



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

TEÓFILO SEIJI ODAIRA

Estudo da tecnologia relativa à adaptação *dual fuel* em motores a combustão interna

Guaratinguetá - SP
2023

TEÓFILO SEIJI ODAIRA

Estudo da tecnologia relativa à adaptação *dual fuel* em motores a combustão interna

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Jose Antonio Perrella Balestieri

Guaratinguetá - SP
2023

O22e	<p>Odaira, Teófilo Seiji Estudo da tecnologia relativa à adaptação <i>dual fuel</i> em motores a combustão interna / Teófilo Seiji Odaira - Guaratinguetá, 2023. 65 f : il. Bibliografia: f. 61-65</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri</p> <p>1. Motores de combustão interna. 2. Biocombustíveis. 3. Motor diesel. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.43</p>
------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

TEÓFILO SEIJI ODAIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO(A) EM NOME DO CURSO"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

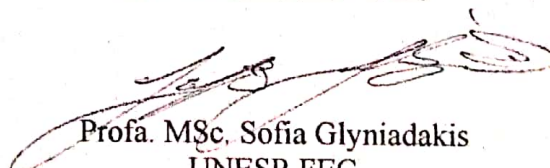


Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Orientador/UNESP-FEG



Profa. MSc. Sofia Glyniadakis
UNESP-FEG



Prof. MSc. Anderson Zenken Nakazato
UNESP-FEG

Janeiro 2023

DADOS CURRICULARES

TEÓFILO SEIJI ODAIRA

NASCIMENTO	31.01.2000 – Cuiabá / MT
FILIAÇÃO	Joel Tsuyoshi Odaira Soely Yoshie Takano Odaira
2015/2017	Ensino Médio ETEC Professor Massuyuki Kawano
2018/2023	Engenharia Mecânica UNESP-FEG

Dedico este trabalho
a Deus e à minha família

AGRADECIMENTOS

Foi prometido que estaria comigo todos os dias até a consumação do século e assim tem cumprido dia após dia. Quando estive sem forças me deu a porção necessária para prosseguir. Quando estive desesperançoso, me fez lembrar a razão do meu viver. Deus é bom o tempo todo.

Em primeiro lugar agradeço a Deus. Agradeço pelo propósito de vida encontrado nele; ao meu orientador, *Prof. Dr. Jose Antonio Perrella Balestieri* que, com toda paciência, me apoiou e direcionou para solução dos diversos problemas que surgiram;

aos meus pais, *Joel e Shie Odaira*, que sempre deram o melhor para que eu crescesse nos estudos, mas acima de tudo no temor a Deus;

ao meu irmão, *Nathan Odaira*, companheiro e fonte de inspiração na determinação e disciplina para cumprir o que lhe é proposto;

aos meus mantenedores, que demonstraram cuidado e amor de Deus em oração e apoio financeiro;

à UNESP, por me ajudar no meu desenvolvimento profissional.

“Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém!”

Romanos 11:36

RESUMO

Com o maior rigor no controle da emissão de gases poluentes, a indústria automobilística desenvolveu tecnologias de conversão de motores que utilizam combustíveis líquidos e gasosos em conjunto. A conversão realizada não necessita de mudanças na estrutura original do motor e implica em menores custos de investimentos. Por isso, esse trabalho busca aprofundar o conhecimento envolvendo motores a combustão interna, entendendo seu funcionamento básico para maior compreensão da adaptação do motor para tecnologia *dual fuel*. Para isso, foi realizada uma fundamentação técnica por meio de revisão bibliográfica, expondo os componentes e suas respectivas funções dentro do sistema bicombustível.

PALAVRAS-CHAVE: *Dual Fuel*; Sistema Bicombustível; Motor a Combustão Interna; Tecnologia de Conversão.

ABSTRACT

With the greatest rigor in controlling the emission of polluting gases, the automobile industry has developed technologies for converting engines that use liquid and gaseous fuels together. The conversion carried out does not require changes to the original structure of the engine and implies lower investment costs. Therefore, in this work has been performed a study in order to deepen the knowledge involving an internal combustion engine, understanding its basic operation for a better comprehension of the adaptation of the engine to dual fuel technology. For this, a technical foundation has been made through a bibliographical review, exposing the components and their respective functions within the dual-fuel system.

KEYWORDS: Dual Fuel; Bifuel System; Internal Combustion Engine; Conversion Technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Motor de pistão livre de Barsanti e Matteuci	12
Figura 2 – Motor exposto na Feira Internacional de Paris de Nikolaus Otto	13
Figura 3 – Motor a combustão interna linha pesada utilizado em maquinários agrícolas.....	14
Figura 4 – Seção lateral do motor a combustão interna	19
Figura 5 – Seção frontal do motor a combustão interna.....	20
Figura 6 – Conjunto de acionamento de válvulas.....	23
Figura 7 – Circuito de ar.....	25
Figura 8 – Seção de um filtro em banho de óleo	25
Figura 9 – Filtro de ar seco.....	26
Figura 10 – Elemento primário do filtro de ar seco.....	26
Figura 11 – Elemento secundário do filtro de ar	27
Figura 12 – Turbocompressor	28
Figura 13 – Radiador	28
Figura 14 – Circuito de combustível	29
Figura 15 – Corte do filtro de combustível.....	30
Figura 16 – Circuito de tubulações de combustível	30
Figura 17 – Motor a combustão interna dois tempos	32
Figura 18 – Motor a combustão interna quatro tempos.....	33
Figura 19 – Representação dos 4 tempos com ciclo Otto.....	34
Figura 20 – Diagrama Pressão x Volume; Temperatura x Entropia do ciclo diesel	35
Figura 21 – Diagrama Pressão x Volume Diesel real.....	36
Figura 22 – Diagrama Pressão x Volume; Temperatura x Entropia do ciclo Otto.....	36
Figura 23 – Diagrama Pressão x Volume Otto real.....	37
Figura 24 – Sistema bicombustível 1ª geração.....	38
Figura 25 – Sistema bicombustível 2ª geração.....	39
Figura 26 – Sistema bicombustível 3ª geração.....	40
Figura 27 – Injetor <i>dual fuel</i> 3ª geração	41
Figura 28 – Injetores inseridos no coletor de admissão.....	41
Figura 29 – Representação da injeção direta em sistema <i>dual fuel</i>	42
Figura 30 – Sistema convencional de injeção de gás	43
Figura 31 – Componentes do sistema <i>dual fuel</i>	43
Figura 32 – Aterramento para abastecimento de gás.....	44

Figura 33 – Válvula de abastecimento	45
Figura 34 – Filtro de gás.....	45
Figura 35 – Válvula do cilindro.....	46
Figura 36 – Redutor de pressão Landirengo	46
Figura 37 – Misturador tipo boca de fogão	47
Figura 38 – Instalação do misturador	48
Figura 39 – Chave comutadora TURY	49
Figura 40 – Taxa de substituição x Potência	51
Figura 41 – Taxa de substituição diesel-gás natural x carga de ensaio	52
Figura 42 – Redução de diesel x Potência.....	52
Figura 43 – Percentuais de CO ₂ nas emissões.....	54
Figura 44 – Percentuais de CO nas emissões	54
Figura 45 – Percentuais de NOx nas emissões	55
Figura 46 – Sistema de redução catalítica SCR.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3	DESENVOLVIMENTO	19
3.1	COMPONENTES ESTACIONÁRIOS	20
3.2	COMPONENTES MÓVEIS	21
3.3	SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO.....	24
3.3.1	Sistema de alimentação para motores ciclo diesel	24
3.4	MOTOR DOIS TEMPOS.....	32
3.5	MOTOR QUATRO TEMPOS.....	33
3.6	CICLO DIESEL	35
3.7	CICLO OTTO	36
4	MOTOR <i>DUAL FUEL</i>	38
4.1	SISTEMAS DE CONVERSÃO <i>DUAL FUEL</i>	38
4.2	FUNCIONAMENTO	41
4.3	COMPONENTES DO SISTEMA	43
4.4	VANTAGENS	50
4.5	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO	51
4.6	EMISSÕES	53
4.7	DESAFIOS	56
4.8	APLICAÇÃO DO SISTEMA <i>DUAL FUEL</i>	56
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Fundamentalmente, um motor é uma máquina destinada à obtenção de energia mecânica a partir de outra forma de energia, podendo ser térmica, elétrica, hidráulica, etc. Para o caso dos motores de combustão interna (MCI), há transformação de energia térmica, queima de combustível, em energia mecânica (MAHLE..., 2019).

Inicialmente, teve-se a ideia de construir um motor que aproveitasse a força expansiva dos gases provenientes da combustão de pólvora num cilindro fechado, proposta pelo Padre Hautefoille em 1652, porém não deixou nada escrito sobre o assunto. Em 1687, Dênia Papim desenvolveu e descreveu o princípio de funcionamento de uma máquina a vapor. Após isso, em 1767, James Watts construiu um motor a vapor com sistema de resfriamento de cilindros. A evolução se deu pela patente de um motor de combustão interna de Robert Steet em 1794 com dois cilindros horizontais. Em 1821, foi desenvolvido por W. Cecil o primeiro motor de combustão que funcionou com sucesso e que trabalhava com ar e hidrogênio. Partindo dos estudos de Cecil, Jean Lenoir, em 1858 tentou seu primeiro motor fixo de explosão de gás patenteado em 1860, trabalho que deu início aos estudos de transformação do movimento retilíneo em movimento de rotação. Porém, em 1857, Barsanti e Matteuci construíram um motor de pistão livre, exposto na Figura 1, que operava a partir da expansão dos gases da combustão e impulsionava o pistão verticalmente para cima; quando o pistão descia, pela ação da gravidade, acionava uma catraca que, por sua vez, acionava um eixo (VARELLA, 2012).

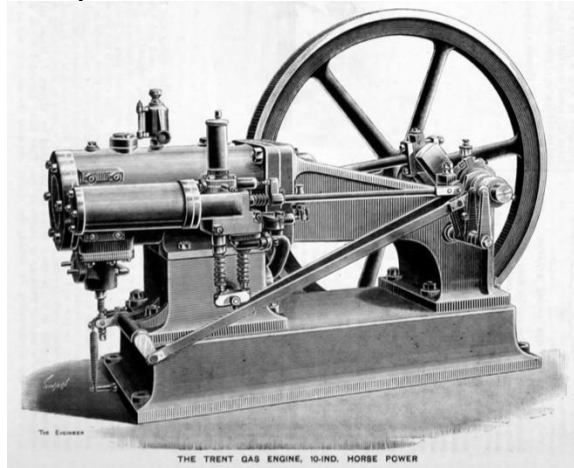
Figura 1 – Motor de pistão livre de Barsanti e Matteuci.



Fonte: Varella (2012).

Pouco tempo depois, Beau de Rochás, 1862, propôs e patenteou os princípios de funcionamento dos motores de 4 tempos de combustão interna com êmbolos. Na teoria, apresentava condições de eficiência elevada. Porém, nunca conseguiu construir o motor. Em 1876, Nikolaus Otto, caixeiro viajante e sócio de uma fábrica de motores a gás, construiu depois de ter inventado independentemente o mesmo ciclo descrito por Beau de Rochás, o motor que foi chamado de Otto silencioso. Em 1878, após solidificação dos seus conhecimentos, apresentou o motor na Feira Internacional de Paris conforme exposto na Figura 2 (VARELLA, 2012).

Figura 2 – Motor exposto na Feira Internacional de Paris de Nikolaus Otto

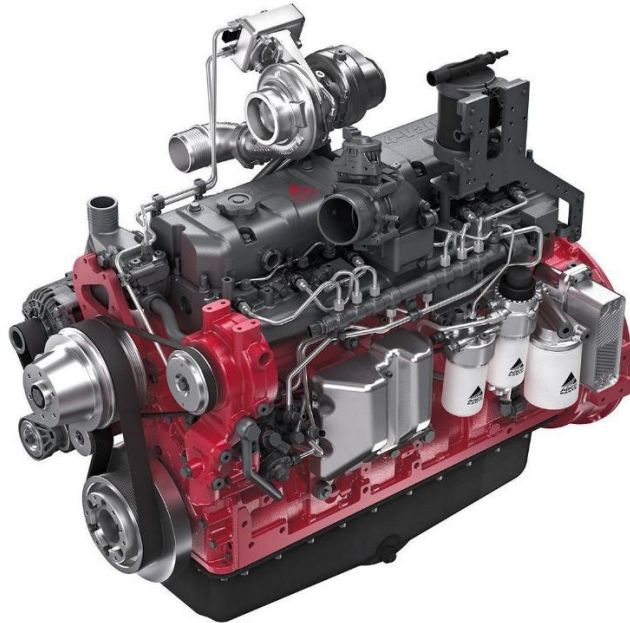


Fonte: Varella (2012).

Em 1893, Rudolf Diesel, alemão engenheiro, inventou o tipo de motor que leva seu nome: motor diesel. Após algumas dificuldades para financiar seu projeto, construiu um motor que explodiu após a primeira injeção de combustível, escapando por pouco de morrer. Até que, quatro anos mais tarde, conseguiu um motor operacional (VARELLA, 2012).

A Figura 3 mostra um motor linha pesada como é utilizado atualmente. Para motores a combustão interna, a transformação da energia é obtida com a compressão da mistura ar/combustível na câmara de combustão de cada cilindro. Inicia-se uma queima que libera uma força contra a cabeça do pistão, forçando um deslocamento na direção do virabrequim. A conversão do movimento retilíneo alternado dos pistões em movimento rotativo do virabrequim é feita através da biela (MAHLE..., 2019).

Figura 3 – Motor a combustão interna linha pesada utilizado em maquinários agrícolas.



Fonte: TRATTORI WEB (2019).

1.1 MOTIVAÇÃO

Como visto anteriormente, a evolução histórica dos motores a combustão interna sempre focou no seu desempenho. Uma vez construído um motor funcional, alcançar torque e potência cada vez maiores era o objetivo das diversas empresas envolvidas no seu desenvolvimento. Porém, um ponto preocupante começou a aparecer: emissões de gases poluentes.

No Brasil as legislações ambientais se mostravam inexistentes ou ineficazes até o início da década de 1990 (CARVALHO, 2014). A poluição do ar é um dos maiores problemas ambientais da atualidade, comprometendo a saúde e a qualidade de vida das populações. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que mais de 4 milhões de pessoas morrem prematuramente no mundo em decorrência da poluição do ar. Cerca de 90% da população mundial está exposta a níveis de concentração de poluentes acima dos recomendados pela OMS. Nas regiões metropolitanas as emissões dos veículos rodoviários se constituem nas principais fontes de poluição. Essas emissões são compostas por diversas substâncias tóxicas que, absorvidas pelo sistema respiratório, produzem efeitos negativos sobre a saúde. Essa emissão é composta por gases como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO_x), material particulado, etc (CETESB, 2019).

A partir do entendimento das possíveis consequências da negligência em se tratar desse assunto, algumas medidas começaram a serem estudadas. Sabe-se que o Brasil como um todo apresenta um crescimento expressivo na frota veicular de suas regiões metropolitanas. O Estado de São Paulo, por exemplo, enfrenta uma situação particularmente preocupante por deter cerca de 40% da frota automotiva do país (CETESB, 2019).

Algumas soluções e tecnologias aplicadas a motores já foram ou estão sendo desenvolvidas como a alteração e estudo das curvas de ignição e diagrama de válvulas, a recirculação dos gases de escape, alteração e controle da razão ar/combustível, injeção direta, sistemas catalíticos e de pós-tratamento (COSTA, 2017).

Entre os benefícios trazidos dessas inovações tecnológicas, os que mais merecem destaque são aqueles que contribuíram de alguma forma para a sustentabilidade do meio ambiente. Com relação às emissões provenientes dos gases de escapamento de motor, as tecnologias de controle do motor e de pós-tratamento de gases conseguiram minimizar severamente as emissões de gases como CO, HC e NOx. Porém, todas essas medidas ainda não são suficientes. O gás carbônico, por exemplo, é apontado como um dos causadores do efeito estufa e aquecimento global, sendo lançado ao meio ambiente proporcionalmente ao consumo de combustíveis em MCI. Essa demanda pelo melhor aproveitamento do combustível tem levado à tendência de veículos com MCI cada vez menores, que consumam menos combustíveis e, logo, emitam menos poluentes (CARVALHO, 2011).

Combustíveis com a capacidade de reduzir as emissões gasosas, o gás natural, o biogás, gás pobre, e outros combustíveis existentes no mundo podem também contribuir para que alguns países não dependam da importação de energia para sua matriz energética, além de contribuir para movimentar máquinas e para a redução de CO₂ na atmosfera (MURARO, 2006). Motores operando no modo diesel/gás podem apresentar rendimento térmico superior tanto ao verificado em seu funcionamento original diesel, como o obtido dos motores do ciclo Otto dedicados ao gás natural. Além do aumento de rendimento tem-se também a redução de emissões à atmosfera, reduzindo o impacto ambiental desses tipos de motores (FRANCO, 2007).

