



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

PEDRO HENRIQUE BARRETO SOARES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A ADAPTAÇÃO INDUSTRIAL E AS
METODOLOGIAS DE CONVERSÃO DUAL FUEL DESENVOLVIDAS NA UFPB**

JOÃO PESSOA
2025

PEDRO HENRIQUE BARRETO SOARES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A ADAPTAÇÃO INDUSTRIAL E AS
METODOLOGIAS DE CONVERSÃO DUAL FUEL DESENVOLVIDAS NA UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Engenharia de Produção Mecânica, da
Universidade Federal da Paraíba, como
parte dos requisitos para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia de Produção
Mecânica.

Orientador: Koje Daniel Vasconcelos
Mishina

JOÃO PESSOA

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S676a Soares, Pedro Henrique Barreto.

Análise comparativa entre a adaptação industrial e as metodologias de conversão dual fuel desenvolvidas na UFPB / Pedro Henrique Barreto Soares. - João Pessoa, 2025.

49 f. : il.

Orientação: Kojé Daniel Vasconcelos Mishina.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. motor diesel. 2. dual fuel. 3. gás natural. 4. adaptação de motores. 5. eficiência energética. I. Mishina, Kojé Daniel Vasconcelos. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 658.5(043.2)

PEDRO HENRIQUE BARRETO SOARES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A ADAPTAÇÃO INDUSTRIAL E AS
METODOLOGIAS DE CONVERSÃO DUAL FUEL DESENVOLVIDAS NA UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, apresentado em sessão de defesa pública em 01/10/2025, obtendo o conceito aprovado, sob avaliação da banca examinadora a seguir:

Documento assinado digitalmente
 KOJE DANIEL VASCONCELOS MISHINA
Data: 02/10/2025 16:22:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Koje Daniel Vasconcelos Mishina

Orientador

Documento assinado digitalmente
 JOSE CARLOS DE LIMA JUNIOR
Data: 02/10/2025 15:35:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. José Carlos de Lima Junior

Examinador

Documento assinado digitalmente
 SIDERLEY FERNANDES ALBUQUERQUE
Data: 02/10/2025 13:28:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Siderley Fernandes Albuquerque

Examinador

JOÃO PESSOA

2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, ao meu avô Fernando e à minha avó Olga.

À minha mãe, por sempre estar ao meu lado, me apoiando em todas as escolhas e tornando minha caminhada mais leve. Seu compromisso com o meu futuro e sua confiança no meu potencial foram fundamentais para que eu concluísse esta jornada, fruto de todo o seu apoio e das suas renúncias por mim.

À minha avó Olga, por sempre estar presente, com a certeza de que, se precisasse, ela faria tudo o que fosse possível para me ajudar.

E a *Painho*, meu avô Fernando, que me ensinou que o que se aprende ninguém pode tirar, sempre dizendo: *“Estude, meu filho. Pois podem lhe tirar tudo, mas o que está na sua cabeça, isso ninguém tira.”*. Ele acreditava que a maior herança que alguém pode deixar é o exemplo e o conhecimento transmitido em vida, e foi muito disso que ele me deixou.

Aos três, minha eterna gratidão. Foram suas lições, amor e apoio que fazem de mim quem sou.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Professor Emerson Jaguaribe, que me orientou e me guiou na fase inicial deste trabalho, e cujos ensinamentos valiosos, tanto acadêmicos quanto pessoais, me acompanharão por toda a vida. Sou grato, também, ao Professor Koje Mishina, que assumiu a orientação na reta final e cuja ajuda foi decisiva para que eu pudesse finalizar este trabalho com êxito e alcançar a conclusão da graduação.

Ao meu pai, que me apoiou financeiramente durante parte da graduação, permitindo que eu focasse nos estudos e me dedicasse totalmente a essa jornada.

Aos meus amigos da universidade, que tornaram esta jornada mais suportável e prazerosa, compartilhando comigo momentos importantes.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este momento fosse possível. Sou imensamente grato a cada um de vocês.

“Bem-aventurado o homem que encontra a sabedoria, o homem que obtém o entendimento. Pois o lucro da sabedoria é maior que o da prata, e a sua renda, mais que o ouro mais puro.”

(Provérbios 3:13-15)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre a técnica industrial de Injeção Direta de Alta Pressão (HPDI) e as metodologias de baixo custo desenvolvidas na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para a conversão de motores diesel para operação dual fuel. Trata-se de um estudo comparativo, baseado em revisão bibliográfica, que investiga a viabilidade técnica e econômica dessas abordagens como alternativas para reduzir custos operacionais e o impacto ambiental da frota nacional. O objetivo principal é comparar os processos de conversão, focando nas diferenças, vantagens e desvantagens de cada tecnologia. A metodologia emprega uma revisão analítico-comparativa de estudos de caso, detalhando o sistema HPDI e a evolução das adaptações por fumigação na UFPB, desde o controle manual em motores mecânicos até o desenvolvimento de controladores eletrônicos customizados. Os resultados demonstram que, enquanto a tecnologia HPDI assegura alta eficiência em toda a faixa de operação, as abordagens da UFPB mostram seu maior benefício em regimes de média a alta potência, atingindo taxas de substituição de diesel de até 97% e uma economia de custos de até 53%. Conclui-se que a conversão para o modo dual fuel é uma alternativa estratégica cuja viabilidade está ligada ao perfil de uso do motor, consolidando-se como uma solução eficaz para aplicações que operam predominantemente em alta carga e de forma constante, como grupos geradores e veículos de transporte rodoviário.

Palavras-chave: motor diesel. dual fuel. gás natural. adaptação de motores. eficiência energética.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis between the industrial High Pressure Direct Injection (HPDI) technique and the low-cost methodologies developed at the Federal University of Paraíba (UFPB) for converting diesel engines to dual fuel operation. This is a comparative study, based on a bibliographic review, that investigates the technical and economic viability of these approaches as alternatives to reduce operational costs and the environmental impact of the national fleet. The main objective is to compare the conversion processes, focusing on the differences, advantages, and disadvantages of each technology. The methodology employs an analytical-comparative review of case studies, detailing the HPDI system and the evolution of fumigation adaptations at UFPB, from manual control in mechanical engines to the development of customized electronic controllers. The results show that while HPDI technology ensures high efficiency across the entire operating range, the UFPB approaches demonstrate their greatest benefit in medium to high power regimes, achieving diesel substitution rates of up to 97% and cost savings of up to 53%. It is concluded that the dual fuel conversion is a strategic alternative whose viability is linked to the engine's usage profile, establishing itself as an effective solution for applications that operate predominantly under high and constant load, such as generator sets and road transport vehicles.

Keywords: diesel engine. dual fuel. natural gas. engine adaptation. energy efficiency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
2 MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR A DIESEL	17
2.1 SISTEMA DE ADMISSÃO	20
2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL	22
2.3 PRINCÍPIOS DA OPERAÇÃO DUAL FUEL EM MOTORES DIESEL	23
2.4 MÉTODOS DE INJEÇÃO DE GÁS EM MOTORES DUAL FUEL	26
2.4.1 Injeção indireta no coletor de admissão	26
2.4.2 Injeção direta de alta pressão (HPDI)	27
2.5 COMBUSTÍVEIS GASOSOS E LÍQUIDOS: DIFERENÇAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	27
2.5.1 Características do óleo diesel	28
2.5.2 Características do gás natural.....	29
2.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA CONVERSÃO DO MOTOR CONVENCIONAL PARA O MOTOR DUAL FUEL	30
2.7 PROCESSO DE IGNIÇÃO DETALHADO	33
3 METODOLOGIA.....	35
4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO	35
4.1 ADAPTAÇÃO INDUSTRIAL.....	36
4.2 ADAPTAÇÕES REALIZADAS NA UFPB	38
4.2.1 Abordagem para motores com injeção eletrônica	38
4.2.2 Abordagem para motores com injeção mecânica	40
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA HPDI E O SISTEMA UTILIZADO NA UFPB	43
5 CONCLUSÃO.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Primeira etapa do ciclo Diesel – Admissão de ar no cilindro.....	17
Figura 2: Sistema de motor a Diesel alimentado por turbina.....	18
Figura 3: Segunda etapa do ciclo Diesel – Compressão do ar	18
Figura 4: Terceira etapa do ciclo Diesel – Combustão e expansão	19
Figura 5: Quarta etapa do ciclo Diesel – Exaustão dos gases	19
Figura 6 – Sistema de admissão por aspiração natural em um motor a diesel	20
Figura 7 – Sistema de admissão sobrealimentado por turbina	21
Figura 8: Fluxo de gases em um sistema sobrealimentado	22
Figura 9: Componentes do sistema de alimentação de combustível em um motor a diesel.....	23
Figura 10: Ciclo termodinâmico (a) Otto, (b) Diesel e (c) Dual	34
Figura 11: Diagrama de funcionamento do sistema HPDI	36
Figura 12: Injetor duplo do sistema HPDI.....	37
Figura 13: Componentes do sistema de injeção GNV: (a) Conjunto de injetores Landi Renzo GI25-65 e (b) Esquema do sistema de acionamento peak and hold	39
Figura 14: Misturador do tipo 'boca de fogão' desenvolvido no LI.....	41
Figura 15: Componentes da adaptação mecânica: (a) misturador do tipo "boca de fogão" instalado e (b) válvula manual controladora de fluxo.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação de custos entre o motor a diesel convencional e o motor dual fuel	32
Tabela 2: Comparativo técnico entre as pesquisas desenvolvidas na UFPB.....	43
Tabela 3: Comparação entre a adaptação industrial HPDI e as adaptações da UFPB	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DI-NG – Direct Injection Natural Gas and Diesel Reactivity Combustion (Injeção Direta de Gás Natural e Combustão por Reatividade de Diesel)

ECU – Electronic Control Unit (Unidade de Controle Eletrônico)

GN – Gás Natural

GNL – Gás Natural Liquefeito

GNV – Gás Natural Veicular

HC – Hidrocarbonetos

HCCI – Homogenous Charge Compression Ignition (Ignição por Compressão de Carga Homogênea)

HCDI – Homogenous Charge Direct Injection (Injeção Direta de Carga Homogênea)

HPDI – High Pressure Direct Injection (Injeção Direta de Alta Pressão)

LI – Laboratório de Inovação e Conversão Térmica

MCG – Módulo de Condicionamento de Gás

MP – Material Particulado

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

ONU – Organização das Nações Unidas

ppm – Partes por milhão

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

S10 – Diesel com teor máximo de enxofre de 10 mg/kg de enxofre

S500 – Diesel com teor de enxofre máximo de 500 mg/kg de enxofre

S1800 – Diesel com teor máximo de 1800 mg/kg de enxofre

SPC – Slightly Premixed Combustion (Combustão Levemente Pré-misturada)

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

bar – Unidade de pressão (1 bar = 100 kPa)

°C – Grau Celsius (temperatura)

kW – Quilowatt (unidade de potência)

kWe – Quilowatt elétrico (unidade de potência elétrica)

L – Litro (unidade de volume)

m³ – Metro cúbico (unidade de volume)

mg/kg – Miligrama por quilograma (unidade de concentração)

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, a sustentabilidade progressivamente passou a ser o foco das políticas públicas a um nível mundial. No período posterior à revolução industrial até os primeiros anos da segunda guerra mundial, embora o mundo tivesse experimentado uma grande evolução tecnológica, é possível afirmar que o foco principal das preocupações científicas e humanas era apenas o progresso técnico para a resolução de problemas da humanidade. Entretanto conforme este cenário evoluiu, o progresso técnico passou a ser acompanhado por uma preocupação crescente com os danos que este progresso poderia causar ao mundo e ao meio ambiente, pois nenhum progresso é válido se comprometer a existência humana.

