindro de um motor alternativo de combustão interna.....	29
Figura 2.6 - Diagrama de pressão e volume para motores de combustão interna com ignição por faísca.	36
Figura 2.7 - Representação das três curvas características do motor: Torque (binário), Potência e Consumo.	39
Figura 2.8 - Relação da curva de consumo e torque (binário) com a variação da concentração de combustível na mistura ar-combustível.....	40
Figura 2.9 - Representação do diagrama de desempenho de um motor com ignição por centelha (ciclo Otto).	41
Figura 2.10 - Representação de uma torre de fracionamento para tratamento do petróleo e produção de seus derivados.	47
Figura 2.11 - Comportamento da concentração dos gases poluentes no escape em função da composição da mistura.....	55
Figura 2.12 - Ilustração esquemática de um catalisador de escape de três vias.	56
Figura 2.13 - Esquema representativo do sistema de recirculação de gases de escape (EGR).....	57
Figura 3.1 - Bancada experimental do motor Fiat Fire 1.0 localizada na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).	63
Figura 4.1 - Curvas características de torque e potência do motor Fiat Fire 1.0.....	67
Figura 4.2 - Modelo computacional do motor criado no software AVL BOOST.....	68
Figura 4.3 - Alguns dos principais parâmetros ajustados durante a calibração para a gasolina, da esquerda para a direita: dados gerais dos cilindros do motor, informações gerais da pressão média efetiva de atrito e de eixo do motor, especificações da vazão mássica.	70
Figura 4.4 - Comparativo das curvas característica para os diferentes tipos de combustíveis.	73

Figura 4.5 - Comparativo entre curva real e simulada do torque do motor abastecido com gasolina.	74
Figura 4.6 - Comparativo entre curva real e simulada do torque do motor abastecido com etanol.	74
Figura 4.7 - Comparativo de emissão dos principais tipos de poluentes para as três composições de combustível usadas.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades de Poder Calorífico Inferior (PCI) e Razão Ar/Combustível para diversos tipos de combustíveis.	44
Tabela 2.2 - Características de diversas propriedades para os testes RON e MON.	45
Tabela 2.3 - Comparativo entre as principais propriedades da Gasolina A e do Etanol.	51
Tabela 2.4 - Limites recomendados de diversos poluentes para veículos leves de acordo com a Fase L6.	59
Tabela 2.5 - Limites recomendados de diversos poluentes para veículos pesados de acordo com a Fase P7.	60
Tabela 4.1 - Parâmetros divulgados para o motor Fiat Fire 1.0.	66
Tabela 4.2 - Comparativo entre emissões experimental e simulada dos poluentes Dióxido de Carbono (CO ₂) e Monóxido de Carbono (CO) usando a gasolina.	77
Tabela 4.3 - Comparativo entre emissões experimental e simulada dos poluentes Dióxido de Carbono (CO ₂) e Monóxido de Carbono (CO) usando o etanol.	77
Tabela 4.4 - Comparativo entre emissões experimental e simulada dos poluentes Dióxido de Carbono (CO ₂) e Monóxido de Carbono (CO) usando a mistura entre gasolina e etanol.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

EGR	Sistema de Recirculação dos Gases de Escape (do inglês: Exhaust Gas Recirculation)
ECU	Central Eletrônica do Motor (do inglês: Engine Control Unit)
MON	Número de Octanos Obtidos por Teste no Motor (do inglês: Motor Octane Number)
OICA	Organização Mundial da Indústria Automobilística (do francês: Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)
RON	Número de Octanos Obtidos por Pesquisa (do inglês: Research Octane Number)
UNEA	Assembléia Ambiental das Nações Unidas (do inglês: United Nations Environment Assembly)
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
H	Hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos (não queimados)
H ₂ O	Água Como Substância Química
N ₂	Nitrogênio
NO _x	Composição de aproximadamente 90% de NO e 10% de NO ₂
NO	Óxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
S	Enxofre
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
C _e	Consumo Específico
CV	Unidade de Potência (Cavalo)
esteq	Estequiométrica
g/km	Gramas por quilômetro
kg	Unidade de Massa (Quilograma)
kgfm	Unidade de Torque (quilograma-força metro)
kJ/kg	Quilojoule por Quilograma

mar	Massa de Ar
\dot{m}_c	Vazão de Combustível
mcomb	Massa de Combustível
mm	Unidade de Dimensão (milímetros)
n	Número de voltas por segundo
N_a	Potência de Atrito
N_e	Potência Efetiva
N_i	Potência Indicada
Nm	Unidade de Torque (Newton metro)
Nº	Número
PCi	Poder Calorífico Inferior
\dot{Q}	Fluxo de calor pela combustão
RPM	Rotações Por Minuto
s	Unidade de Tempo (segundos)
T	Torque
V	Unidade de Tensão (Volts)
x	Número de tempos do motor
W_i	Trabalho Indicado
z	Número de cilindros
η_g	Rendimento Global
η_m	Rendimento Mecânico
η_t	Rendimento Térmico
η_v	Rendimento Volumétrico
ϕ	Coeficiente da Riqueza da Mistura
λ	Coeficiente de Excesso de Ar
ω	Velocidade de rotação
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	22
2.2	FUNCIONAMENTO DOS MOTORES	25
2.2.1	<i>Ciclo Otto em motores alternativos</i>	25
2.2.2	<i>Componentes dos motores alternativos</i>	27
2.2.3	<i>Sistemas auxiliares em motores alternativos</i>	30
2.3	COMBUSTÍVEIS.....	42
2.3.1	<i>Mistura ar-combustível</i>	42
2.3.2	<i>Poder calorífico superior e inferior</i>	43
2.3.3	<i>Índices de octanos</i>	44
2.3.4	<i>Tipos de combustíveis</i>	46
2.4	POLUENTES	52
2.4.1	<i>Tratamento de poluentes</i>	56
2.5	PROGRAMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	58
3	METODOLOGIA	62
3.1	AVL BOOST	62
3.2	MOTOR FIAT FIRE 1.0.....	63
3.3	PROCEDIMENTOS	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	MOTOR FIAT FIRE 1.0.....	66
4.2	MODELO COMPUTACIONAL AVL BOOST	68
4.3	SIMULAÇÕES PARA DIFERENTES COMBUSTÍVEIS	71
4.4	ANÁLISE DE POLUENTES	75
5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

As questões ambientais vêm a todo momento, chamando a atenção da sociedade. Já se tem a consciência de que os recursos naturais são esgotáveis e, portanto, para preservar as próximas gerações de uma maneira saudável e sustentável se faz necessário medidas preventivas quanto a exploração desses recursos.

As emissões de poluentes para a atmosfera é, sem dúvidas, um dos maiores vilões para a sustentabilidade, causando a degradação do meio ambiente e complicações para a saúde da população. Hoje, os veículos automotivos são fontes de grande parcela desses poluentes e, por isso, estão sendo cada vez mais estudados de forma que tais emissões sejam controladas e reguladas da melhor maneira possível.

Em 2017, foram produzidos no Brasil cerca de 2,69 milhões de veículos segundo dados divulgados pela OICA (Organização Mundial da Indústria Automobilística). Mundialmente, nesse mesmo ano, mais de 97 milhões de veículos foram fabricados, representando um crescimento de 2,36% em relação ao ano de 2016 (OICA, 2018). Dessa forma, é evidente o aumento da demanda de veículos e, como consequência, o aumento também das emissões de poluentes produzidos por eles.

Diante dessa preocupação ambiental, a indústria se empenha cada vez mais no desenvolvimento de projetos e tecnologias que consigam reduzir as emissões de poluentes sem que se comprometa a performance dos automóveis. Uma vez que o processo fundamental para o desempenho de um veículo comum é a combustão, se livrar das emissões de poluentes e manter um bom rendimento se torna uma tarefa difícil já que esses poluentes são produtos inerentes de tais reações. Assim, o grande desafio é conseguir alcançar objetivos sustentáveis com a menor perda possível em performance e economia.

O tipo de combustível usado para alimentar os veículos é um dos principais fatores que precisam ser controlados para que se tenha uma menor emissão de poluentes. Alternativas menos poluentes e mais sustentáveis como o etanol, compõem soluções eficientes encontradas para substituir o uso de combustíveis mais poluentes e nocivos ao ambiente como a gasolina e o diesel.

Nesse sentido, desenvolvimento dos projetos de motores flex revolucionou a indústria automobilística, fazendo com que o consumidor possa alternar entre diferentes tipos de combustíveis como o etanol e a gasolina, auxiliando assim a redução das emissões. Nem sempre o etanol se torna economicamente mais vantajoso em relação à gasolina, fazendo muitas pessoas ainda optarem pelo combustível fóssil, no entanto, quando a situação se inverte tem-se um bônus para o meio ambiente através do uso de uma energia mais limpa e sustentável.

De acordo com o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários divulgado em 2013 pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em 2012 cerca de 57% dos veículos possuíam motores com a tecnologia flex, sendo o restante composto por 40% dos motores movidos apenas à gasolina e 3% com exclusividade para o etanol hidratado (MMA, 2013). Isso mostra que os motores flex atraíram o interesse da população, mas que ainda há uma maior preferência para a gasolina em detrimento do etanol.

Além da inserção dos motores flex no mercado, houve a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). A criação do programa visa limitar os níveis de emissões permitidos para os veículos que fossem produzidos ou importados pelo Brasil, controlando assim as vendas dos automóveis no país de forma que sejam proibidos aqueles que não respeitam os níveis de emissão de poluentes estipulados pela legislação.

Vale ressaltar que cada nova fase do PROCONVE limita ainda mais a quantidade de poluentes que podem ser emitidos, forçando os veículos mais novos a atenderem às especificações mais rígidas e, portanto, emitirem uma menor quantidade de poluentes. Com isso, nota-se uma considerável queda na emissão de poluentes ao longo dos anos, já que as frotas mais antigas que poluem mais e que geralmente saem de circulação por falta de peças e sucateamento, são recompensadas pelos novos veículos que são mais limpos e sustentáveis.

Apesar disso, segundo a UNEA (Assembleia Ambiental das Nações Unidas), de 193 países apenas 90 possuem padrões para as emissões de poluentes em veículos (UNEA, 2018). Isso significa que grande parte do mundo ainda não possui uma legislação que padroniza as emissões toleradas para os veículos, fazendo com que sejam permitidos o comércio e o uso de automóveis que possuam um alto poder

de poluição. Isso prejudica o meio ambiente e também a qualidade do ar dentro das cidades, aumentando a incidência de doenças respiratórias na população.

Desde que essas medidas ambientais visando a redução das emissões de poluentes foram estabelecidas, as montadoras de veículos e fabricantes de motores foram obrigadas a desenvolver projetos que atendessem à tais requisitos. Uma das grandes revoluções nesse sentido se deve à implementação e aprimoramento dos catalisadores a partir do fim da década de 80 (MMA, 2013). O componente é responsável pelo pós-tratamento dos gases produzidos na combustão antes de serem expelidos para o meio ambiente.

Nesse sentido, a indústria automobilística possui um constante estudo e desenvolvimento de tecnologias capazes de auxiliar na redução das emissões dos poluentes. Para isso, se faz necessário a realização de testes que verifiquem a viabilidade dessas tecnologias antes que elas possam ser devidamente usadas na produção. No entanto, como os testes experimentais são caros e complexos, eles geralmente fazem parte apenas das últimas etapas de validação da eficiência de uma determinada tecnologia.

Hoje, antes dos testes experimentais, já é bastante difundido o uso de softwares que simulam o funcionamento dos motores. Por serem ferramentas práticas e econômicas em comparação à geração de resultados experimentais, e que ainda retornam um resultado bastante preciso, elas se tornam vantajosas para a avaliação de novas tecnologias e estudos avançados. Os modelos computacionais são então, uma opção importante que auxilia a indústria automobilística no desenvolvimento de soluções sustentáveis que atendam as demandas propostas pelo PROCONVE de maneira eficiente e acessível.

Um software desenvolvido para essa aplicação é o BOOST desenvolvido pela AVL. Trata-se de uma ferramenta virtual para o desenvolvimento de motores. Simulando motores de combustão interna totalmente integrados, o software consegue entregar modelos avançados desses componentes que podem gerar resultados de alta confiabilidade no que diz respeito à performance do motor, emissões de gases e acústica (AVL BOOST, 2018).

Assim, o objetivo desse trabalho foi a avaliação dos poluentes emitidos por um motor flex usando gasolina e etanol, bem como a mistura dos dois combustíveis, sendo que cada caso foi simulado para diferentes rotações. Além disso, resultados

experimentais de outro trabalho foram usados para a comparação com os obtidos no modelo.

Dessa forma, ao se avaliar a qualidade das emissões de poluentes após a combustão em veículos é possível se obter uma melhor percepção dos desafios enfrentados para redução desses parâmetros, bem como levantar possíveis soluções que possam atender tais demandas. Assim, com o uso de ferramentas computacionais e conhecimentos teóricos em motores viabilizam-se os estudos de medidas com os objetivos de mitigar a degradação ambiental e mitigar os problemas de saúde causados pela poluição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Motor de Combustão Interna

Máquinas térmicas são dispositivos capazes de converter energia na forma de calor em trabalho mecânico. Esse calor pode ser obtido de diversas fontes como a combustão, energia solar, energia nuclear, entre outros. Assim, os motores de combustão interna são exemplos de máquinas térmicas que fornecem trabalho mecânico a partir da combustão que fornece energia térmica e outros produtos através de reações químicas.

No caso dos automóveis, esse trabalho mecânico fornecido através da combustão é utilizado para movimentar o veículo, bem como prover energia para outros sistemas auxiliares. Para isso, uma mistura de ar com algum tipo de combustível, seja ele gasolina, etanol ou diesel, é queimada em uma câmara de combustão, produzindo energia e outros produtos das reações químicas.

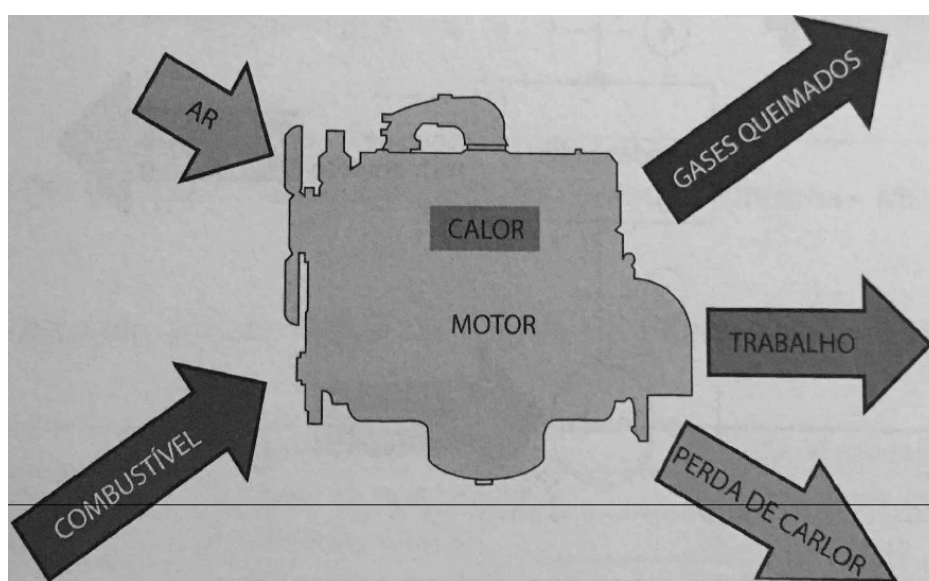


Figura 2.1 - Representação esquemática de uma máquina térmica.
Fonte: BRUNETTI (2012).

De acordo com Brunetti (2012), o processo de obtenção de trabalho em uma máquina térmica é ocasionado através de um fenômeno conhecido como fluxo ativo, que no caso dos motores é formado pela mistura de ar e combustível na entrada do volume de controle e os gases contendo produtos da combustão que são expelidos

na saída do volume de controle. Nesse caso, o volume de controle seria a própria câmara de combustão onde as reações, de fato, ocorrem.

Em relação ao fluxo ativo, as máquinas térmicas podem ser classificadas como motores de combustão externa e motores de combustão interna. O primeiro é caracterizado por uma combustão que ocorre fora do fluxo ativo, se portando apenas como uma operação intermediária para a entrega de energia térmica, como acontece com as máquinas à vapor. Já quando se fala de motores de combustão interna, o fluxo ativo participa diretamente das reações de combustão fornecendo a energia dentro do próprio volume de controle.

Hoje, com o avanço tecnológico e a necessidade de aplicações cada vez mais diversas, tem-se variados tipos de motores com diferentes funcionamentos. Em geral, os automóveis usam os motores de combustão interna uma vez que são mais eficientes e mais aplicáveis para o segmento. Brunetti (2012) ainda ressalta os principais tipos de motores de combustão interna como sendo os motores alternativos, rotativos e de impulso.

Os motores alternativos obtêm o trabalho mecânico através do movimento oscilatório de um pistão que através de um sistema biela manivela é transformado em rotação contínua para determinada aplicação. A grande maioria dos automóveis usam esse tipo de motor pelo seu funcionamento simples e satisfatório.

Um outro tipo de motor são os rotativos, que produzem um trabalho diretamente por um movimento de rotação, como é o caso dos motores Wankel. Apesar de serem motores com uma alta eficiência, ainda sofrem bastante com problemas de vedação, ruídos e lubrificação, o que faz o custo desses dispositivos se tornarem bastante elevados.

Já quando o trabalho é obtido pela força de reação de gases expelidos a uma alta velocidade pelo motor, tem-se os motores de impulso. Este é o caso dos motores a jato e foguetes que produzem elevada potência através de uma resposta rápida e eficiente.

Motores alternativos de combustão interna são, sem dúvidas, os tipos de motores a combustão mais utilizados atualmente, principalmente quando se trata de veículos automotivos. Nesses motores a combustão ocorre dentro do fluxo ativo, onde este participa diretamente das reações e produz um movimento oscilatório de

um pistão que é transmitido como um movimento rotativo para o eixo de transmissão.

Além disso, os motores alternativos podem ser classificados quanto ao tipo de ignição que ocorre durante a combustão. Essa ignição nada mais é do que um agente necessário para que o combustível reaja com o ar, sem o qual não seria possível provocar a combustão. Dessa forma, a ignição fornece a energia necessária para que se inicie as reações de combustão, desenvolvendo uma frente de chama que consome o combustível e fornece energia para o motor (BRUNETTI, 2012).

Em 1876, o inventor Nicolaus August Otto concebeu o motor de ciclo Otto também conhecido como motor de ignição por faísca ou motor de quatro tempos. Um pouco depois, em 1893, o motor de ignição espontânea, também conhecido como motor de ciclo diesel foi criado por Rudolf Diesel (BRAESS; SEIFFERT, 2005). Brunetti (2012) explica que no motor de ciclo Otto a mistura de ar e combustível é admitida previamente formada ou com a injeção direta de combustível e em seguida a combustão é iniciada através de uma centelha produzida entre os eletrodos de uma vela através de uma fonte elétrica.