1.2 OBJETIVOS

Desenvolver um aprofundamento dos estudos envolvendo motores de combustão interna, entendendo seu funcionamento básico para maior compreensão da adaptação do motor para tecnologia *dual fuel*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Schlosser et al. (2004), motivado pela previsível escassez de petróleo e por questões ambientais, avaliou um motor diesel, biocombustível, movido a diesel e gás natural. Para esse motor, o diesel era utilizado para introduzir a combustão do gás que, por sua vez, era o combustível principal. É apontado como uma grande vantagem o fato desse sistema não exigir modificações no motor. Diversos parâmetros importantes no que diz respeito ao funcionamento do motor foram observados como rendimento da combustão, proporção da mistura dos combustíveis, ângulo de avanço de injeção, consumo específico e potência do motor. Para aplicação e interpretação dos resultados dos experimentos foram utilizados métodos estatísticos e pôde-se concluir que o uso de gás natural em motores diesel é viável desde que em regime biocombustível.

Muraro (2006) avaliou o funcionamento de motor de combustão interna com gás proveniente da gaseificação de casca de arroz. O estudo foi feito com o motor montado em um rack juntamente com um dinamômetro para mostrar os valores de potência e torque. Foram feitas modificações na admissão do ar/combustível para partida do motor com gás natural e posterior alimentação com gás proveniente do gaseificador. Os resultados foram favoráveis para validar o funcionamento com gás a partir da casca de arroz. A fim de melhorar a partida do motor, é apontado como possibilidade a utilização de um turbo compressor e a diminuição da quantidade de alcatrão com sistema de filtragem, utilização de catalisador ou combustível original por algum tempo antes da parada do motor.

Catellanelli et al. (2008) analisou o desempenho de um motor ciclo diesel a partir de uma bancada dinamométrica utilizando misturas diesel e biodiesel. Para este caso, foi utilizado um motor da CUMMINS 4BTA 3.9 sem adaptações com injeção direta e foram avaliados os desempenhos de torque, potência e consumo específico de combustível para as misturas diesel e éster etílico de soja, dentre as quais, a B20 (20% de biodiesel e 80% de diesel) apresentou melhor desempenho. Ao comparar a mistura com o diesel, obteve-se um aumento significativo de potência em toda a faixa de trabalho do motor, torque praticamente igual e consumo específico menor. Apesar de nem todas as misturas apresentarem grandes vantagens no seu desempenho, o funcionamento do motor permaneceu normal.

Suzuki et al. (2011) apresentou as características de motores de combustão interna que utilizam biogás, descrevendo o funcionamento e sua eficiência, bem como a qualidade do combustível utilizado. Após uma vasta exposição da bibliografia disponível para esse tipo de tecnologia, o biogás é apontado como um combustível com todas as condições técnicas e

econômicas para ser explorado no Brasil. Além disso, para a utilização do biogás em sua maior potência, em geral, são necessárias poucas alterações em motores de ciclo Otto ou ciclo diesel, atualmente existentes no mercado.

Carvalho (2011) realizou um estudo de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. A fim de analisar o desempenho, eficiência e emissões do motor, foram utilizados conceitos termodinâmicos como entropia, irreversibilidade, exergia e a aplicação das Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica em motores de combustão interna. O método abordado de trabalho consistiu de ensaios experimentais realizados em um dinamômetro de bancada, que possibilitou a comparação dos resultados de torque e potência, consumo de combustível, eficiências e emissões entre os combustíveis álcool, gasolina, misturas álcool/gasolina e gás natural veicular. Destaca-se o álcool combustível tanto pelos bons resultados de desempenho e eficiência, quanto pelas questões ambientais por se tratar de uma alternativa com fonte de origem renovável e parte das emissões de CO₂ capturadas nos vegetais que dão origem ao combustível.

Leite (2013) estudou alternativas de aproveitamento energético para os resíduos provenientes do esgotamento sanitário das cidades. Através de pesquisa da tecnologia envolvida desse aproveitamento, foi constatado que é possível viabilizar projetos de estações de tratamento de esgoto que utilizam microturbinas e grupos moto-geradores adaptados ao uso de biogás. A literatura estudada não possuía tantos valores reais de mercado, assim, tornou-se inviável o estudo mais aprofundado nesse sentido. A relevância do trabalho não se restringe à técnica, mas envolve sua importância do ponto de vista ambiental (quantidade de metano como potencial poluidor) e social (cogeração que possibilita implantação de mais estações, mais empregos e melhora a qualidade de vida da sociedade evitando doenças provenientes da falta de tratamento do esgoto).

Segundo Souza, Lima e Schaeffer (2013) uma análise sobre a utilização de biocombustíveis para veículos agroindustriais, máquinas e equipamentos agrícolas, revelou potencial de produção de motores dual biocombustíveis em substituição ao combustível fóssil óleo diesel. Foi proposto o desenvolvimento de um equipamento que proporcionasse a utilização da mistura do biometano e biodiesel em motores de ciclo diesel. Uma unidade de controle eletrônica microprocessada foi utilizada para aquisição e controle dos dados como rotação do motor, pressão e temperatura do ar, do biometano e sensores de refrigeração a fim de determinar um controle da dosagem dos combustíveis.

Carvalho (2014) estudou a viabilidade técnica de injeção de gás natural em motores diesel. Para isso, avaliou o comportamento de um motor de ciclo de ignição por compressão

que funcionava originalmente com óleo diesel adaptado para óleo diesel e gás natural. Essa avaliação foi quantificada por meio do desempenho e análise das emissões dos gases gerados. Utilizando um grupo motor gerador acoplado ao dinamômetro, pôde-se concluir que em regimes de baixas taxas de substituição de gás natural por óleo diesel (até 25% de substituição diesel/gás natural), poucas diferenças são notadas no desempenho e emissões de poluentes. Em rotações próximas de 1800 rpm ambos regimes funcionam de forma muito semelhantes.

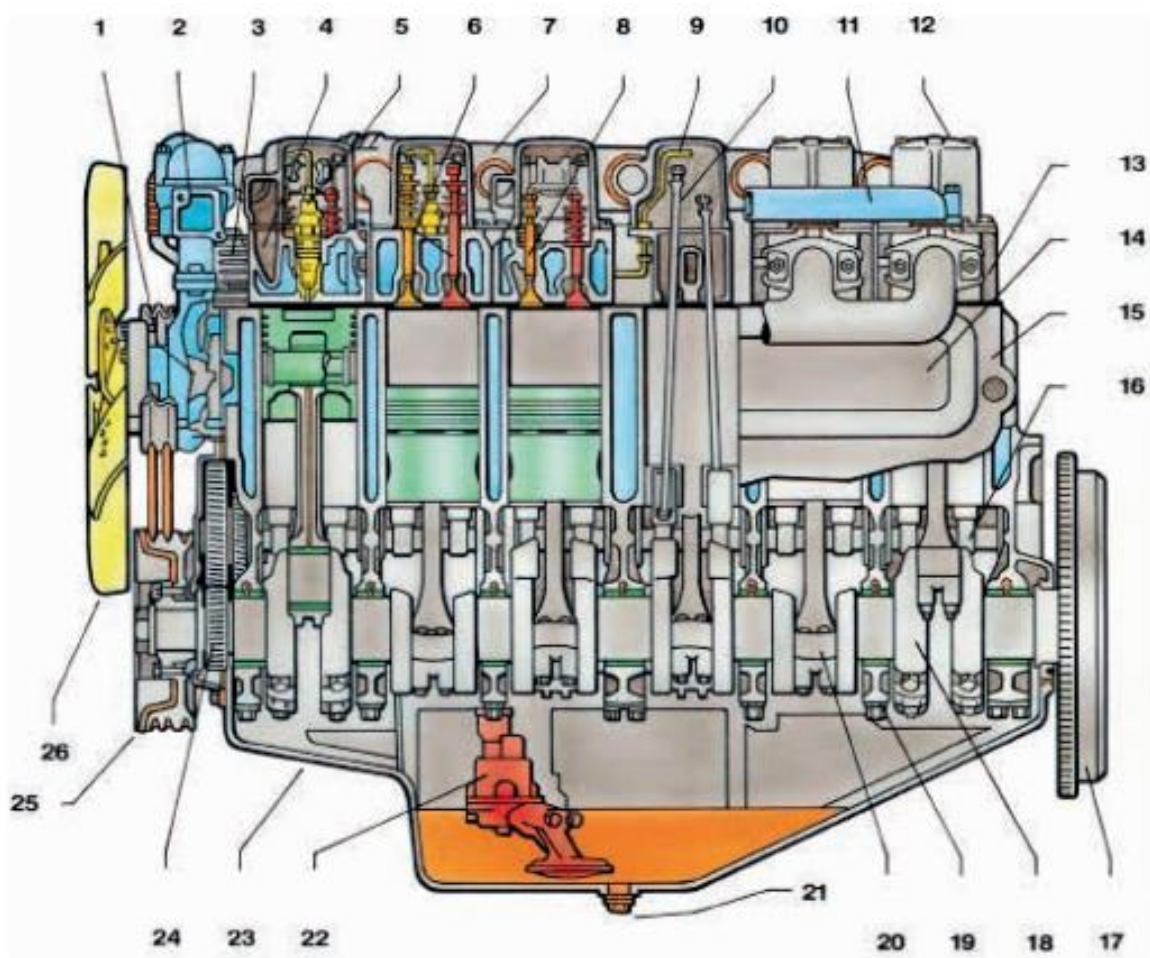
Figueiral (2016) estudou a aplicação do conceito de combustão dual-fuel num motor diesel pesado. O motor analisado foi um Euro 3 D2066 LF01 convertido para dual-fuel a GLP. A inovação do trabalho realizado foi a possibilidade de aplicação do sistema a um veículo com caixa de velocidades automática sem que as características de funcionamento fossem comprometidas. Os testes foram realizados em estrada e banco de potência de forma a calibrar e avaliar todo o sistema. Após o desenvolvimento dos cálculos que permitiram simular os consumos e as poupanças associadas à tecnologia estudada, foi possível estimar poupanças entre os 3500 € e os 7000€, que representam um retorno do sistema instalado entre 7 e 14 meses. Semelhantemente a outros trabalhos, o bom desempenho foi alcançado pela substituição de 20% do combustível gasóleo.

Macedo (2018) estudou a adaptação de um motor diesel para atuar com biocombustível. O motor trabalhado foi o D229-4 diesel da MWM para atuação dual com diesel e gás natural. A conversão foi feita através de um misturador do tipo “boca de fogão” entre o filtro de ar e o coletor de admissão, canalização da linha de gás natural até o misturador com um redutor de pressão e uma válvula manual controladora de fluxo. Assim, foi possível analisar o consumo em função da potência, inspecionar a emissão de particulados oriundos da combustão, avaliar o ruído provocado pelo funcionamento do motor e acompanhar a temperatura dos gases de escape. O resultado foi satisfatório tanto economicamente, por apresentar redução de custo de operação de até 17,92 R\$/h, quanto ambientalmente, pela redução da opacidade da fumaça oriunda a combustão.

3 DESENVOLVIMENTO

Para a melhor compreensão acerca da tecnologia de adaptação *dual fuel*, os próximos tópicos buscam apresentar uma visão geral do funcionamento básico de um motor a diesel, identificando-se seus sistemas e componentes principais. As Figuras 4 e 5 ilustram a seção lateral e frontal, respectivamente, de um motor que evidenciam a grande quantidade desses componentes que precisam trabalhar juntos na obtenção de torque e potência.

Figura 4 – Seção lateral do motor a combustão interna

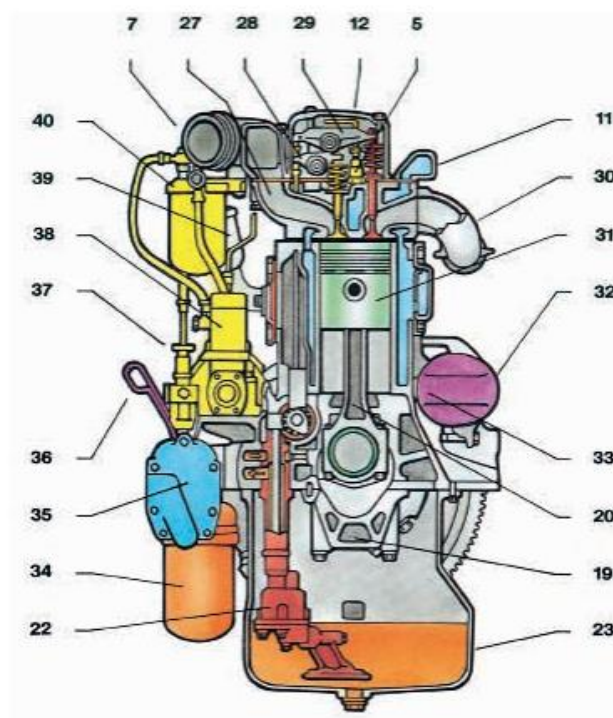


Fonte: Mahle (2019).

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Bomba d'água | 10. Vareta de válvula |
| 2. Válvula termostática | 11. Duto de saída de água de refrigeração |
| 3. Compressor de ar | 12. Tampa de válvulas |
| 4. Duto de admissão | 13. Cabeçote |
| 5. Bico injetor | 14. Tampa lateral do bloco |
| 6. Válvula de escape | 15. Bloco do motor |
| 7. Coletor de admissão | 16. Eixo comando de válvulas |
| 8. Válvula de admissão | 17. Volante |
| 9. Linha de injeção de combustível | 18. Eixo virabrequim |

- | | |
|---|--|
| 19. Capa do mancal principal | 30. Coletor de escape |
| 20. Biela | 31. Pistão |
| 21. Bujão de escoamento do óleo do cárter | 32. Motor de partida |
| 22. Bomba de óleo | 33. Dreno da água de refrigeração |
| 23. Cárter | 34. Filtro de óleo |
| 24. Engrenagem do eixo virabrequim | 35. Radiador de óleo |
| 25. Polia anti-vibradora | 36. Vareta indicadora do nível de óleo |
| 26. Hélice | 37. Bomba manual de combustível |
| 27. Duto de admissão tangencial | 38. Bomba injetora |
| 28. Balancim da válvula de admissão | 39. Respiro do cárter |
| 29. Balancim da válvula de escape | 40. Filtro de combustível |

Figura 5 – Seção frontal do motor a combustão interna



Fonte: Mahle (2019).

Entender o funcionamento de um motor pode parecer complexo por possuir muitas peças. Porém, ao investigar cada componente, compreendendo suas funções dentro de cada sistema do motor, essa tarefa fica um pouco mais simples.

A seguir, serão apresentadas as funções dos principais componentes do motor.

3.1 COMPONENTES ESTACIONÁRIOS

- Bloco

Compõe parte da estrutura geral do motor. Estão localizados os cilindros ou os furos para a colocação das camisas. Na parte inferior do bloco estão localizados os alojamentos dos

mancais centrais onde se apoia o virabrequim e em muitos casos, o eixo comando de válvulas (MAHLE..., 2019).

- Cabeçote

Este componente serve de tampa dos cilindros contra o qual o pistão comprime a mistura combustível/ar. Além disso, suporta o conjunto de válvulas e, em alguns casos, o eixo comando de válvulas (BRUNOBONFIMLOPES, 2012; MAHLE..., 2019).

- Cárter

É o compartimento que protege os componentes inferiores do motor e onde é depositado o óleo lubrificante (MAHLE..., 2019).

- Coletor de admissão

Além de receber, distribui aos cilindros a mistura (ciclo Otto) ou o ar (ciclo Diesel) aspirado pelo pistão através do filtro de ar (MAHLE..., 2019).

- Coletor de escape

Recebe os gases queimados para lançá-los à atmosfera através do tubo de escape e silencioso (MAHLE..., 2019).

3.2 COMPONENTES MÓVEIS

- Biela

Componente responsável por realizar a ligação entre o pistão e o virabrequim. Ao receber o impulso do pistão, transmite ao virabrequim. Assim, o conjunto transforma o movimento retilíneo alternado do pistão em movimento rotativo do virabrequim (MAHLE..., 2019).

- Pistão

Parte móvel da câmara de combustão. A transmissão da força de expansão advinda dos gases queimados à biela é realizada por meio de um pino de aço. Em geral, o pistão é fabricado em liga de alumínio (MAHLE..., 2019).

- Anéis

Os anéis são acoplados ao pistão e é responsável pela vedação do sistema, evitando que o óleo do motor e os gases da combustão entrem em contato com o resto do motor. Quando apresenta algum problema, percebe-se diminuição na potência do motor, aumento no consumo de óleo e uma mudança nos gases que saem pelo escapamento. Comumente encontram-se três anéis em cada pistão: anel de compressão, anel de raspagem e anel de óleo.

O anel de compressão garante a compressão na câmara de combustão e impede que os gases da combustão cheguem ao interior do cárter. Possui um desenho que proporciona o máximo contato com o cilindro e seu material deve suportar altas temperaturas e desgaste.

O anel de raspagem é responsável por tirar o excesso de óleo de dentro do cilindro, deixando apenas uma fina camada para diminuir o atrito entre os anéis e a parede do cilindro. Sua geometria é caracterizada por uma borda angulada a fim de retirar o excesso de óleo na descida do pistão e espalhar o lubrificante na subida do pistão.