Nesse contexto, um dos focos da sustentabilidade durante essa reviravolta da preocupação mundial foi a produção de energia ao redor do mundo. Os governos passaram a se preocupar com uma produção de energia que fosse simultaneamente limpa e sustentável, pois atualmente a maior parte da energia produzida no mundo é proveniente do petróleo e de seus derivados, que por conta de serem recursos finitos e não renováveis, suas reservas se esgotarão em um futuro não tão distante. Do ponto de vista ambiental, os combustíveis fósseis acarretam problemas ambientais significativos, sendo responsáveis pela maior parte da emissão de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e outras substâncias poluentes. Uma grande parte destas substâncias é emitida por veículos automotores. No Brasil, o transporte de cargas rodoviário, que é majoritariamente realizado por veículos movidos a diesel, é um dos principais responsáveis por essas emissões.

Diante desse cenário, é possível notar que em algumas partes do mundo (como na Alemanha, por exemplo), os governos já têm adotado algumas normas técnicas e reguladoras que restringem a emissão de poluentes pelos veículos. Em solo brasileiro, embora o país esteja relativamente atrasado em políticas ambientais quando comparado com nações europeias, já existem normas vigentes que visam exercer um controle rigoroso sobre as emissões. Um exemplo é o PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores), que em sua fase P-8, vigente desde 1º de janeiro de 2022, estabeleceu limites mais rígidos para a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP) em veículos pesados a diesel. Todavia, é necessário ter em mente que a maior parte dos problemas relacionados aos poluentes automotivos está ligada ao tipo de combustível utilizado. Os combustíveis fósseis em geral, como o óleo diesel e a gasolina, liberam um alto teor

de dióxido de carbono durante sua queima, razão pela qual a mudança do paradigma de combustíveis é necessária. Neste sentido, os combustíveis gasosos têm sido avaliados como alternativas menos poluentes, dentre eles, o Gás Natural (GN).

De acordo com Park, Shim e Bae (2019), durante as últimas décadas, o gás natural passou a ser popularizado como uma alternativa economicamente viável à gasolina, sobretudo, em motores de ignição por centelha. Entretanto, em motores que utilizam o diesel como combustível, a situação se torna mais complexa, pois há a exigência de uma elevada temperatura de ignição. Desta maneira, uma das principais alternativas para o emprego do gás natural em motores a diesel é a conversão para o modo dual fuel. Nesse sistema, o motor opera com a combustão simultânea de dois combustíveis de propriedades diferentes, como um combustível líquido e outro gasoso (PARK, SHIM E BAE, 2019). Esta adaptação é tecnicamente atrativa, pois permite reduzir tanto os custos operacionais quanto a emissão de poluentes, sem exigir grandes modificações estruturais no motor.

Para que um motor a diesel convencional possa ser transformado em um motor dual fuel, é necessária a aplicação de um kit dual fuel que permita a utilização simultânea dos dois combustíveis. Esta alternativa é relativamente barata, já que não necessita de alterações estruturais no bloco do motor. A Universidade Federal da Paraíba (UFPB) tem uma linha de pesquisa consolidada na conversão de motores para o modo dual. Os primeiros estudos, focados em um motor de injeção eletrônica, foram iniciados por Santos (2015). Posteriormente, a partir de 2018, o Laboratório de Inovação e Conversão Térmica (LI) da UFPB passou a desenvolver uma frente de pesquisa focada em kits de baixo custo para motores de injeção mecânica, objetivando atender às demandas do mercado por soluções mais baratas e práticas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Com base no exposto, o objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre a abordagem de conversão industrial para dual fuel, e as metodologias de adaptação desenvolvidas no Centro de Tecnologia da UFPB.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, este trabalho foi estruturado a partir de etapas sequenciais. Primeiramente, busca-se descrever os princípios de funcionamento de

um motor a diesel e as características termodinâmicas da operação em modo dual fuel. Em seguida, o estudo detalha a tecnologia de adaptação industrial utilizando Injeção Direta de Alta Pressão (HPDI) e as metodologias de adaptação desenvolvidas na UFPB. O trabalho finaliza com uma análise comparativa entre as duas abordagens, focando nos critérios técnico, econômico e ambiental para avaliar seus respectivos potenciais.

2 MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR A DIESEL

De maneira geral, exceto por alguns detalhes, o motor a diesel funciona de forma bastante similar ao motor a gasolina. No motor a diesel, assim como no motor à gasolina, o principal mecanismo de geração de trabalho é a combustão do diesel, cuja energia liberada é convertida em trabalho mecânico e transmitida para os eixos do veículo.

Para converter a energia em trabalho, o motor a diesel utiliza o movimento alternado de um pistão, que funciona no interior do cilindro, transformando o movimento linear do pistão em movimento rotativo através do sistema biela-manivela (BRUNETTI, 2012). Este processo de conversão da energia em trabalho ocorre em quatro etapas: (1) a fase de admissão; (2) compressão; (3) combustão e (4) exaustão, razão pela qual são conhecidos como motores de “quatro tempos”.

Tratando-se especificamente dos motores aspirados, sem sistemas de sobrealimentação, o processo tem início com a abertura da válvula de admissão, no qual a descida do pistão cria uma diferença de pressão que suga o ar para dentro do cilindro, conforme exemplifica a figura 1:

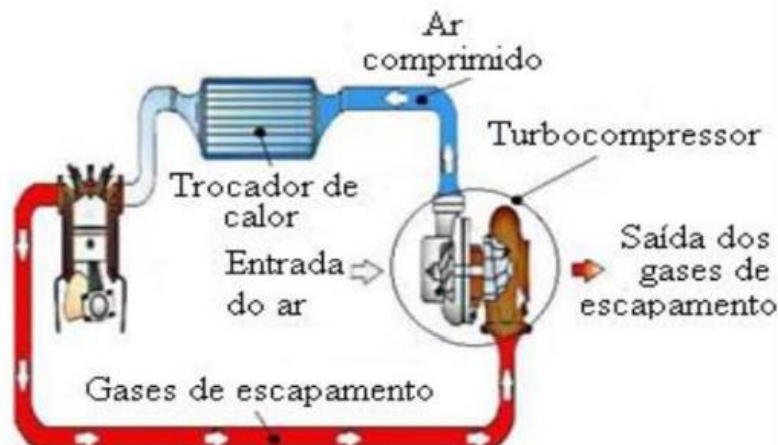
Figura 1: Primeira etapa do ciclo diesel – Admissão de ar no cilindro



Fonte: (DUARTE FILHO, 2018)

Nos motores que possuem sistemas de sobrealimentação (como um turbocompressor ou um supercharger), o ar passa pelo sistema, é comprimido pelo compressor e, em sistemas com intercooler, é resfriado antes de ser admitido no interior dos cilindros no momento em que as válvulas de admissão se abrem.

Figura 2: Sistema de motor a diesel alimentado por turbina



Fonte: (DUARTE FILHO, 2018)

Após a fase de admissão, o movimento do pistão inicia a fase de compressão, conforme indica a figura 3:

Figura 3: Segunda etapa do ciclo diesel – Compressão do ar



Fonte: (DUARTE FILHO, 2018)

O processo de compressão aquece o ar, e é por esta razão que nos motores a diesel há a compressão do ar de maneira isolada, pois caso a mistura ar-combustível seja comprimida em conjunto, pode ocorrer uma autoignição ainda durante o processo de compressão.

Quando terminada a compressão do ar, o sistema dá início ao processo de

combustão. Após o processo de compressão, o ar atinge uma temperatura que supera a de ignição do combustível. Neste momento, o bico injetor pulveriza o combustível na câmara, iniciando a combustão. Após a combustão, o rápido aumento de pressão dos gases na câmara empurra o pistão para baixo, convertendo a energia gerada da combustão em trabalho mecânico (BRUNETTI, 2012). Este processo é exemplificado através da figura 4:

Figura 4: Terceira etapa do ciclo diesel – Combustão e expansão



Fonte: (DUARTE FILHO, 2018)

Terminado o processo de combustão, a válvula de escape se abre. No caso de motores sobrealimentados, os gases são direcionados para a turbina, enquanto nos motores sem sobrealimentação, são descartados pelo escapamento (BRUNETTI, 2012). Ao final, o sistema retorna ao primeiro tempo e o ciclo se reinicia com a admissão de ar, mostrado na figura 5:

Figura 5: Quarta etapa do ciclo diesel – Exaustão dos gases



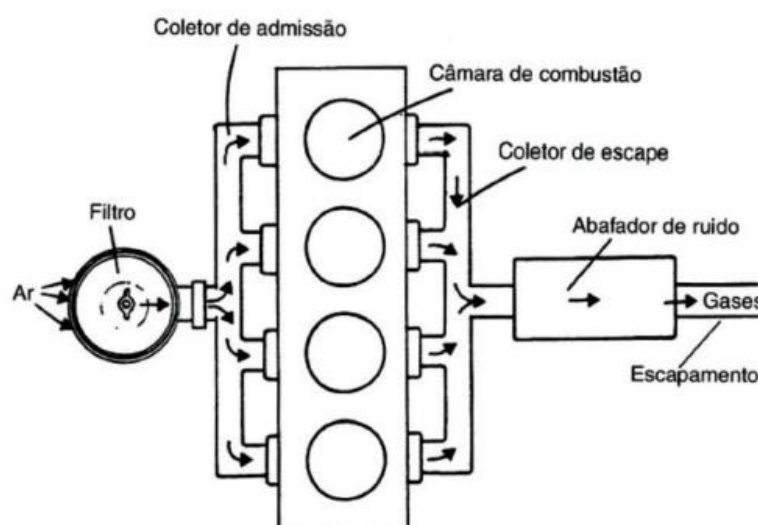
Fonte: (DUARTE FILHO, 2018)

2.1 SISTEMA DE ADMISSÃO

Nos motores mais tradicionais, o sistema de admissão é geralmente composto pelo filtro de ar e pelo coletor de admissão, responsável por direcionar o ar para o interior dos cilindros, onde será comprimido. Segundo Brunetti (2012), a finalidade do filtro de ar é garantir que o ar admitido esteja isento de impurezas, evitando não apenas o desgaste das peças internas do motor como assegurando uma maior qualidade da mistura ar-combustível. Segundo Brunetti (2012), é comum que o sistema de filtro de ar conte com subsistemas auxiliares para aumentar a eficiência da filtração, especialmente em condições severas de uso. Um exemplo prático é a combinação de um pré-filtro do tipo ciclone com um elemento filtrante principal, geralmente de papel. Nesse arranjo, o pré-filtro utiliza a força centrífuga para remover as partículas maiores de poeira antes que o ar atinja o filtro principal. Outro sistema robusto é o filtro de ar banhado a óleo, no qual as impurezas são retidas ao entrarem em contato com uma película de óleo, sendo também frequentemente combinado com um filtro seco para capturar as partículas mais finas.