Já para os motores de ciclo Diesel o pistão comprime somente ar até que se atinja uma temperatura suficientemente elevada. A partir disso, o combustível é injetado de forma que ocorra uma reação espontânea entre o combustível e o oxigênio presente na câmara dando início à combustão.

Motores de ciclo Diesel possuem uma maior potência e conseguem movimentar maiores cargas, sendo assim, são bastante usados em veículos com cargas pesadas como caminhões, ônibus e automóveis de grande porte. Embora ainda não seja uma realidade no Brasil, o ciclo Diesel também é usado em carros de passeio. Apesar de sua maior aplicabilidade ser em veículos pesados, esse tipo de motor vem ganhando cada vez mais espaço no mercado de veículos de passeio, já que permite a produção de carros mais robustos e potentes.

No entanto, o ciclo Otto ainda é usado em grande parte dos veículos de passeio, como é o caso do objeto de estudo deste trabalho. Dessa forma, o próximo capítulo se dedica em expor algumas características importantes desses motores.

2.2 Funcionamento dos motores

Um ciclo de operações em motores é considerado uma sequência de processos sofridos pelo fluxo ativo, ou seja, são processos que se repetem periodicamente para a produção do trabalho mecânico útil (BRUNETTI, 2012). O que acontece é que dentro de um único ciclo podem acontecer diferentes tempos, que são na verdade etapas da combustão dentro do ciclo.

Neste trabalho, o motor analisado é um motor alternativo do ciclo Otto a quatro tempos (4T) que será definido a seguir.

2.2.1 Ciclo Otto em motores alternativos

Nos motores de quatro tempos, a cada duas rotações do eixo virabrequim (720°) completam-se os quatro tempos necessários para ocorrer o ciclo de fornecimento de energia do motor. Através do mecanismo cursor biela manivela, a cada ciclo do eixo virabrequim o pistão é elevado e em seguida abaixado dentro da câmara de combustão. Assim, nota-se que o pistão percorre o curso do cilindro quatro vezes a cada ciclo, e o eixo do motor realiza duas rotações completas nesse mesmo ciclo.

O ponto onde o pistão atinge sua altura máxima e, portanto, o volume da câmara de combustão se reduz ao mínimo é conhecido como Ponto Morto Superior (PMS). Analogamente, o ponto de altura mínima atingido pelo pistão é denominado como Ponto Morto Inferior (PMI) e é nesta configuração que se tem o máximo volume da câmara de combustão.

Assim, os quatro tempos são definidos, em ordem cronológica como, tempo de admissão, tempo de compressão, tempo de expansão e tempo de escape.

Segundo Brunetti (2012), o primeiro tempo é quando o pistão se desloca do Ponto Morto Superior até o Ponto Morto Inferior. Nesse momento, o pistão provoca uma sucção a partir de uma pressão negativa, obrigando o fluxo dos gases através da válvula de admissão que se encontra aberta durante esse processo. Assim, a câmara de combustão é preenchida com uma mistura de ar-combustível que será queimada para o fornecimento de energia.

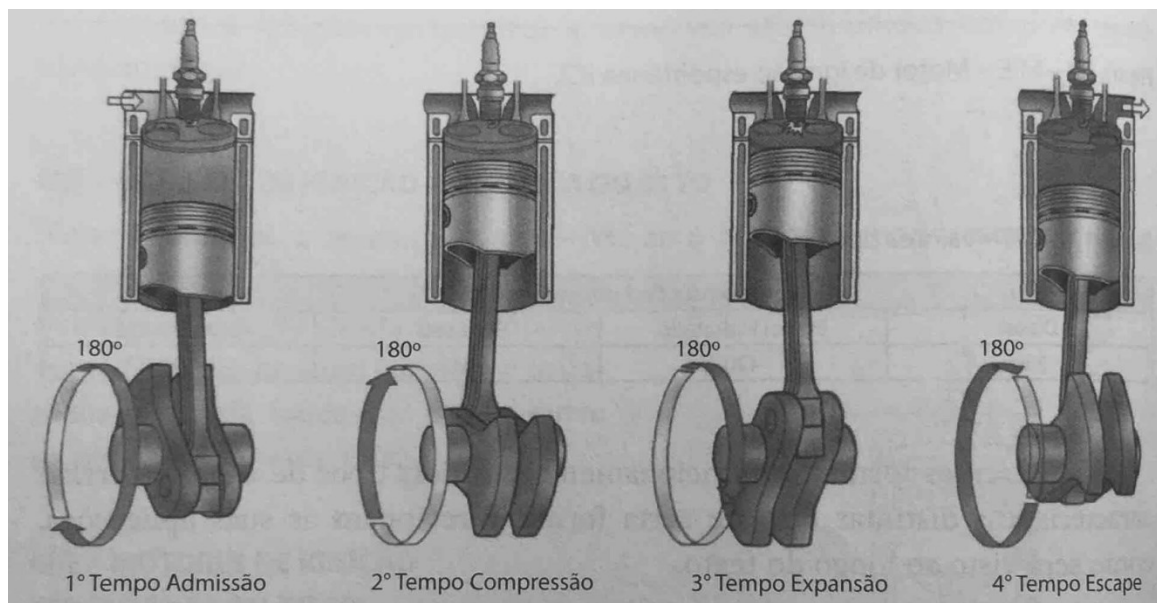


Figura 2.2 - Os quatro tempos de um motor de ciclo Otto.
Fonte: BRUNETTI (2012).

Durante o segundo tempo, ocorre a compressão da mistura que foi admitida no cilindro. Nesse movimento, o pistão parte do Ponto Morto Inferior e se desloca até o Ponto Morto Superior com todas as válvulas fechadas, ou seja, eleva-se a pressão da mistura de ar e combustível presente dentro da câmara de combustão.

No terceiro tempo, conhecido como tempo de expansão, ainda quando o pistão se encontra próximo ao Ponto Morto Superior ocorre a centelha que causa o início da combustão. Após a ignição, as reações de combustão começam a acontecer de maneira rápida provocando um grande aumento da pressão e temperatura no interior do cilindro. Assim, a energia térmica liberada pela combustão impulsiona o pistão para baixo, de forma que esse calor seja convertido em trabalho positivo útil do motor.

Por fim, o quarto tempo é denominado como tempo de escape onde há o retorno do pistão do Ponto Morto Inferior até o Ponto Morto Superior. Nesse momento, a válvula de escape é aberta, de modo que os gases de escape produzidos durante a combustão sejam expelidos para fora do cilindro.

A figura 2.3 apresentada a seguir, mostra a distribuição dos tempos para cada cilindro em um motor contendo quatro cilindros. Vale ressaltar que o tempo de expansão onde ocorre a combustão acontece para um cilindro por vez. Isso promove uma melhor distribuição da carga no eixo virabrequim bem como evita com

que a transmissão de potência seja muito brusca, uma vez que a combustão em cada cilindro ocorre de maneira isolada e bem distribuída.

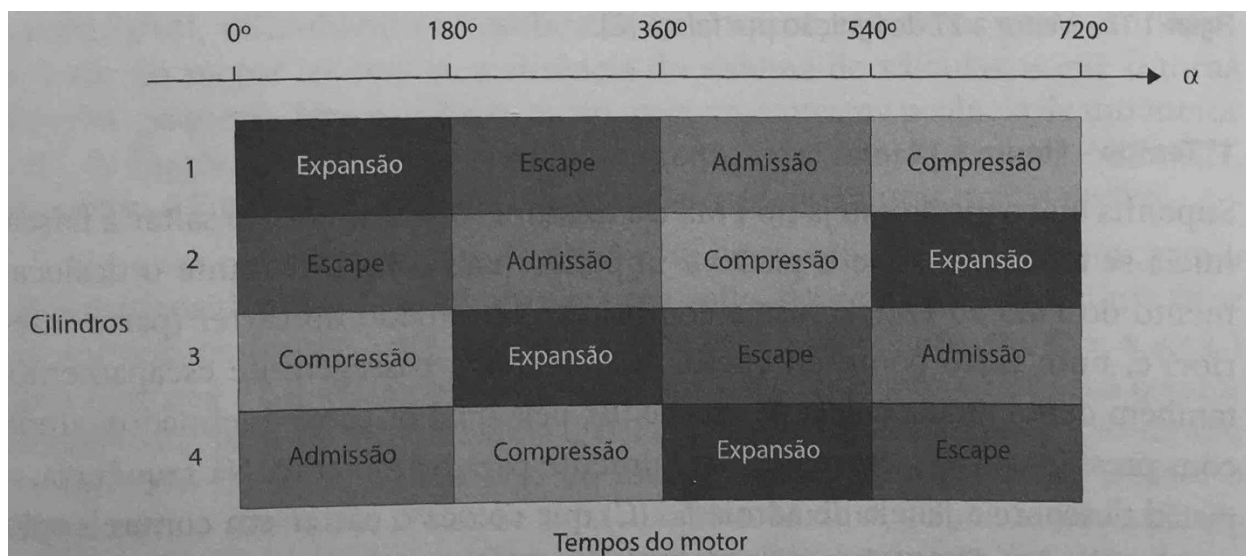


Figura 2.3 - Sincronismo dos tempos de cada cilindro em um motor do ciclo Otto.
Fonte: BRUNETTI (2012).

2.2.2 Componentes dos motores alternativos

A estrutura de um motor é caracterizada por ser robusta e resistente a fim de suportar as elevadas pressões cíclicas e altas velocidades em que é submetido durante o seu funcionamento, como relata Martins (2006). Essa estrutura ainda pode ser dividida por três grandes partes, sendo elas: bloco, cabeçote e cárter.

O bloco do motor é localizado entre o cárter e o cabeçote é onde os cilindros são fixados e os pistões trabalham. Em projetos mais antigos, o ferro fundido era empregado devido à sua elevada resistência, mas com os avanços tecnológicos o alumínio é o elemento mais usado na fabricação dessas estruturas uma vez que são leves e oferecem uma melhor transferência de calor.

O cabeçote é a parte superior do motor acoplada ao bloco onde se encontram as válvulas de admissão e de escape para cada cilindro do motor, bem como os apoios das árvores de cames responsáveis pela abertura e fechamento das válvulas, além das velas de ignição. Geralmente, são fabricados com o mesmo material do bloco sendo que hoje o alumínio é o metal mais utilizado.

Na parte inferior do motor se encontra o cárter, que tem a função de armazenar e arrefecer o óleo lubrificante que circula em todo o motor garantindo o

bom funcionamento dos componentes móveis. Podem ser fabricados a partir do aço ou do alumínio e podem apresentar aletas para um aumento da eficiência térmica na troca de calor com o ambiente.

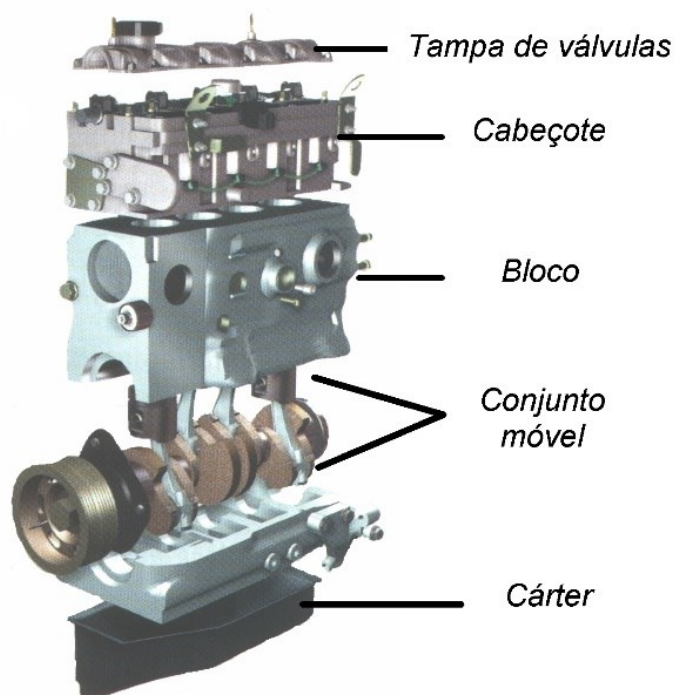


Figura 2.4 - Representação das principais partes de um motor.
Fonte: SENAI (2003).

Martins (2006) também descreve alguns componentes que são essenciais para o funcionamento do motor como será apresentado a seguir.

O pistão é o componente que recebe diretamente a pressão produzida pela combustão, fazendo com seja o componente responsável por transmitir a potência útil da combustão. Além disso, é importante que o pistão também seja fabricado de modo que a transferência de calor para as paredes do cilindro seja eficiente, e que seu encaixe no cilindro seja satisfatório mesmo com a grande variação de temperatura, a fim de evitar possíveis vazamentos.

Já a biela é um componente que transmite o movimento do pistão para o eixo virabrequim, ou seja, converte o movimento retilíneo produzido pelo pistão em um movimento rotativo que será transmitido para as rodas através do eixo virabrequim.

O eixo virabrequim, também conhecido como eixo de manivelas é responsável por receber potência do pistão e da biela e transmiti-la para o volante de inércia. Além disso, esse componente comanda os sistemas de distribuição,

injeção, ignição, refrigeração e lubrificação através de engrenagens, correntes e sensores eletrônicos que são acoplados ao longo do eixo.

Assim, o volante de inércia recebe a energia transmitida pelo eixo virabrequim e a armazena de modo que ela seja fornecida através de impulsos para garantir que o motor esteja funcionando mesmo entre os tempos em que a energia não é gerada, como na admissão, na compressão e no escape. Dessa maneira, o funcionamento do motor se torna mais suave causando a impressão de que a energia está sendo fornecida a todo o momento.

O eixo comando de válvulas ou árvore de cames é um componente que provoca a abertura e o fechamento das válvulas de admissão e de escape. A partir do sincronismo com o eixo virabrequim o comando de abertura e fechamento das válvulas é realizado no momento certo para cada cilindro. Para isso, o eixo pode contar com elementos como balancim, haste e tucho para controlar a admissão e o escape.

Como abordado anteriormente, as válvulas realizam a admissão e exaustão dos gases durante todo o fluxo ativo dentro dos cilindros. As válvulas de admissão admitem uma mistura limpa de ar e combustível enquanto que as válvulas de escape permitem que os gases resultantes da combustão sejam eliminados da câmara.

Na figura 2.5 nota-se a disposição e a representação desses componentes.

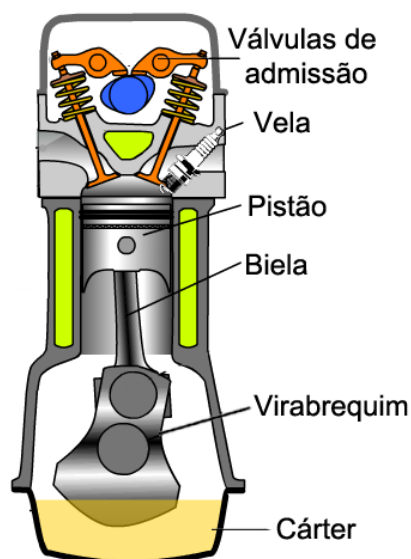


Figura 2.5 - Detalhes do cilindro de um motor alternativo de combustão interna.
Fonte: MAKINANDOVELEZ (2011)

2.2.3 Sistemas auxiliares em motores alternativos

Para o bom funcionamento de um motor se torna necessário o uso de outros sistemas que auxiliam em seu desempenho. Tais mecanismos garantem que a combustão e a geração de energia ocorram da melhor forma possível de modo que atenda às necessidades e condições para determinada circunstância. Assim, também é importante a integridade de todos esses sistemas para que de uma maneira geral o motor se comporte como esperado.

Primeiro o sistema de admissão de ar atua na coleta do comburente que irá queimar o combustível. Essa admissão de ar pode ser natural ou forçada através do uso de turbinas ou turbo-compressores que desempenham a função de aplicar uma maior quantidade de ar dentro da câmara de combustão. No entanto, em ambos os casos o ar entra por um elemento filtrante para tratamento de partículas e então é de fato admitido para que se possa misturar ao combustível (BRAESS; SEIFFERT, 2005). Depois disso, o ar passa por uma restrição conhecida como válvula borboleta que desempenha a função de controlar a quantidade de ar admitida pelo motor, de acordo com a necessidade potência para determinada condição.

O ar admitido então recebe o combustível que deverá ser queimado. Esse fluido é bombeado do reservatório e passa por uma linha de combustível até que finalmente possa ser aspergido no ar admitido. A proporção de combustível que é aplicada dependerá das condições e necessidades do motor, muitas vezes decidida através da leitura de sensores. Vale ressaltar que os bicos injetores de combustível exercem a importante função de aspergir o fluido de maneira homogênea e bem distribuída, facilitando que o combustível seja incorporado de maneira eficiente pelo ar.

A injeção de combustível pode ser através de um sistema de carburador ou por intermédio de uma injeção eletrônica. O primeiro se trata de um projeto puramente mecânico, que apesar de ser satisfatório, não consegue entregar uma injeção muito precisa e eficiente. Dessa forma, o carburador acabou caindo em desuso com o advento da tecnologia da injeção eletrônica que conseguiu compensar as carências desse antigo mecanismo (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

Hoje, os motores normalmente possuem o sistema de injeção eletrônica que a partir do monitoramento de sensores e dados específicos da condição do motor controlam precisamente a quantidade de combustível que irá ser injetada no ar. Além disso, os bicos injetores pulverizam o combustível de forma que a mistura entre ar e combustível seja facilitada, aumentando assim o potencial da combustão. Esse sistema pode ser direto, quando o combustível é aplicado diretamente dentro da câmara de combustão, ou indireto, quando o combustível é injetado antes da câmara de combustão criando uma pré-mistura de ar e combustível, como ocorre na maioria dos veículos (BRUNETTI, 2012).

Uma vez que a mistura é admitida para dentro do cilindro, a combustão se inicia a partir de uma centelha de ignição provocada pelos eletrodos de uma vela elétrica que são alimentados pelo sistema elétrico do veículo. Uma voltagem de cerca de 10.000V é necessária para que se inicie o processo de combustão. Para chegar a esse nível de descarga elétrica o sistema de ignição conta com um subsistema de amplificação, além de um subsistema de distribuição que é capaz de distribuir as correntes elétricas para as velas de todos os cilindros no momento adequado para combustão (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

O sistema elétrico também deve alimentar outros componentes como motor de partida, luzes, sensores, entre outros elementos que necessitam de eletricidade. Para tanto, os veículos contam com uma bateria que recebe e armazena carga elétrica para alimentar todos esses dispositivos. De acordo com Brunetti (2012), a energia é recarregada constantemente através de um alternador acoplado eixo virabrequim do motor, de modo que parte da energia mecânica se converta em energia elétrica para alimentar a bateria do sistema elétrico.