Por fim, o anel de óleo, último anel do conjunto, é responsável por encaminhar o excesso de óleo retirado pelo anel de raspagem e permitir que ele chegue até o cárter (PORTALLUBES, 2017).

- Virabrequim

Eixo motor que na maioria das vezes é instalado na parte inferior do bloco, recebendo as bielas que lhe imprimem movimento. Apenas em casos de motores de grande porte que o virabrequim é instalado no cárter (MAHLE..., 2019).

- Eixo comando de válvulas

Esse componente é responsável por abrir as válvulas de admissão e escape por meio de cames. Ele é acionado pelo virabrequim, através de engrenagem ou corrente ou ainda corrente dentada (MAHLE..., 2019).

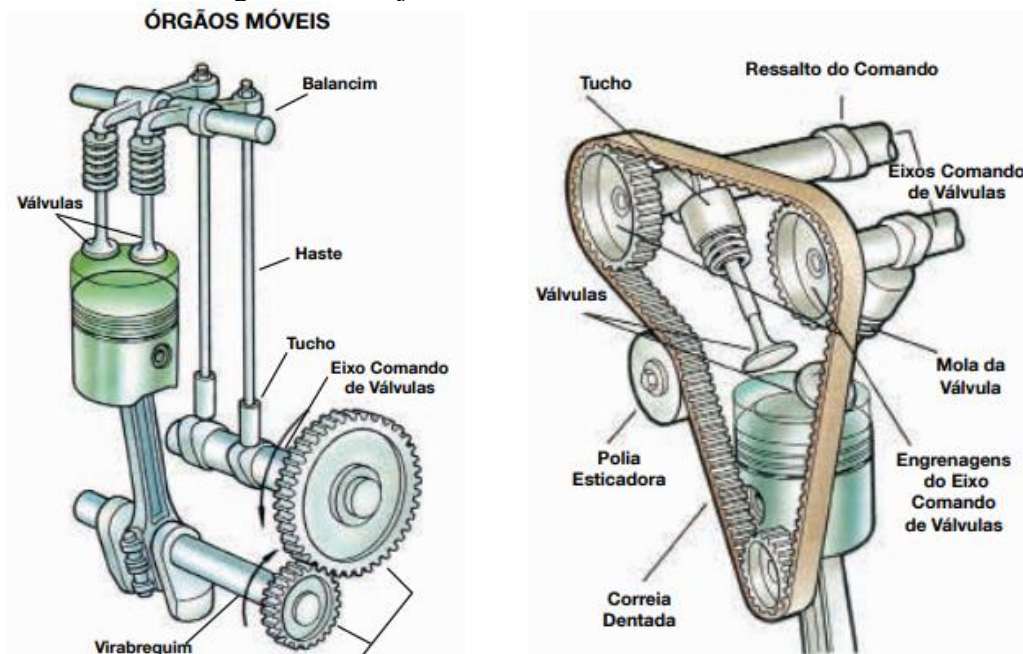
- Válvulas

A válvula de admissão tem a finalidade de permitir a entrada da mistura de combustível/ar ou, no caso de motor diesel, somente ar no interior do cilindro. A válvula de escape, tem a finalidade de permitir a saída dos gases queimados (MAHLE..., 2019).

- Conjunto de acionamento de válvulas

Com o movimento do eixo comando de válvulas, o ressalto (came) aciona o tucho, que por sua vez move a haste, fazendo com que o balancim transmita o movimento à válvula. Para cada ressalto, isto é, para cada válvula, tanto de admissão quanto de escape, existe um conjunto: tucho, haste e balancim. O conjunto pode ser acionado através da engrenagem, corrente ou correia dentada (MAHLE..., 2019). A Figura 6 traz o conjunto de acionamento de válvulas, evidenciando a necessidade de cada componente cumprir a respectiva função para bom funcionamento do sistema mecânico.

Figura 6 – Conjunto de acionamento de válvulas



Fonte: Mahle (2019).

- Polia e anti-vibrador

Através da correia, o movimento de rotação do virabrequim é transmitido ao alternador e à bomba, além de absorver as vibrações do funcionamento do motor (MAHLE..., 2019).

- Bomba de óleo

Esse mecanismo possui a finalidade de bombear o óleo do cárter e enviá-lo aos diversos pontos do motor que necessitam de lubrificação. Existem vários tipos de bombas de óleo, sendo a de engrenagem a mais utilizada (MAHLE..., 2019).

- Bomba d'água

Mecanismo com a finalidade de realizar a circulação de água pelo motor e radiador para arrefecimento do motor (MAHLE..., 2019).

3.3 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO

Tendo em vista os principais componentes, tanto estáticos como dinâmicos, é possível entender um pouco melhor o funcionamento dos sistemas de alimentação que trabalham para o bom funcionamento do motor.

O sistema de alimentação dos motores de combustão é responsável pelo suprimento de ar e combustível ao motor. Existem basicamente dois tipos de sistemas de acordo com o ciclo de funcionamento dos motores: o sistema para motores Otto e o sistema para motores diesel. Uma característica do sistema de alimentação Otto é a mistura do combustível com o ar antes de ser admitido nos cilindros, enquanto no sistema diesel, o combustível é injetado nos cilindros por um circuito percorrido pelo ar. De forma semelhante para os dois sistemas, a admissão ocorre quando o pistão se desloca do ponto morto superior para o ponto morto inferior com a válvula de admissão aberta (VARELLA, 2012).

A seguir, serão exploradas características mais profundas de ambos os sistemas.

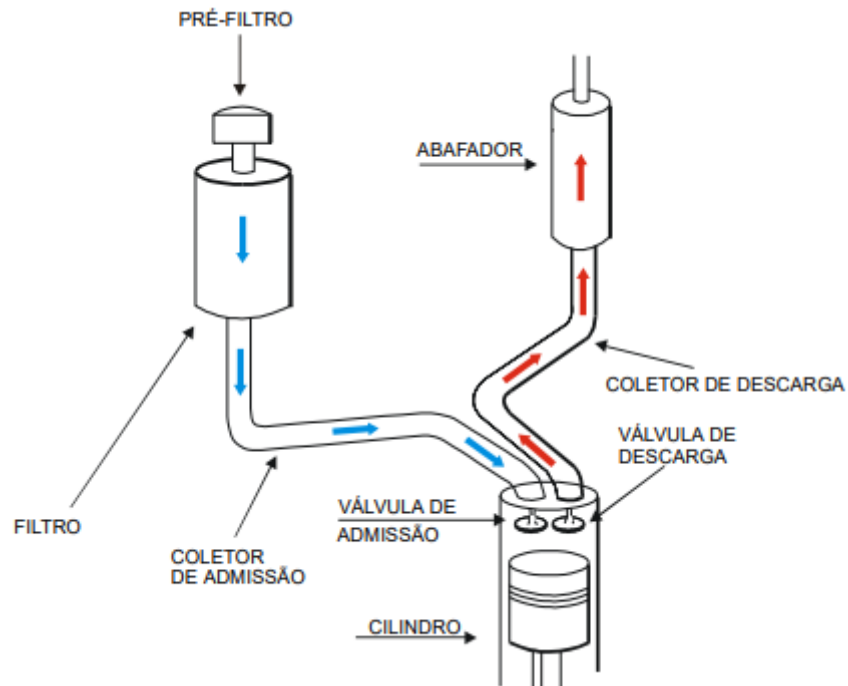
3.3.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO PARA MOTORES CICLO DIESEL

Esse sistema é composto por dois circuitos: circuito de ar e circuito de combustível. Para que o ar e o combustível se encontrem em boas condições de trabalho, passam por diversos pontos antes de se encontrarem no cilindro do motor.

- CIRCUITO DE AR

O circuito de ar tem como função conduzir o ar do meio ambiente até o interior dos cilindros e depois eliminar os resíduos da combustão. Toda a instalação deve possuir meios para a remoção das partículas sólidas do ar da admissão e deve ser posicionada de forma a não captar o ar aquecido no compartimento do motor e receber o mínimo de água, poeira, gases de escape, etc. Pode ser constituído de pré-filtro, filtro de ar, coletor de admissão, coletor de descarga e abafador, conforme é visto na Figura 7 (VARELLA, 2012).

Figura 7 – Circuito de ar

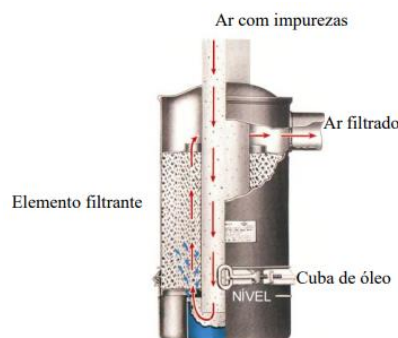


Fonte: Varella (2012).

O pré filtro está localizado antes do filtro primário de ar e tem como função reter partículas grandes contidas no ar. Além disso, ele pode estender a vida do elemento filtrante, reduzindo a quantidade de pó, água e partículas sólidas que entrariam no sistema de admissão de ar. Após o ar passar pelo pré filtro, ele segue pelo filtro de ar que tem como função reter partículas menores que passaram contidas no ar. Podem ser de dois tipos: em banho de óleo ou de ar seco. A importância da retenção de poeira é dada por se tratar da principal fonte de desgaste das camisas, pistões, anéis, válvulas, e compressor do turbo (VARELLA, 2012).

Nos filtros em banho de óleo o ar passa por uma camada de óleo antes de atravessar o elemento filtrante como é visto na Figura 8. Neste caso, o elemento filtrante deve ser limpo periodicamente, pois ele não é trocado (VARELLA, 2012).

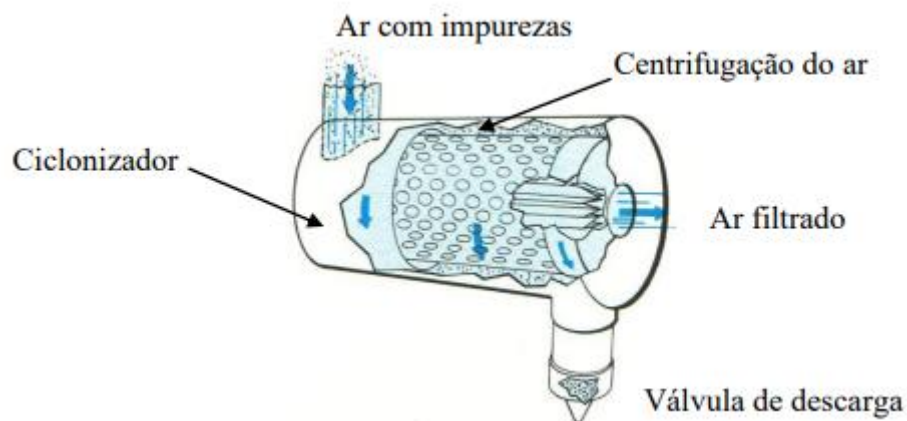
Figura 8 – Seção de um filtro em banho de óleo



Fonte: Varella (2012).

Os filtros de ar seco são constituídos por dois elementos filtrantes descartáveis: elemento primário de papel e elemento secundário de feltro. A Figura 9 traz uma característica interessante desse tipo de filtro de dois estágios. Apesar de ter dois elementos filtrantes, seu nome não considera cada um como um estágio. O primeiro é visto a partir da geometria do ciclone que induz a centrifugação do ar e 70 a 90% das partículas mais pesadas em suspensão são separadas do ar e eliminadas do filtro através de orifícios de descarga. Dessa forma, a vida útil do elemento pode ser aumentada. Por fim, pode-se destacar o elemento principal que faz parte como segundo estágio do filtro (APJ TREINAMENTOS; VARELLA, 2012).

Figura 9 – Filtro de ar seco



Fonte: Varella (2012).

O elemento primário, Figura 10, aceita limpezas e deve ser limpo sempre que for avisado pelo indicador de restrição. Esse dispositivo monitora a restrição do sistema de admissão até a entrada de ar no turbo, por isso, sua instalação é feita depois do filtro e o mais próximo possível do turbo. A restrição da passagem de ar pelo filtro reduz a eficiência do elemento filtrante e pode levar o motor a perder potência, aumentar o consumo e provocar superaquecimento. A eficiência é a capacidade de um filtro de ar remover os contaminantes e é determinado de acordo com a SAE J726 e pode ser encontrada normalmente em torno de 99,9% (APJ TREINAMENTOS; REIS et al., 1999).

Figura 10 – Elemento primário do filtro de ar seco



Fonte: Varella (2012).

O elemento secundário, Figura 11, não aceita limpezas e deve ser substituído periodicamente. Também conhecido como elemento de segurança, normalmente possui uma área menor e retem somente partículas maiores, em relação ao elemento principal. Sua eficiência é em torno de 60% e tem a função de proteger o motor de contaminantes a partir da ruptura do elemento principal ou descuidos durante a operação de manutenção do filtro (APJ TREINAMENTOS; VARELLA, 2012).

Figura 11 – Elemento secundário do filtro de ar

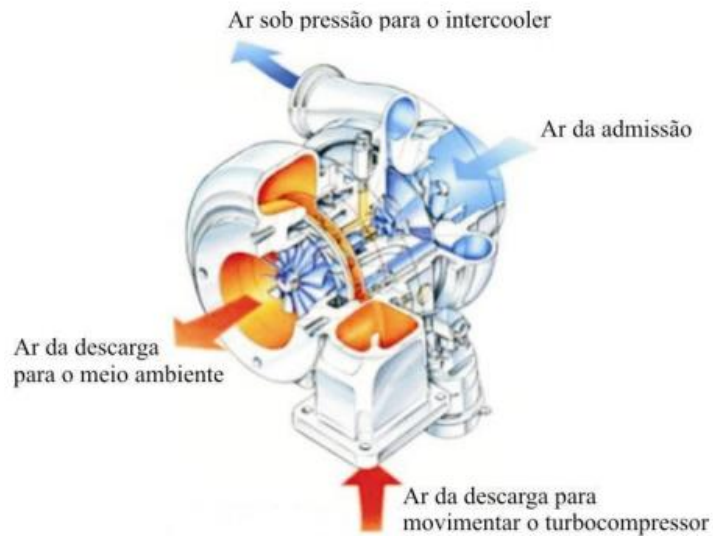


Fonte: Varella (2012).

Após o ar passar por todo o caminho de filtração, o coletor de admissão conduz o ar filtrado até os cilindros do motor. Essa etapa pode ser cumprida pelo vácuo criado pelo movimento descendente do pistão no interior dos cilindros (motor aspirado) ou sob pressão com auxílio de uma turbina (motor turbinado) (VARELLA, 2012).

A turbina ou turbocompressor é constituído por um conjunto de dois rotores montados nas extremidades de um eixo que podem ser observados na Figura 12. O ar quente resultante dos gases da descarga impulsiona o rotor quente, fazendo com que o rotor frio, na outra extremidade impulsione o ar para os cilindros. Nos motores do ciclo diesel o turbocompressor tem como objetivo aumentar a pressão do ar no coletor de admissão acima da pressão atmosférica de modo que haja aumento de massa sem aumento de volume. Dessa forma, é possível atingir uma maior potência pela maior quantidade de combustível injetado também. O turbocompressor aumenta a potência em torno de 35% e reduz o consumo específico de combustível em torno de 5% (VARELLA, 2012).

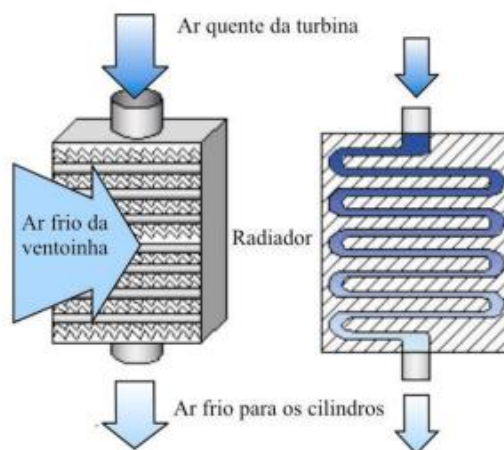
Figura 12 – Turbocompressor



Fonte: Varella (2012).

O *intercooler* é um sistema de resfriamento de ar para motores turbinados. O objetivo é resfriar o ar proveniente do turbocompressor. O volume da câmara de combustão é ocupado por um ar mais quente que o atmosférico, de menor densidade mássica e que resulta num menor rendimento da queima de combustível. Porém, com o uso do *intercooler*, o ar pode ser resfriado antes de entrar na câmara de combustão, aumentando a sua densidade mássica e resultando em uma melhor queima do combustível e rendimento do motor. A Figura 13 mostra a sua estrutura básica composta de canais por onde o ar quente passa advindo do compressor. A troca térmica é feita com o ar frio advindo da ventoinha por fluxo cruzado (SILVA, 2008; VARELLA, 2012).