Nos motores de ciclo diesel, o sistema de admissão pode ser classificado em duas configurações principais: aspiração natural ou sobrealimentação. No sistema de aspiração natural, o ar é admitido nos cilindros unicamente pela depressão gerada pelo movimento descendente do pistão. O esquema de funcionamento deste sistema é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Sistema de admissão por aspiração natural em um motor a diesel

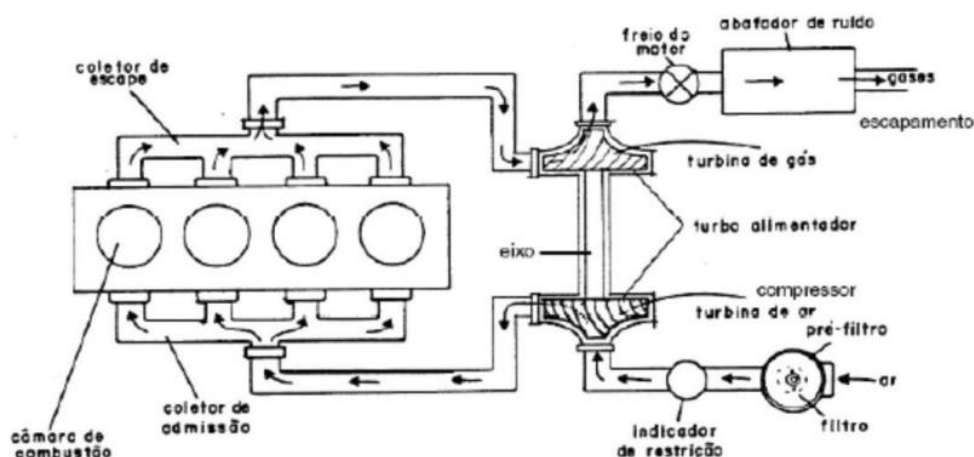


Fonte: (MWM INTERNATIONAL, 2009)

Já nos sistemas sobrealimentados, a admissão de ar é forçada por um

turbocompressor. Este dispositivo aproveita a energia contida nos gases de exaustão para acionar uma turbina, que por sua vez movimenta um compressor. O compressor, então, comprime o ar da admissão a uma pressão superior à atmosférica antes de direcioná-lo aos cilindros. Essa elevação na pressão de admissão aumenta a massa de ar admitida, o que permite a queima de uma maior quantidade de combustível e, conseqüentemente, resulta em ganhos significativos de potência e torque. Este mecanismo é apresentado na Figura 7:

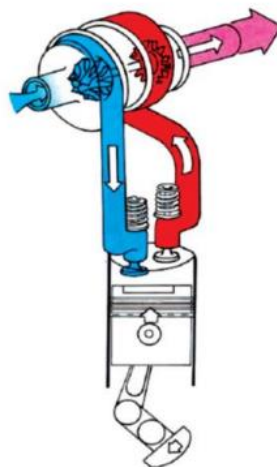
Figura 7 – Sistema de admissão sobrealimentado por turbina



Fonte: (MWM INTERNATIONAL, 2009)

Nos sistemas sobrealimentados, a densidade do ar de admissão é um parâmetro fundamental para a otimização da potência. O processo de compressão no turbocompressor, embora eleve a pressão, também aumenta a temperatura do ar, o que, por si só, reduziria sua densidade. Conforme os princípios termodinâmicos, e como afirma Brunetti (2012), a densidade do ar é inversamente proporcional à sua temperatura. Portanto, para maximizar a massa de ar admitida, é crucial que o ar seja o mais denso possível. Uma maior massa de ar admitida no cilindro significa uma maior disponibilidade de comburente, possibilitando a queima de uma quantidade superior de combustível e, conseqüentemente, resultando em um ganho expressivo de potência e torque.

Figura 8: Fluxo de gases em um sistema sobrealimentado

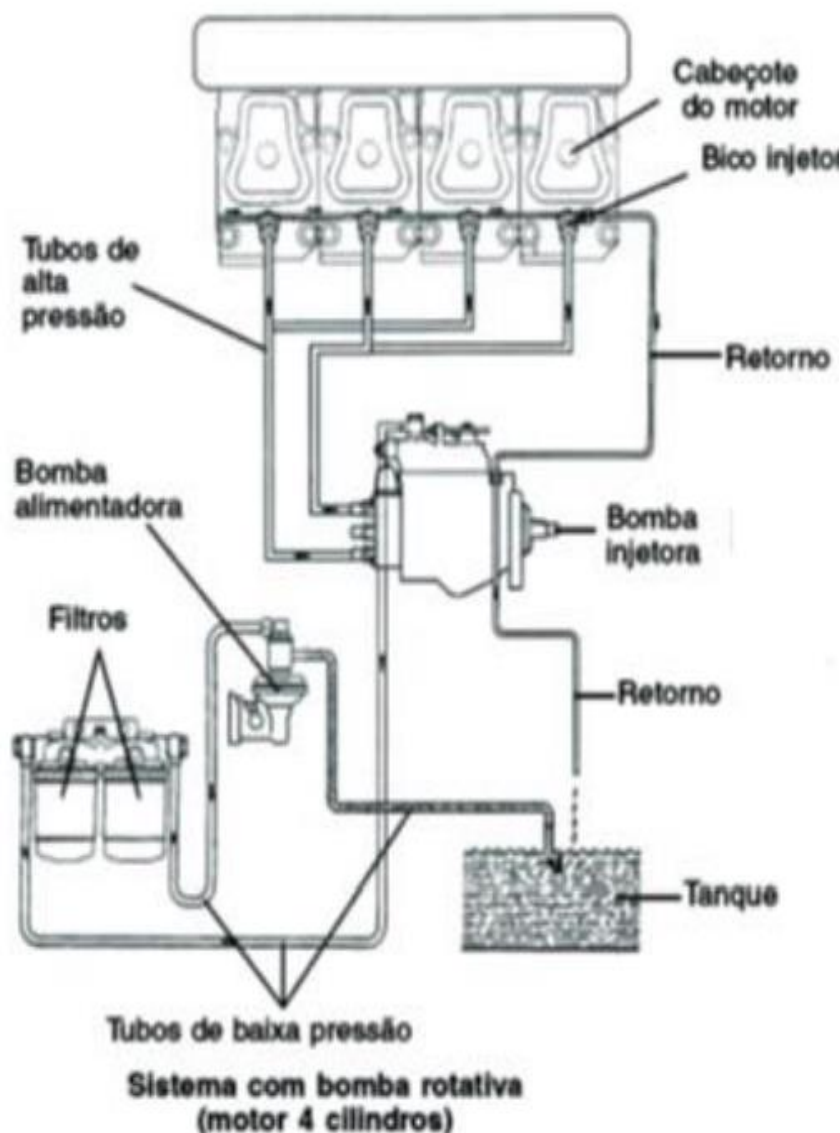


Fonte: (DUARTE FILHO, 2018)

2.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Conforme foi explicado anteriormente, a combustão é gerada pela mistura ar-combustível. Assim, o sistema de alimentação de combustível é tão importante quanto o sistema de admissão. No sistema de alimentação, os componentes devem dosar o combustível na quantidade e pressão corretas. Os motores a diesel possuem reservatório de combustível, bomba alimentadora, filtros, bomba injetora e bicos injetores. A figura 9 exemplifica um sistema de combustível em um motor a diesel:

Figura 9: Componentes do sistema de alimentação de combustível em um motor a diesel



Fonte: (MERCEDES BENZ, 2006)

A bomba alimentadora tem a função de puxar o combustível do reservatório, fazendo com que ele passe pelos filtros antes de ser direcionado à bomba injetora. A bomba injetora, por sua vez, é responsável pela compressão do combustível, que será injetado pelos bicos injetores no final da etapa de compressão do ar. Para que o motor funcione de maneira perfeita, a bomba envia uma quantidade de combustível maior que a necessária, e o combustível sobressalente é redirecionado ao reservatório através das tubulações de retorno (BRUNETTI, 2012).

2.3 PRINCÍPIOS DA OPERAÇÃO DUAL FUEL EM MOTORES DIESEL

Conforme o próprio nome já sugere, os motores diesel dual fuel trabalham através do consumo simultâneo de dois tipos de combustíveis, que por conta do

próprio modo de funcionamento do motor, costuma ser um combustível em estado líquido e outro combustível em estado gasoso, que geralmente é de baixo custo (FIGUEIRAL, 2016).

Assim, nos motores diesel dual, a combustão ocorre pela mistura de dois combustíveis com propriedades termodinâmicas distintas. Alves (2018) descreve o processo da seguinte maneira: a operação dual depende da combinação de um combustível com alto número de cetano (como o diesel), utilizado principalmente em baixas cargas para garantir a ignição, e outro com alto número de octanas (como o gás natural), que atua como combustível principal em altas cargas.

No modo dual fuel, o combustível gasoso, funciona como combustível primário, fornecendo a maior parte da energia, enquanto o óleo diesel atua como combustível secundário, sendo sua proporção ajustada conforme a demanda de trabalho do motor (SANTOS et al., 2016).