Outro sistema muito importante para o bom funcionamento de um motor é o sistema de lubrificação. Segundo Martins (2006), a lubrificação permite o aumento da eficiência e redução do desgaste em um motor ao mitigar as perdas pelo atrito entre superfícies em movimento como nos apoios do virabrequim, moentes das bielas, pistões e cilindros, apoios de árvores de cames, comando de válvulas e outros componentes móveis. Para isso, uma bomba é interligada ao eixo virabrequim e efetua a circulação do óleo armazenado no cárter para todos os

elementos móveis do motor, além de permitir a passagem do lubrificante em um filtro para a purificação de possíveis contaminantes e impurezas.

Além disso, a temperatura média do motor deve ser bem controlada a fim de preservar o desempenho dos componentes. Dessa forma, um sistema de arrefecimento se torna necessário para manter a temperatura de trabalho desejada e evitar riscos de desgastes, falhas ou detonação do motor.

Para garantir o arrefecimento do motor uma das formas mais simples se trata da construção de uma superfície de aletas na parede externa do motor que intensifica a troca de calor com o ambiente externo, favorecendo a queda de temperatura. Além disso, geralmente usa-se um eletro-ventilador que produz uma convecção forçada ao redor do motor quando sua temperatura está demasiadamente elevada. Outro meio de arrefecimento em todos os veículos é a troca de calor com água aditivada, que ao circular em meio às paredes do motor consegue controlar sua temperatura de uma forma muito mais eficiente que o ar. Após se aquecer em contato com o motor, a água passa por um dispositivo conhecido como radiador, onde se resfria novamente com o fluxo de ar para dar continuidade ao ciclo de arrefecimento (MARTINS, 2006).

Após a devida combustão dentro dos cilindros os gases produzidos neste processo são eliminados pelas válvulas de escape. Esses produtos possuem uma alta concentração de poluentes e elevada toxicidade, por isso existe um dispositivo conhecido como catalisador que é responsável por tratar esses gases de maneira que essa concentração de poluentes seja reduzida ao mínimo, a fim de amenizar os danos ao expulsá-los para o ambiente. De acordo com Martins (2006), o catalisador funciona como uma colmeia com pequenas passagens de cerâmicas revestidas com metais que reagem com o gás e catalisam os poluentes garantindo que o gás emitido para atmosfera não seja tão nocivo. Além disso, existe um sistema de escapamento atrelado ao catalisador cuja principal função é reduzir os ruídos provocados pela saída do gás de escape, atenuando a poluição sonora provocada pelos automóveis.

Com todos esses sistemas ligados ao motor é extremamente importante que se tenha uma boa instrumentação de certos parâmetros gerais da máquina. Dessa forma, sensores são instalados em diversas partes do motor, e são considerados

como os sentidos do equipamento, que ao serem tratados e entendidos auxiliam na tomada de decisão que influenciará o seu desempenho.

Através de sinais elétricos, os sensores enviam informações de um determinado parâmetro do motor para uma central de controle integrada de todo o sistema do motor, conhecida como a central eletrônica ECU (do inglês: Engine Control Unit). Em geral, a ECU é programada pelo fabricante e armazenada em sua memória dados em relação ao funcionamento ótimo do motor. Assim, essa central recebe os sinais emitidos dos sensores e compara com o padrão determinado pelo fabricante, e caso esteja muito longe do ponto ótimo de trabalho a central comanda ações ao motor com o intuito de recuperar o melhor desempenho do veículo (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

De acordo com relatos de Braess e Seiffert (2005), o sistema de instrumentação ativa de um motor faz com que a máquina trabalhe em uma malha fechada, buscando sempre se adequar com as variadas situações que este é colocado em funcionamento. Assim, os autores discutem os principais sensores que normalmente são usados em veículos e que de alguma forma possibilitam um melhor desempenho para a geração de energia.

O sensor de rotação é capaz de calcular a velocidade de rotação do motor através de uma indução criada entre a base magnética do sensor e os dentes de uma engrenagem acoplada ao eixo virabrequim. O sinal é enviado para a ECU que a partir disso pode determinar alguns comandos em relação ao tempo de ignição, início da ignição e comando de abertura e fechamento de válvulas, dependendo da tecnologia desse sistema.

Já o sensor de fase do motor indica o tempo em que um dos cilindros está atuando, seja admissão, compressão, expansão ou descarga. Dessa forma, a central consegue obter o momento exato de ignição do sistema, bem como a sincronia dos demais cilindros.

O sensor de posição da válvula borboleta, indica para a ECU a carga que está sendo demandada pelo motorista, para que a partir disso a central controle as mudanças na carga de combustível para que essa demanda seja atendida. Ainda na admissão, existe também o sensor de vazão de ar, que mede a vazão mássica de ar

que entra no motor, ajudando também na regulagem do combustível que deverá ser injetado para manter a proporção estequiométrica das reações de combustão.

Para aferir as temperaturas, normalmente tem-se os sensores temperatura para o ar de admissão e para o líquido de arrefecimento do motor. Através de um termo resistor informações quanto à temperatura desses pontos são enviadas para a central que pode usar tais dados para controlar alguma variável do motor.

Além disso, strain gages e transdutores piezo-resistivos são comumente usados para aferir a pressão absoluta do ar admitido. Combinando tal informação com os dados de temperatura pode-se saber com precisão o fluxo mássico de ar que está sendo admitido no motor, ou seja, tem-se a informação exata da quantidade de ar entrando na câmara de combustão.

Outro importante dispositivo é o sensor de oxigênio, também conhecido como sonda lambda, que é instalado no próximo do coletor dos gases de escape. Esse sensor consegue aferir a quantidade de oxigênio presente nesses gases que estão saindo do motor e a partir disso a central determina a sua relação de ar-combustível. Caso o sensor perceba uma baixa concentração de oxigênio, significa que a mistura está rica, ou seja, com uma proporção de combustível maior em relação a proporção estequiométrica, sendo que o inverso ocorre para misturas pobres. Dessa forma, a central de controle consegue analisar tais dados e realizar comandos para corrigir a mistura de modo que ela se mantenha próxima ao ponto ótimo determinado pelo fabricante. Além disso, com esse sensor é possível se ter um maior controle das emissões de poluentes para a atmosfera através dos óxidos de nitrogênio e de combustíveis não queimados.

Dessa forma, o sistema se comporta com uma malha fechada que a todo momento envia “feedbacks” para a ECU, para que a partir disso a central possa tomar as devidas decisões e controlar as variáveis do motor de modo que seu rendimento seja preservado.

2.2.4 Desempenho de motores

No estudo de motores, é importante que se tenha um profundo conhecimento de propriedades e conceitos relevantes para o desenvolvimento de mecanismos

mais eficientes e potentes. Tais informações são tratadas e podem gerar curvas que apresentam de maneira visual o comportamento de um determinado motor.

Para tanto, se faz necessário o uso de técnicas experimentais para levantar dados suficientes para a construção das curvas que descrevem o motor. Por isso, os motores geralmente são submetidos a testes em bancadas experimentais contendo equipamentos conhecidos como freios dinamométricos, que em sua maioria se classificam em hidráulicos e elétricos.

De acordo com Brunetti (2012), os freios dinamométricos hidráulicos funcionam a partir da energia hidráulica da água. O motor em funcionamento gera uma turbulência do fluido que por sua vez consegue converter essa excitação em esforço torçor, mensurando assim o torque impelido pelo motor. Já nos freios dinamométricos elétricos, essa medição é realizada com a energização de uma bobina pelo movimento rotativo do motor. A partir disso, esse componente gera um campo magnético que é sentida por uma grande engrenagem fabricada com material magnético, e então, o torque pode ser mensurado devido ao movimento desse componente.

Além disso, existem os dinamômetros mistos que são máquinas elétricas de corrente alternada podendo funcionar como motor ou gerador. Quando em operação de geração, se comportam como freios de tal modo que a energia elétrica gerada pela excitação do dinamômetro seja devolvida à rede. O campo de excitação desse dispositivo é independente proporcionando assim uma ampla variação de velocidades e de potências absorvidas (BRUNETTI, 2012).

Vale ressaltar que em ambos os sistemas de freios dinamométricos, a energia transmitida sofre muitas perdas, sendo em sua maioria através do calor. Dessa forma, é necessário prever tais perdas e minimiza-las ao máximo para que os resultados dos testes sejam satisfatórios. A forma mais comum de se evitar essas grandes perdas é através do resfriamento dos componentes do freio dinamométrico, que geralmente é realizado por meio de água a baixas temperaturas, devido à sua boa capacidade de absorver calor e menor custo para aplicação e tratamento.

Brunetti (2012) ainda ressalta que cada tipo de freio dinamométrico possui uma melhor aplicabilidade dependendo da finalidade dos testes. Os hidráulicos e elétricos, por exemplo, são mais indicados para a produção, manutenção e controle de qualidade, visto que atingem maiores torques e potências. Já os freios mistos são

mais usados em áreas de pesquisa e desenvolvimento, visto que são mais caros e necessitam de um maior investimento, além de possuírem capacidades menores sendo então, mais indicados para testes experimentais de protótipos.

Dessa forma, a partir dos testes experimentais pode-se definir o torque de um motor para uma determinada rotação através do uso de um freio dinamométrico. Além disso, existem outras propriedades que descrevem as características do motor quanto ao desempenho e eficiência. Estes parâmetros são estimados muitas vezes através de cálculos com dados já obtidos.

A potência efetiva se trata da potência medida no eixo do motor, ou seja, aquela que realmente é aproveitada para o movimento mecânico (BRUNETTI, 2012). A equação 2.1 apresenta como o cálculo dessa grandeza pode ser realizado:

$$N_e = T * \omega = T * 2\pi * n \quad (2.1)$$

Segundo Brunetti (2012), a potência indicada é definida pela potência desenvolvida pelo ciclo termodinâmico do fluido ativo. Essa potência pode ser mensurada através de um dispositivo indicador de pressões, que permite traçar o ciclo do fluido ativo apresentando um diagrama da pressão versus o volume como indica a figura 2.6. De acordo com a termodinâmica, sabe-se que as áreas do ciclo em questão são proporcionais ao trabalho desempenhado, sendo que a potência indicada pode então ser descrita como mostrada na equação 2.2.

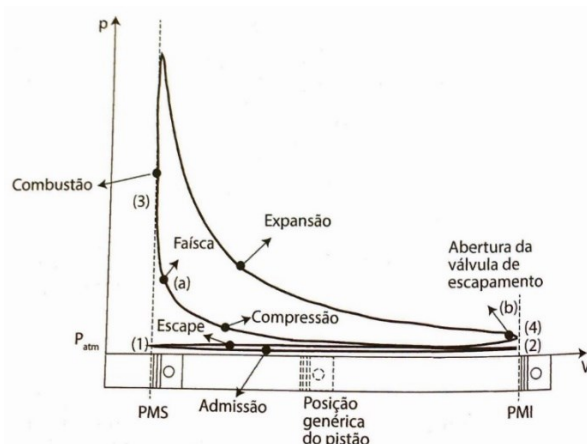


Figura 2.6 - Diagrama de pressão e volume para motores de combustão interna com ignição por faísca.

Fonte: BRUNETTI (2012).

$$N_i = W_i * \frac{n}{x} * z \quad (2.2)$$

Onde x pode assumir o valor de 1 ou 2, sendo 1 para motores de dois tempos e dois para motores de quatro tempos. Além disso, z representa o número de cilindros contidos no motor avaliado.

Assim, a potência indicada nada mais é do que a potência total que o motor poderia fornecer para condições ideais. No entanto, devido às perdas pelo atrito, calor e ruído, o motor na realidade consegue entregar uma potência inferior à indicada, a potência efetiva. As perdas que inevitavelmente ocorrem durante a combustão são estimadas pela potência de atrito, obedecendo a seguinte proporção:

$$N_i = N_e + N_a \quad (2.3)$$

Outro parâmetro importante para o conhecimento dos motores é o calor fornecido por unidade de tempo, também conhecido como fluxo de calor pela combustão. Esse fluxo pode ser calculado pelo produto entre o consumo de combustível requerido pelo motor e o poder calorífico inferior do combustível, que representa uma propriedade específica para cada tipo de combustível indicando o quanto de energia por unidade de massa os componentes conseguem fornecer. A equação 2.4 estabelece a relação entre essas grandezas:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c * PCi \quad (2.4)$$

A partir desses parâmetros, é possível mensurar algumas eficiências como explica Brunetti (2012). O rendimento térmico mensura o quanto de calor é transformado em trabalho, uma vez que parte desse calor é cedida à fonte fria e outra parte pode nem chegar a se converter devido à possibilidade de combustão incompleta. Dessa forma, a potência indicada sempre será inferior ao calor fornecido pela combustão, como descreve a equação 2.5 do rendimento térmico:

$$\eta_t = \frac{N_i}{\dot{Q}} \quad (2.5)$$

Analogamente, a eficiência global efetiva mensura a parte do fluxo de calor da combustão que de fato é convertida em potência efetiva usada no eixo do motor, representada pela equação 2.6. Já o rendimento volumétrico pode ser estimado pela relação entre a massa de ar realmente admitida no motor e a massa de ar que poderia preencher o mesmo volume com as mesmas propriedades da atmosfera, como indica a equação 2.7. Além disso, ainda existe o rendimento mecânico que compara a potência efetiva com a potência indicada, resultando em uma eficiência sensível às perdas mecânicas, como descrita pela equação 2.8.

$$\eta_g = \frac{N_e}{\dot{Q}} \quad (2.6)$$

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_{ac}} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{ac}} \quad (2.7)$$

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} \quad (2.8)$$

Um outro parâmetro importante para a avaliação de desempenho em motores é o consumo de combustível para seu funcionamento. É interessante perceber que um motor mais econômico é um diferencial tanto no aspecto econômico quanto no ambiental, e, portanto, o parâmetro conhecido como consumo específico é utilizado para essa finalidade de modo que possibilita a estimativa da vazão de combustível consumida por unidade da potência efetiva usada no eixo, como descreve a seguinte equação 2.9.

$$C_e = \frac{\dot{m}_c}{N_e} \quad (2.9)$$

Todas as propriedades dos motores aqui mencionadas variam em função das condições de funcionamento. Assim, para se ter uma melhor visualização dessas variações e, portanto, avaliar o desempenho da máquina, são construídas as curvas

características dos motores, a partir dos ensaios e cálculos realizados em laboratórios.

As curvas características mais usuais são as curvas a plena carga para os parâmetros de torque, potência efetiva e consumo específico em função da rotação do motor (BRUNETTI, 2012).

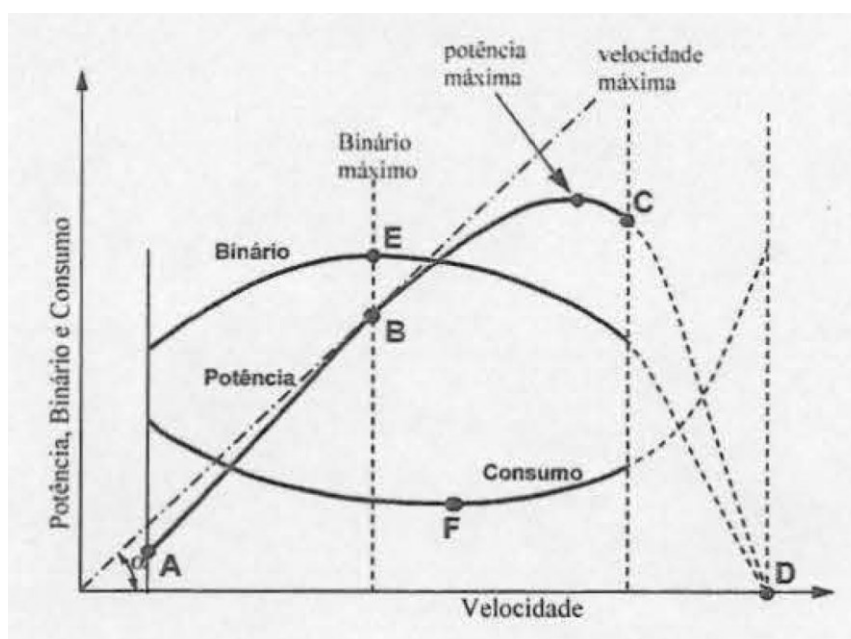


Figura 2.7 - Representação das três curvas características do motor: Torque (binário), Potência e Consumo.

Fonte: MARTINS (2006).

Pela figura 2.7 percebe-se que os pontos característicos mais importantes não coincidem nas diferentes curvas.

Sabe-se que o torque sentido pelo motor é aproximadamente proporcional à quantidade de ar que entra no motor para cada ciclo. Dessa forma, para baixas rotações os avanços e atrasos em relação à abertura e fechamento de válvulas da admissão e do escape resultam em um menor torque, sendo que à medida em que se ganha velocidade de rotação o efeito dinâmico torna a entrega de torque mais eficiente até que se atinja o máximo. A partir desse ponto, o aumento de rotação implica em maiores perdas de carga e esforços de atrito entre superfícies, causando assim uma redução do torque efetivo (MARTINS, 2006).

Brunetti (2012) explica que como o torque é proporcional à potência indicada, o torque aumenta conforme o produto dos rendimentos aumenta. Esse produto

indica o aproveitamento do calor fornecido durante a combustão, bem como a eficiência de enchimento do cilindro e também o aproveitamento desses efeitos no eixo.

Na rotação em que se atinge o máximo torque no eixo tem-se também a máxima pressão média efetiva do cilindro. A partir desse ponto, o trabalho indicado diminui devido aos efeitos dos rendimentos. Em contrapartida, a potência continua crescendo uma vez que o aumento da rotação compensa as perdas de torque até certo ponto. Acima de certa rotação, esse crescimento não consegue se sustentar fazendo com que a potência inevitavelmente diminua.

De acordo com Martins (2006), a curva do consumo específico não possui uma relação direta com os outros diagramas. A rotação que representa o mínimo consumo de combustível geralmente é intermediária à velocidade para os máximos de torque e potência. Para baixas rotações, o consumo é elevado em virtude de haver elevadas perdas térmicas, ao passo que para altas rotações o consumo se eleva novamente devido às intensas perdas mecânicas.

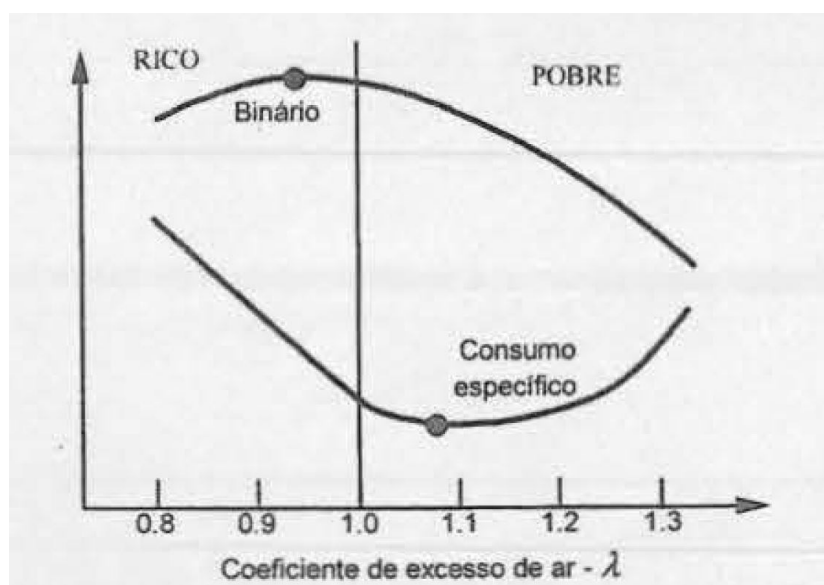


Figura 2.8 - Relação da curva de consumo e torque (binário) com a variação da concentração de combustível na mistura ar-combustível.