Figura 13 – Radiador

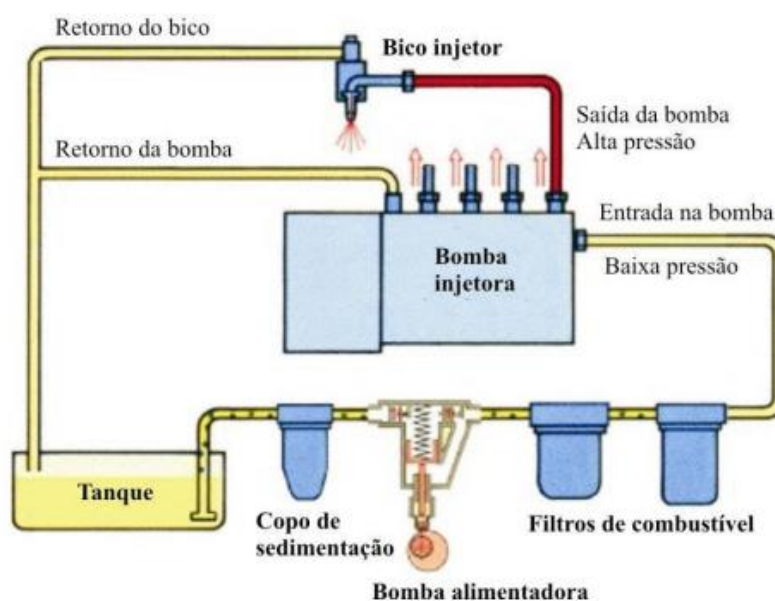


Fonte: Varella (2012).

- CIRCUITO DE COMBUSTÍVEL

O circuito de combustível tem como função conduzir o combustível do tanque até o interior dos cilindros. Além disso, é responsável pela dosagem e injeção do combustível pulverizado no interior dos cilindros segundo a ordem de ignição do motor. A pressão de injeção é em torno de 2000 kgf.cm^{-2} ou duas mil atmosferas. A alta pressão de injeção auxilia na combustão eficiente com baixas emissões de gases e material particulado. A temperatura do combustível na entrada da bomba não deve exceder 71°C para que a lubrificação seja feita de forma adequada e não ocorra um decréscimo acentuado em sua densidade. Esse sistema é composto por: tanque de combustível, tubulações de baixa pressão, bomba injetora, tubulações de alta pressão, bicos injetores e filtros conforme pode ser visto na Figura 14 (APJ TREINAMENTOS; VARELLA, 2012).

Figura 14 – Circuito de combustível



Fonte: Varella (2012).

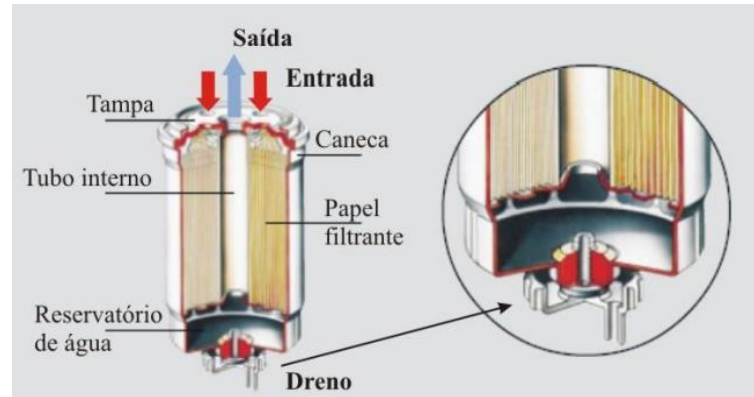
Os tanques de combustível são na sua maioria fabricados de polietileno de alta densidade e devem possuir um respiro que permita a passagem de ar e gases, o qual deve estar protegido da entrada de água e poeira (HEMAIS, 2003). O uso desse tipo de material é devido a sua resistência ao calor, resistência a solventes, baixa permeabilidade, fácil de processar e baixo custo. Tanques galvanizados não devem ser usados para circuitos com diesel pois a reação do combustível com o tanque pode provocar entupimento dos filtros e injetores com flocos oxidados (APJ TREINAMENTOS; VARELLA, 2012).

Além de uma preocupação com a autonomia aceitável (1 ciclo de trabalho, 8h, para maquinários agrícolas) para a aplicação da máquina, o projeto do tanque de combustível deve levar em consideração a linha de sucção no centro do tanque, 25 mm acima do fundo do tanque para espaço de sedimentação. Por fim, destaca-se a recomendação a prolongação do boal de enchimento a fim de proporcionar um espaço mínimo de 5% do volume total do tanque para acomodar expansões térmicas do combustível. Para funcionamento completo do sistema, o tanque deve possuir um respiro com abertura de aproximadamente 1,5 mm de diâmetro, operando tanto com pressões positivas quanto com negativas (APJ TREINAMENTOS).

O copo de sedimentação localizado antes da bomba alimentador tem como principal função decantar a água contida no combustível. Na parte inferior possui um parafuso para drenagem que deve ser feita todos os dias para evitar que a água se misture com o combustível e danifique partes como bomba injetora ou bicos injetores. A bomba alimentadora pode ser de pistão ou de diafragma e é responsável por promover o fluxo de óleo do tanque até a bomba injetora, fazendo passar por um elemento filtrante (MAHLE..., 2019; VARELLA, 2012).

O filtro de combustível se localiza entre a bomba alimentadora e a bomba injetora. A sua principal função é proteger o sistema de injeção contra impurezas presentes no óleo diesel e corrosão do sistema de combustível do motor. O elemento filtrante é de papel e normalmente vem conjugado com copo de sedimentação e dreno para retirada de água do circuito de combustível do sistema de alimentação. A substituição do elemento filtrante deve ser feita sempre que a restrição máxima recomendada for atingida. Um fator importante da instalação do filtro a ser considerado é sua localização. É recomendado que esteja num local que o operador tenha fácil acesso sempre que iniciar qualquer atividade. Assim, a manutenção e dreno da água do reservatório pode ser feita constantemente como deve ser realizado. A Figura 15 mostra um corte do filtro de combustível no qual é possível observar os componentes do sistema para realização da filtragem (APJ TREINAMENTOS; VARELLA, 2012).

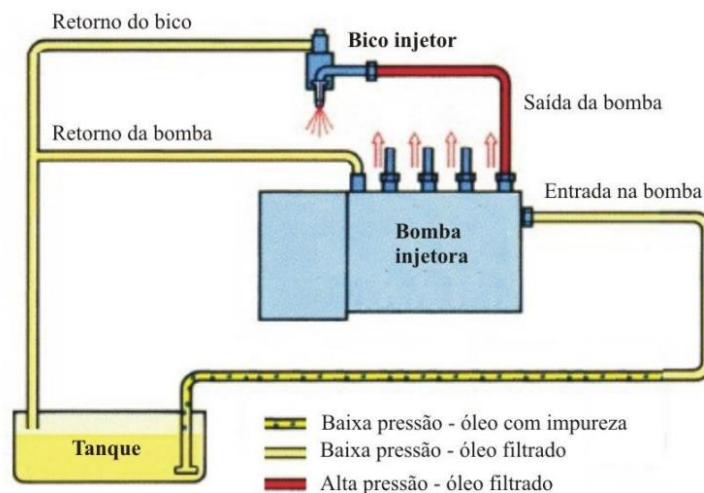
Figura 15 – Corte do filtro de combustível



Fonte: Varella (2012).

As tubulações entre o tanque de combustível e a bomba injetora, e as tubulações de retorno são de baixa pressão. As tubulações entre a bomba injetora e os bicos injetores são de alta pressão. O sistema pode ser visto na Figura 16 que representa esses circuitos de alta e baixa pressão. A linha de retorno deve ser posicionada dentro do tanque para permitir a separação de vapor e gases de combustível. Além disso, devem ser evitadas curvas e proibidos *loops* para que não haja bloqueios pela retenção de ar ou gases. O projeto não pode considerar apenas a pressão, mas deve se atentar ao movimento e vibrações do sistema. Por isso, podem ser usados tubos de aço, desde que intercalados por mangueiras flexíveis para compensar esses movimentos relativos entre motor e sistema de combustível. Tubos de cobre, por exemplo, não devem ser usados pois racham nas conexões. (APJ TREINAMENTOS; VARELLA, 2012).

Figura 16 – Circuito de tubulações de combustível

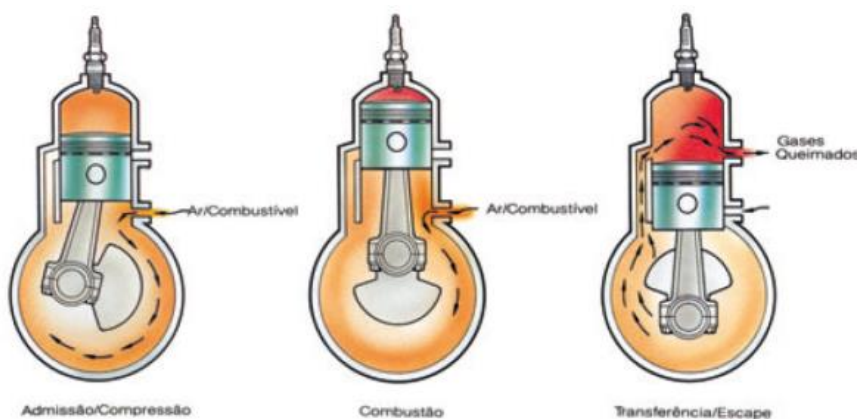


Fonte: Varella (2012).

A bomba injetora é a principal parte do sistema de alimentação diesel. As suas principais funções são dosar o combustível de acordo com as necessidades do motor; enviar o combustível para os bicos injetores de acordo com a ordem de ignição do motor e promover pressão suficiente para pulverizar o combustível na massa de ar quente na câmara de combustão. Por sua vez, os bicos injetores, localizados no cabeçote, têm a função de pulverizar o combustível na massa de ar quente dentro da câmara de combustão. Isso acontece em torno de 1300 a 2000 bar e em gotas de 20 a 100 μm . Após a injeção, os bicos se fecham para impedir o retorno de gases da combustão (VARELLA, 2012).

3.4 MOTOR DOIS TEMPOS

Figura 17 – Motor a combustão interna dois tempos



Fonte: Mahle (2019).

Os motores deste tipo combinam em dois cursos as funções dos motores de quatro tempos e têm seu esquema de funcionamento representado na Figura 17. Sendo assim, há um curso motor para cada volta do virabrequim (MAHLE..., 2019).

O funcionamento é dado a partir da combustão, que impulsiona o pistão para baixo, fornecendo trabalho. Ao mesmo tempo, a mistura que vai ser utilizada no tempo seguinte é comprimida no cárter. Continuando a descer, o pistão descobre as janelas de escape, por onde são expelidos os gases queimados. Simultaneamente, descobre também as janelas de transferência da mistura sob pressão existente no cárter para o cilindro onde é comprimida e queimada, repetindo-se o ciclo (MAHLE..., 2019).

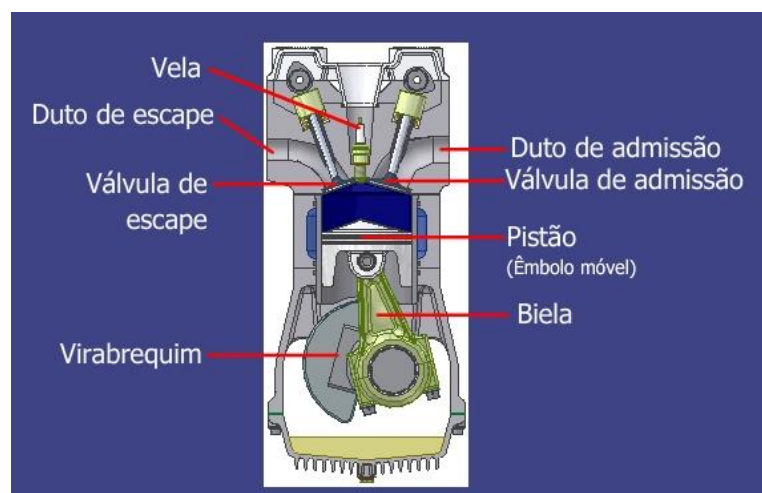
O motor diesel de dois tempos tem funcionamento semelhante ao motor Otto de dois tempos. A diferença é que admitem apenas ar puro, geralmente forçando no interior do

cilindro por um compressor de baixa pressão. Possui também um sistema de lubrificação forçada idêntico ao dos motores de quatro tempos (MAHLE..., 2019).

3.5 MOTOR QUATRO TEMPOS

Comumente encontrado na indústria automobilística, motores com ciclo diesel podem ser aplicados no setor agrícola, geração de energia, rodoviário, mineração, entre outros (LEAOENERGIA, 2022).

Figura 18 – Motor a combustão interna quatro tempos



Fonte: Schulz (2009).

A Figura 18 traz o motor de combustão interna de quatro tempos que é assim denominado por operar em quatro etapas básicas: admissão, compressão, combustão e exaustão.

Para um motor operando com ciclo Otto, temos o seguinte trabalho sendo efetuado em cada uma das etapas que pode ser visto na Figura 19 (MAHLE..., 2019; SCHULZ, 2009):

- 1º Tempo - Admissão

A partir do movimento do pistão do PMS para o PMI, a válvula de admissão se abre e a mistura de ar e combustível vaporizada é aspirada para o interior do cilindro. Nesse tempo, a válvula de escape permanece fechada e o virabrequim efetua meia volta (180°).

- 2º Tempo – Compressão

Em seguida, a válvula de admissão se fecha. Assim, à medida que o pistão se desloca para o PMS, comprime a mistura de ar e combustível. Nesse tempo, o virabrequim executa meia volta, fechando a primeira volta completa (360°).

- 3º Tempo – Combustão

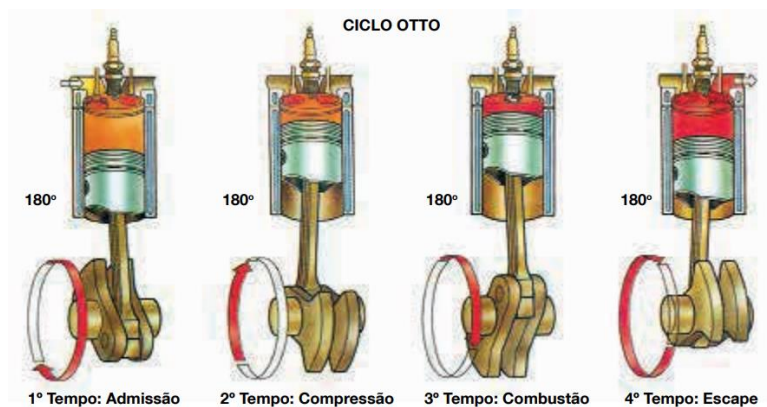
Pouco antes do pistão atingir o PMS, o sistema de ignição transmite corrente elétrica à vela, que gera uma centelha entre os eletrodos, inflamando a mistura de ar e combustível fortemente comprimida. Os gases em expansão, resultantes da combustão, força o deslocamento do pistão do PMS para o PMI. Nesse tempo, o virabrequim completa uma volta e meia (540°).

- 4º Tempo – Exaustão

Por fim, após a queima da mistura e expansão dos gases, a válvula de escape se abre. Os gases queimados são forçados para fora do cilindro pelo movimento do pistão do PMI para o PMS pela abertura da válvula de escape. Assim, o virabrequim completa a segunda volta completa (720°), fechando o ciclo.

Vale ressaltar que nesses tipos de motor, apenas no tempo de combustão é produzida energia mecânica, enquanto que os outros três absorvem energia.

Figura 19 – Representação dos 4 tempos com ciclo Otto



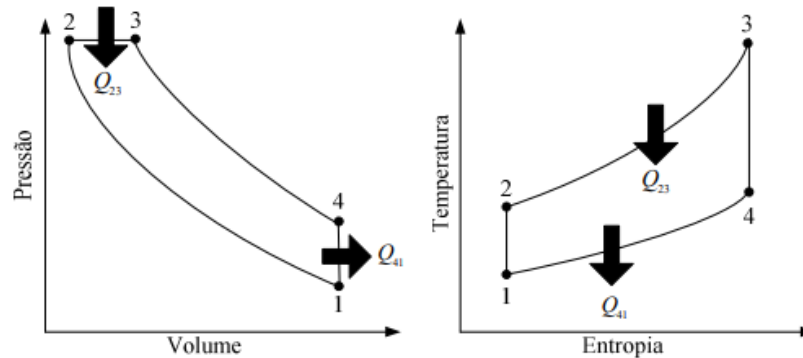
Fonte: Mahle (2019).

Diferentemente do ciclo Otto, que há a admissão de uma mistura de ar e combustível, no ciclo Diesel há apenas a admissão de ar puro. Não há combustível no cilindro no início do curso de compressão, e a ignição é feita por compressão. O óleo diesel pulverizado no interior da câmara de combustão é inflamado através do aquecimento do ar comprimido pelo pistão. Esse comportamento é resultante da alta temperatura desenvolvida durante a compressão adiabática, não sendo necessárias velas de ignição. Taxas de compressão mais altas podem ser alcançadas em motores a diesel (normalmente entre 12:1 e 20:1) do que em motores Otto (normalmente entre 6:1 e 10:1) (MAHLE..., 2019; THERMAL, 2019).