Em sistemas de conversão convencionais, a proporção de substituição do óleo diesel pelo gás natural varia tipicamente na faixa de 30% a 80% em volume, dependendo diretamente da carga imposta ao motor (CARVALHO, 2014). A conversão para o modo dual fuel é motivada por fatores econômicos e ambientais, não visando, necessariamente, o ganho de potência, embora possa levar a um aumento da eficiência térmica em determinadas faixas de operação (CARVALHO, 2014). O gás natural é considerado um combustível de queima mais limpa, o que contribui para a redução de emissões (TAVARES DE LUNA, 2025). As principais vantagens e desvantagens dessa tecnologia são detalhadas na seção 2.6.

Contudo, um dos principais desafios técnicos da operação dual fuel ocorre em regimes de baixa carga. Nessas condições, a menor quantidade de combustível resulta em uma mistura ar-gás excessivamente pobre e, conseqüentemente, em temperaturas de combustão mais baixas. Conforme detalhado por Tavares de Luna (2025), a baixa temperatura e a baixa reatividade dessa mistura pobre dificultam a oxidação completa do gás natural. Este fenômeno de combustão incompleta resulta em um aumento acentuado das emissões de monóxido de carbono (CO) e de hidrocarbonetos não queimados (HC), sendo este um dos principais desafios da operação com sistema de injeção indireta de gás em baixa potência.

Papagiannakis et al. (2016) apresentam as principais vantagens da conversão, que incluem menor custo de manutenção, potência quase similar ao motor original em altas rotações, flexibilidade no abastecimento e maior autonomia do veículo. Os

autores destacam que uma conversão integral do motor para o gás natural acaba gerando mais custos de manutenção do que a operação em modo dual, reforçando o benefício econômico da abordagem.

Em termos ecológicos, já é de conhecimento público que o Brasil e outros países, que aderem ao protocolo da Organização das Nações Unidas (ONU), possui o objetivo de reduzir a poluição e a emissão de gases tóxicos na atmosfera. No Brasil, segundo a Hivecloud (2022), o transporte rodoviário representa 61% de toda a movimentação de cargas. Essa predominância ocorre porque o país depende majoritariamente de caminhões a diesel, já que possui malha ferroviária limitada e pouco utiliza o transporte aéreo. Por conta disso, mais do que os outros países, o Brasil possui um maior trabalho para reduzir a poluição, dada a grande quantidade de veículos a diesel em território nacional e a sua importância para a logística do país. Tendo isso em mente, a adoção do GN como combustível primário na frota de caminhões rodoviários é um importante marco ecológico.

Em contraste, os sistemas industriais de injeção direta de alta pressão (HPDI) apresentam um comportamento de emissões fundamentalmente diferente. Por injetar o gás diretamente na câmara de combustão, o HPDI evita a fuga de combustível não queimado durante a sobreposição de válvulas. Essa técnica, aliada ao controle preciso da combustão, resulta em emissões de HC extremamente baixas, mitigando um dos principais pontos fracos dos sistemas de injeção indireta (LI et al., 2020).

Apesar de o GN possuir um baixo índice de cetano, o que o torna resistente à ignição, a tecnologia dual supera essa característica utilizando o diesel como piloto. Em compensação, a alteração no motor não é tão economicamente custosa, já que como foi afirmado anteriormente, ela não necessita de grandes modificações estruturais.

A mistura ar-gás, quando comprimida, permanece abaixo de sua condição de autoignição, sendo inflamada pelo jato piloto de diesel (PAPAGIANNAKIS et al., 2016).

Tratando-se das características termoquímicas do GN, Chen et al. (2020) explicam que o gás natural possui um número de octanas comparativamente maior ao número do diesel, tornando-o resistente à combustão, fator que gera o aumento do seu tempo de ignição, sendo algo vantajoso quando se trata do consumo total de combustível. Todavia, a alta temperatura de autoignição demanda uma fonte de ignição, momento onde o diesel é utilizado.

Enquanto a temperatura de autoignição do GN é algo em torno de 650 °C, a do óleo diesel é entre 180 °C e 220 °C. Assim, para que a mistura ar-gás entre em combustão, ela é inflamada por uma pequena quantidade de óleo diesel injetada no cilindro ao invés da vela de ignição. Compreendendo-se essa dinâmica térmica do ar-gás, compreende-se por que o motor dual ainda é relativamente poluente quando opera em baixas cargas (WOODYARD, 2009).

Segundo Woodyard (2009), a quantidade de ar-gás exigida em baixas cargas é naturalmente menor do que aquela que é exigida em altas cargas, fator que torna necessário uma maior quantidade de óleo diesel para que a mistura entre em combustão, gerando uma maior emissão de fuligens. Todavia, quando operando em alta carga, a queima da mistura ar-gás pelo diesel piloto libera uma grande quantidade de calor, garantindo uma combustão mais completa e uma redução significativa na emissão de CO (CARVALHO, 2014).

2.4 MÉTODOS DE INJEÇÃO DE GÁS EM MOTORES DUAL FUEL

A introdução do gás natural em motores de ciclo diesel pode ser realizada por meio de diferentes tecnologias, que variam significativamente em complexidade, custo e eficiência. As duas abordagens principais são a injeção de gás no coletor de admissão, conhecida como fumigação, e a injeção direta de alta pressão (HPDI), sendo cada uma adequada a um tipo específico de conversão e motor.

2.4.1 Injeção indireta no coletor de admissão

A injeção no coletor de admissão, também conhecida como fumigação, é o método característico das adaptações desenvolvidas no Centro de Tecnologia da UFPB. A técnica consiste em introduzir o gás natural em baixa pressão diretamente no coletor de admissão, onde ele se mistura com o ar antes de entrar no cilindro, formando uma pré-mistura ar-gás homogênea que é aspirada para a câmara de combustão durante o tempo de admissão (TAVARES DE LUNA, 2025). Para essa finalidade, utiliza-se um dispositivo misturador, como o modelo "boca de fogão", instalado entre o filtro de ar e o coletor (MACEDO, 2018). A principal vantagem dessa abordagem é a simplicidade da conversão, que não exige modificações estruturais profundas no motor, tornando-a economicamente viável para a adaptação da frota existente. No entanto, a técnica de fumigação apresenta desafios técnicos, como o aumento das emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de

carbono (CO), especialmente em regimes de baixa carga (TAVARES DE LUNA, 2025).

2.4.2 Injeção direta de alta pressão (HPDI)

A tecnologia industrial, conhecida como HPDI (High Pressure Direct Injection), utiliza um método de injeção direta. Neste sistema, o gás natural é injetado sob alta pressão, geralmente acima de 300 bar, diretamente na câmara de combustão no final do tempo de compressão (LI et al., 2020). Esse processo é realizado por meio de um injetor duplo com agulhas concêntricas, que permite o controle independente da injeção do diesel e do gás.

A injeção direta do gás evita a fuga de combustível não queimado durante o período de sobreposição de válvulas, resultando em emissões de hidrocarbonetos (HC) extremamente baixas (LI et al., 2020). Essa tecnologia possibilita um desempenho equivalente ou até superior ao do motor diesel original. Mumford, Goudie e Saunders (2017) mencionam um estudo de McTaggart-Cowan et al. que reportou ganhos de torque de até 20%, melhoria de 7% de aumento de eficiência, ou redução de 90% no MP ao dobrar a pressão do trilho de combustível. Por ser uma tecnologia de alta complexidade e custo, é mais adequada para motores novos de fábrica, especialmente em aplicações pesadas.

2.5 COMBUSTÍVEIS GASOSOS E LÍQUIDOS: DIFERENÇAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS

Embora o gás natural seja uma opção mais sustentável, a matriz energética para automóveis ainda é dominada por combustíveis como a gasolina e o óleo diesel. Todos são combustíveis fósseis e possuem reservas finitas. Quando queimados, esses combustíveis lançam na atmosfera uma vasta quantidade de poluentes, como dióxido de carbono e outras substâncias tóxicas, que contribuem para o aquecimento global e outros impactos ambientais negativos.

Diante desse cenário, a comunidade científica e acadêmica tem buscado alternativas menos poluentes para a geração de energia, cogitando a utilização da energia nuclear e, sobretudo, do GN para a geração de energia em carros. Entretanto, a utilização de combustíveis não tradicionais não é a única solução viável, pois de acordo com Figueiral (2016), outros tipos de métodos também têm sido utilizados, como a configuração de motores diferentes (os motores híbridos, por exemplo, que

embora trabalhem com combustíveis fósseis, buscam balancear a utilização junto com a fonte de energia elétrica), além da utilização de outros dispositivos que visam diminuir a quantidade da emissão de substâncias poluentes.

Entretanto, tratando-se estritamente da utilização de combustíveis gasosos, Maurya e Mishra (2017) afirmam que o GN é pensado atualmente como um dos principais recursos alternativos de geração de energia, estando, por exemplo, ao lado dos carros elétricos e híbridos. A preferência pelo GN se deve não apenas por ser menos poluente, mas também por suas vastas reservas, consideradas mais abundantes que as de petróleo.

A própria natureza gasosa do GN traz vantagens para o funcionamento do motor. Por não ser líquido, sua mistura com o ar no processo de admissão tende a ser mais rápida e homogênea, o que favorece uma combustão mais completa e eficiente.

2.5.1 Características do óleo diesel

Segundo Bertuol (2017), o óleo diesel é um combustível fóssil derivado do petróleo. Acerca de sua composição química, o óleo diesel é composto por cadeias de hidrocarbonetos de 8 a 16 carbonos, possuindo também, em menor quantidade, outras substâncias como nitrogênio, oxigênio e enxofre.

O óleo diesel é utilizado principalmente em veículos de grande porte, como caminhões, embarcações, ônibus, locomotivas, tratores, dentre outros. De acordo com a Petrobrás (2019), o óleo diesel é classificado de duas formas principais, conforme detalhado a seguir:

Quanto à adição de biodiesel, classifica-se em:

- **Óleo Diesel A:** Obtido diretamente do refino do petróleo, sem adição de biodiesel.
- **Óleo Diesel B:** Resultante da mistura de biodiesel ao Óleo Diesel A.

Quanto à composição química, as principais categorias são:

- **Óleo Diesel S10:** Com baixo teor de enxofre (máximo de 10 mg/kg), alto número de cetano (mínimo 48) e massa específica entre 820–850 kg/m³. É destinado a veículos que atendem à fase P7 do PROCONVE, proporcionando melhor combustão e partida a frio.
- **Óleo Diesel S500:** Possui teor de enxofre máximo de 500 mg/kg.