Fonte: MARTINS (2006).

Existe ainda uma outra representação do consumo específico considerando um gráfico da pressão média em relação à velocidade de rotação. Conhecido como diagrama de desempenho, o consumo específico toma a forma de curvas de nível

representando a pressão média efetiva e a rotação para determinada operação, como está representado na figura 2.9.

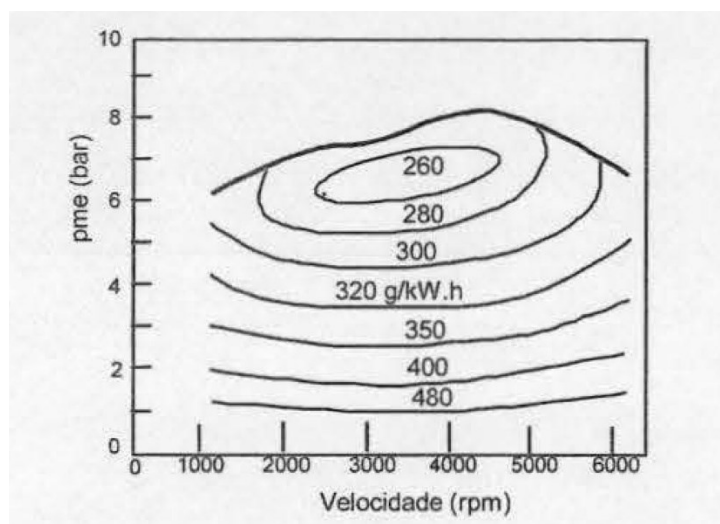


Figura 2.9 - Representação do diagrama de desempenho de um motor com ignição por centelha (ciclo Otto).
Fonte: MARTINS (2006).

Percebe-se então que para o motor a gasolina, nas cargas inferiores, as perdas por bombeamento são significativas, e o aumento e diminuição da velocidade podem aumentar o consumo, devido às elevadas perdas mecânicas e perdas térmicas que, respectivamente, cada caso pode provocar.

Vale ressaltar que o desempenho de um motor está intimamente relacionado ao tipo de combustível utilizado bem como suas condições físico-químicas. Como estes produtos são as fontes de energia para a combustão do motor, suas particularidades determinam o comportamento da máquina, podendo alterar sua performance, desempenho e longevidade. Hoje já existe uma certa variedade de combustíveis, além de outras alternativas que estão sendo frequentemente estudados e pesquisados visando ganho de benefícios na geração de energia e substituição daqueles não renováveis que são constantemente explorados. Dessa maneira, o próximo capítulo discute os principais combustíveis utilizados em veículos de passeio, detalhando suas particularidades e benefícios.

2.3 Combustíveis

Em motores, o combustível é a fonte de energia química que será convertida em energia mecânica durante as reações de combustão. Por isso, é muito importante o estudo de propriedades de cada tipo de combustível, buscando sempre por opções mais eficientes em termos de desempenho, consumo e poluição.

Os combustíveis fósseis, definidos como aqueles que são derivados do petróleo, são utilizados em larga escala para diversas aplicações de motores. Gasolina, óleo diesel, querosene para aviação e outros óleos-combustíveis marítimos são alguns exemplos da vasta variação desses produtos bem como suas aplicabilidades. Apesar desses combustíveis apresentarem elevada eficiência de performance, são grandes poluentes e fontes de energia não renováveis, uma vez que o petróleo é um recurso considerado limitado devido ao longo período de tempo necessário para a sua formação.

A fim de amenizar os impactos ambientais, novos tipos de combustíveis estão sendo sempre estudados e em constante desenvolvimento. Hoje, o combustível etanol, conhecido também como álcool etílico, vem ganhando seu espaço já que é proveniente da cana-de-açúcar e, portanto, considerado uma fonte de energia renovável, além de apresentar um menor índice de poluição se comparado com os combustíveis fósseis.

Dessa forma, esse capítulo se dedica em detalhar os principais combustíveis usados atualmente: a gasolina e o etanol. Além disso, é apresentada algumas propriedades importantes que estão intrinsecamente relacionadas a esses combustíveis.

2.3.1 Mistura ar-combustível

Em motores, para que se tenha a combustão, o combustível deve ser misturado com o ar, que será o comburente da reação. Sabe-se que o ar é uma mistura de gases, sendo constituído (em volume) com cerca de 78,09% de Nitrogênio, 20,95% de Oxigênio, 0,93% de Argônio e 0,03% de Dióxido de Carbono (MARTINS, 2006).

Quando todo o ar disponível na mistura consegue queimar todo o combustível usado, a mistura é denominada estequiométrica. Isso quer dizer que as reações químicas estarão perfeitamente balanceadas e que as quantidades de reagentes e produtos serão de fato aquelas determinadas pela proporção das reações.

No entanto, nem sempre as misturas são estequiométricas, muitas vezes há o excesso ou a falta de ar para uma determinada concentração de combustível. Martins (2006) explica que quando a mistura tem excesso de ar na relação ar-combustível, ela é denominada pobre, enquanto que, em caso contrário, a mistura com deficiência de ar é conhecida como mistura rica. A seguir são apresentados dois coeficientes que especificam a mistura ar-combustível, o coeficiente de excesso de ar (λ) representado pela equação 2.10 e o coeficiente de riqueza da mistura (ϕ) como mostra a equação 2.11.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{real}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{esteq}} = \frac{\left(\frac{Comb}{Ar}\right)_{esteq}}{\left(\frac{Comb}{Ar}\right)_{real}} \quad (2.10)$$

$$\phi = \frac{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{esteq}}{\left(\frac{m_{ar}}{m_{comb}}\right)_{real}} = \frac{\left(\frac{Comb}{Ar}\right)_{real}}{\left(\frac{Comb}{Ar}\right)_{esteq}} \quad (2.11)$$

A partir desses parâmetros é possível caracterizar a qualidade da mistura ar-combustível, sendo que o aumento do coeficiente ϕ indica o enriquecimento da mistura (escassez de ar), enquanto que para maiores valores de λ tem-se misturas pobres (excesso de ar).

2.3.2 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico é uma importante propriedade dos combustíveis que revela muito sobre seu desempenho e por isso tem grande relevância na comparação entre diversos combustíveis. De maneira geral, o poder calorífico estabelece a quantidade de energia contida em um 1kg do combustível em questão (MARTINS, 2006).

Geralmente, por conter hidrogênio em sua composição os combustíveis podem produzir água, que por sua vez pode estar em seu estado líquido ou gasoso no fim da combustão. Assim, Martins (2006) explica que o poder calorífico superior

(PCS) é referente à água condensada aproveitando o calor latente da vaporização. Já o poder calorífico inferior (PCI) está relacionado ao vapor de água produzido pelo combustível.

A partir da tabela 2.1, nota-se que cada combustível possui seu valor de referência para o poder calorífico superior e inferior, de forma que seja possível realizar uma comparação entre diferentes combustíveis, já que um maior poder calorífico indica uma maior quantidade de energia disponível em 1kg deste produto.

Tabela 2.1 - Propriedades de Poder Calorífico Inferior (PCI) e Razão Ar/Combustível para diversos tipos de combustíveis.

Combustível	Equação Reduzida	PCI (kJ/kg)	Razão Ar/Combustível (em massa)
Isooctano	$\text{CH}_{1,25}$	44.310	15,11
Metanol	CH_4O	19.937	6,46
Etanol	$\text{CH}_3\text{O}_{0,5}$	26.805	8,99
Etanol hidratado	$\text{CH}_3\text{O}_{0,5} + 7\% \text{ água}$	24.876	8,36
Gasolina C	$\text{CH}_{2,05}\text{O}_{0,07}$	39.205	13,28
Gasolina de aviação	$\text{CH}_{1,97}$	43.382	14,72
Gasolina PODIUM	$\text{CH}_{2,15}\text{O}_{0,08}$	39.810	13,38
GNV (Gás Natural Veicular)	$\text{CH}_{3,76}$	48.296	16,93

Fonte: BRUNETTI (2012).

2.3.3 Índices de octanos

O fenômeno conhecido como detonação é ocasionado pela combustão em condições de alta pressão e temperatura. Nos pontos de maior pressão e maior temperatura, uma combustão não esperada pode ocorrer após a ignição da centelha, em um momento diferente da frente de chama principal. Assim, uma nova frente de chama é produzida com uma velocidade superior à frente de chama principal, que por sua vez, ao se encontrarem, criam uma onda de choque, gerando um ruído conhecido como batida de pino.

Assim, o índice de octanos consegue mensurar a capacidade de anti-detonação de um combustível. A detonação é um fenômeno que depende primeiramente dessa qualidade, mas que também é dependente do projeto do motor e das condições operacionais que influenciam a temperatura e a pressão do gás após a ignição da centelha (BRUNETTI, 2012).

Para avaliar o índice de octanas em um combustível é necessário compará-lo com as características de outros combustíveis padrões em um motor de testes, alterando especificamente a sua taxa de compressão que por sua vez está relacionada com pressões e temperaturas de funcionamento.

Segundo Martins (2006), os combustíveis utilizados para os testes são misturas de iso-octano (C_8H_{18}) e n-heptano (C_7H_{16}). O valor zero da escala corresponde ao heptano e o valor 100 ao octano. Para aqueles combustíveis com um índice de octanos acima de 100, é preciso comparar com uma mistura de octano puro com certos valores de tetro-etilo de chumbo.

Para motores usados em automóveis existem dois diferentes testes para determinar o índice de octanos do combustível: o método MON (Motor Octane Number) que garante as características através de um motor de teste, e o método RON (Research Octane Number) que dará as características através da análise química. As situações como o tempo de ignição e temperatura de mistura são diferentes para ambos os testes, sendo que os valores de MON são superiores aos valores do RON. As características de cada teste podem ser observadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características de diversas propriedades para os testes RON e MON.

	RON	MON
Rotação do motor (RPM)	600 ± 6	900 ± 6
Avanço da centelha ($^\circ$ APMS)	13	14 a 26
Temperatura do ar de admissão ($^\circ$ C)	48 (1bar)	38 ± 14
Temperatura do líquido de arrefecimento ($^\circ$ C)	$100 \pm 1,7$	$100 \pm 1,7$
Temperatura do óleo ($^\circ$ C)	$57,2 \pm 8,4$	$57,2 \pm 8,4$
Pressão do óleo (bar)	1,7 a 2,0	1,7 a 2,0
Viscosidade do óleo	SAE 30	SAE 30
Folga do eletrodo da vela (mm)	$0,51 \pm 0,13$	$0,51 \pm 0,13$
Pressão do ar de admissão	Pressão atmosférica	
Relação ar/combustível	Ajustado para se obter a máxima detonação	

Fonte: BRUNETTI (2012).

Muitas vezes o índice de octanas é associado de maneira incorreta com o desempenho do motor, de modo que um maior valor desse índice é confundido com uma melhor performance do veículo. No entanto, o bom desempenho do motor está relacionado ao uso de um combustível com o índice de octanos dentro dos valores estabelecidos em projetos. Por exemplo, um motor que funcione bem com uma

gasolina de índice 95 irá apresentar o mesmo desempenho do que com uso de uma gasolina de índice 98, mas o inverso poderá trazer condições para ocasionar o fenômeno de detonação, perda de potência e prematura destruição de componentes (MARTINS, 2006).

Para este trabalho, foram utilizados dois tipos de combustíveis nas simulações, a gasolina e o etanol. Além disso, foi analisado os efeitos de uma mistura entre esses dois combustíveis aplicados em motores com a tecnologia Flex. A seguir, é discutido os detalhes referentes aos combustíveis utilizados.

2.3.4 Tipos de combustíveis

2.3.4.1 Gasolina

A gasolina é um produto derivado do petróleo, que são produtos de resultantes de matéria orgânica sedimentada por centenas de anos. Muitas vezes conhecido como ouro negro devido ao seu alto valor de mercado, o petróleo tem aspecto líquido oleoso, são inflamáveis, possuem coloração que varia do castanho ao negro e são encontrados principalmente em subsolos profundos, terrestres ou marítimos (BRUNETTI, 2012).

Quimicamente, o petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos podendo apresentar em sua estrutura orgânica pequenas quantidades de enxofre (S), nitrogênio (N) e oxigênio (O). Martins (2006) explica que existem vários processos para tratamento e processamento do petróleo, e que podem gerar diferentes tipos de produtos. A figura 2.10 apresenta os derivados que são produzidos a partir do processamento do petróleo através de uma torre de fracionamento.

Hoje, a gasolina é um dos combustíveis mais utilizados em veículos de combustão interna. Esse produto é formado por misturas de diversas naftas obtidas do processamento do petróleo. As propriedades dessas misturas são devidamente balanceadas de modo que o desempenho do combustível seja satisfatório para uma grande variedade de condições operacionais dos motores.

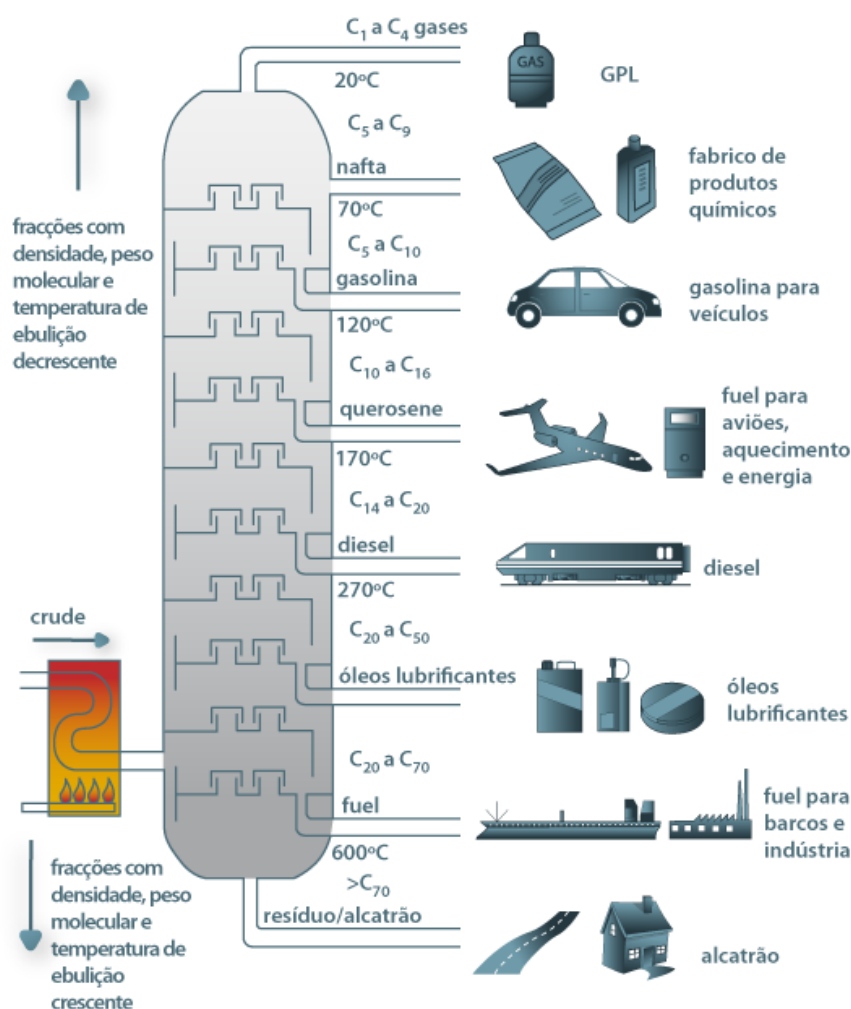


Figura 2.10 - Representação de uma torre de fracionamento para tratamento do petróleo e produção de seus derivados.
Fonte: DIÁRIO DO PRESAL (2013).

Brunetti (2012) explica que as especificações da gasolina devem representar compromissos entre os requisitos de qualidade, desempenho e do meio-ambiente. Além disso, precisam ser suficientemente flexíveis para que os combustíveis possam ser vendidos a preços acessíveis, de forma que os fabricantes de motores consigam adequar seus produtos ao combustível existente no mercado. Quanto mais rígidas são essas exigências mais difícil se torna o processamento do petróleo e conseqüentemente maior será o custo da gasolina. No Brasil, existem duas classificações para a gasolina:

- **Gasolina A:** produto isento de álcool etílico anidro, sendo sua comercialização restrita somente entre refinador e distribuidor;

- **Gasolina C:** gasolina com adição de etanol anidro combustível pelos distribuidores e vendida aos postos revendedores e em seguida ao consumidor final.

A adição do etanol anidro tem como principal objetivo o aumento do índice de octanas da gasolina, já que o etanol possui maiores valores referentes à essa propriedade. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2018), a porcentagem obrigatória de etanol anidro combustível que deve ser adicionado na gasolina comum é de 27%, sendo que a margem de erro é de 1% para mais ou para menos. Para a gasolina premium, o percentual de etanol adicionado é um pouco menor, cerca de 25% em volume.

Então, mesmo a gasolina comum adquirida nos postos de combustíveis não é pura, se tratando de uma mistura regulamentada pela legislação do país. Vale ressaltar que o teor de mistura pode ser ajustado pelos órgãos públicos, de acordo com o cenário econômico e interesses políticos dos governantes, no entanto, os ajustes influenciam diretamente na qualidade e desempenho do combustível.

Além da adição de etanol anidro, outros produtos podem ser acrescentados na gasolina para auxiliar o bom desempenho do motor. De acordo com a distribuidora PETROBRAS (2017), são produzidas as seguintes classes de gasolinas:

- **Gasolina Petrobras Podium:** possui avançada tecnologia em sua produção, atribuindo melhor performance ao motor com seu maior índice de octanos, chegando ao valor de 95 (exclusiva da Petrobras). Sua aplicação é recomendada para motores com taxas de compressão mais altas, oferecendo maior desempenho do motor. Também recebe a adição de aditivos químicos com ações dispersantes, detergentes e lubrificantes, e possui um teor de enxofre menor (30ppm), se tornando um combustível menos poluente.
- **Gasolina aditivada:** possui índice de octanagem de 87 e teor de enxofre igual a 50ppm, apresenta aditivos químicos com ações dispersantes, detergentes e lubrificantes. Os benefícios da adição desses aditivos são a prevenção contra a perda de energia, manter os níveis de emissões mais baixos e impedir a formação de gomas e depósitos.