3.6 CICLO DIESEL

O ciclo, representado pela Figura 20, considera que a adição de calor ocorre durante um processo a pressão constante, no momento de deslocamento do pistão do ponto morto superior para o ponto morto inferior.

Figura 20 – Diagrama Pressão x Volume; Temperatura x Entropia do ciclo diesel



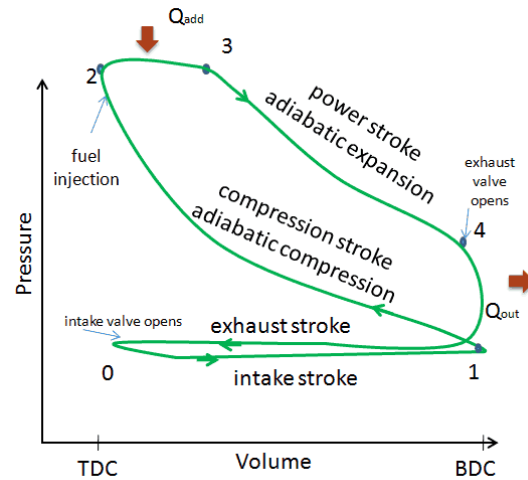
Fonte: Oliveira; Scalon (2014).

O ciclo consiste em quatro processos internamente reversíveis evidenciados pelos diagramas $p - v$ e $T - s$ mostrados na Figura 20.

O trabalho de compressão isentrópico do ar é tido com o movimento do pistão do PMI para o PMS (1-2). Após esse movimento, há uma transferência de valor a pressão constante para o ar a partir de uma fonte externa (2-3), seguida do movimento do pistão para o PMI que está relacionado ao trabalho de expansão isentrópico do ar (3-4). Por fim, a transferência de calor a volume constante do ar é tida enquanto o pistão está no PMI (4-1). Nota-se que o ciclo idealizado despreza a alteração química relacionada a combustão (OLIVEIRA; SCALON, 2014).

O entendimento do ciclo termodinâmico ideal é importante ser em conjunto com o funcionamento mecânico do movimento do pistão durante a combustão. Porém, ao considerar o ciclo real evidenciado na Figura 21, as premissas do ciclo ideal não são mais consideradas. O ciclo ideal considera um sistema fechado, adição de calor isobárica, sem perdas por transferência de calor, atrito, combustão completa, sem perda de purga e de impacto. Essas suposições e perdas simplificadores determinam a diferença da área fechada, ou seja, do trabalho entre o real e o ideal. Em outras palavras, o ciclo ideal representa uma potência superior em cerca de 20% sobre o ciclo real (THERMAL, 2019).

Figura 21 – Diagrama Pressão x Volume Diesel real



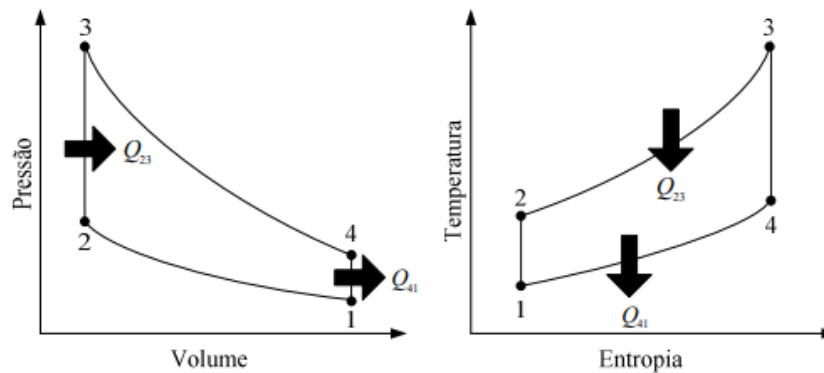
Fonte: Thermal (2019).

3.7 CICLO OTTO

O ciclo Otto teve seu início de desenvolvimento em 1876 por um engenheiro alemão, Nikolaus August Otto. O avanço no estudo de motores térmicos possibilitou a construção do primeiro motor de quatro tempos. Nesse período, foi utilizada uma mistura de carvão, gás e ar como combustível. Assim, desenvolveram-se rapidamente modelos aperfeiçoando cada vez mais a construção e produzida em grandes quantidades no final do mesmo ano (ROCHA, 2020).

Amplamente utilizado em motores de automóveis, descreve o funcionamento de um motor de pistão de ignição comandada. Em um ciclo ideal, o sistema que executa o ciclo passa por uma série de quatro processos reversíveis internamente e podem ser vistos na Figura 22. Característica presente nesses tipos de motores, alcançam cerca de 25% a 30% de eficiência térmica em casos movidos a gasolina, por exemplo (ROCHA, 2020).

Figura 22 - Diagrama Pressão x Volume; Temperatura x Entropia do ciclo Otto

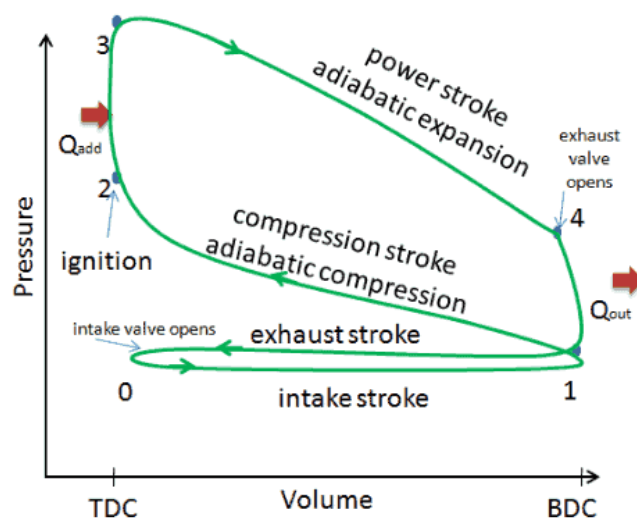


Fonte: Oliveira; Scalon (2014).

Para este ciclo, temos o início do trabalho de compressão isentrópico do ar que compreende o movimento do pistão do PMI para o PMS (1-2). Após esse movimento, há transferência de calor a volume constante para o ar a partir de uma fonte externa enquanto o pistão está no PMS (2-3), seguido do movimento do pistão do PMS para o PMI que está relacionado ao trabalho de expansão isentrópico do ar (3-4). Por fim, a transferência de calor a volume constante do ar é tida enquanto o pistão está no PMI (4-1). Nota-se que o ciclo idealizado despreza a alteração química relacionada a combustão (OLIVEIRA; SCALON, 2014).

A diferença entre os ciclos Otto ideal e real, conforme a Figura 23, é explicada pelos mesmos fatores do ciclo diesel. As perdas associadas em cada processo se mantêm, mas com a curva característica desse ciclo específico. A suposição de um sistema fechado não se aplica em um motor real, pois a cada ciclo completo o gás resultante da combustão é substituído por uma nova mistura de ar e combustível. A perda de purga acontece pela abertura precoce das válvulas de escape, resultando em perda de trabalho útil. O ciclo diesel ideal tem como característica a consideração de adição de calor a pressão constante. O ciclo ideal Otto considera que a adição de calor é isocórica, ou seja, adição instantânea de calor. Nos motores reais o pico de pressão não está no momento em que o pistão se encontra ponto morto superior, mas logo após (THERMAL, 2019).

Figura 23 – Diagrama Pressão x Volume Otto real



Fonte: Thermal (2019).

4 MOTOR DUAL FUEL

Um motor *Dual Fuel* pode operar usando uma mistura de dois combustíveis diferentes. Comumente, os combustíveis são diesel e gás natural. Além disso, pode funcionar tanto exclusivamente com óleo diesel, quanto simultaneamente com óleo diesel e gás natural. A substituição de óleo diesel é feita, geralmente, na faixa de 30 a 80% em volume (CARVALHO, 2014).

4.1 SISTEMAS DE CONVERSÃO *DUAL FUEL*

Assim como o próprio motor teve sua evolução histórica, os sistemas de conversão dessa tecnologia tiveram como principal objetivo aperfeiçoar a injeção de óleo diesel e gás natural para o motor de forma a otimizar o aproveitamento deles na combustão. Essa evolução é dividida em cinco gerações de conversões que serão expostas de modo geral, para posteriormente aprofundar no funcionamento individual dos componentes que fazem parte do sistema (CARVALHO, 2014).

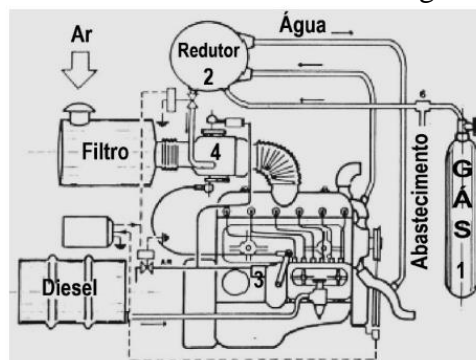
- Primeira geração

O sistema de dosagem de ar e gás natural era feito através de um Venturi calibrado e a quantidade de diesel podia ser ajustada mecanicamente. A substituição do óleo diesel pelo gás natural ainda era baixa, pois o sistema não respondia adequadamente às mudanças de regimes de operação (CARVALHO, 2014).

Os sistemas da primeira geração eram constituídos dos seguintes componentes básicos conforme vistos na Figura 24:

1. Sistema de abastecimento e armazenamento de gás sob alta pressão ou liquefeito;
2. Sistema de redução ou evaporação do gás;
3. Sistema de redução do débito de óleo diesel;
4. Sistema de dosagem e mistura ar/gás natural.

Figura 24 – Sistema bicomcombustível 1ª geração

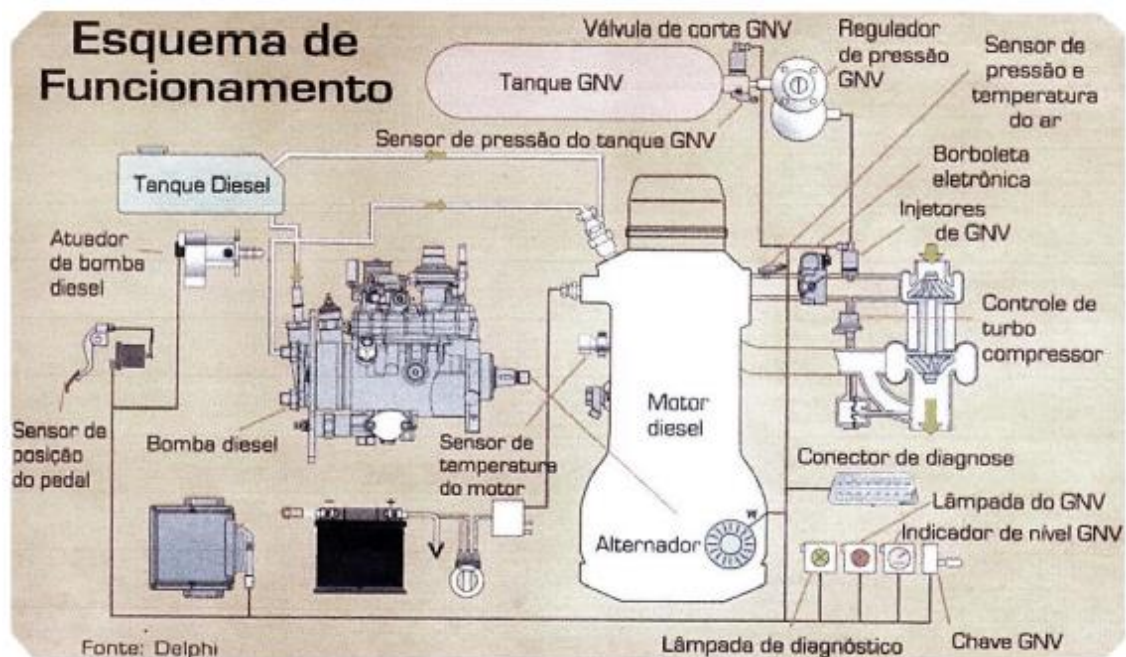


Fonte: Carvalho (2014).

- Segunda geração

O sistema de conversão *dual fuel* ainda apresentava o Venturi calibrado na alimentação de gás natural, porém a dosagem de óleo diesel passou a ser feita eletronicamente. A partir desse avanço, o sistema podia controlar a injeção do combustível líquido de maneira mais adequada. Isso era feito através de sensores que enviavam sinais para uma central eletrônica em função da condição de operação do motor. A partir do controle eletrônico, diversos sensores foram implementados para maior controle e otimização da alimentação de combustível conforme pode ser visto na Figura 25 (MACHADO, 1996).

Figura 25 – Sistema bicomcombustível 2ª geração

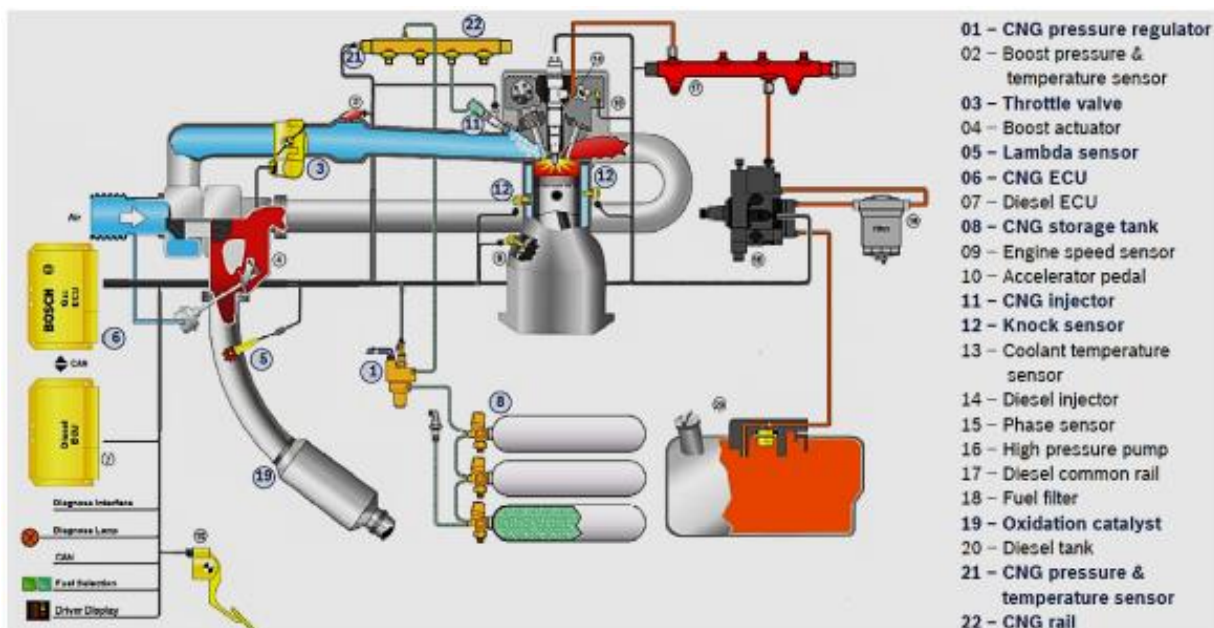


Fonte: Carvalho (2014).

- Terceira geração

O sistema de conversão de motores duais de terceira geração possuía controle eletrônico apenas de diesel, passa a ter de gás natural também. Além disso, o sistema “closed-loop” controla a formação da mistura em função de um monitoramento das condições dos gases resultantes da combustão. Esse monitoramento é feito por uma sonda especial denominada sonda Lambda. A Figura 26 traz o esquema de funcionamento com a novidade do controle eletrônico de gás natural a partir da *Engine Control Unit* (ECU) (MACHADO, 1996).

Figura 26 – Sistema bicomcombustível 3ª geração



Fonte: Carvalho (2014).

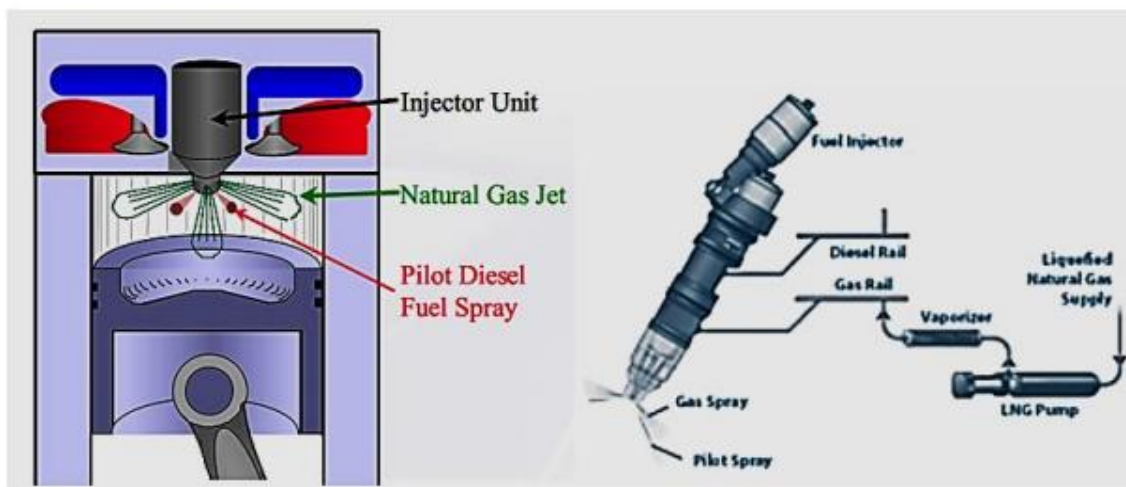
- Quarta geração

A quarta geração desse sistema de conversão tem sua inovação com o emprego de um único injetor para ambos os combustíveis. A empresa Cummins Westport desenvolveu pesquisas para a possibilidade da injeção simultânea de diesel e gás natural. A denominação da tecnologia empregada pela empresa é High Pressure Direct Injection (HPDI) que consiste na injeção de gás natural sob alta pressão no fim do tempo de compressão do motor. Imediatamente após a injeção do gás natural, o jato piloto de óleo diesel é iniciado, providenciando a ignição como é feito nos outros sistemas (Greencar, 2014).