- **Óleo Diesel S1800:** Com teor máximo de 1800 mg/kg de enxofre, é utilizado em ferrovias, mineração e geração de energia em termelétricas.
- **Óleo Diesel Marítimo:** Destinado a embarcações, possui ponto de fulgor acima de 60 °C por razões de segurança.

2.5.2 Características do gás natural

O GN, em sua composição química, é formado por uma mistura de vários hidrocarbonetos, que, nas condições de temperatura e pressão ambientes, se apresenta em estado gasoso (ANP, 2018). Alves (2018) afirma que o GN é, de um certo modo, uma parte volátil do petróleo quando em estado bruto, ocupando em altas pressões as rochas porosas do petróleo acima da zona do combustível líquido. Assim, o GN é geralmente encontrado em campos de gás de petróleo, presente em rochas porosas que o armazenam. Portanto, o GN também é um combustível fóssil, sendo um fragmento gasoso do petróleo bruto.

Todavia, embora o GN possua a mesma origem do óleo diesel e da gasolina, ele diverge quimicamente dos outros derivados de petróleo, pois sua composição é majoritariamente de hidrocarbonetos mais simples (metano), que se encontra em estado mais abundante nele do que nos outros combustíveis derivados do petróleo, gerando assim uma combustão menos poluente (ALVES, 2018).

Abdelaal e Hegab (2012) apontam que a diferença de emissão de CO entre o GN e os outros combustíveis derivados do petróleo é de cerca de 50%, além de produzir uma quantidade quase nula de fumaça. Por conta de sua temperatura de autoignição ser mais alta do que os demais combustíveis, além de sua combustão lenta, tornam-no uma opção viável para a combustão dual.

Papagiannakis et al. (2016), acerca das características do GN, destacam a entalpia elevada por unidade de massa, que por conta da alta taxa de octanagem, permite que o motor opere em uma taxa de compressão mais alta do que quando se utiliza da gasolina e do óleo diesel, sendo uma opção mais viável para motores de ignição por compressão.

Fora essas características, Hegab et al. (2017) ressaltam que o GN também traz benefícios para a parte estrutural do motor, já que ele efetivamente reduz a sua manutenção, pois prolonga a vida útil de componentes como os anéis do pistão e as velas de ignição. Segundo os autores, esse prolongamento se dá por conta de o GN não diluir o óleo lubrificante, já que eles não se misturam como no caso da gasolina.

Dentre as outras características que compõem o que é o GN, Hegab et al. (2017) também acrescentam características como sua baixa densidade e alta inflamabilidade, que resultam em uma rápida dispersão em caso de vazamento, o que naturalmente diminui o risco de acidentes relacionados à incêndio por conta de vazamento, além do fato de que o GN não possui a mesma toxicidade da gasolina nem outras características cancerígenas.

Assim, por conta de todo esse conglomerado de características, o GN (pelo menos do ponto de vista da saúde) revela ser menos perigoso e danoso ao ser humano do que os outros tipos de combustíveis.

Tratando-se especificamente da composição química do gás natural, Martins (2006) aponta que, embora o GN tenda a possuir um núcleo semelhante independente destes fatores, ele ainda pode variar segundo o local de extração, tipo de extração e tipo de transporte. Em média, sua composição é de 70 a 90% de metano (CH_4), com quantidades menores de outros gases como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), dióxido de carbono (CO_2), butano (C_4H_{10}), nitrogênio (N_2), ácido sulfídrico (H_2S), ácido sulfúrico (H_2SO_4), água (H_2O) e outras impurezas a depender do local de extração (SILVA, 2016).

2.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA CONVERSÃO DO MOTOR CONVENCIONAL PARA O MOTOR DUAL FUEL

A conversão de motores para a tecnologia dual fuel oferece as seguintes vantagens operacionais e de manutenção (COMINO, 2013):

- **Redução de custos operacionais:** A substituição parcial do diesel pelo gás natural, um combustível de menor custo, resulta em uma redução direta nos gastos operacionais.
- **Redução de emissões:** A queima mais limpa do GN, devido à sua menor relação carbono/hidrogênio, diminui significativamente as emissões de MP e CO_2 .
- **Simplicidade de adaptação:** A conversão para dual fuel requer modificações mínimas na estrutura original do motor, já que componentes como o injetor de gás podem ser instalados no coletor de admissão de ar e o controle pode ser gerenciado por um dispositivo simples.
- **Flexibilidade operacional:** Os sistemas de combustível são independentes, permitindo que o motor opere tanto no modo dual fuel quanto exclusivamente

com diesel.

- **Alta eficiência energética:** A manutenção da alta taxa de compressão original do motor a diesel resulta em maior eficiência no aproveitamento da energia dos combustíveis.
- **Menor desgaste:** O diesel atua como lubrificante para válvulas e anéis, enquanto o gás não contamina o óleo lubrificante, reduzindo o desgaste e aumentando os intervalos de manutenção.
- **Segurança operacional:** Em caso de falha no sistema de gás, o motor continua a funcionar apenas com o diesel, garantindo a continuidade da operação.

Contudo, a tecnologia também apresenta desvantagens a serem consideradas (COMINO, 2013):

- **Dependência do diesel:** O motor dual fuel necessita de diesel para a ignição, o que significa que a operação não é possível se o diesel acabar.
- **Maiores emissões de CO:** Comparado a um motor que opera exclusivamente com diesel, o modo dual pode apresentar maiores emissões de Monóxido de Carbono (CO).
- **Maior complexidade de manutenção:** A presença de dois sistemas de combustível distintos aumenta a complexidade geral e, consequentemente, os custos de manutenção.

Apesar das vantagens, a adoção de motores dual fuel deve considerar cuidadosamente as condições de uso e a aplicação específica, ponderando benefícios e limitações.

A Tabela 1 apresenta os custos de conversão, manutenção e operação do motor dual fuel em comparação ao convencional. Parte desses custos foi extraída do trabalho de Macedo (2018), portanto, a maior parte dos valores é estimada. Custos relativos à mão de obra, peças e outros elementos podem ter se alterado desde a publicação do estudo original. Apenas os valores de combustível foram atualizados para os preços médios de 2025.

Tabela 1: Comparação de custos entre o motor a diesel convencional e o motor dual fuel

Custo e durabilidade	Motor diesel convencional	Motor dual fuel	Detalhes específicos
Custo de conversão	R\$ 0	R\$ 10.000 - R\$ 25.000	Estimativa de custos com mão de obra, sistema de injeção de GNV, controladores eletrônicos e ajustes mecânicos.
Custo de revisão (anual)	Entre R\$ 4.000 e R\$ 6.000	Entre R\$ 6.000 e 9.000	O custo é maior devido à maior complexidade do sistema, mas é compensado pela economia de combustível na operação.
Custo de operação (combustível), valores de 2025	R\$ 6,00/L	GNV R\$ 4,70/m ³ + Diesel R\$ 6,00/L	A economia pode chegar a 48,77% em média carga.
Vida útil do motor	15.000 - 20.000 horas de operação	20.000 - 25.000 horas de operação	A queima mais limpa do GNV reduz a formação de resíduos e a contaminação do óleo lubrificante.

Fonte: (Adaptado de Macedo, 2018)

Tavares de Luna (2025) traz informações mais detalhadas acerca dos custos comparados, trazendo a variável das diferentes faixas de potência em que os motores costumam trabalhar.

Em relação ao consumo específico de combustível, o estudo confirmou que, quando o motor opera em baixa carga, o consumo por unidade de energia produzida é maior no modo dual fuel em comparação ao motor a diesel. No entanto, a partir de uma potência de 50 kWe, essa situação se inverte, e o motor dual fuel passa a ser mais eficiente, consumindo menos combustível específico (TAVARES DE LUNA, 2025).

Quanto à substituição de diesel por gás natural, a pesquisa demonstrou que, à medida que a carga do motor aumenta, também cresce o percentual de diesel substituído pelo gás, mostrando o potencial do sistema para reduzir o uso de diesel em cargas elevadas (TAVARES DE LUNA, 2025).

No que diz respeito ao custo operacional, a análise final da tese revelou que a conversão foi economicamente vantajosa em quase todas as potências analisadas. A economia máxima alcançada foi de 53% na potência de 70 kWe, confirmando que o motor dual fuel se torna mais econômico, especialmente em regimes de alta performance (TAVARES DE LUNA, 2025).

Para uma análise aprofundada da eficiência, a tese de Tavares de Luna (2025)

avaliou o motor em diferentes modos de controle. Estes modos foram definidos como dual manual, que utilizava uma válvula manual para o controle do gás, dual automático, que empregava o kit dual fuel com a máxima vazão de gás natural permitida pelo sistema, e duas variações do modo automático denominadas -10% e -20%, que representavam uma redução programada de 10% e 20% na abertura do regulador de fluxo de gás, respectivamente.

A análise da eficiência térmica revelou um comportamento complexo entre esses diferentes modos de controle. Na maior parte da faixa de operação, o motor a diesel se mostrou mais eficiente. Contudo, em potências mais altas (acima de 50 kWe), a operação dual fuel se destacou. Os resultados mostraram que a configuração com maior participação de diesel (-20%) foi a mais eficiente em baixas e médias cargas. Já em altas cargas, a configuração -10% apresentou o melhor desempenho entre todos os modos duais, alcançando uma eficiência máxima de 31,43%. Para efeito de comparação, a maior eficiência registrada para o modo dual manual foi de 29,83%, para o modo dual automático foi de 29,74%, e para o motor a diesel foi de 29,16% (TAVARES DE LUNA, 2025).

Em síntese, a análise dos custos revela um panorama complexo, cuja viabilidade depende diretamente do regime de trabalho do motor. A pesquisa de Macedo (2018) foi pioneira em quantificar a redução nos custos de operação, demonstrando uma economia que variou de 3,49% em baixa carga a 48,77% em média carga.

Em complemento, o trabalho de Tavares de Luna (2025) aprofundou essa análise em um motor mais potente, confirmando que a tecnologia dual fuel mostra seu maior benefício econômico e de eficiência térmica apenas em médias e altas cargas, sendo menos vantajosa em operações de baixa potência. Portanto, a decisão de converter um motor a diesel não é universalmente vantajosa, mas sim uma escolha estratégica que deve ser alinhada ao perfil de uso e à demanda de potência do equipamento.