- **Gasolina comum:** produto mais simples com índice de octanas de 87 e com teor atual de enxofre de 50ppm, não há aditivos em sua composição tornando seu preço mais atrativo para o mercado.

Em termos de desempenho, a gasolina em geral, possui uma elevada temperatura de autoignição, justificando seu grande uso em motores de ciclo Otto, uma vez que o fenômeno de detonação é amenizado com o uso do combustível. Seu poder calorífico é relativamente alto se comparado com o etanol, de modo com que seja gerado uma maior quantidade de energia com um menor consumo.

Para o meio-ambiente, a gasolina é um dos grandes responsáveis pela poluição atmosférica, uma vez que ainda se trata de um combustível com alto índice de emissão de poluentes e amplamente usado em automóveis. O potencial de produção de CO₂ pela gasolina é cerca de 331g/km, do processo de produção à utilização, sendo um dos mais altos comparados a outros combustíveis (VASCONCELLOS, 2008). Essa é uma das principais razões para a qual o frequente estudo de outras fontes menos nocivas de energia vem sendo realizado, visando dessa forma, reduzir o consumo da gasolina.

2.3.4.2 *Etanol*

Etanol é classificado como um composto orgânico que está dentro do grupo dos álcoois e possui uma cadeia pequena de dois carbonos e uma hidroxila (C₂H₅OH). Durante a década de 1930, grande parte dos países industrializados tiveram algum tipo de incentivo fiscal ou programa de mistura obrigatória de etanol, e o Brasil foi um deles. A ideia foi criar um sistema de combustível de emergência e reduzir a dependência dos países por importações de petróleo, bem como apoiar os agricultores e incentivar a economia interna (BRUNETTI, 2012).

Em diferentes localidades do mundo começaram a se produzir o álcool originado de diferentes matérias orgânicas como milho, batata, beterraba, arroz, cana de açúcar e outros. No Brasil, o etanol combustível é produzido através do processo de fermentação natural da cana de açúcar (álcool de 1ª geração) ou pela hidrólise enzimática da celulose (álcool de 2ª geração).

O etanol é considerado um combustível oxigenado, uma vez que contém oxigênio em grandes proporções em sua composição, assim como outros álcoois e éteres. Comparando com as gasolinas comerciais no mundo, algumas propriedades dos oxigenados são muito diferentes. Brunetti (2012) explica que apesar do seu menor poder calorífico, o calor de mistura dos álcoois é alto, uma vez que a pequena relação ar-combustível exige uma adição de maior volume de combustível para o mesmo volume de ar aspirado.

Além disso, os compostos oxigenados são facilmente inflamáveis, melhorando a dispersão cíclica da combustão nos motores. O alto calor de vaporização também permite um maior enchimento dos motores, ou seja, uma maior taxa de calor é retirada do ar, que por sua vez esfria mais, aumentando sua massa específica e diminuindo seu volume. Assim, uma maior massa de ar e combustível consegue entrar na câmara de combustão e gerar uma maior quantidade de energia (BRUNETTI, 2012).

Dessa forma, o etanol possui maiores valores de octanas se comparado com a gasolina. Como a detonação é função da temperatura da câmara de combustão, o resfriamento devido ao alto calor latente de vaporização do combustível diminui essa tendência, fazendo com que a octanagem seja maior.

No Brasil, a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) classifica o etanol em dois tipos:

- **Etanol Etílico Anidro Combustível (AEAC):** combustível adicionado à gasolina, com teor máximo de água de 0,4% (volume);
- **Etanol Etílico Hidratado Combustível (AEHC):** combustível usado para aplicação direta em veículos a álcool ou flex. O teor de água máximo permitido pela Resolução nº 7, de 9.2.2011 da ANP é de 4,9% (volume).

Em termos ambientais, o etanol tem o potencial de gerar 213g/km de emissão de CO₂ da produção até o seu consumo, sendo o valor mais baixo dentro dos combustíveis utilizados para se obter energia (VASCONCELLOS, 2008). Além disso, existe a recuperação de parte de CO₂ através da fotossíntese dos vegetais que são plantados para a produção do álcool, ajudando ainda mais a reduzir o nível dessas

emissões durante o ciclo para a sua produção. Dessa maneira, o etanol é reconhecido como o combustível que provoca o menor impacto ambiental.

2.3.4.3 *Tecnologia flex*

A partir da consolidação do uso de álcool como combustível por volta do ano de 2002, houve a produção dos primeiros veículos Flex e seu primeiro contato com o mercado. O sistema Flex foi desenvolvido para tornar possível o uso optativo entre gasolina e etanol pelos usuários de automóveis e assim flexibilizar o uso dos diferentes combustíveis.

Segundo Brunetti (2012), os sensores e instrumentação do motor são responsáveis por avaliar as condições do combustível. Dessa forma, os motores Flex conseguem identificar os teores de mistura entre gasolina e etanol através de sensores, que por sua vez enviam as informações para a central de controle e comando que é responsável por ajustar os parâmetros de combustão a fim de se ter a melhor queima para a determinada condição.

Tabela 2.3 - Comparativo entre as principais propriedades da Gasolina A e do Etanol.

Propriedade	Etanol	Gasolina A
Fórmula química	C_2H_5OH	Média: $C_{6,47}H_{14,28}$
Peso molecular ($g\ mol^{-1}$)	46	100 - 105
Ar/Combustível	9	14,7
Massa específica a 15,5°C (kg/m^3)	794	721 a 742
Ponto de ebulição (°C)	78,3	35 a 220
Octanagem (MON)	90	Mínimo 82
Octanagem (RON)	106	Mínimo 93
Ponto de fulgor (°C)	12,7	-42,7 a -39,0
Limite pobre de inflamabilidade (% no ar)	4,3	1,4
Limite rico de inflamabilidade (% no ar)	19,0	7,6
Carbono (% em massa)	52,2	85 – 88
Hidrogênio (% em massa)	13,1	12 – 15
Oxigênio (% em massa)	34,7	0

Fonte: BRUNETTI (2012).

A tabela 2.3 traz informações comparativas de propriedades, já discutidas neste capítulo, entre Etanol e Gasolina A (pura). Vale ressaltar que uma mistura entre esses dois combustíveis gera efeitos e propriedades intermediárias que podem influenciar no desempenho e qualidade da combustão.

2.4 Poluentes

Hoje os motores de combustão interna são os principais responsáveis pela poluição do ar das grandes cidades. Em tempos onde grande parte das pessoas possuem seus veículos particulares, as emissões de poluentes têm se tornado uma preocupação no mundo todo, já que pode causar efeitos negativos para o meio ambiente e a saúde humana.

De acordo com Brunetti (2012), quando um combustível é submetido a uma combustão completa, os produtos obtidos são água (H_2O), gás nitrogênio (N_2) e gás oxigênio (O_2). No entanto, quase nunca se tem uma mistura estequiométrica em uma combustão fazendo com que outros produtos possam ser formados.

Em misturas ricas, onde há uma maior concentração de combustível em relação ao ar comburente, a combustão é incompleta e gera poluentes que são emitidos para a atmosfera através dos gases de escape. Além disso, pode ocorrer a emissão de poluentes através da possível evaporação de combustível nos depósitos, ou ainda através de gases contidos no cárter do motor (MARTINS, 2006).

Os principais componentes emitidos nos gases de escape estão listados a seguir:

- **Componentes redutores:** gás hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC);
- **Componentes oxidantes:** gás oxigênio (O_2), monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2);
- **Componentes inertes:** dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e gás nitrogênio (N_2);
- **Partículas sólidas.**

Dentre esses componentes, são considerados poluentes aqueles que possuem efeitos nocivos quando emitidos pelos gases de escape. São eles o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de nitrogênio (NO₂), gás carbônico (CO₂) e partículas sólidas. De acordo com Brunetti (2012), as principais características desses componentes são as seguintes:

- **Dióxido de Carbono (CO₂):** é resultante da combustão completa de hidrocarbonetos, sendo encontrado em maior quantidade em combustíveis de origem fóssil. É considerado o principal responsável pelo efeito estufa no planeta, ocasionando o aumento da temperatura média global e consequente derretimento das calotas polares e aumento do nível dos oceanos. O controle das emissões do CO₂ pode ser dado através da redução do uso de combustíveis de origem fóssil, como a gasolina, ou no aperfeiçoamento de projetos de motores.
- **Monóxido de Carbono (CO):** resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos, quando a partícula de CO contido no combustível não sofre a oxidação para se tornar CO₂. Desta forma, o nível de CO resultante é formado em função da relação ar-combustível e da homogeneização da mistura. É um gás inodoro que pode trazer indesejadas consequências para o corpo humano como reação com a hemoglobina, redução de oxigênio no sangue, dores de cabeça, náuseas e até mesmo morte em casos de extrema exposição ao gás.
- **Óxidos de Nitrogênio (NO_x):** contempla uma mistura que pode conter os variados óxidos de nitrogênio, com destaque para o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). Tem origem através da reação entre nitrogênio presente no combustível e oxigênio do ar ou então através da oxidação do nitrogênio presente no ar, quando submetido a altas temperaturas. Assim, o controle da emissão de NO_x está intrinsicamente relacionado à temperatura de funcionamento do motor, como também, na própria composição da mistura. Quando lançados na atmosfera esses componentes provocam a formação da chuva ácida a partir de sua mistura com o ácido sulfúrico (H₂SO₄), além do aumento da concentração de Ozônio (O₃) na atmosfera, quando o NO₂ recebe a ação dos raios solares

ultravioletas (UV). O Ozônio em altitudes estratosféricas é desejável devido à sua capacidade de filtrar raios UV's e diminuir os efeitos do aquecimento global, em contrapartida, a presença desse componente próximo à superfície terrestre pode ocasionar problemas respiratórios e complicações pulmonares, prejudicando o bem-estar da população.

- **Hidrocarbonetos não Queimados (HC):** são considerados componentes orgânicos que estão presentes no combustível primário e se decompõem termicamente em outros de menores pesos moleculares, como etano, metano, acetileno e outros. Os hidrocarbonetos não queimados se formam devido à falta de temperatura necessária à combustão em certos pontos da câmara, como paredes do cilindro e regiões onde a mistura não é homogênea e possui pontos excessivamente ricos ou pobres. Os hidrocarbonetos são oxidados na saída do escape, sendo assim, quanto menor a temperatura de saída dos gases, maior será a emissão deste componente perante a sua dificuldade de reagir com o oxigênio. São considerados agentes cancerígenos, podendo causar irritações, problemas respiratórios, inflamação nos olhos e até mesmo desenvolvimento de doenças graves.

Percebe-se que, um dos principais fatores para a formação de poluentes é a razão ar-combustível usada na câmara, principalmente quando a quantidade de ar presente na câmara não é o suficiente para que ocorra uma queima eficiente de todo o combustível. Brunetti (2012) afirma que uma mistura excessivamente rica daria origem a uma emissão maior de CO e HC devido a maior presença de hidrocarbonetos que podem não entrar em combustão.

Quando se tem uma mistura ligeiramente pobre, existe uma maior presença de oxigênio, e por isso pode-se pensar erroneamente que a formação de óxidos é favorecida. No entanto, essas reações ocorrem mais facilmente em elevadas temperaturas, que são atingidas quando se tem proporções próximas da estequiometria da combustão. Por essa razão, os óxidos nitrosos geralmente têm sua maior produção para uma razão de equivalência ar-combustível próxima de 1,00, uma vez que nessas condições é possível atingir elevadas temperaturas auxiliando o processo de formação dos NO_x.

Esses conceitos podem ser visualmente percebidos pelo gráfico da figura 2.11 representa o comportamento da emissão dos três tipos de poluentes mais comuns com a variação da razão de equivalência ar-combustível.

Apesar de misturas pobres apresentarem menores valores de emissões de poluentes, se a mistura estiver demasiadamente pobre, o motor pode sofrer instabilidades em seu funcionamento e performance podendo apresentar valores significantes de poluentes como os hidrocarbonetos não queimados.

Percebe-se de maneira geral, que os maiores problemas estão nas misturas ricas, onde se tem uma maior concentração de poluentes. Para essas condições uma forma de controlar essas emissões poderia ser o aumento do avanço da centelha, que causaria um aumento de temperatura gerando uma queima mais eficiente, mas que em contrapartida acaba facilitando a formação de óxidos nitrosos (NO_x).

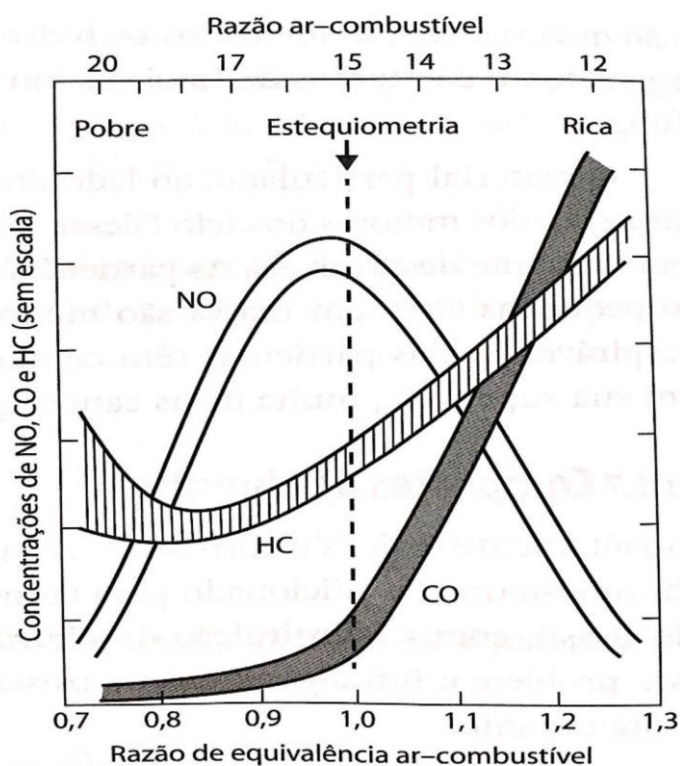


Figura 2.11 - Comportamento da concentração dos gases poluentes no escape em função da composição da mistura.
Fonte: BRUNETTI (2012).

2.4.1 Tratamento de poluentes

Antes da emissão dos gases de escape para a atmosfera, é necessário que se tenha um tratamento desses produtos a fim de reduzir a concentração de poluentes e mitigar os efeitos nocivos causados pelos mesmos. Para tanto, o método mais comum para esse tratamento é a adoção de um catalisador de três vias.

O catalisador é um conversor catalítico instalado na jusante da câmara que usa elementos como paládio e ródio (motores à gasolina) ou paládio e molibdênio (motores à álcool) com a finalidade de transformar os principais poluentes como CO, HC e NO_x em substâncias menos nocivas como CO₂, H₂O e N₂ (BRUNETTI, 2012).

Em um catalisador de três vias, os gases contendo os três tipos de poluentes são direcionados através de flanges para uma colmeia de material cerâmico ou metálico, onde em contato com os compostos catalíticos é realizado a purificação dos gases. A disposição da colmeia garante um aumento da área superficial de contato do gás, auxiliando as reações químicas de tratamento e proporcionando uma maior eficiência de purificação.



Figura 2.12 - Ilustração esquemática de um catalisador de escape de três vias.
Fonte: O MECÂNICO (2015).

A fim de se garantir um melhor funcionamento do catalisador, é recomendado que a mistura apresente uma razão próxima à estequiométrica, visando também estar de acordo com leis ambientais que determinam uma eficiência de 90% para se obter o máximo da neutralização dos gases.

Para se atingir essa eficiência, o uso de um sistema de malha fechada com feedbacks se faz necessário e é amplamente utilizado nos projetos de motores. Este sistema é composto pelo sensor conhecido como sonda lambda, e fornecerá um sinal à central eletrônica referente à quantidade de oxigênio medido na saída da tubulação do escapamento, indicando se o gás de saída se encontra rico ou pobre. A central por sua vez, irá corrigir a relação da mistura antes da combustão, visando o aperfeiçoamento dos parâmetros a partir do ajuste ideal para o bom funcionamento do motor.

De acordo com Brunetti (2012), uma outra técnica comumente utilizada no tratamento das emissões de poluentes é a recirculação dos gases de escape (EGR, do inglês “Exhaust Gas Recirculation”). Se trata de um sistema que promove a recirculação dos gases provenientes da queima da mistura na câmara de combustão através de uma válvula conhecida como válvula EGR.

Essa técnica, basicamente tem como premissa usar o CO_2 , produzido como produto da combustão, para roubar calor de dentro da câmara e reduzir a emissão de NO_x , que é formado principalmente em altas temperaturas. A recirculação dos gases deve ser interrompida quando o motor estiver em baixas cargas para evitar possíveis instabilidades. Já para carga plena a recirculação dos gases também deve ser cessada a fim de mitigar roubo de potência durante a combustão. Vale ressaltar, que mesmo com essa técnica, a utilização de um catalisador na jusante da câmara ainda se faz necessário para controlar os níveis de emissão de CO e HC.

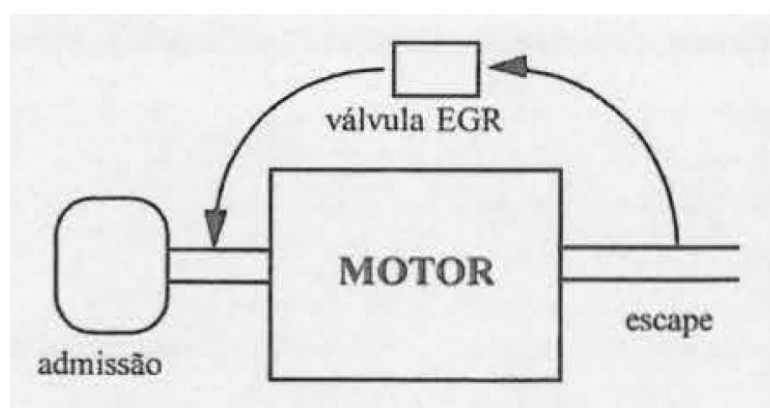


Figura 2.13 - Esquema representativo do sistema de recirculação de gases de escape (EGR).

Fonte: MARTINS (2006).

Brunetti (2012) ainda menciona outras formas alternativas para tratamento de NO_x. A mais simples delas é conhecida como catalisador “DeNO_x” que entrega uma eficiência de conversão da ordem de 30% a 50% e tem uma boa resistência à contaminação por enxofre. Já a tecnologia “NO_x Storage” é usada no catalisador de três vias, mencionado anteriormente, alcançando uma maior eficiência (cerca de 90%), porém extremamente sensível à contaminação de enxofre. Além disso, existe um sistema mais complexo, denominado catálise seletiva à base de ureia, que apresenta uma eficiência de conversão da ordem de 70% mantendo uma resistência ao enxofre e dispensando a necessidade de regeneração que pode promover uma economia de combustível.