Uma grande vantagem que esse sistema possui é o controle independente do tempo de injeção e dosagem de cada combustível. Isso possibilita desempenho e emissão de poluentes aprimorados em toda a faixa de rotação do motor. A capacidade de torque de um motor com essa tecnologia é de 10 a 30% maior que um motor diesel convencional e o funcionamento é menos sensível a variação da composição do gás. As emissões desse motor podem diminuir em até 40% em NOx, 60% em materiais particulados e 20% em CO₂, comparativamente a um motor diesel convencional (CARVALHO, 2014).

A Figura 27 traz o injetor desenvolvido para aplicação de ambos os combustíveis diretamente na câmara de combustão.

Figura 27 – Injetor *dual fuel* 4ª geração



Fonte: Carvalho (2014).

- Quinta geração

A quinta geração utiliza um redutor de duas etapas, associado a uma central de injeção eletrônica que envia o gás com pressão positiva através dos bicos injetores conforme pode ser visto na Figura 28. Os injetores são colocados no coletor de admissão por meio de uma perfuração para se posicionarem na entrada de cada cilindro. Além disso, conta com a chave comutadora, emulador de bicos e simulador de sonda. Quando acaba o gás, automaticamente volta para operação apenas com o combustível líquido (MAIA, 2021).

Figura 28 – Injetores inseridos no coletor de admissão



Fonte: Planetagas (2021).

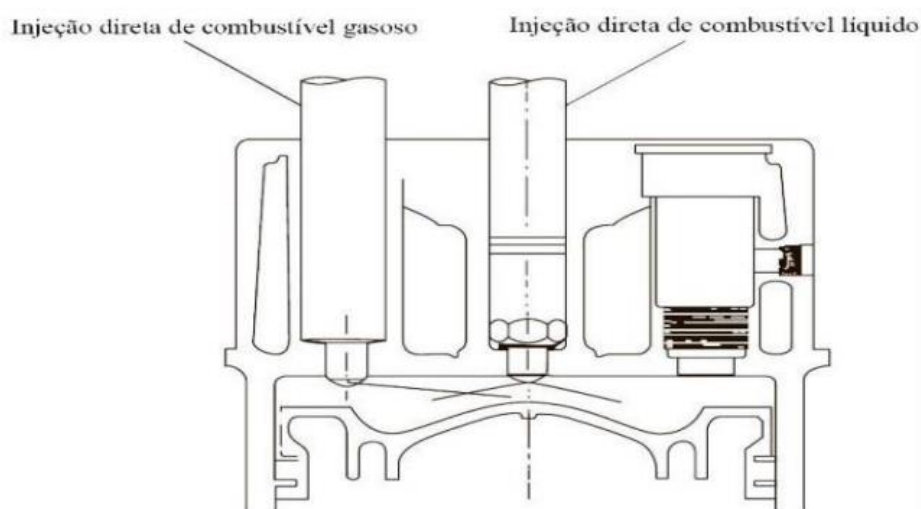
4.2 FUNCIONAMENTO

O avanço das gerações tecnológicas para o sistema *dual fuel* não significa substituição integral de uma inovação pela outra. Existem dois tipos de operação *dual fuel* atualmente. O

sistema de injeção direta é caracterizado pela introdução de ambos os combustíveis diretamente na câmara de combustão, sendo a combustão produzida pela presença do ar que entra na câmara. Na operação *dual fuel* convencional, uma pré-mistura de combustível gasoso e ar é admitida pelo coletor de admissão, seguido pela injeção de combustível líquido que irá iniciar a combustão na câmara (MACEDO, 2018).

Para o sistema de injeção direta, há uma limitação de 20% no volume de injeção do combustível líquido. Por outro lado, no sistema *dual fuel* convencional essa porcentagem pode variar de 0,5 a 100%. A injeção do combustível gasoso na câmara de combustão pode ser vista na Figura 29 e ocorre sob alta pressão através dos injetores e atua como combustível principal. O combustível líquido, por sua vez, atua como fonte de ignição. Nesse tipo de operação outra limitação que torna o uso da injeção direta menos atrativo e não tão extensivo como a operação convencional, é o fato da redução de óxidos de nitrogênio e material particulado não ser tão significativa (MACEDO, 2018).

Figura 29 – Representação da injeção direta em sistema *dual fuel*



Fonte: Carvalho (2014).

Conforme segue na Figura 30, o gás natural é misturado ao fluxo de ar no sistema de admissão do motor. A injeção do diesel é reduzida em quantidade e é responsável para a ignição da mistura de ar e gás na câmara de combustão. A mistura é previamente aquecida, ou seja, um motor que opera nesse regime aspira e comprime uma mistura ar e gás natural e inicia a combustão somente quando uma pequena parcela de óleo diesel é injetada no cilindro. A partir do momento em que se inicia a combustão, o processo se torna bastante semelhante ao registrado em motores de ignição por centelha. Essa semelhança se dá a partir da injeção

O cilindro tem como função armazenar o gás combustível a uma pressão de aproximadamente 200 bar estabilizada a 15°C. O veículo pode ter um ou mais cilindros que deverão ser inspecionados a cada 5 anos. Existem alguns tipos de estruturas para suportar o cilindro à estrutura do veículo. A localização deles muitas vezes é dada de forma a manter o tanque de combustível líquido sem alterações. Além dessa preocupação, do ponto de vista da instalação, nos pontos de contato do cilindro com o suporte utiliza-se proteções de borracha (RODEGAS, 2017).

O sistema possui um manômetro que possui a função de monitorar continuamente a pressão do gás contido no cilindro. Sua instalação é feita entre a válvula de abastecimento e o redutor de pressão que serão expostos posteriormente. A partir da relação entre a pressão e o volume, é possível visualizar a quantidade de gás no cilindro a ser utilizado como combustível. O manômetro envia um sinal elétrico à chave comutadora instalada no painel do veículo onde pode ser visto a quantidade de gás disponível (INOVEGAS, 2018).

O abastecimento do cilindro deve ser feito de forma cuidadosa. Durante esse período é de fundamental importância que o veículo não esteja eletrizado. Para isso, um aterramento é feito através de um dispositivo condutor de energia elétrica a fim de descarregar ao solo a energia estática do veículo. O sistema para garantir segurança durante esse processo pode ser visto na Figura 32 (RODEGAS, 2017).

Figura 32 – Aterramento para abastecimento de gás



Fonte: Mecanicabeto (2017).

Após o aterramento garantido, o abastecimento pode ser iniciado. Para isso, uma válvula instalada no compartimento do motor tem a finalidade de permitir a conexão do bico de abastecimento para que o cilindro seja abastecido com gás e pode ser vista na Figura 33. Essa válvula conta com um dispositivo de retenção, que impede o retorno do gás à fonte de

abastecimento. Dispõe também de uma manícula de fechamento rápido que permite o corte do gás em caso de emergência, impedindo o fluxo de gás para o redutor ou manutenção do motor (DICASGNV, 2016; RODEGAS, 2017).

Figura 33 – Válvula de abastecimento



Fonte: DICASGNV (2016).

Assim como nos sistemas de alimentação convencionais, o sistema de gás também possui uma série de tubulações para interligação dos diversos componentes do sistema. São apropriadas para serviços de alta ou baixa pressão. Para maior segurança, sua substituição deve acontecer no prazo máximo de 80000 km ou 2 anos. Além das tubulações, o sistema conta com o filtro de gás, Figura 34, que faz o papel de reter partículas sólidas e líquidas indesejadas, impedindo que essas partículas tenham contato com os bicos injetores de gás e provoquem danos ao sistema (RODEGAS, 2017).

Figura 34 – Filtro de gás



Fonte: Mercadolivre (2017).

O controle da passagem do gás para o restante do sistema é feito pela válvula do cilindro, Figura 35.

A sua instalação é feita no pescoço do cilindro e dispõe de três dispositivos de segurança (RODEGAS, 2017).

1. Manípulo de fechamento rápido, a qual, dependendo de sua posição, permite a saída do gás ou sua retenção no cilindro.

2. Dispositivo contra explosão, cuja finalidade é de liberar automaticamente o gás contido no cilindro caso a temperatura e pressão ultrapassem o limite crítico de segurança estabelecido no projeto do cilindro.
3. Dispositivo limitador de fluxo, cujo objetivo é impedir automaticamente a vazão de gás caso ocorra um rompimento na tubulação externa, a fim de evitar grandes vazamentos.

Figura 35 – Válvula do cilindro



Fonte: DICASGNV (2016).

Permitida a passagem do gás, o redutor de pressão visto na Figura 36 pode entrar em ação. A função do redutor de pressão é, para qualquer regime de rotação, reduzir a pressão e promover a alimentação do motor. Esse componente dispõe de múltiplos estágios de regulação de pressão, através dos quais a pressão do gás no cilindro, que varia conforme o consumo é regulada para uma pressão estável e única para alimentação do motor (RODEGAS, 2017; INOVEGAS 2018).

Figura 36 – Redutor de pressão Landirengo



Fonte: Landirengo (2019).

O redutor é considerado o principal dispositivo do kit de conversão, possui válvulas de regulação de marcha lenta e solenoide que interrompe a passagem do gás natural quando o

motor não está funcionando ou funcionando apenas com o combustível líquido (RODEGAS, 2017; INOVEGAS 2018).

O gás vai sendo conduzido por câmaras controladas por molas, válvulas e diafragmas que possuem papel fundamental no funcionamento desse componente. As principais responsáveis pela retirada de pressão nesse trajeto são as membranas que recobrem as câmaras. Caso elas se danifiquem, o redutor terá sua função comprometida e o gás entrará no motor com mais pressão do que o recomendado, podendo causar engasgos e outros danos ao sistema (INOVEGAS, 2018).

Outro ponto importante a ser destacado é a possibilidade de congelamento do gás natural. Em situações extremas, sobretudo em regiões mais frias, essa falha pode fazer o carro morrer ou parar de funcionar no gás. De forma a intervir nessa situação, é feita a absorção de calor retirado de elementos do redutor rescaldados com o líquido do circuito de esfriamento do motor, que evita na fase de queda de pressão o congelamento do gás natural (INOVEGAS, 2018; LANDIRENZO, 20--).

Para o funcionamento adequado de qualquer motor, a combustão deve ser estudada. No sistema convencional, a mistura que será admitida pelo motor obedece a uma razão estequiométrica formada por uma fração de ar e outra de gás. A função desse componente é formar essa mistura através de pequenos furos no interior de sua estrutura como pode ser visto na Figura 37. Porém, isso não é nada trivial. Como existem motores de diferentes cilindradas e potências, se faz necessário um estudo para se aplicar o mesclador correto para cada modelo e tipo de motor. Assim, a perda de potência e o consumo excessivo são reduzidos, proporcionando um funcionamento normal do motor tanto com o gás quanto com o combustível original (RODEGAS, 2017).

Figura 37 – Misturador tipo boca de fogão



Fonte: Macedo (2018).

O misturador fica localizado entre o filtro de ar e o coletor de admissão conforme é visto na Figura 38.

Figura 38 – Instalação do misturador



Fonte: Macedo (2018).

Para o sistema de injeção direta, os injetores são responsáveis por injetar o gás individualmente através do coletor de admissão para os cilindros, proporcionando uma maior eficiência na combustão. Para que não haja entrada de dois combustíveis na câmara de combustão, outro componente importante do sistema cumpre com a sua função, interrompendo o funcionamento dos bicos injetores: o emulador. Isso é feito por meio de um sinal elétrico compatível com o sistema original do motor à central eletrônica enviado pelo componente (RODEGAS, 2017; INOVEGAS, 2018).

Para que todo o sistema de injeção trabalhe simultaneamente de forma sincronizada e obedecendo todos os parâmetros estabelecidos o sistema conta com a ação de um módulo eletrônico específico. Tem função principal de controlar eletronicamente a mistura ar-gás de forma a atingir boa eficiência e diminuir as emissões de poluentes na atmosfera (RODEGAS, 2017; INOVEGAS, 2018).

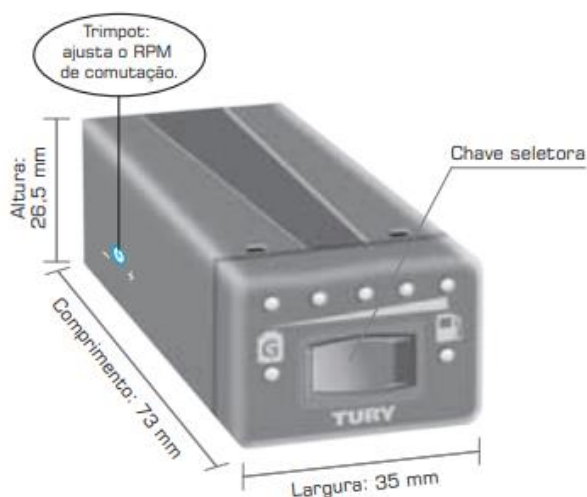
O simulador de sonda lambda é responsável por detectar falhas no balanceamento do combustível. A partir de um sinal elétrico enviado ao módulo é possível apontar se há excesso de oxigênio na mistura ar-combustível e se os níveis estão ideais para um bom funcionamento do motor. Esse componente é usado em alguns casos como substituto do módulo eletrônico. Suas principais funções são gravar o tempo de injeção padrão do combustível líquido da unidade de controle eletrônico através de seu botão de programação; manter o tempo de injeção das válvulas injetoras de combustível líquido dentro dos seus parâmetros normais de funcionamento, de acordo com o combustível utilizado e auxiliar na regulagem da mistura,

indicando a condição do sensor de sonda lambda em relação à regulagem da mistura através de leds (TURY, 2016; INOVEGAS, 2018).

Como a queima do gás natural ocorre de forma mais lenta, o tempo de ignição precisa ser configurado para atuar de maneira específica a fim de não ter perda de potência do motor. Se faz necessário o aumento do rendimento termodinâmico da combustão para assegurar melhor desempenho do motor a partir do ponto de ignição. O variador de avanço cumpre esse papel através de um sensor de rotação que é aplicado na roda fônica do volante do motor e é possível programar o ângulo de avanço de ignição. O funcionamento básico desse sistema é dado por sinais advindos do variador de rotação que informa a central eletrônica que o pistão está em uma posição adiantada. Assim, a queima do gás natural pode ser completa (TURY, 2016; INOVEGAS, 2018).

Por fim, destaca-se o componente responsável por selecionar entre o combustível gasoso e líquido. Seu funcionamento pode ser de modo manual ou automático. Dispõe também de um conjunto de leds que indicam a quantidade de gás disponível no cilindro. Diversas são as possibilidades para funcionamento desse tipo de componente eletrônico. Um exemplo específico é dado pela Comutadora T1011 da Tury mostrado na Figura 39 (TURY, 2016; RODEGAS 2017).

Figura 39 – Chave comutadora TURY



Fonte: TURY (2016).

Neste exemplo a comutadora está configurada para dar partida no motor com o combustível líquido e alternando automaticamente para o gás na primeira desaceleração do veículo. Porém, possui um sistema de emergência caso a partida com gás seja necessária (TURY, 2016).

A partir da escolha do usuário, a comutadora dá opções de modos de funcionamento. Caso queira funcionamento apenas com combustível líquido, basta selecionar essa opção que a chave indicará essa escolha e o motor operará sempre com o combustível líquido do tanque. Outra opção é a partida com gás. Para isso, basta pressionar o botão de emergência e, em seguida, ligar a chave de ignição para dar partida no motor (TURY, 2016).

O funcionamento desejado ao adquirir o sistema é o da comutação do combustível líquido para o gás. Ao posicionar a chave seletora na posição gás o motor sempre irá partir com o combustível líquido e ao atingir a rotação de comutação do motor, o gás passará a ser o combustível principal de trabalho. Porém, caso seja desejado o funcionamento apenas com combustível líquido, basta selecionar a posição de combustível líquido. Com o motor em funcionamento, a eletroválvula do redutor de pressão será fechada e as válvulas injetoras liberadas da emulação (TURY, 2016).