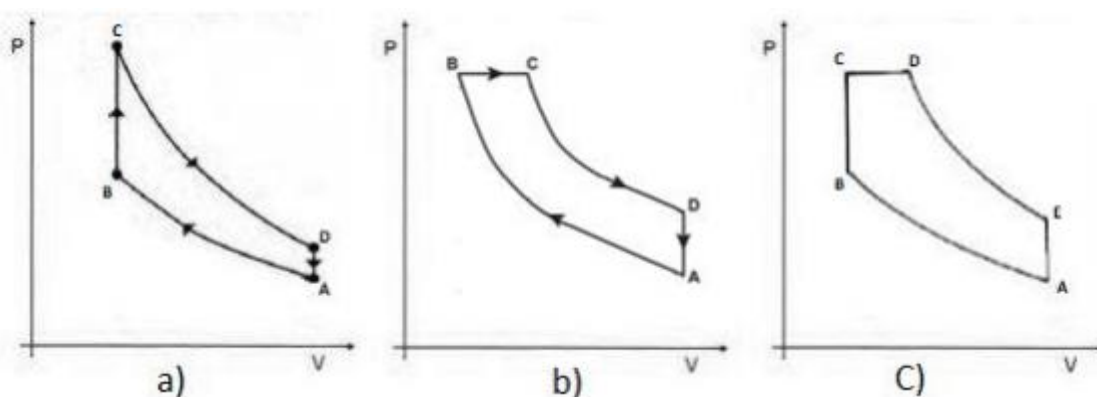
2.7 PROCESSO DE IGNIÇÃO DETALHADO

O processo de ignição em um motor dual fuel é iniciado pela injeção piloto de diesel. Em altas cargas, a quantidade de diesel necessária pode representar apenas 5% a 10% do fluxo total de combustível, o que possibilita taxas de substituição de energia pelo gás natural de até 95%. Estudos conduzidos no LI da UFPB, em um

motor Perkins turboalimentado, validaram este potencial ao alcançar uma taxa de substituição de 97% em alta carga.

Segundo Weaver e Turner (1994), a operação dual fuel com injeção indireta de gás combina características de diferentes ciclos termodinâmicos. A admissão de uma mistura pré-formada de ar e gás assemelha-se funcionalmente ao ciclo Otto, enquanto a ignição por compressão do piloto de diesel é análoga ao ciclo diesel.

Figura 10: Ciclo termodinâmico (a) Otto, (b) Diesel e (c) Dual



Fonte: (WEAVER; TURNER, 1994)

Ao analisar os diagramas de ciclo, Weaver e Turner (1994) apontam que o processo de combustão de um motor dual fuel é, uma união dos processos dos ciclos Otto e Diesel. É importante notar que, embora o motor que opera com dois combustíveis seja chamado de dual fuel, seu ciclo termodinâmico real se aproxima de uma variação do ciclo diesel.

A principal vantagem dessa combinação é a possibilidade de operar com as altas taxas de compressão do ciclo diesel, aproveitando a elevada resistência à detonação do gás natural, sem a necessidade de alterações estruturais no motor. O diesel, com seu alto número de cetano, garante uma ignição eficiente e confiável para a mistura ar-gás.

Contudo, a operação do motor é limitada pela dosagem do combustível gasoso. Conforme detalhado por Figueiral (2016), misturas muito pobres em baixa carga podem levar a falhas de ignição, enquanto misturas ricas em alta carga aumentam o risco de knock. Portanto, um controle preciso da quantidade de gás injetado é essencial para garantir uma operação estável e segura. Esta limitação de potência pela detonação pode ser controlada através da manipulação da proporção da quantidade de GN adicionado à mistura, que deve ser feita em função de uma quantidade fixa de óleo diesel (PAPAGIANNAKIS et al., 2016).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter analítico-comparativo, fundamentada na análise de resultados quantitativos e qualitativos de pesquisas já publicadas na área. O percurso metodológico consistiu na consulta a dois conjuntos de fontes para realizar a comparação entre as tecnologias de conversão dual fuel. Para a análise da adaptação industrial, focada no sistema HPDI, foram utilizados os estudos de Carvalho (2014), Mumford, Goudie e Saunders (2017) e Li et al. (2020).

Em contrapartida, para detalhar as metodologias desenvolvidas no Centro de Tecnologia da UFPB, a pesquisa se baseou nos trabalhos de Santos (2015), Rocha (2020), Macedo (2018), Duarte Filho (2018) e Tavares de Luna (2025). A partir da análise desses estudos, realizou-se uma comparação dos processos, focando nas diferenças, vantagens e desvantagens de cada abordagem.

Adicionalmente, a fundamentação teórica sobre os princípios de funcionamento dos motores, propriedades dos combustíveis e dinâmica da combustão dual fuel foi enriquecida com as contribuições de Weaver e Turner (1994), Papagiannakis et al. (2016) e Figueiral (2016). A partir da análise integrada desses estudos, realizou-se uma comparação detalhada dos processos, focando nas diferenças, vantagens e desvantagens de cada abordagem.

A partir da análise integrada desses estudos, foi realizada uma comparação detalhada dos processos. Essa análise foi guiada por critérios técnicos e econômicos específicos para permitir uma avaliação aprofundada das duas abordagens. A comparação levou em conta o conceito de projeto, o método de injeção de gás, o desempenho e a eficiência energética em diversas faixas de operação. Além disso, a análise também abordou o impacto econômico de cada sistema, considerando os custos de conversão e operacionais, e o perfil de emissões de poluentes. Por fim, a análise avaliou a aplicabilidade de cada tecnologia, contrastando a solução HPDI, ideal para fabricantes de motores, com as metodologias da UFPB, focadas na adaptação da frota nacional existente.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO

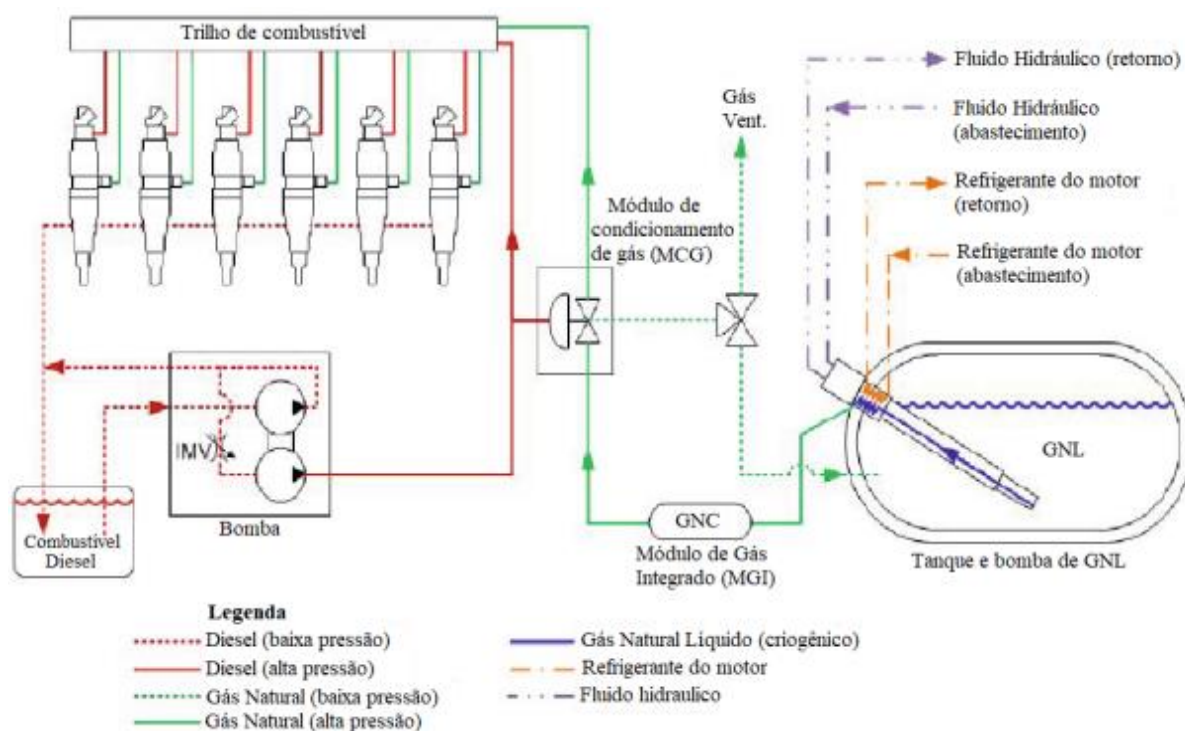
A análise a seguir compara a abordagem industrial para a conversão de motores, representada pelo sistema High Pressure Direct Injection (HPDI), com as metodologias desenvolvidas na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que

focaram em diferentes tipos de motores e tecnologias.

4.1 ADAPTAÇÃO INDUSTRIAL

De acordo com Mumford, Goudie e Saunders (2017), as adaptações industriais de motores a diesel frequentemente utilizam a tecnologia High Pressure Direct Injection (HPDI), ou sistema de injeção direta de alta pressão. Diferente de soluções de baixo custo, o sistema HPDI é uma tecnologia industrial avançada. A primeira geração do sistema era considerada de alto custo, e a segunda geração (HPDI 2.0) foi reprojetaada visando a redução de custos e o aumento da confiabilidade, mas ainda representa um sistema de alta complexidade. A Figura 11 ilustra esquematicamente os componentes do kit:

Figura 11: Diagrama de funcionamento do sistema HPDI



Fonte: (Adaptado de Tavares de Luna (2025) apud Mumford, Goudie e Saunders (2017)).

No sistema HPDI, o Gás Natural Liquefeito (GNL) é armazenado em um tanque criogênico e bombeado sob alta pressão. Depois de bombeado, o GNL passa por um processo de aquecimento, geralmente utilizando o líquido de arrefecimento do próprio motor, para retornar ao estado gasoso antes de ser enviado ao Módulo de Condicionamento de Gás (MCG). Este módulo regula a pressão do gás, mantendo-a ligeiramente abaixo da pressão do diesel no trilho comum (Common Rail).

Conforme descrito por Li et al. (2020), o diesel tem um papel duplo fundamental no sistema: ele não atua apenas como o combustível piloto necessário para iniciar a ignição, mas também funciona como o fluido hidráulico responsável pelo acionamento da agulha de injeção dentro do injetor duplo. Essa função hidráulica exige um fluxo de retorno contínuo de diesel, que circula do injetor de volta para o circuito de baixa pressão. A peça central do sistema HPDI é o seu injetor duplo, ilustrado na figura 12, que possui agulhas concêntricas para injetar os dois combustíveis de forma independente e direta na câmara de combustão. Essa capacidade de injetar o gás diretamente em alta pressão no final do tempo de compressão é o que diferencia fundamentalmente o HPDI dos sistemas que introduzem o gás no coletor de admissão. Mumford, Goudie e Saunders (2017) destacam a evolução deste componente: o injetor de primeira geração possuía dois atuadores separados, enquanto o de segunda geração utiliza um arranjo de atuador duplo empilhado, semelhante aos já usados em injetores diesel de produção, o que simplifica sua fabricação. A flexibilidade deste injetor permite a aplicação de diversas estratégias de injeção para otimizar o desempenho e as emissões. Li et al. (2020) classificam essas estratégias em cinco tipos comuns: High Pressure Direct Injection (HPDI) com pós-injeção, Homogenous Charge Direct Injection (HCDI), Homogenous Charge Compression Ignition (HCCI), Slightly Premixed Combustion (SPC) e Direct Injection Natural Gas and Diesel Reactivity Combustion (DI-NG).