2.5 Programas de Controle da Poluição do Ar

A constante expansão da frota veicular em todo o Brasil, sobretudo nas grandes cidades, tem demandado a contínua melhoria da qualidade dos combustíveis e da tecnologia dos veículos, além de soluções de mobilidade urbana, que constituem um conjunto de medidas necessárias ao alcance e manutenção de padrões de qualidade do ar visando sempre a proteção da saúde da população.

Com o intuito de controlar da melhor forma as emissões de poluentes causadas pelo transporte veicular, em 6 de maio de 1986, a Resolução CONAMA nº 18 criou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, coordenado pelo IBAMA.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente – MMA (2018), o PROCONVE veio definir os primeiros limites de emissão para veículos leves e contribuir para o atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar. Em 28 de outubro de 1993 a lei nº 8.723 endossou a obrigatoriedade de reduzir os níveis de emissão dos poluentes de origem veicular, contribuindo para induzir o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes de combustíveis, motores e autopeças, e permitindo que veículos nacionais e importados passassem a atender aos limites estabelecidos.

Além disso, o PROCONVE também impõe a certificação de protótipos e o acompanhamento estatístico em veículos na fase de produção (ensaios de produção), a autorização do IBAMA para uso de combustíveis alternativos, o

recolhimento ou reparo de veículos e motores encontrados em desconformidade com a produção ou projeto e a proibição da comercialização de modelos de veículos não homologados. A homologação de protótipos é, de fato, a principal atividade exercida pelo PROCONVE, e faz com que as montadoras apliquem conceitos de projetos que assegurem um baixo potencial poluidor aos veículos novos, e uma taxa de deterioração das emissões ao longo de sua vida útil tão baixa quanto possível (MMA, 2018).

A categoria de veículos leves, engloba os limites de poluentes permitidos para automóveis de passeio, motocicletas, e até mesmo vans e pick-ups que podem transportar pequenas cargas. Desde 1988, esses limites são periodicamente ajustados e divididos em fases enumeradas como L1, L2, L3, L4, L5 e L6. Hoje, a atualização mais recente (Fase L6) recomenda os valores apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2.4 - Limites recomendados de diversos poluentes para veículos leves de acordo com a Fase L6.

Poluentes	Veículos com massa menor ou igual a 1700kg	Veículos com massa maior que 1700kg
Monóxido de carbono (CO) [g/km]	1,30	2,00
Hidrocarbonetos totais (THC) somente para veículos a gás natural [g/km]	0,30	0,50
Hidrocarbonetos não metano (NMHC) [g/km]	0,05	0,06
Óxidos de Nitrogênio (NOx) para ciclo Otto [g/km]	0,08	0,25
Óxidos de Nitrogênio (NOx) para ciclo Diesel [g/km]	0,08	0,35
Aldeídos totais (CHO) para ciclo Otto [g/km]	0,02	0,03
Material particulado (MP) para ciclo Diesel [g/km]	0,03	0,04
Monóxido de carbono em marcha lenta para ciclo Otto	0,2% em volume	0,2% em volume

Fonte: PROCONVE (2013).

Existe uma constante preocupação com veículos pesados de transporte de passageiros e ou cargas, uma vez que são os principais emissores de material particulado e óxidos de nitrogênio. De acordo com o PROCONVE (2013), considera-se um veículo pesado aquele com massa total máxima maior que 3.856 kg, ou massa do veículo em ordem de marcha maior que 2.720 kg.

Analogamente aos veículos leves, os veículos pesados possuem alterações e ajustes periódicos dos limites de poluentes recomendados. De acordo com a tecnologia vigente nas indústrias automobilísticas o valor tende a se reduzir com o tempo forçando o mercado a substituir os veículos mais poluentes por outros mais

sustentáveis. Cada fase dessas recomendações é indicada pela letra “P”, sendo que a última a ser lançada foi a Fase P7, apresentada na tabela a seguir.

Tabela 2.5 - Limites recomendados de diversos poluentes para veículos pesados de acordo com a Fase P7.

Poluentes	Ensaio E.S.C. / E.L.R. [g/km]	Ensaio E.T.C. [g/km]
NOx	2,00	2,00
HC	0,46	N/A
CO	1,5	4,00
CH4	N/A	1,1
MP	0,02	0,03
NMHC	N/A	0,55
Opacidade	0,50	N/A

Fonte: PROCONVE (2013).

Uma particularidade da recomendação para veículos pesados é que o índice de poluição pode ser medido a partir de diferentes ensaios como apresentado na tabela acima. O ensaio ESC é conhecido como Ciclo Europeu em Regime Constante e consiste de um ciclo de ensaio com 13 modos de operação em regime constante. Já o Ciclo ELR é denominado Ciclo Europeu de Resposta em Carga e é executado a partir de uma sequência de quatro patamares a rotações constantes e cargas crescentes de 10% a 100%, para determinação da opacidade da emissão de escapamento. Por fim, o ensaio ETC é conhecido como Ciclo Europeu em Regime Transiente e consiste em 1800 modos transientes a cada segundo, simulando condições reais de uso.

Nos anos 80, já na sua primeira fase para veículos leves, o PROCONVE atingiu a redução da concentração de poluentes em 50% para a metade dos veículos novos fabricados no país. Para os veículos pesados, desde o início das exigências, as reduções foram da ordem de 80%, o que trouxe grandes benefícios para o ar das regiões metropolitanas, detentoras de grandes frotas de ônibus e caminhões.

É notório que os resultados alcançados pelo PROCONVE desde 1986 se mostram satisfatórios, e seu êxito se deve a adoção de fases cada vez mais restritivas. A continuidade e o sucesso é focada na identificação real dos ganhos

para o ambiente, traçando uma correlação clara entre a definição de novas fases tecnológicas e de restrição das emissões, com o monitoramento da qualidade do ar nas grandes cidades brasileiras.

3 Metodologia

3.1 AVL BOOST

A desenvolvedora AVL, possui uma série de softwares e soluções que atendem as mais diversas necessidades para simulação de motores. Todos esses softwares são desenvolvidos com a finalidade de reduzir tempo e custos de testes de modelos em desenvolvimento, substituindo a necessidade de construção de protótipos e bancadas experimentais. A partir disso, a engenharia se torna mais dinâmica e assertiva, dando espaço para mais inovação através do uso dessas tecnologias.

O software utilizado para confecção deste trabalho é o AVL BOOST, uma ferramenta totalmente integrada para a simulação de motores de combustão interna. Este software consegue entregar modelos avançados que permitem uma previsão precisa em relação à performance do motor, emissões na exaustão, além de uma análise acústica do motor estudado.

O AVL BOOST fornece soluções de análises unidimensionais do funcionamento de um motor, caracterizando assim uma abordagem ideal para um ponto de partida onde se pode ter respostas iniciais rápidas que auxiliam no desenvolvimento de modelos. Além disso, o software dispõe de uma análise de transporte de espécies, que envolve a consideração dos diversos tipos de fluidos, permitindo um alto nível de flexibilidade para simulação com diferentes combustíveis e fluidos de trabalho, além das emissões de poluentes.

Dessa forma, o AVL BOOST se mostra uma ferramenta computacional prática e eficiente para a simulação prévia de motores endotérmicos. Com uma interface simples através de blocos e caixas para inserção de parâmetros, o modelo pode ser construído da forma desejada pelo desenvolvedor. Vale ressaltar, que os resultados podem ser obtidos de qualquer maneira através da criação dos cases e parametrização das variáveis identificadas, podendo ser extraídos gráficos das séries de cases, dos períodos transientes ou dos traços de desempenho.

3.2 Motor Fiat Fire 1.0

Para este trabalho, foi usado como referência a bancada de um motor fabricado pela Fiat, que se encontra na Universidade Federal de Uberlândia. O motor está ilustrado na Figura 14 e se trata do modelo Fire 1.0, que possui um volume de cilindrada de 1l e utiliza a tecnologia Flex, mantendo o funcionamento tanto para gasolina quanto para etanol, ou uma mistura entre os dois.



Figura 3.1 - Bancada experimental do motor Fiat Fire 1.0 localizada na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

A partir dessa bancada, algumas medidas externas foram adquiridas de forma que o modelo computacional se aproximasse ao máximo da realidade. Utilizando um paquímetro com resolução de 0,2 mm e uma trena com resolução de 1 mm, foi possível mensurar os diâmetros externos de alguns dutos bem como seus comprimentos e outras dimensões. Vale ressaltar que, como o motor não foi desmontado, essas medições possuem apenas um caráter estimativo, visto que existem alguns erros referentes à dificuldade de se mensurar as dimensões dos componentes montados. Dessa forma, o objetivo dessas medidas foi uma aproximação do modelo virtual em relação ao motor real.

Além disso, alguns parâmetros que são divulgados pela fabricante foram adquiridos através de pesquisas e usadas para incrementar o modelo virtual. Dentre

eles, vale destacar a razão de compressão, parâmetros geométricos, relação ar combustível, e características de performance.

Para outros parâmetros que não são divulgados pela fabricante e que não foram possíveis de serem mensurados, foram considerados os valores recomendados pelo guia do usuário integrante do software AVL BOOST. Neste guia, existe recomendações para cada parâmetro de cada elemento do motor além de exemplos práticos com valores pré-fixados dos parâmetros e faixas normalmente encontradas para os mesmos. Dessa forma, esses parâmetros regulares foram aplicados na expectativa que os valores reais também estivessem dentro desta faixa.

Por fim, para acertar o comportamento do motor simulado no software com o esperado na realidade, alguns parâmetros foram ajustados por tentativas com base nos conceitos, teorias e equações de desempenho de motores. Assim, foi executada uma calibração a fim de se ter uma maior aproximação do modelo com a realidade.

3.3 Procedimentos

A partir do guia do usuário fornecido pelo AVL BOOST e tutoriais de modelos de motores de combustão interna do ciclo Otto, foi possível construir um modelo com as características necessárias para a análise. Para isso, se faz necessária uma familiarização com os elementos e componentes do software, entendimento de suas funções e parâmetros necessários para simulação do motor.

Depois de estruturado e construído o modelo com todos os elementos do motor, os dados podem ser ajustados, inspirando-se na bancada experimental do motor Fiat Fire 1.0. Primeiramente, as dimensões externas como diâmetro dos dutos, comprimento de tubulações e mangueiras, e outras dimensões dos elementos, foram devidamente inseridas no modelo. Apesar das medições não serem exatas, a estimativa é interessante para uma maior aproximação com a realidade, contribuindo para uma visão mais prática e verdadeira do comportamento do motor.

Além das medições realizadas na bancada experimental, outras informações puderam ser adquiridas em pesquisas online relacionadas ao motor em questão. Parâmetros geométricos, performance de torque e potência, consumo de

combustível e razão de compressão são informações divulgadas pelo fabricante e, portanto, auxiliam ainda mais a validação do modelo.

No entanto, existem muitos dados sigilosos que não são encontrados facilmente, uma vez que não são divulgados pelos fabricantes. Para tais informações foram utilizados aquilo que já se encontra na literatura e é esperado para um motor comum de combustão interna do ciclo Otto. Além disso, o próprio guia do usuário do AVL BOOST proporciona algumas faixas de valores recomendados para diversos parâmetros relacionados a diferentes tipos de motores. Assim, essas informações foram usadas para complementar o modelo e permitir que as simulações sejam realizadas.

Com o modelo construído, existe a necessidade de acertar alguns parâmetros para que seu comportamento se aproxime ainda mais da realidade. Essa foi a etapa de calibração, e consistiu em ajustar os parâmetros já inseridos a fim de que a curva característica de torque e potência do modelo esteja mais próxima da curva divulgada pelos fabricantes. Para isso, os parâmetros foram ajustados através de tentativas e análises das respostas para cada ajuste. A partir disso, foi possível adequar o comportamento do motor de acordo com as respostas do modelo para as devidas modificações.

Em seguida, com o modelo ajustado foram iniciadas as simulações e análises do motor. O AVL BOOST fornece uma série de ferramentas para tratamento dos dados e apresentação de resultados a partir de simulações do motor sendo que todas foram realizadas sempre para uma mesma faixa de rotação. Além disso, por se tratar de um motor Flex, diferentes combustíveis puderam ser simulados, como a gasolina, o etanol e mistura dos dois combustíveis (50% de gasolina e 50% de etanol).

Dessa forma, foi possível observar e analisar o comportamento do motor através das curvas características de torque e potência, além das curvas de emissão de poluentes a partir do funcionamento do motor. A partir disso, foi possível visualizar as principais peculiaridades do modelo e divergências com a realidade, além de comparar os diferentes comportamentos apresentados quando há uma troca de combustível no motor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Motor Fiat Fire 1.0

Para a elaboração de um modelo virtual que se aproximasse ao máximo do motor em questão, seria necessário o acesso a informações precisas que muitas vezes demandam de resultados experimentais ou que são de caráter confidencial não divulgado pelos fabricantes. No entanto, alguns parâmetros são divulgados e facilmente encontrados em sites ou livros relacionados, o que auxilia o trabalho e orienta o resultado de acordo com o desejado.

A bancada experimental que inspirou este trabalho se trata de um motor fabricado pela Fiat e muito usado em seus modelos populares como o Uno e o Palio. Conhecido como Fire 1.0, esse motor possui quatro cilindros de combustão interna dispostos em linha contendo duas válvulas em cada um deles, uma para admissão e outra para o escape, totalizando oito válvulas para o conjunto. A Tabela 4.1 apresenta alguns dados encontrados sobre o motor estudado.

Tabela 4.1 - Parâmetros divulgados para o motor Fiat Fire 1.0.

Parâmetro	Valor Divulgado
Cilindrada (cm ³)	1000
Razão de Compressão	12 a 15
Combustível	Flex
Aspiração	Natural
Alimentação	Multiponto
Diâmetro dos Cilindros (mm)	70
Curso dos Pistões (mm)	65
Torque Específico (kgfm/l)	9,91
Potência Específica (CV/l)	75,08
Consumo Urbano (km/l)	8,7 (Álcool) 12,2 (Gasolina)
Consumo Rodoviário (km/l)	10,4 (Álcool) 15,3 (Gasolina)

Fonte: CARROSNWEB (2017).

Outra informação importante encontrada são as curvas características de torque e potência do motor. Estas representações desempenham um papel fundamental na validação do modelo, visto que retratam o comportamento do motor bem como a sua performance. Neste caso, o torque máximo para o motor acontece com uma rotação de aproximadamente 4500 rpm, sendo que, quando abastecido com álcool atinge um valor de 9,9 kgf.m, equivalente a 97,1 N.m, já quando o combustível é a gasolina o torque máximo vale 9,5 kgf.m, ou 93,2 N.m. A potência máxima é definida na rotação próxima de 6250 rpm, e equivale a 75 CV para o álcool e 73 CV para a gasolina. A figura 4.1 mostra as curvas características de torque e potência divulgadas para o motor em questão (CARROSNAWEB, 2017).

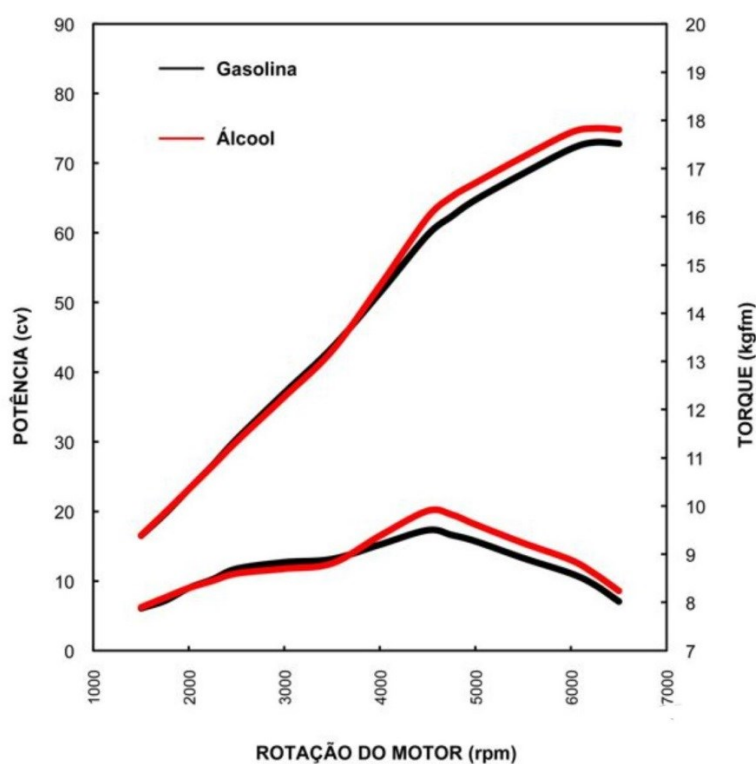


Figura 4.1 - Curvas características de torque e potência do motor Fiat Fire 1.0. Fonte: CARROSNAWEB (2017).

Vale ressaltar que, além de todas essas informações, os diâmetros e comprimentos da tubulação e disposição de todos os elementos foram mensurados a partir da bancada e usados no modelo do AVL BOOST. As outras informações foram consideradas a partir de valores recomendados pela literatura e pelos próprios

guias disponibilizados na plataforma AVL Users Guide. Dessa forma, o modelo passou por algumas considerações e validações de modo que seu resultado teórico se aproximasse da prática. No próximo tópico, serão discutidas as análises e considerações realizadas durante a construção do modelo computacional.

4.2 Modelo computacional AVL BOOST

De acordo com as informações adquiridas e tendo como base a bancada experimental do motor Fiat Fire 1.0 foi possível criar o modelo computacional com auxílio do software AVL BOOST. A disposição de cada elemento foi pensada de forma que atendesse à realidade bem como o dimensionamento dos dutos e tubulações auxiliares do motor. A figura a seguir representa a versão final do modelo criado.