Caso a comutação esteja apresentando irregularidades, é possível ajustar a rotação de comutação a partir do trimpot. A sua programação é ajustada na fábrica com um valor de referência predefinido. Caso haja necessidade, basta girar o trimpot no sentido horário para aumentar ou no sentido anti-horário para diminuir a rotação de comutação. Isso se faz necessário para evitar que o motor apague no momento da troca do combustível original pelo gás (TURY, 2016).

4.4 VANTAGENS

Diversos fatores favorecem o uso do gás natural em motores de ciclo Diesel. Um motor bicomcombustível pode operar com o combustível diesel de 100% ou a mistura de substituição de diesel e gás natural, fornecendo a mesma potência, curva de torque e resposta transitória do motor diesel básico. Além disso, a necessidade de uma elevada temperatura de autoignição é suprida pelo gás natural (620°C), o que garante que o combustível suporte altas compressões e só entre em combustão na presença do Diesel (CARVALHO, 2014).

Outras vantagens sobre o sistema *dual fuel* são destacadas a seguir (COMINO, 2013):

- Do ponto de vista estrutural, o motor requer mínima modificação para instalação do kit gás. Além dessa facilidade, o controle do combustível pode ser gerenciado por um dispositivo simplificado.
- Em termos de emissões, a capacidade de combustão de mistura pobre, muito além dos sistemas de ignição por centelha, contribui para reduzir falhas na ignição, melhorar a eficiência, elevar a densidade de potência e reduzir as emissões de

NOx. Além disso, emissões de poluentes, CO₂ e particulados são significativamente reduzidas.

- Na perspectiva de manutenção, combinado com gás limpo, o combustível líquido proporciona lubrificação das válvulas e anéis. Desta forma, os intervalos entre as manutenções desses sistemas são maiores. Outro ponto que agrega para o uso desse tipo de sistema é a redução de falhas nas operações, uma vez que se um problema acontecer no sistema de gás, o combustível líquido passa a ser utilizado.

A possibilidade de obtenção de eficiência térmica superior em operação com bicomcombustível com relação a operação apenas com diesel soma mais um ponto para a tecnologia. Mais uma vez é importante destacar que a análise deve ser feita em faixas de operação para que a interpretação dos resultados seja correta. Franco (2007) realizou a análise a 1800 rpm e obteve rendimento térmico aumentado de 33,7% apenas com diesel para 36,7% a 80% de taxa de substituição por gás. Porém, para baixas cargas, o rendimento térmico cai substancialmente com a taxa de substituição.

4.5 TAXA DE SUBSTITUIÇÃO

A taxa de substituição é a parte da energia do combustível fornecida pelo gás natural. Esse parâmetro varia de acordo com a faixa de operação. A Figura 40 expressa uma taxa máxima de substituição de aproximadamente 70% para aplicação com altos fatores de carga. A partir do gráfico é possível analisar os melhores pontos, ou seja, onde as maiores taxas de substituição são alcançadas, a fim de proporcionar maior redução nos custos de combustível (CUMMINS, 20--).

Figura 40 – Taxa de substituição x Potência

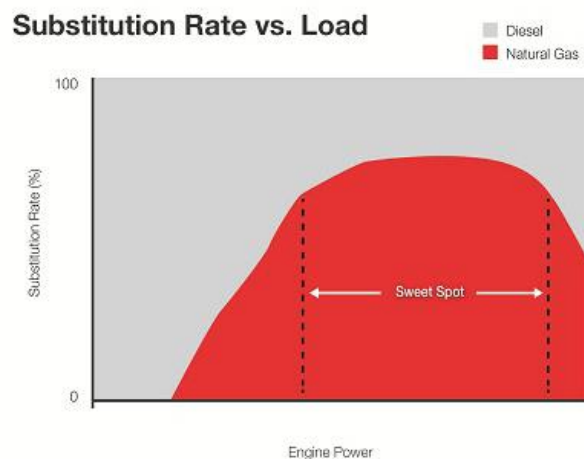
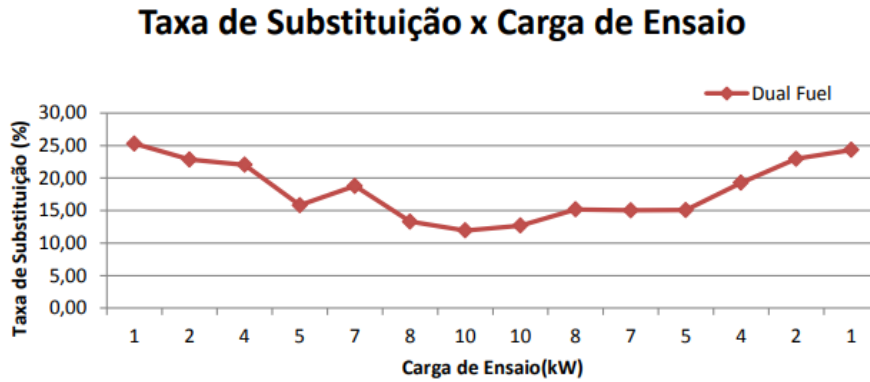


Chart is illustrative; not representative of actual data.

Fonte: Cummins (20--).

Para a análise da taxa de substituição de diesel por gás natural em função da carga de ensaio feita através da Figura 41, o poder calorífico inferior do diesel e do gás natural foram 42450 kJ/kg e 48750 kJ/kg, respectivamente.

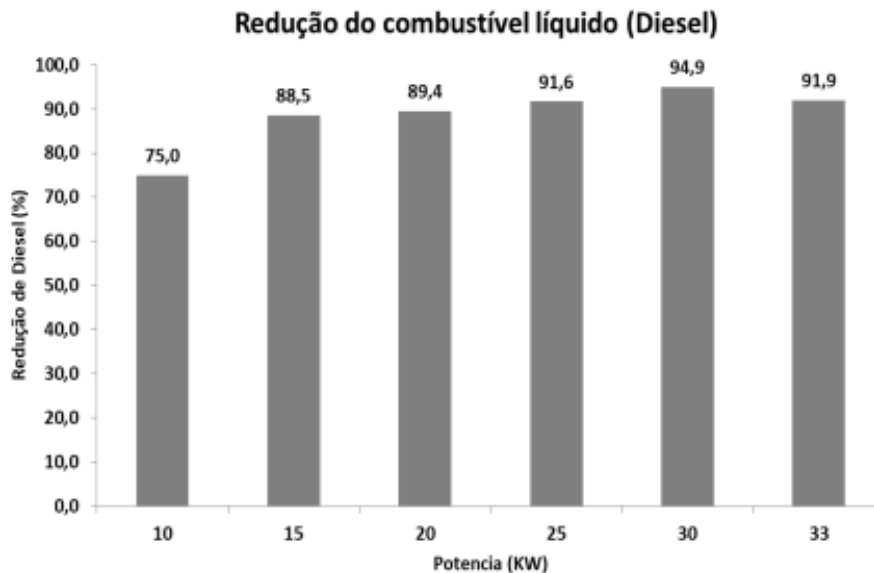
Figura 41 – Taxa de substituição diesel-gás natural x carga de ensaio.



Fonte: Carvalho (2014).

No processo de adaptação do motor diesel para o dual, o propósito maior é fazer a substituição do combustível líquido pelo gasoso, sem desprezar o desempenho do motor. A Figura 42 mostra o percentual de redução do consumo de diesel do motor dual com relação ao motor original, para cada carga aplicada (MACEDO, 2018).

Figura 42 – Redução de diesel x Potência



Fonte: Macedo (2018).

Como pode ser observado, conseguiu-se maior substituição de diesel pelo gás natural na potência de 30 kW. Os três resultados distintos para diferentes motores revelam que existe uma singularidade de cada motor que deve ser observado, não existindo um limite geral de

taxa de substituição a ser seguido. Porém, os resultados experimentais são motivadores quando indicam possibilidade de substituição da ordem de 70 a 80% (PEREIRA, S. BRAGA, C. BRAGA, 2004).

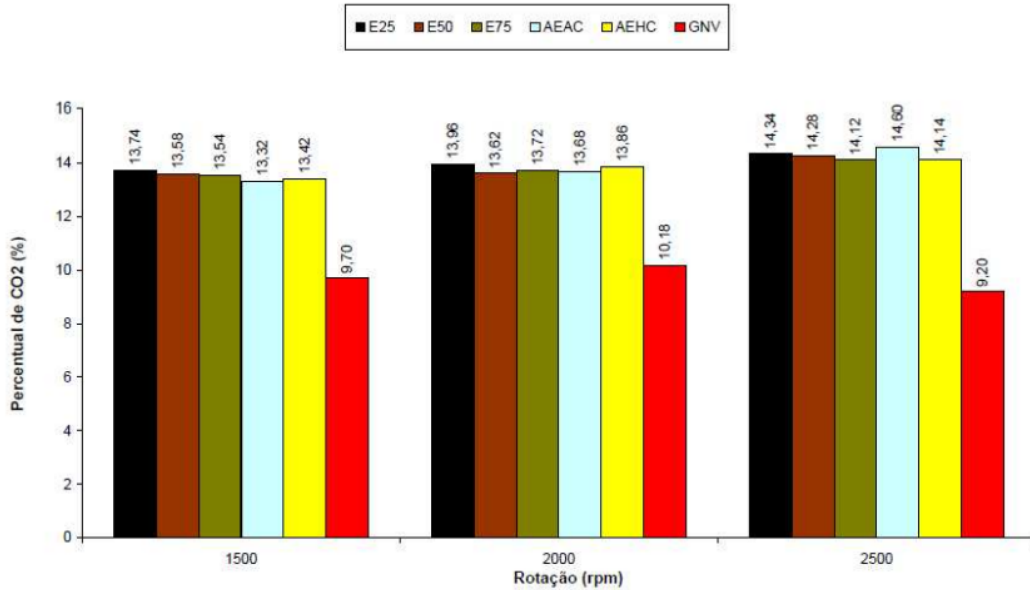
4.6 EMISSÕES

Na reação de combustão completa do combustível, os gases resultantes da combustão são o gás carbônico (CO_2), a água (H_2O) normalmente em estado vapor e o nitrogênio (N_2). Do ponto de vista ambiental, o único produto preocupante pela ação no efeito estufa e aquecimento global é o CO_2 . Entretanto, nas reações que ocorrem de fato nos motores, outros gases também são formados como o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), oxigênio (O_2), compostos orgânicos voláteis, entre outros (M. CARVALHO, 2011).

A partir da observância e preocupação com o meio ambiente, diversos estudos foram desenvolvidos na tentativa de controlar as emissões dos gases poluentes. No Brasil, o órgão consultivo e deliberativo que estabelece os limites legais de emissões veiculares é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). De forma a estabelecer esses limites, a primeira resolução que entrou em vigor no país foi a CONAMA nº 18, 6 de maio de 1986. Para implementação dessas resoluções foi criado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) (M. CARVALHO, 2011).

A comparação de parâmetros de emissões do motor deve ser feita na mesma faixa de operação. A utilização do gás natural é vantajosa por se tratar de uma alternativa de combustível de queima mais limpa. M. Carvalho (2011) realizou o ensaio comparativo das emissões a partir do gás natural veicular, gasolina comum brasileira (tipo C ou E25), álcool etílico anidro combustível (AEAC), álcool etílico hidratado combustível (AEHC), mistura E50 (50% de gasolina pura e 50% de álcool anidro AEAC) e mistura E75 (75% de álcool anidro AEAC e 25% de gasolina pura). Outro importante fator a ser considerado foi a não utilização de catalisador no escapamento para conversão dos gases.

A Figura 43 revela o impacto de cada combustível dos ensaios com relação às emissões de CO_2 no meio ambiente.

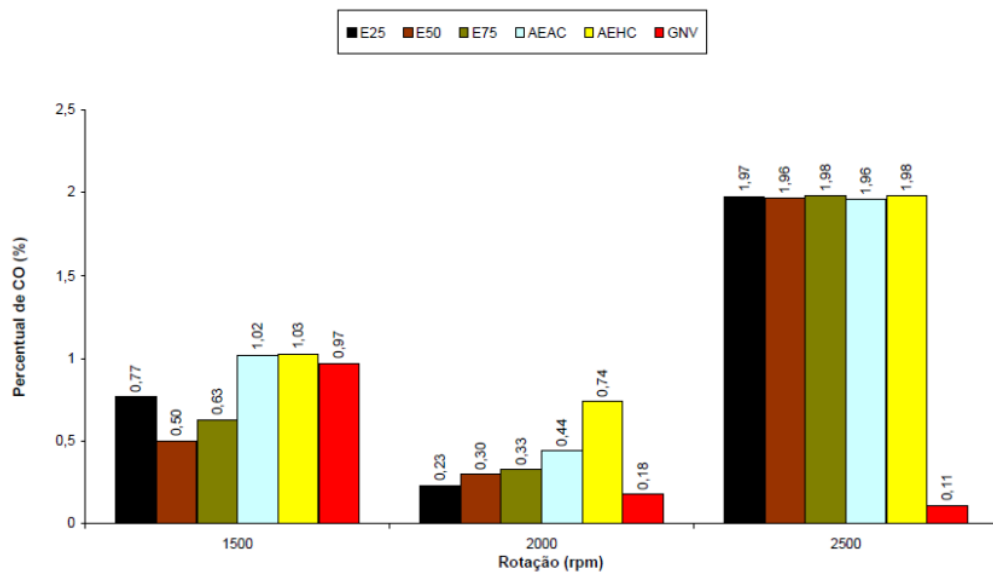
Figura 43 – Percentuais de CO₂ nas emissões

Fonte: M. Carvalho (2011).

A partir da observação dos resultados, pode-se concluir que o combustível que menos contribuiu com as emissões de CO₂ no meio ambiente foi o GNV.

A Figura 44 revela o impacto de cada combustível dos ensaios com relação às emissões de CO no meio ambiente. Observa-se que na rotação de 2500 rpm, houve um aumento significativo de todos os combustíveis líquidos em relação às rotações de 1500 e 2000 rpm. Esse fato pode ser explicado pelo enriquecimento da mistura na rotação de 2500 rpm. Observa-se ainda que para a rotação de 1500 rpm o valor percentual de emissão de CO para o GNV não é tão vantajoso quanto nas demais ensaiadas.

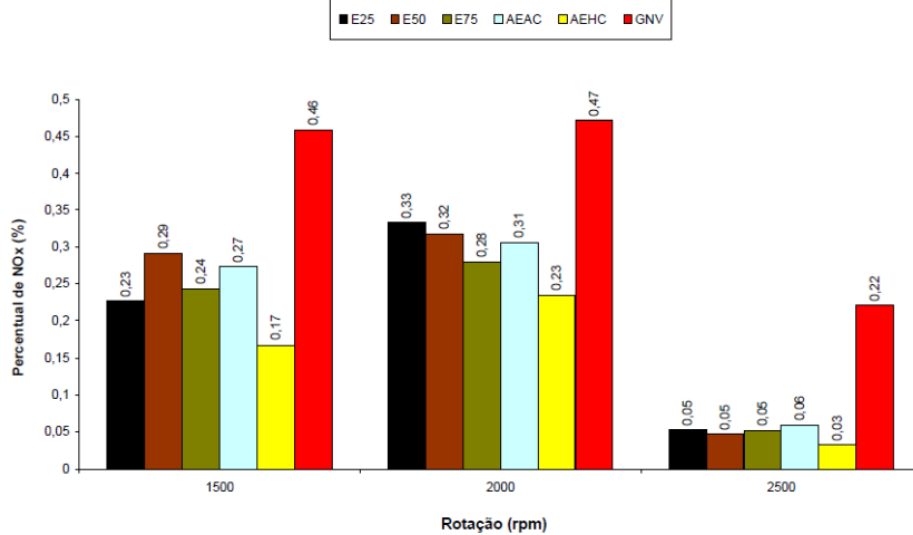
Figura 44 – Percentuais de CO nas emissões



Fonte: M. Carvalho (2011).

A Figura 45 revela um lado não atrativo com relação à emissão de NOx. A partir dela é possível verificar que os resultados são mais elevados para GNV que para os combustíveis líquidos.

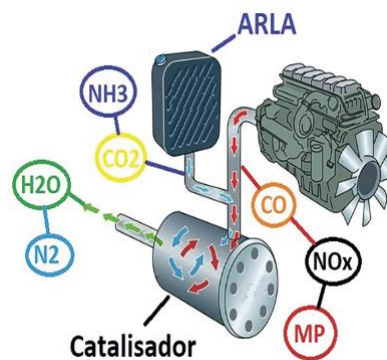
Figura 45 – Percentuais de NOx nas emissões



Fonte: M. Carvalho (2011).

De forma a controlar as emissões de NOx, os veículos do ciclo diesel utilizam o SCR (Selective Catalytic Reduction), ou seja, a Redução Catalítica Seletiva. O sistema tem como objetivo diminuir as emissões de material particulado e o próprio NOx. Esse sistema de pós-tratamento utiliza o ARLA 32 (Agente Redutor Líquido de NOx Automotivo) que é um reagente químico com 32,5% de ureia numa solução de água desmineralizada. Uma pequena quantidade dessa solução é injetada no fluxo dos gases de escape e, juntamente com a alta temperatura do catalisador SCR, se transforma em Amônia (NH₃). Por fim, dentro do catalisador a amônia reage com os óxidos de nitrogênio e libera nitrogênio e vapor de água. A Figura 46 representa o esquema descrito do sistema de redução catalítica seletiva (MIURA, 2018).