Figura 12: Injetor duplo do sistema HPDI



Fonte: (Adaptado de Tavares de Luna (2025) apud Ouellette, Goudie e Taggart-Cowan (2016)).

Essas estratégias, detalhadas por Li et al. (2020), são configuradas alterando os tempos e a sequência das injeções. A estratégia HCDI, por exemplo, divide a injeção de gás em duas partes, uma antes e outra após a injeção piloto de diesel. Já na HCCI, todo o gás é injetado antes do diesel, criando uma mistura mais homogênea.

Por fim, na SPC, as injeções de gás e diesel se sobrepõem parcialmente, resultando em uma combustão levemente pré-misturada.

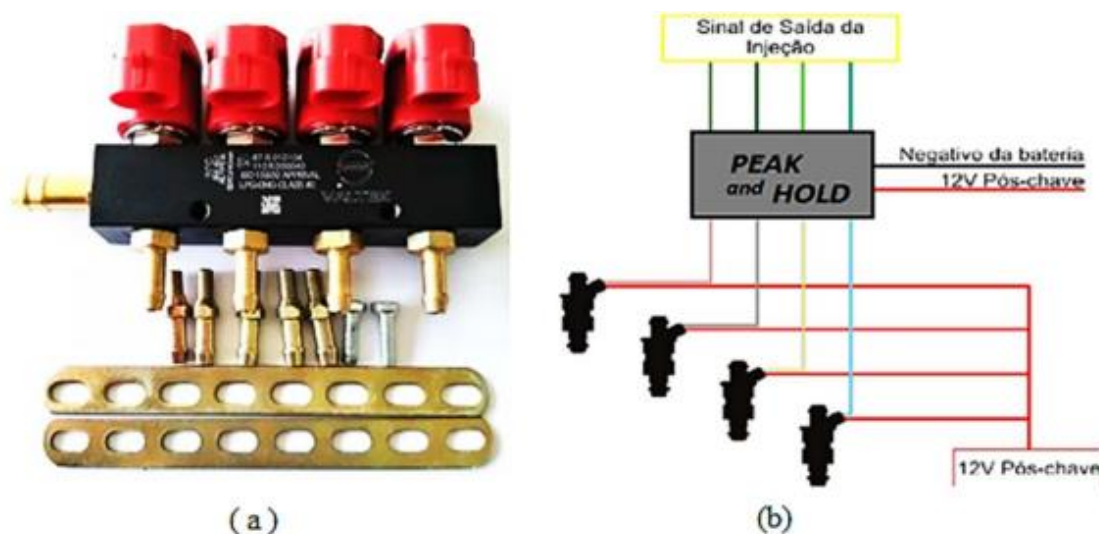
4.2 ADAPTAÇÕES REALIZADAS NA UFPB

Diferente da abordagem industrial, que se concentra em tecnologias de alta complexidade, os trabalhos desenvolvidos na UFPB focaram em duas frentes distintas, adaptando tanto motores com injeção eletrônica quanto com injeção mecânica. As metodologias e os resultados de cada linha de pesquisa são detalhados a seguir.

4.2.1 Abordagem para motores com injeção eletrônica

Numa das linhas de pesquisa, cujo sistema de controle eletrônico foi desenvolvido por Santos (2015) e cujos parâmetros de operação foram posteriormente aprofundados por Rocha (2020), a adaptação foi realizada num motor MWM 4.07 TCE, que já possui um sistema de injeção eletrônica. Diferente do injetor duplo utilizado em adaptações industriais (visto na figura 12), o kit desenvolvido na UFPB emprega um conjunto de quatro eletroválvulas, modelo GI25-65 da Landi Renzo, que introduzem o gás diretamente no coletor de admissão. Segundo Santos (2015), este sistema de injetores é capaz de fornecer até 112 kW de potência, superando a exigência de 103 kW do motor. O gás natural é fornecido aos injetores por um redutor que mantém a pressão na faixa de 2 bar, e o acionamento das eletroválvulas é realizado individualmente por meio de um sistema peak and hold. A Figura 13 ilustra o conjunto de injetores utilizado.

Figura 13: Componentes do sistema de injeção GNV: (a) Conjunto de injetores Landi Renzo GI25-65 e (b) Esquema do sistema de acionamento peak and hold



Fonte: (SANTOS, 2015)

A principal inovação desta abordagem, descrita por Santos (2015), reside no desenvolvimento de um sistema de controle eletrônico próprio. O sistema é baseado em uma placa controladora com um microcontrolador PIC18F4520, projetada especificamente para a operação dual fuel. Sua função é interceptar os sinais da ECU original e, através de um software customizado, comandar os injetores de GNV. Essa arquitetura permite estratégias avançadas, como a inibição da pré-injeção de diesel para substituí-la pela injeção de GNV, sem interferir no funcionamento da ECU original.

Posteriormente, Rocha (2020) aprofundou o estudo dos parâmetros de operação do sistema, focando no avanço de injeção da mistura biodiesel-GN, utilizando um variador de avanço comercial Tury T30, componente utilizado em veículos convertidos para GNV, permitindo efetuar ajustes pré-determinados no avanço da injeção piloto de biodiesel em 6°, 9°, 12° e 15°. A pesquisa revelou um comportamento inesperado. Ao aplicar um avanço na injeção, ao invés de acelerar a combustão, resultou em um aumento do atraso de ignição. Este fenômeno ocorre porque a injeção antecipada acontece em um momento do ciclo onde a temperatura e a pressão do cilindro são menores, dificultando o início da combustão. Essa descoberta demonstra que técnicas de avanço convencionais não se aplicam diretamente ao modo dual, exigindo um mapeamento específico para otimizar a eficiência.

Portanto, enquanto estudos como o de Mumford, Goudie e Saunders (2017) detalham o funcionamento de sistemas industriais avançados como o HPDI, a adaptação desenvolvida na UFPB por Santos (2015) se destaca pela criação de um sistema de controle dedicado, que gerencia todo o processo, desde a aquisição de sinais dos sensores até o acionamento dos injetores de ambos os combustíveis.

4.2.2 Abordagem para motores com injeção mecânica

Em outra frente de pesquisa desenvolvida no Laboratório de Inovação e Conversão Térmica (LI), o foco foi a conversão de motores com bomba injetora mecânica, preservando a robustez e a simplicidade do sistema original. Os trabalhos de Macedo (2018), Duarte Filho (2018) e Tavares de Luna (2025) exploraram diferentes métodos para alcançar esse objetivo, adaptando a técnica para motores aspirados e turboalimentados.

A metodologia base, descrita no estudo de Macedo (2018), foi aplicada a um grupo gerador com motor MWM D229-4 aspirado. Nessa abordagem, a introdução do gás foi realizada utilizando um misturador do tipo "boca de fogão", instalado entre o filtro de ar e o coletor de admissão. A adaptação, mostrada na Figura 15, foi complementada por uma válvula manual para regular o fluxo de gás. Um passo técnico fundamental foi o ajuste mecânico na bomba injetora, que teve seu lacre rompido para permitir a redução do débito de diesel, necessário para maximizar a substituição de combustível. Os ensaios de Macedo (2018) mostraram que, embora a eficiência térmica do motor dual seja inferior à do motor diesel original em toda a faixa de operação, a expressiva diferença de preço entre o gás natural e o diesel compensa essa desvantagem, gerando uma economia de até 48,77%. No entanto, essa viabilidade econômica se manifesta apenas em cargas médias e altas, pois em baixa potência, a queda de eficiência anula o benefício do custo do combustível.

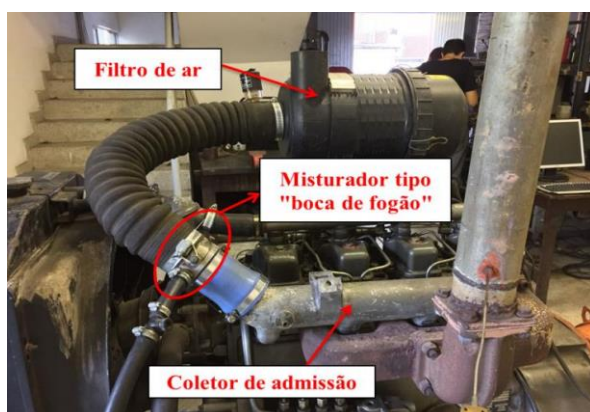
Figura 14: Misturador do tipo 'boca de fogão' desenvolvido no LI



Fonte: (MACEDO, 2018)

Figura 15: Componentes da adaptação mecânica: (a) misturador do tipo "boca de fogão" instalado e (b) válvula manual controladora de fluxo.

a)



b)



Fonte: (MACEDO, 2018)

De forma complementar, a pesquisa de Duarte Filho (2018) avançou na automação do sistema. Ele analisou um grupo gerador de menor porte, o MDG-5000CLE, também de injeção mecânica, e implementou um controle de fluxo de gás acionado por um sistema com Arduino e motor de passo. Essa abordagem permitiu uma dosagem mais automatizada do gás na admissão. Seus testes de desempenho foram os primeiros a mostrar que a conversão só se tornava economicamente viável em cargas mais altas. Em potências abaixo de 3,24 kW, a operação dual fuel chegou a ser mais cara que utilizando exclusivamente diesel.

A pesquisa de Tavares de Luna (2025) validou e expandiu a metodologia para

um motor maior e turboalimentado, um Perkins 1104C-44TAG2. O estudo foi conduzido em múltiplas fases de controle, permitindo uma boa análise comparativa.

Inicialmente, os ensaios foram realizados com um sistema de controle manual do fluxo de gás, confirmando que o desempenho da conversão depende diretamente da carga e estabelecendo um ponto de equilíbrio econômico em aproximadamente 30 kWe, abaixo do qual a operação dual fuel se mostrou mais cara. Acima desse valor, contudo, a conversão não apenas reforçou as conclusões de estudos anteriores, como as de Duarte Filho (2018), mas também demonstrou resultados ainda mais expressivos.