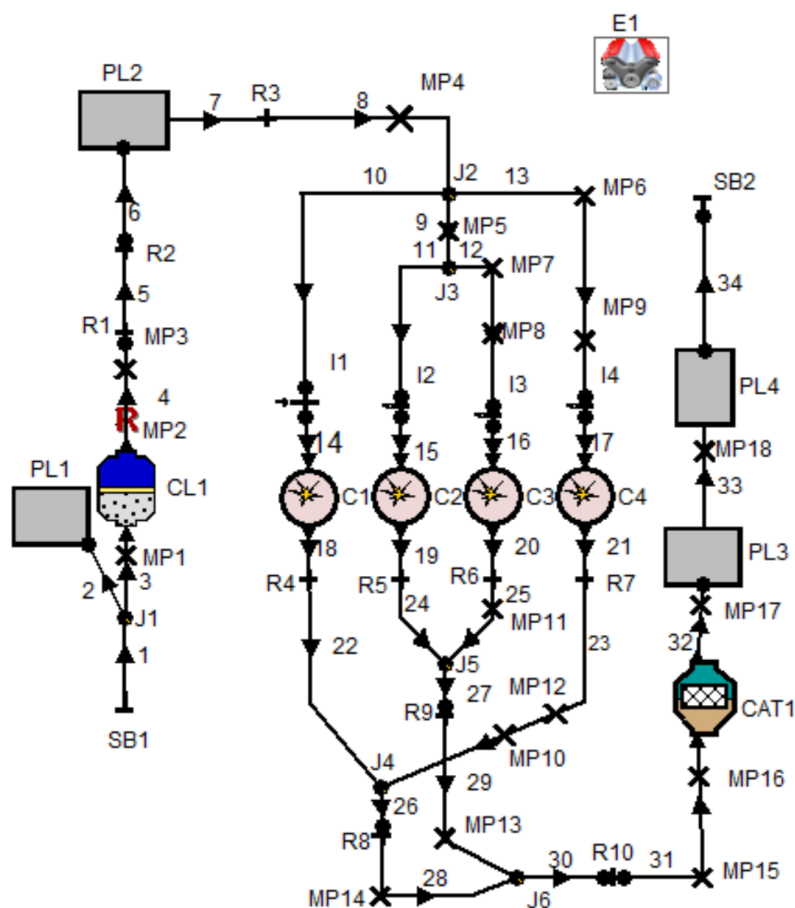


Figura 4.2 - Modelo computacional do motor criado no software AVL BOOST. FONTE: AUTOR PRÓPRIO.

Parâmetros como temperaturas de diversas partes do motor, abertura e fechamento de válvulas, avanço da centelha, propriedades da ignição, transferência de calor entre superfícies, reações químicas no catalisador, e uma série de outras informações não foram definidas com precisão para o objeto de estudo, uma vez que para isso, se torna necessário outros experimentos, para os quais não há instrumentação disponível, e acesso às informações não divulgadas pelos fabricantes.

Dessa forma, esses parâmetros foram definidos de acordo com as recomendações do Guia do Usuário da AVL BOOST, onde existem alguns tutoriais e modelos exemplos, além de faixas recomendadas para todos os parâmetros do motor. Com todas as variáveis aplicadas, foi possível contruir o modelo virtual do motor e a partir dos primeiros resultados, realizar um procedimento de calibração, alterando diversos parâmetros e analisando sua resposta, para que assim os valores pudessem ser ajustados de forma que o resultado se aproximasse mais da realidade.

Um dos maiores desafios para a calibração foi em relação aos parâmetros geométricos do motor e seus cilindros. Quando o diâmetro do cilindro e curso do pistão apresentados na tabela 4.1 eram aplicados, as curvas características do motor apresentavam um comportamento irregular e fora do esperado. Como o guia do AVL BOOST fornecia parâmetros e valores baseados em um motor diferente do que estava sendo analisado, é possível que alguns dados não sejam bem aceitos pelo modelo e, portanto, resultem em comportamentos indesejáveis.

Assim, a saída para este problema foi aumentar as dimensões dos diâmetros dos cilindros e do curso do pistão até que o comportamento se estabilizasse e tomasse a forma já esperada para as curvas características. Devido à complexidade da simulação estes ajustes foram necessários uma vez que muitas informações importantes foram utilizadas de acordo com a recomendação dos tutoriais e guia do usuário do AVL BOOST e que podem ser diferentes para o motor estudado, como por exemplo o tempo de abertura e fechamento das válvulas, mapas de ignição e injeção, parâmetros de atrito e transferência de calor, modelo de combustão, entre outros. Dessa forma, os parâmetros já conhecidos do motor foram ajustados para compensar os desconhecidos, de forma que o resultado se aproximasse do objetivo. Para que o resultado fosse mais fiel ao motor, seria necessária uma maior precisão

dos parâmetros citados acima, demandando uma série de testes e experimentos na bancada.

Além disso, para compensar o pequeno aumento geométrico do motor a quantidade de combustível injetada nos cilindros foi alterada para a situação de uma mistura pobre para a gasolina e próxima da estequiometria para o álcool, considerando uma relação de ar-combustível de 16 para a gasolina e 9 para o álcool.

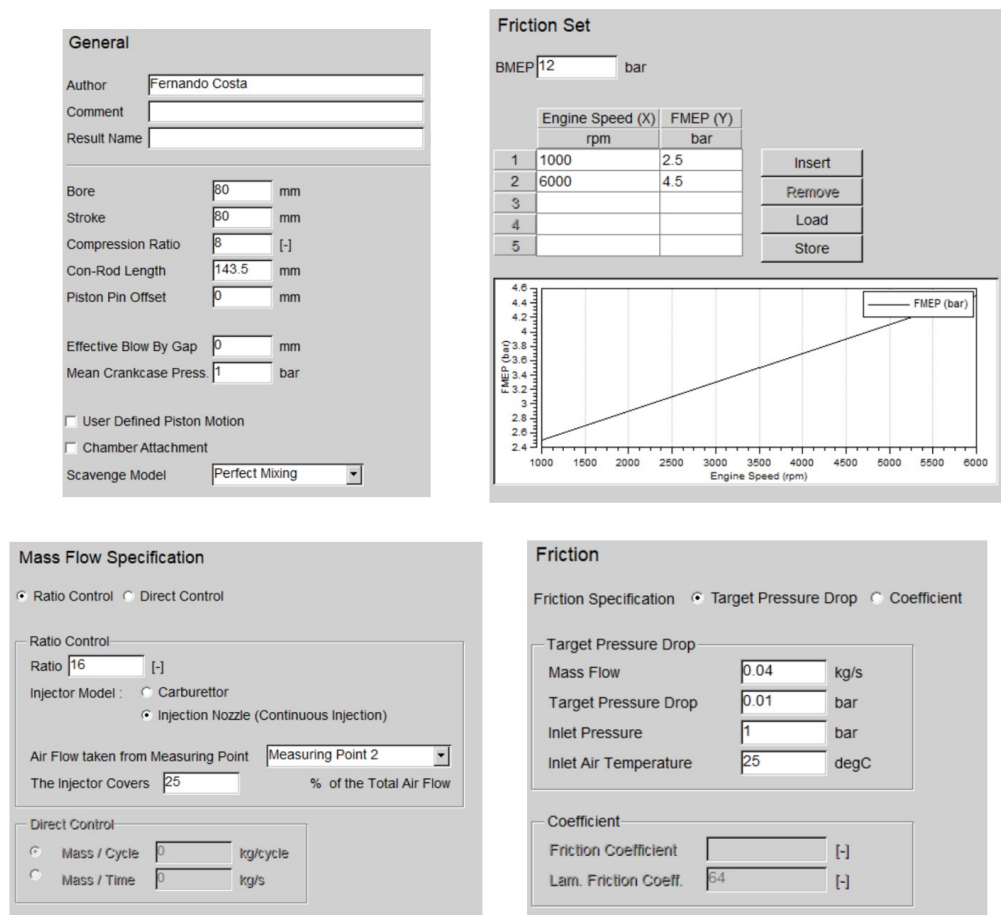


Figura 4.3 - Alguns dos principais parâmetros ajustados durante a calibração para a gasolina, da esquerda para a direita: dados gerais dos cilindros do motor, informações gerais da pressão média efetiva de atrito e de eixo do motor, especificações da vazão mássica.

Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

Vale ressaltar que, através de cálculos do torque e simulando as variáveis desejáveis, foi possível se obter uma estimativa dos valores ideais para a situação de trabalho. Com a estimativa dos rendimentos térmico, volumétrico e mecânico foi possível calcular algumas aproximações para variáveis críticas. Nesse sentido, foi

estimado uma razão de compressão de 8, e uma vazão de ar de 0,04 kg/s, calculados de forma que os valores de torque indicados na figura 4.1 pudessem ser atingidos. Nota-se que a razão de compressão utilizada é inferior à especificada na tabela 4.1, e isso, mais uma vez, foi uma alteração necessária para compensar os parâmetros desconhecidos que foram estimados, já citados acima. Além disso, a pressão média efetiva de fricção foi definida variando linearmente de 2,5 a 4,5 bar entre as rotações de 1000 a 6000 rpm.

Dessa maneira, foi possível calibrar o modelo para que os resultados se tornassem mais fiéis ao que era esperado. Vale lembrar que como se trata de uma configuração complexa e dependente de inúmeras variáveis, esse processo de calibração deve ser executado meticulosamente a fim de que as propriedades desejadas sejam de fato atingidas, sendo que a alteração dos parâmetros é realizada gradualmente simulando cada parâmetro isolado para avaliar os impactos de suas modificações nos resultados.

4.3 Simulações para diferentes combustíveis

Após a construção e ajuste do modelo computacional, algumas simulações de casos particulares foram realizadas e suas respectivas respostas analisadas de acordo com o comportamento esperado. Para isso, foram consideradas três situações com diferentes tipos de combustíveis.

O primeiro caso se trata do uso da gasolina como combustível. Para essa condição, foi usada uma relação ar-combustível equivalente a 16. Para a gasolina, essa relação se caracteriza como uma condição levemente pobre, que se fez necessária para compensar outros parâmetros estimados do modelo, de modo que as curvas características se aproximassem do esperado. Além das curvas de torque e potência, é possível avaliar o comportamento da pressão média efetiva dentro das câmaras de combustão do motor.

Em seguida, foi simulado os mesmos comportamentos para o combustível etanol. Nesse caso, como o álcool exige uma menor concentração de ar em relação ao combustível para a combustão, foi considerada uma razão de ar-combustível equivalente a 9. Esse valor já é considerado bem próximo à razão estequiométrica e fornece uma boa aproximação dos resultados esperados.

Por fim, uma mistura de 50% gasolina e 50% etanol foi considerada na simulação. Nesse caso, a relação ar-combustível foi estimada a partir de uma média ponderada levando em consideração a vazão de ar necessária para cada tipo de combustível e, portanto, definida em 12,5. Como esperado, os valores e comportamentos das curvas características são resultados definidos entre as respostas referentes ao álcool e a gasolina puros, de modo que sua performance seja intermediária entre esses dois tipos de combustíveis.

A Figura 4.4 apresenta um comparativo entre o comportamento do motor para os diferentes tipos de combustíveis. Vale ressaltar que a diferença é mais perceptível para rotações mais baixas e como esperado, o etanol fornece um maior torque e potência ao motor quando comparado com a gasolina.

A fim de validar o modelo, a curva de torque para a gasolina e etanol foi comparada com a curva característica divulgada para o motor. Fazendo um comparativo dos resultados da simulação para a gasolina, chegamos à um erro médio de 6% com um desvio padrão de 3%. Na figura 4.5, percebe-se que para a gasolina os maiores erros estão nas extremidades com destaque para as maiores rotações onde se tem o maior erro relativo, valendo 13% em 7000 rpm.

Já para o etanol apresentado na figura 4.6, o erro se torna mínimo para as baixas rotações mas ainda se mantém maior para as rotações mais elevadas, chegando à um erro relativo de 15% em 3500 rpm. O erro médio encontrado para esse caso também foi de 6% porém com um desvio padrão de 5%.

Vale ressaltar que os erros encontrados são esperados, visto que diversos parâmetros foram estimados e adequados para o modelo virtual. No entanto, os erros relativos são aceitáveis visto que a resposta do modelo ainda se aproxima da performance do motor estudado, principalmente para os valores máximos atingidos.

Dessa forma, a partir desses resultados, considera-se que o modelo é válido para o motor, uma vez que o etanol fornece um torque levemente superior em relação à gasolina e a mistura apresenta um resultado intermediário entre esses dois extremos. Isso se deve especialmente à diferença das partes de ar para as partes de combustíveis que são configuradas de maneira diferente pela injeção eletrônica, considerando cada tipo de combustível.

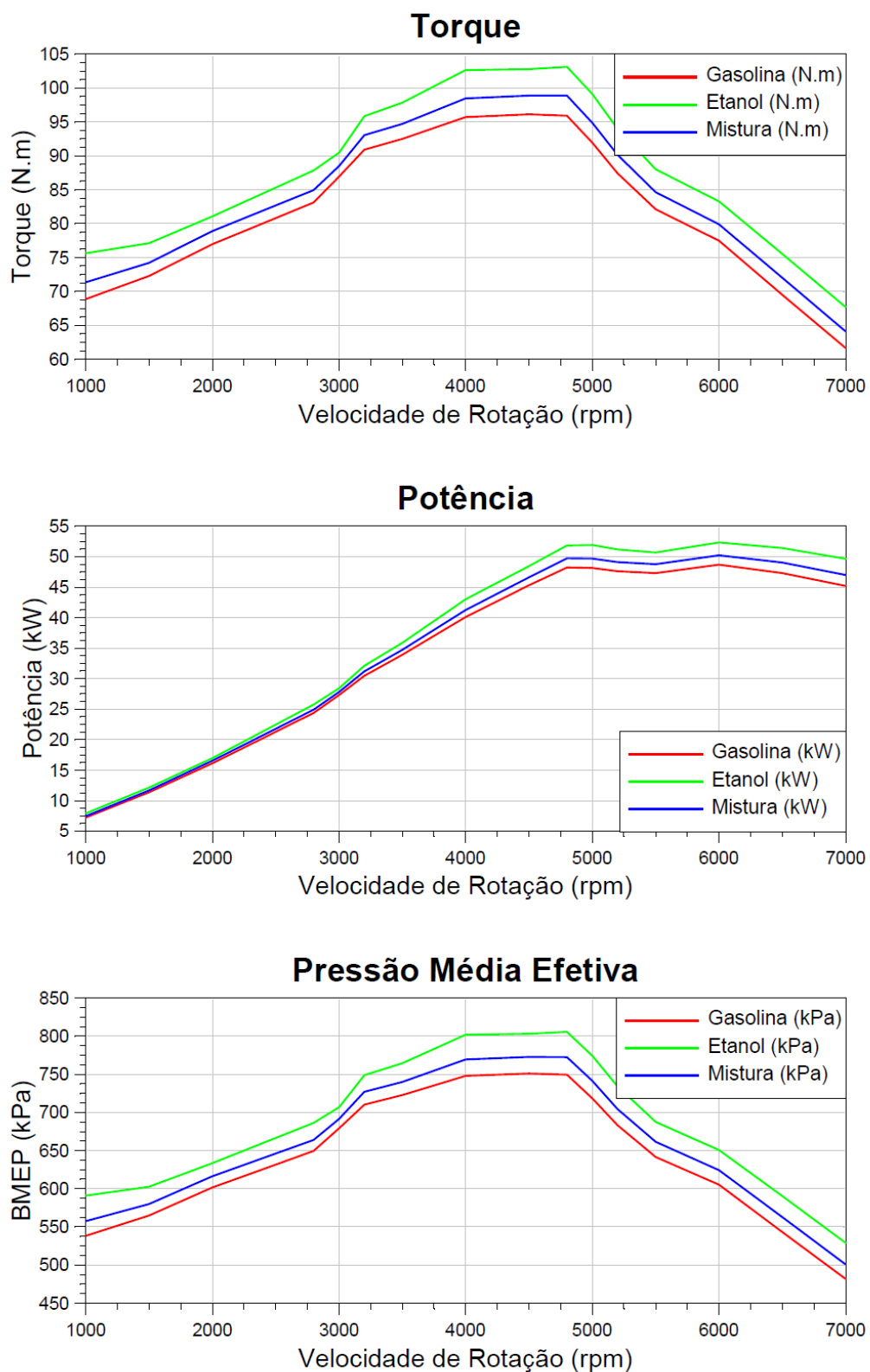


Figura 4.4 - Comparativo das curvas característica para os diferentes tipos de combustíveis.
 Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

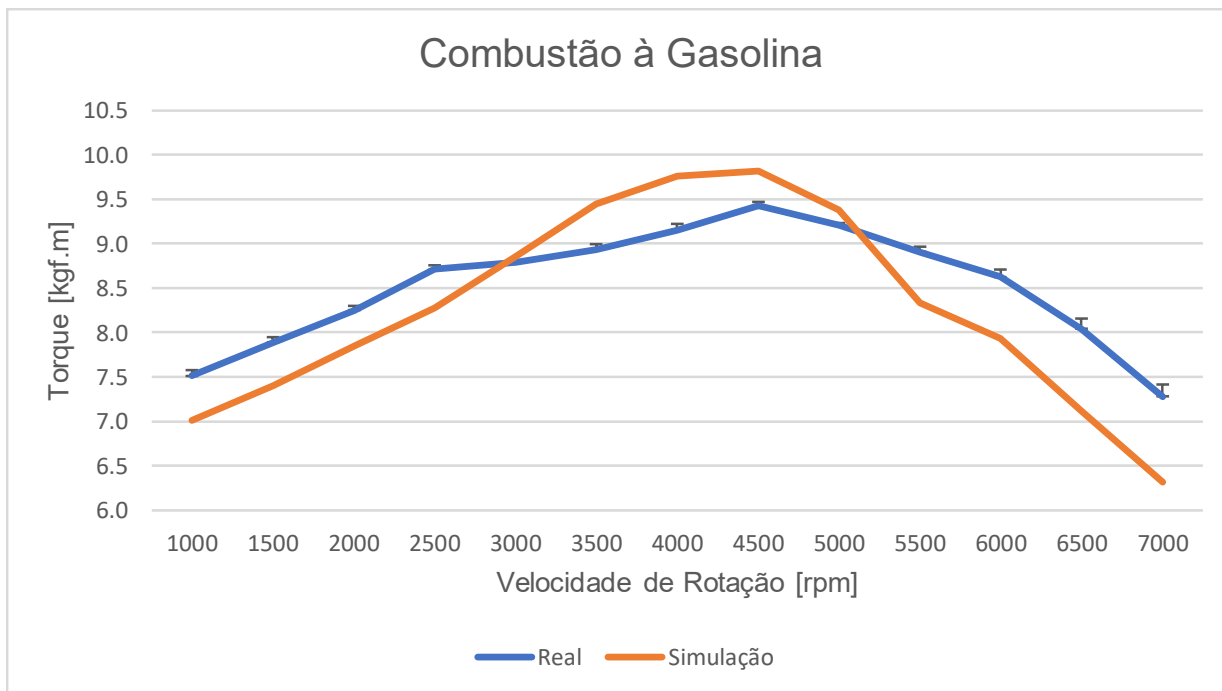


Figura 4.5 - Comparativo entre curva real e simulada do torque do motor abastecido com gasolina.
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

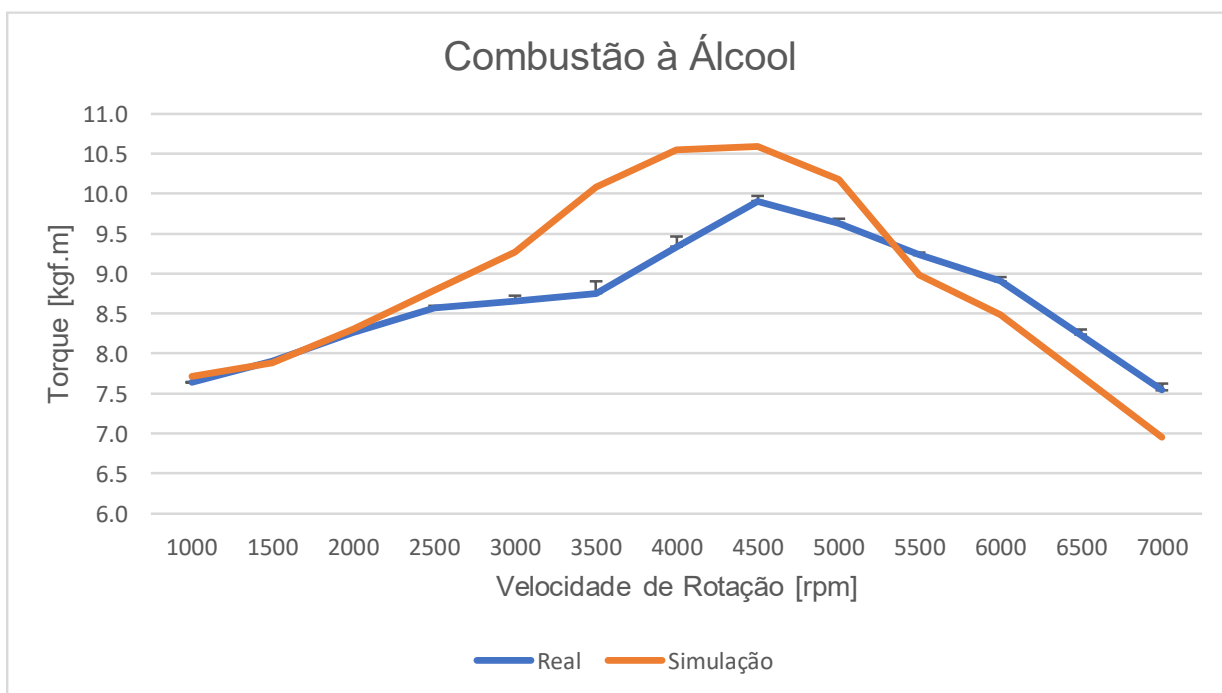


Figura 4.6 - Comparativo entre curva real e simulada do torque do motor abastecido com etanol.
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

4.4 Análise de poluentes

O BOOST calcula as emissões de componentes químicos, chamados pelo software de espécies, em fração mássica ou fração molar. Para a simulação de poluentes foi considerado uma mistura composta por CO, CO₂, NO_x, O₂ e N₂. Dessa forma, o modelo computa as frações de cada um desses elementos de acordo com o número de ciclos realizados pelo motor, sendo que esse comportamento tende a se estabilizar na medida em que o motor entra em regime permanente estável. A figura 4.7 apresenta os resultados referentes às simulações de poluentes realizadas no AVL BOOST.