Figura 46 – Sistema de redução catalítica SCR



Fonte: OficinaBrasil (2018).

4.7 DESAFIOS

A diferença fundamental entre o motor por compressão tradicional e o que opera no modo diesel/gás está na quantidade de óleo diesel injetado. Como visto anteriormente, existem diversas possibilidades da variação dessa quantidade. Ao se avaliar essa gama de possibilidades necessária à flexibilidade do motor para utilização de mistura ou somente diesel, percebe-se o quanto a combustão nesse motor se torna complexa (CARVALHO, 2014).

De modo não tão frequente, o motor pode apresentar falha na combustão do combustível gasoso devido a uma mistura excessivamente rica. Por outro lado, a utilização de misturas pobres em motores *dual fuel* acarreta um acentuado aumento da emissão de monóxido de carbono ao se comparar com o observado em motores diesel sob o mesmo regime de funcionamento (BET *apud* CARVALHO, 2014).

Devido a própria caracterização do sistema requerer combustível líquido para ignição e combustível gasoso para funcionamento do motor, haverá dois sistemas de combustível para manutenção. Além disso, ao comparar motores movidos apenas a diesel, existe uma alta emissão de monóxido de carbono (COMINO, 2013).

4.8 APLICAÇÃO DO SISTEMA *DUAL FUEL*

Como defendido neste trabalho, a partir da facilidade de adaptação em motores a combustão interna que operam apenas com um combustível líquido, a tecnologia de conversão bicombustível é vista em diversas aplicações no mercado.

Fábricas e montadoras de grupos geradores aproveitam da solução econômica para motores de variadas velocidades, aumento da vida útil do motor e custos de manutenção reduzidos. Os geradores precisam de garantia de funcionamento e a segurança oferecida para a transição entre os modos bicombustível para diesel e vice-versa sem interrupção da carga contribuem para esse tipo de aplicação (SERVINTEL).

Outro interessante setor que a tecnologia atingiu foi o ferroviário. Para essa aplicação, o motor pode gerar não apenas economia por utilizar gás natural como combustível principal, mas aumentar a autonomia em atividade, podendo até dobrar. Porém, essas vantagens não serviriam se fossem isoladas da possibilidade de aplicabilidade nos motores já em operação de frotas que possuem vida útil em torno de 40 anos (BLOGLOGÍSTICA, 2014).

Outro transporte que pode aproveitar dos benefícios trazidos pela tecnologia é o ônibus. Assim como nas demais aplicações, a flexibilidade do funcionamento com diesel puro ou diesel com gás natural é uma importante vantagem para esse setor. Os motores ainda aproveitam de redução de 18% nas emissões de hidrocarbonetos e dióxido de carbono e cerca de 10% na emissão de material particulado (MERCEDSBENZTRUKS, 2014).

Para aplicações marítimas a possibilidade de alta potência de saída por cilindro, resultando em um motor mais compacto; menor quantidade de revisões através da vida útil prolongada dos componentes (tempo entre revisões estendido no mínimo de 30%) e funcionamento a velocidades constantes e variáveis, fez com que esse setor também investisse nessa tecnologia (WARTSILA, 2016).

O uso do motor diesel é visto em larga escala em tratores. Para o caso explorado o tanque é localizado abaixo do nível da cabine, não perturbando o centro de gravidade para trabalho adequado. A capacidade de 192 litros rende aproximadamente 4 horas de trabalho, praticamente metade do usual. A princípio, isso poderia ser um problema. Porém, a possibilidade de alternar entre os modos diesel e *dual fuel* soluciona essa questão pelo fato de o tanque de diesel manter o seu volume (VALTRA, 2014).

O uso do sistema também pode ser visto em veículos de transporte de carga. Assim como no setor ferroviário, para modificação em caminhões, é de extrema importância a adaptação descomplicada. Em Pernambuco o primeiro caminhão a utilizar essa tecnologia contou com o apoio da Copergás, Landirengo e Auto Gás com a motivação de uma alternativa de proteção à instabilidade dos preços dos combustíveis. O sistema é recomendado para caminhões que rodam em média 10.000 quilômetros por mês (DIAS, 2021).

A partir do aumento do diesel, mais caminhoneiros e empresas do setor de transporte passaram a buscar a solução oferecida pela tecnologia. O estudo econômico considerando um caminhão da Mercedes-Benz, 460 cv, com 9 eixos e peso bruto total de 74 toneladas, que saiu de Lajes-SC vazio até Araucária-PR e volta carregado com combustível. Antes da modificação o consumo de diesel era de 1,6 km/l, e após, a média passou para 2,25 km/l. A autonomia dos 6 cilindros instalados de 150 m³ atingiram uma autonomia de 583 km. No período do teste o diesel custava R\$ 7,568, ao passo que o GNV, R\$ 4,54 por metro cúbico. A partir da instalação do kit, a economia gerada nessas condições foi de R\$ 3.019,00 (BRASILPOSTOS, 2022).

5 CONCLUSÃO

Com base na revisão bibliográfica realizada para produzir este trabalho, foi possível obter um melhor entendimento da tecnologia de conversão de motores a combustão interna para operação *dual fuel*. O entendimento da evolução histórica da construção dos motores ajudou na conscientização da importância de um desenvolvimento sustentável. Não obstante, a compreensão de todo o funcionamento básico do motor desde a função de cada componente, bem como a integração entre eles para formação de sistemas de trabalho, tem sua relevância.

Da mesma forma, a fim de contextualizar na evolução do desenvolvimento de soluções econômicas e ambientais foi feita a exposição de cada geração do sistema bicomcombustível. A partir desse conhecimento, foi possível perceber uma direção na tentativa de encontrar um caminho ótimo de se obter a máxima taxa de substituição do diesel para diminuição de gases poluentes, sem perder desempenho. Com a fundamentação técnica feita através de revisão bibliográfica foi possível entender o funcionamento de cada componente pertinente a tecnologia da adaptação *dual fuel* convencional e injeção direta. Foi possível desenvolver um aprofundamento do entendimento da função dos principais componentes eletrônicos responsáveis por controlar o fluxo e seleção do combustível dentro do sistema.

Da perspectiva de emissões de poluentes desse tipo de sistema percebe-se que a tecnologia bicomcombustível é promissora. A redução de CO e CO₂, combinadas com sistemas de pós-tratamento, permitem o uso e desenvolvimento sustentável de motores a combustão interna. A tecnologia *dual fuel* ainda tem espaço para crescimento, principalmente em um horizonte mundial que busca alternativas com menores emissões. Além disso, a aplicação em diversos setores (ferroviário, marítimo, agrícola, entre outros) reafirma tal potencial.

Na maior parte dos casos, inovação possui o pré-requisito de uma compreensão daquilo que já tem funcionado. Por isso, a apresentação dos componentes básicos do sistema *dual fuel* é de suma importância. O caminho para domínio dessa tecnologia é interminável. Porém, alguns passos podem ser dados para evoluir nesse sentido. Como sugestão de trabalhos futuros, são apresentados os seguintes pontos:

- Estudo da geometria dos pistões para mistura efetiva do ar e gás;
- Avaliação do desempenho e emissões com aplicação de biogás;
- Efeito da utilização de diferentes mescladores na mistura ar e gás;
- Estudo da viabilidade econômica do sistema *dual fuel* para frotas de transporte logístico.

REFERÊNCIAS

APJ TREINAMENTOS. **Treinamento módulo de motores AGCO Power**. Mogi das Cruzes: APJ Treinamentos, 2022.

BLOGLOGÍSTICA. **Motores flex Dual Fuel chegam no transporte ferroviário**. Disponível em: <https://bloglogistica.com.br/mercado/motores-flex-dual-fuel-chegam-ao-transporte-ferroviario/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

BRASILPOSTOS. **Aumenta o número de caminhões movidos à GNV no país**. Disponível em: <https://www.brasilpostos.com.br/noticias/combustiveis-2/aumenta-o-numero-de-caminhoes-movidos-a-gnv-no-pais/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

CARVALHO, D. H. **Estudo de viabilidade técnica de injeção de gás natural em motores diesel**. 2014a. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011b. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

CARVALHO, V. H. **Simulação e análise de um motor quatro tempos a diesel**. 2020c. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

CASTELLANELLI, M. *et al.* Desempenho de motor ciclo Diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia agrícola**, v. 28, n. 1, p. 145–153, 2008.

CETESB COMPANHIA ESTADUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano de redução de emissões de fontes estacionárias guia de melhor tecnologia prática disponível**. São Paulo: CETESB, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2015/12/Guia-MTPD-Fontes-de-Combust%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2022.

COMINO, J. C. C. **Investigation of knock limits of dual fuel engines**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2012.

CONNOR, N. **O que é exemplo de taxas de compressão - gasolina x diesel**: definição. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-exemplo-de-taxas-de-compressao-gasolina-x-diesel-definicao/>. Acesso em: 31 dez. 2022a.

CONNOR, N. **O que é o ciclo Diesel real e ideal**: definição. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-diesel-real-e-ideal-definicao/>. Acesso em: 1 jan. 2023b.

CONNOR, N. **O que é o ciclo Otto real e ideal**: definição. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-otto-real-e-ideal-definicao/>. Acesso em: 1 jan. 2023c.

COSTA, R. B. R. **Estudo experimental da tecnologia dual-fuel em motor de combustão interna utilizando biogás, GNV e etanol.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

CUMMINS. **Motores bicomcombustíveis para perfuração.** Disponível em: <https://www.cummins.com/pt/engines/drilling/dual-fuel-engines-drilling>. Acesso em: 1 jan. 2023.

DIAS, T. **Pernambuco larga na frente com primeiro caminhão diesel-GNV da região - Mecânica Online®.** Disponível em: <https://mecanicaonline.com.br/2021/08/primeiro-caminhao-diesel-gnv-circula-em-pernambuco/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

DICASGNV. **Cuidados com o kit GNV do seu carro.** Disponível em: <https://dicasgnv.com.br/2016/01/05/cuidados-com-o-kit-gnv-do-seu-carro/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

FIGUEIRAL, C. M. A. **Aplicação do conceito de combustão dual-fuel num motor diesel pesado.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

FRANCO, A. C. L. **Análise técnico-econômica da substituição parcial do combustível diesel pelo gás natural em motores marítimos na região amazônica.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

GREENCAR. **Westport updates HPDI 2.0 dual fuel system with new Delphi injectors, upgraded LNG storage and supply.** Disponível em: <https://www.greencarcongress.com/2014/10/20141001-hpdi.html>. Acesso em: 1 jan. 2023.

GOUVEIA, F. R. **Avaliação experimental da injeção de gás natural veicular em motor de ignição por compressão com diferentes proporções de biodiesel.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

INOVEGAS. **Por dentro do kit GNV.** Disponível em: <https://www.inovegas.com.br/blog/por-dentro-do-kit-gnv/>. Acesso em: 1 jan. 2023.

LANDIRENZO. **Sistema diesel/gás: dual fuel.** 2019. Disponível em: <https://www.landirengo.com.br/sistema-diesel-gas-dual-fuel/?cn-reloaded=1>. Acesso em: 1 jan. 2023.

LEITE, S. H. P. C. **Aproveitamento energético de resíduos de esgotamento sanitário.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

MACEDO, R. J. F. **Adaptação de um motor diesel para atuar como bicomcombustível: diesel-gás natural.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

MACHADO, F. T. H. F. **A utilização do ônibus a gás natural comprimido na frota de ônibus urbanos como alternativa para a redução da poluição atmosférica na região**

metropolitana de São Paulo. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

MAIA, G. **Diferença geração kit GNV**. Disponível em: <https://troiagas.com/gnv/perguntas/130-diferenca-kit-gnv?start=2>. Acesso em: 1 jan. 2023.

MECANICABETO. **GNV: você sabe como é abastecido?** Disponível em: <https://mecanicabeto.com.br/blog/gnv/gnv-voce-sabe-como-e-abastecido/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

MAHLE. Curso motores de combustão interna: **Manual**. 2019. Disponível em: <https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-latin-america/catalogs/brasil/pdf-catalogos/2019-manual-tecnico-curso-de-motores-web.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

MERCADOLIVRE. **Filtro de gás natural - gnv - filtro Landirezzo injetável 5**. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1500506578-filtro-de-gas-natural-gnv-filtro-landirezzo-injetavel-5-_JM. Acesso em: 31 dez. 2022.

MERCEDESSENZTRUKS. **Comil e Mercedes-Benz testam ônibus bicombustível: diesel e GNV**. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2014/09/05/comil-e-mercedes-benz-testam-onibus-bicombustivel-diesel-e-gnv/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

MIURA, P. A. **Sistema de pós-tratamento SCR para motores ciclo Diesel: o que você precisa saber?** Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/sistema-de-pos-tratamento-scr-para-motores-ciclo-diesel-o-que-voce-precisa-saber>. Acesso em: 1 jan. 2023.

MURARO, W. **Avaliação do funcionamento de motor ice com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

OLIVEIRA, S. DEL R.; SCALON, V. L. Otimização dos ciclos de ar-padrão otto, diesel e dual com relação a potência líquida de saída e a pressão média efetiva. Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria. **Anais...**São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/mathpro-cnmai-0016>

PEREIRA, R. H. *et al.* **Substituição parcial do óleo diesel pelo gás natural em motores: atratividade da tecnologia e sua avaliação experimental**. Disponível em: http://workoutenergy.com.br/publicacao_vencontro/trabalhos_tecnicos/download/ricardo_hernandez.pdf. Acesso em: 31 dez. 2022.

PLANETAGAS. **Instalação de kit GNV 5 geração instalado**. Disponível em: <https://www.planetagas.com.br/sistemas-gnv/instalacao-de-kit-gnv-5-geracao-instalado>. Acesso em: 1 jan. 2023.

PORTALLUBES. **Desvendando os segredos dos anéis do pistão que resultam em desempenho do motor e economia**. Disponível em: <https://portallubes.com.br/2017/08/aneis-do-pistao/>. Acesso em: 31 dez. 2022.

ROCHA, M. A. **Estudo do avanço de injeção de biodiesel em um motor dual de ignição por compressão utilizando gás natural e biodiesel**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

RODEGAS. **Como funciona o GNV**. Disponível em: <https://rodegas.com.br/como-funciona-o-gnv/>. Acesso em: 1 jan. 2023.

SCHLOSSER, J. F.; CAMARGO, M. N.; MACHADO, P. R. M. Comportamento de um motor de ignição por compressão trabalhando com óleo Diesel e gás natural. **Engenharia agrícola**, v. 24, n. 3, p. 736–744, 2004.

SCHULZ, D. **Motores 4 tempos: etapas de funcionamento**. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/motores4t_etapas.htm. Acesso em: 31 dez. 2022.

SERVINTEL. **Servintel - Home**. Disponível em: <https://servintel.com/pt/home>. Acesso em: 1 jan. 2023.

SILVA, A. M. **Simulação e análise do intercooler em motores Otto originais de fábrica**. Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/Intercooler%20simula%E7%E3o.pdf. Acesso em: 31 dez. 2022.

SOUZA, J.; DE LIMA, H. Q.; SCHAEFFER, L. Desenvolvimento de tecnologia para utilização de biogás e biodiesel em motor de ciclo diesel. **Agrener GD**, 2013. DOI:10.13140/2.1.2224.2564. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266141240_Desenvolvimento_de_tecnologia_para_utilizacao_de_biogas_e_biodiesel_em_motor_de_ciclo_diesel. Acesso em: 31 dez. 2022.

SUZUKI, A. B. P. *et al.* Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, p. 221–237, 2011.

TURY. **T65 simulador de sonda lambda inteligente**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://tury.net.br/manuais/t65.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2022.

TURY. **T1011 comutadora**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://www.tury.com.br/downloads/MANUAL%20T1011_REV.01.1470082394.pdf. Acesso em: 31 dez. 2022.

TURY. **T30 variador de avanço**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://www.tury.com.br/downloads/MANUAL%20T30_REV.02.1470081597.pdf. Acesso em: 31 dez. 2022.

VALTRA. **Valtra dual-fuel tractor awarded silver medal in Moscow**. Disponível em: <https://www.ngvglobal.com/blog/valtra-dual-fuel-tractor-awarded-silver-medal-in-moscow-1025>. Acesso em: 31 dez. 2022.

VARELLA, C. A. **Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna: Manual**. Rio de Janeiro: Universidade Rural Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia área de máquinas e energia na agricultura IT 154, 2015. Disponível em:

http://ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/historico_e_desenvolvimento_dos_motores.pdf. Acesso em: 31 dez. 2022.

VOGT, R. Avaliação de parâmetros de desempenho de um motor de ignição por compressão operando em modo dual-fuel (diesel-etanol). 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

WARTSILA. Wartsila 25 – the new marine engine with true fuel flexibility. Disponível em: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-25>. Acesso em: 31 dez. 2022.