As curvas mostram o percentual das emissões mássicas dos poluentes para o motor em regime permanente, em função da velocidade de rotação do eixo do motor. Apesar de apresentar um comportamento não uniforme de variação, nota-se que a escala não varia muito e que a faixa de valores obtidos para as diferentes velocidades não possui uma grande amplitude de variação. Isso significa que tanto para altas quanto para baixas rotações o modelo apresenta emissões próximas para os principais tipos de poluentes.

Analisando os resultados, percebe-se que para os poluentes do carbono (CO₂ e CO), as maiores emissões em geral ocorrem para a simulação com o etanol. Como a relação ar-combustível para esse caso está mais próxima da estequiométrica é comum a emissão mais elevada de poluentes, especialmente para o CO que se trata de um produto da combustão incompleta.

O monóxido de carbono se torna bem próximo de zero principalmente quando se tem a gasolina como combustível, significando que a combustão é completa, ou seja, a reação de combustão consegue queimar praticamente todo o combustível injetado, característica esperada quando se trabalha com misturas pobres. No entanto, como se tem uma mistura mais rica há uma maior formação de CO após a combustão, como no caso do etanol, que apesar de não ser considerada ainda uma mistura muito rica, está mais próxima se sua estequiometria se comparada com a gasolina (EDUCABRAS, 2018).

Os valores da concentração dos óxidos de nitrogênio são geralmente, bem inferiores aos poluentes com carbono em sua composição. Isso é uma qualidade

desejável, uma vez que os NO_x possuem um maior impacto para o meio ambiente e também para a saúde da população.

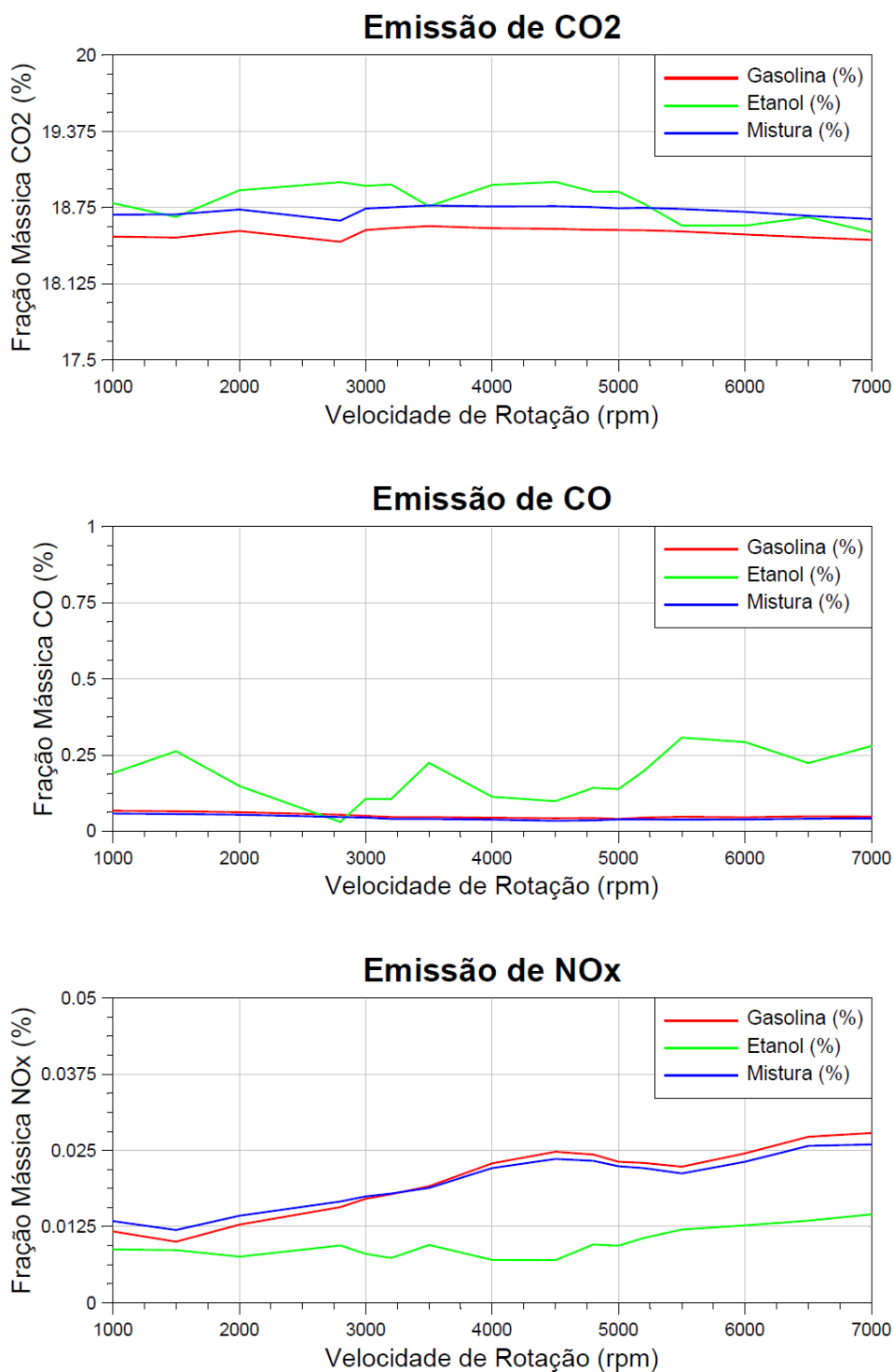


Figura 4.7 - Comparativo de emissão dos principais tipos de poluentes para as três composições de combustível usadas.
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

Em um trabalho experimental de Machado (2017), onde a mesma bancada experimental usada como base para a criação do modelo aqui estudado, foi medido a emissão dos de alguns dos poluentes emitidos pelos gases de escape. Os resultados desses experimentos são comparados com as simulações nas três tabelas a seguir e se tratam dos resultados fixados para uma rotação considerada alta, valendo 5000 rpm.

Tabela 4.2 - Comparativo entre emissões experimental e simulada dos poluentes Dióxido de Carbono (CO₂) e Monóxido de Carbono (CO) usando a gasolina.

Poluentes	Concentração Mássica Simulada (%)	Concentração Mássica Experimental (%)	Erro Relativo
CO ₂	18.57	21.01	12%
CO	0.04	0.28	86%

Fonte: MACHADO (2017).

Tabela 4.3 - Comparativo entre emissões experimental e simulada dos poluentes Dióxido de Carbono (CO₂) e Monóxido de Carbono (CO) usando o etanol.

Poluentes	Concentração Mássica Simulada (%)	Concentração Mássica Experimental (%)	Erro Relativo
CO ₂	18.88	20.91	10%
CO	0.14	0.26	47%

Fonte: MACHADO (2017).

Tabela 4.4 - Comparativo entre emissões experimental e simulada dos poluentes Dióxido de Carbono (CO₂) e Monóxido de Carbono (CO) usando a mistura entre gasolina e etanol.

Poluentes	Concentração Mássica Simulada (%)	Concentração Mássica Experimental (%)	Erro Relativo
CO ₂	18.75	21.08	11%
CO	0.04	0.24	84%

Fonte: MACHADO (2017).

Analisando os resultados, percebe-se que há uma relativa aproximação para os valores encontrados referentes ao CO₂. No entanto, o erro se torna maior quando analisamos o CO e isso, em partes, se deve às diferentes configurações adotadas e consideradas para o modelo computacional. Vale ressaltar que os testes

experimentais realizados também estão sujeitos a diversas fontes de incertezas como por exemplo as condições do aparelho analisador de gases, os procedimentos na execução dos testes e as condições do motor durante os experimentos. Além disso, como os valores da concentração de CO são, por natureza, menores, pequenas variações quantitativas podem provocar grandes aumentos no erro relativo.

Em um outro trabalho realizado por Ranzi (2014), constata-se que os valores encontrados também estão dentro da faixa de grandeza para esse tipo de simulação. Nesse trabalho, foi simulado também no AVL BOOST o motor Honda GX35, utilizando apenas um cilindro de combustão. Os resultados das emissões retornaram uma concentração mássica de 0,91% para o CO, 11,75% para CO₂ e 0,02% para NO_x.

Vale ressaltar, que as simulações referentes à emissão de poluentes foram realizadas pelo AVL BOOST a partir de reações químicas pré-estabelecidas no elemento catalisador usados no modelo. Para tanto, o software utiliza um modelo padrão de performance da dinâmica do gás no catalisador, alinhado com as informações de perda de carga no componente dependendo das condições de escoamento. O AVL BOOST realiza uma aproximação unidimensional e generalizada dos resultados e comportamentos do motor, mas existem outras ferramentas dentro do software que aprofundam a simulação do pós tratamento de gases como é o caso dos modelos de combustão utilizando múltiplas vibrações em duas zonas além da ferramenta AVL FIRE que considera todo o fluxo como uma malha multidirecional.

5 CONCLUSÃO

É indiscutível a importância de se preservar o meio ambiente e utilizar os recursos esgotáveis com sabedoria. Além disso, todo o setor industrial tem grande responsabilidade com a saúde da população, sendo importante lançar ideias cada vez mais sustentáveis e benéficas. Por isso, análise de emissão de poluentes e o uso de ferramentas computacionais para a elaboração de soluções avançadas e sofisticadas tem sido uma importante prática da indústria automobilística.

A partir deste trabalho, é possível notar a grande contribuição que softwares desenvolvidos para motores proporcionam para o desenvolvimento do setor automobilístico. O uso de tais ferramentas permite uma grande redução de testes experimentais, construção de bancadas de testes e um aumento na versatilidade de simulações e experimentos que podem ser realizados. Em se tratando de emissões de poluentes, essas ferramentas podem auxiliar no desenvolvimento de novos motores mais sustentáveis e limpos, que permitem uma redução dos impactos ambientais, bem como na saúde humana.

O grande desafio do trabalho foi transcrever fielmente os parâmetros e informações reais do objeto de estudo para o modelo. O motor fabricado pela Fiat, Fire 1.0, apesar de se ter uma grande popularidade não possui todas as suas informações bem divulgadas e conhecidas, sendo que para se criar um modelo inspirado nesse motor, foi necessária algumas considerações e estimativas. Dessa forma, existem algumas diferenças entre o modelo computacional e a bancada experimental, mas que foram amenizadas ao máximo para que os resultados fossem adequados para o estudo.

As emissões de poluentes em geral se aproximam da faixa esperada para o modelo de um automóvel popular. No entanto, algumas diferenças foram encontradas com os experimentos realizados na bancada especialmente para o monóxido de carbono (CO). Isso se deve em grande parte às diferenças entre o modelo virtual do motor e a realidade que tiveram que ser consideradas para a aplicabilidade do motor. Além disso, os experimentos também estão susceptíveis a uma série de erros e incertezas que podem afastar ainda mais os resultados.

É interessante ressaltar que a simulação em motores carrega uma considerável complexidade, especialmente no que se refere à representação de

modelos reais. Sendo assim, é notável que o tempo disponível para um Trabalho de Conclusão de Curso se torna limitado para detalhar e aprofundar o estudo dos parâmetros e hipóteses necessárias. Dessa forma, existem boas oportunidades de melhorias para este trabalho, de modo que proporcionem resultados mais precisos e exatos, mitigando cada vez mais as fontes de erros e incertezas aqui reconhecidas. Para isso, pode-se refinar e otimizar o modelo já criado, buscando a partir de estudos mais aprofundados e experimentos mais complexos adequar os parâmetros estimados para um resultado mais realista e confiável. Além disso, é possível utilizar ferramentas e softwares mais sofisticados para a simulação do tratamento de gases de escape, como é o caso do AVL FIRE e da simulação de um modelo de vibrações múltiplas com duas zonas de combustão, caracterizados por trazerem resultados mais precisos e refinados.

Vale ressaltar que, na prática, as simulações são apenas usadas como ferramentas auxiliares para os testes de motores em desenvolvimento e em momento algum substituem os experimentos físicos. Por ser uma técnica de menor custo e de maior produtividade, as simulações computacionais são ideais para se ter um primeiro contato com um modelo ou conceito novo. Quando os resultados computacionais são tidos como eficazes e coerentes, deve-se então, criar os protótipos e realizar os devidos experimentos físicos para que os resultados sejam de fato comprovados e sustentados para o desenvolvimento de um novo produto.

Em suma, o trabalho mostra o verdadeiro poder de uma análise computacional e o quanto tais ferramentas podem impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias. Hoje, o mercado já oferece soluções intuitivas e eficientes para a simulação de motores, que proporcionam de maneira segura, rápida e barata, resultados cada vez mais confiáveis e coerentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis 2017 (Ano-Base 2016)**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-02/consumo-de-combustiveis-no-brasil-caiu-45-em-2016-segundo-anp>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **RESOLUÇÃO ANP Nº7 DE 9/2/2011 – DOU 10/02/2011**. 2011. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/legislacao/comercializacao/institucional_site_juridico/res_anp_07_amplia_nomenclatura_alcool.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2018.

AVL BOOST Software “**Boost Theory**”, 2011a.

AVL BOOST Software “**Users Guide**”, 2011a.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. Volume 1. São Paulo: Bluncher, 2012.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. Volume 2. São Paulo: Bluncher, 2012.

CARROSNWEB. **Ficha Técnica: Fiat Pálio ELX 1.0 8V**. Disponível em: <<http://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=3859>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

CONAMA CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº5 de 15 de junho de 1989. Publicada no DOU, de 25 de agosto de 1989, seção 1, páginas 14713-14714**. 1989. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=81>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

CONAMA CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 418, de 25 de novembro de 2009. Publicada no DOU nº 226 de 26/11/2009, págs. 81-84.** 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=618>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

DIÁRIO DO PRÉ-SAL. **Torre de Fracionamento de Petróleo – Refino de Petróleo.** Disponível em: < <https://diariodopresal.wordpress.com/o-que-e-o-pre-sal/torre-de-fracionamento-de-petroleo-2/>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

EDUCABRAS. **Reação de Combustão – Combustão Completa e Incompleta.** Disponível em: <https://www.educabras.com/enem/materia/quimica/aulas/reacao_de_combustao_combustao_completa_e_incompleta>. Acesso em: 10 out. 2018.

IBAMA INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Programa de controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE/PROMOT/IBAMA.** 3º ED. Brasília: IBAMA/Diqua, 2011.

IBAMA INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve).** 2016. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

MACHADO, R. B. G. **Análise de Emissões de Poluentes em Motores de Combustão Interna Usando Diferentes Misturas entre Etanol e Gasolina.** 2017, 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

MAKINANDOVELEZ. **Motor Otto 4T e 2T.** Disponível em: < <https://makinandovelez.wordpress.com/2017/11/29/motor-otto-4t-y-2t-diferencias-construtivas/>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2º ed. Porto: Publindústria, 2006.

MENDONÇA, Douglas. **Precisamos Mesmo dos Motores Flex**. Revista Eletrônica: Motorshow, 2017. Disponível em: <<http://motorshow.com.br/precisamos-mesmo-dos-motores-flex/>>. Acesso em: 29 mai. 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília, 2013. 114p. Relatório.

OMECÂNICO. **Atenção para os Conversores**. Disponível em: <<http://www.omecanico.com.br/atencao-para-os-conversores/>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

PETROBRAS. **Conheça os Benefícios das Novas Gasolinas S-50**. 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-os-beneficios-das-novas-gasolinas-s-50.htm>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

PETROBRAS. **Sobre a Gasolina**. 2017. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/gasolina/>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

RANZI, M. F. **Análise das Emissões de um Motor de Combustão Interna**. 2014. 15folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SEIFFERT, U.W.; BRAESS, H.H. **Handbook of Automotive Engineering**. SAE International. Warrendale: PA, 2005.

SENAI. **Motores de Combustão Interna**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe7qkAl/senai-ba-motor-combustivel-interna#>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

SOUZA, Ana Marta. **Desempenho de Motores. Aula 17.** 2016. Uberlândia. 40p. Material de Estudo.

UNEA UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL ASSEMBLY. **Actions on Air Quality.** Nairobi, Kenya. 2016. Disponível em: <<http://www.ccacoalition.org/en/resources/actions-air-quality>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. **Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análise de impactos.** São Paulo: Annablume Editora, 2006.