Posteriormente, o trabalho avançou para a implementação de um kit dual fuel com controle automático, desenvolvido no LI. Este sistema foi testado em três configurações distintas para otimizar a dosagem do gás: máxima vazão permitida, e com reduções programadas de 10% e 20% na abertura do regulador de fluxo. O trabalho de Tavares de Luna alcançou uma economia máxima de 53% na potência de 70 kWe e uma impressionante taxa de substituição de diesel de 97% em alta carga, condição na qual a eficiência térmica também superou a do motor original a diesel.

A fim de consolidar e comparar os principais achados das diferentes frentes de pesquisa desenvolvidas na UFPB, o quadro a seguir apresenta uma síntese dos motores utilizados, das metodologias empregadas e dos resultados mais expressivos de cada estudo.

Tabela 2: Comparativo técnico entre as pesquisas desenvolvidas na UFPB

Pesquisa	Motor	Aspiração	Injeção de Diesel	Injeção de GN	Controle de Gás	Custo Operacional	Eficiência Térmica
Santos (2015)	MWM 4.07 TCE	Turbo Intercooler	Eletrônica	Injeção eletrônica multiponto	Sistema eletrônico customizado	X	X
Rocha (2020)	MWM 4.07 TCE	Turbo Intercooler	Eletrônica	Injeção eletrônica multiponto	Sistema eletrônico customizado e variador de avanço	X	X
Macedo (2018)	MWM D229-4	Natural	Mecânica	Misturador tipo "boca de fogão"	Válvula manual	Até 48,77% de redução	Menor em toda a faixa de operação
Duarte Filho (2018)	MDG-5000CLE	Natural	Mecânica	Difusor	Kit automatizado com Arduino e motor de passo	Até 39,59% de redução	Maior apenas acima de 3.5kW
Tavares de Luna (2025)	Perkins 1104C-44TAG2	Turbo	Mecânica	Misturador tipo "boca de fogão"	Válvula manual e kit automatizado com Arduino	Até 53% de redução	Maior apenas acima de 50kW

Fonte: (AUTOR, 2025)

Em conjunto, os trabalhos desenvolvidos no LI para motores de injeção mecânica demonstram uma clara linha evolutiva. A metodologia foi primeiramente validada por Macedo (2018) em uma abordagem puramente manual, utilizando um misturador do tipo "boca de fogão" e ajuste direto na bomba injetora. Em seguida, Duarte Filho (2018) introduziu a automação do controle de gás através de um sistema com Arduino e motor de passo, aprimorando a precisão da dosagem. Finalmente, a pesquisa de Tavares de Luna (2025) expandiu e validou o conceito em um motor turboalimentado de maior porte, consolidando a robustez da técnica de conversão de baixo custo e alcançando uma taxa de substituição de diesel de até 97% em alta carga.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA HPDI E O SISTEMA UTILIZADO NA UFPB

A análise comparativa entre o sistema industrial de Injeção Direta de Alta Pressão (HPDI) e as metodologias de conversão desenvolvidas na UFPB revela diferenças fundamentais em termos de conceito de projeto, custo, desempenho e aplicabilidade. A tabela a seguir resume os principais pontos de contraste entre as duas abordagens tecnológicas.

Tabela 3: Comparação entre a adaptação industrial HPDI e as adaptações da UFPB

Sistema	HPDI	UFPB
Conceito de projeto	Solução de alta tecnologia e custo, projetada para motores novos	Adaptação de baixo custo para motores já em serviço
Injeção de gás	Injeção direta de alta pressão na câmara de combustão	Injeção no coletor de admissão a baixa pressão
Principais componentes	Injetor duplo com agulhas concêntricas, tanque de GNL criogênico e Módulo de Condicionamento de Gás	Eletroválvulas, misturador e controlador
Desempenho	Alta eficiência em toda a faixa de operação, com até 20% de ganhos de torque	Eficiência e economia em regimes de média e alta potência
Emissões	HC extremamente baixos devido à injeção direta e controle preciso de NOx e MP	Redução significativa de MP, aumento de CO e HC em baixa carga
Aplicabilidade ideal	Fabricantes de motores e equipamentos originais	Adaptação da frota nacional, ideal para equipamentos com perfil de uso constante

Fonte: (AUTOR, 2025)

Enquanto o HPDI representa uma solução mais adequada a motores novos, os sistemas da UFPB focam na adaptação da frota de motores já em operação, com diferentes técnicas para motores de injeção mecânica e eletrônica. Do ponto de vista econômico e de desempenho, as abordagens desenvolvidas na UFPB demonstraram ser uma alternativa viável, mas cujo benefício depende diretamente da carga operacional. Para os motores de injeção mecânica, os trabalhos de Macedo (2018) e Tavares de Luna (2025) mostraram grande economia de custo em regimes de média a alta potência, chegando a 48,77% e 53%, respectivamente. Contudo, em baixas cargas, o rendimento térmico mostrou-se inferior ao do motor diesel original, com alguns estudos, como o de Duarte Filho (2018), apontando um custo operacional maior nessas condições.

Para os motores de injeção eletrônica, a pesquisa de Santos (2015) focou no desenvolvimento de um controle eletrônico customizado para gerenciar a injeção. O sistema HPDI, por outro lado, por ser uma tecnologia de injeção direta, é projetado para oferecer alta eficiência em toda a faixa de operação, mas seu custo de implementação é significativamente mais elevado.

No que tange às emissões, as tecnologias apresentam perfis distintos. A injeção direta do sistema HPDI mitiga um dos principais desafios dos motores a gás, que é o aumento das emissões de hidrocarbonetos não queimados (HC), e as mantém em níveis extremamente baixos. Em contrapartida, a técnica empregada pela UFPB

enfrenta o desafio da combustão incompleta em baixa carga, o que resulta em um aumento de CO e HC nessas condições, conforme detalhado por Tavares de Luna (2025).

Em termos de sustentabilidade, ambas as tecnologias buscam atender às rigorosas normas ambientais, como a Euro VI e o PROCONVE, que exigem a redução de óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP). O sistema HPDI, com seu controle preciso da combustão, permite reduções expressivas de NOx e MP em diversas condições de funcionamento. As abordagens da UFPB também se mostraram eficazes na redução do MP, conforme observado por Macedo (2018) e Tavares de Luna (2025).

Em resumo, a escolha entre as tecnologias é estratégica. O sistema HPDI é uma solução de alta performance e alto custo, mais indicada para fabricantes de motores. As metodologias da UFPB, por sua vez, consolidam-se como uma solução de adaptação para motores existentes, de baixo custo e ideal para a frota nacional. Sua aplicação é mais vantajosa em equipamentos com perfil de uso em média a alta potência, como grupos geradores, máquinas agrícolas e veículos de transporte rodoviário.

5 CONCLUSÃO

A conversão de motores diesel para operação dual fuel é uma alternativa tecnicamente viável, mas a análise comparativa demonstra que a escolha ideal depende do perfil de aplicação do motor. A abordagem industrial, representada pelo sistema HPDI, é a solução mais adequada para motores novos, pois garante alta eficiência em toda a faixa de operação e emissões de hidrocarbonetos (HC) extremamente baixas. No entanto, seu alto custo e complexidade a tornam inviável para a atual frota em serviço.

Em contraste, as pesquisas da UFPB focaram em soluções de baixo custo para a frota existente. A metodologia de adaptação por fumigação demonstrou ser tecnicamente viável, permitindo uma operação estável e ganhos de potência de até 5,7%. As pesquisas confirmaram que a taxa de substituição de diesel pelo gás natural se correlaciona diretamente com a carga do motor, alcançando 97% em motores turboalimentados.

As conversões da UFPB se mostraram economicamente vantajosas em regimes de média a alta potência, com uma economia expressiva de até 53% e uma

redução de custo operacional de até R\$ 17,92 por hora. A eficiência térmica, embora inferior em baixa carga, superou a do motor original em altas cargas no motor turboalimentado, chegando a 31,43%. No quesito emissões, a operação dual fuel reduziu drasticamente o material particulado, com quedas de opacidade significativas. Porém, a combustão incompleta em baixa carga resulta em um aumento nas emissões de CO e HC.

Em suma, a viabilidade da conversão dual fuel está intrinsecamente ligada ao regime de trabalho do motor. A tecnologia se consolida como uma solução estratégica para aplicações que operam predominantemente em alta e constante carga, como grupos geradores e veículos de transporte rodoviário, onde a conversão demonstra seu máximo potencial econômico e ambiental.

Por outro lado, apesar dos resultados promissores, a disseminação em larga escala das adaptações desenvolvidas na UFPB dependeria da superação de desafios práticos. Seria necessária a criação de kits de conversão padronizados, desenvolvimento de mão de obra qualificada para a instalação. Além disso, a viabilidade comercial em grande escala estaria atrelada a políticas de incentivo que fomentem a conversão da frota nacional, tornando a tecnologia não apenas técnica e economicamente viável, mas também acessível ao mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAAL, M. M.; HEGAB, A. H. Combustion and emission characteristics of a natural gasfueled diesel engine with EGR. **Energy conversion and management**, v. 64, p. 301-312, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**: 2018. Rio de Janeiro: ANP, 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acesso em: 06 de nov. 2022.

ALVES, André Filipe Mendes. **Influência do resfriamento da turbina no desempenho de um motor diesel turboalimentado otolizado para gás natural**. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

BERTUOL, Vinícius. **Análise da combustão de um motor a diesel operando nos modos mono e bi-combustível**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna – Volume 1**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012.

CARVALHO, Danilo Honorato. **Estudo de Viabilidade Técnica de Injeção de Gás Natural em Motores Diesel**. 91 f. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CHEN, Yingjie et al. Study of injection pressure couple with EGR on combustion performance and emissions of natural gas-diesel dual-fuel engine. **Fuel**, v. 261, p. 116409, 2020.

COMINO, Juan Carlos Cando. **Investigation of knock limits of dual fuel engines**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Industrial) – Budapest University of Technology and Economics, Budapeste, 2013.

DUARTE FILHO, Moacir Gomes. **Análise de desempenho de um grupo gerador a diesel operando como dual (Diesel e Gás Natural)**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, p. 43. 2018.

FIGUEIRAL, Carlos Miguel Almeida. **Aplicação do conceito de combustão dual-fuel num motor diesel pesado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

HEGAB, Abdelrahman; LA ROCCA, Antonino; SHAYLER, Paul. Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 666-697, 2017.

HIVECLOUD. **Saiba tudo sobre os 6 modais de transporte existentes no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.hsivecloud.com.br/post/modais-de-transporte/>. Acesso em: 13 de jun. 2023.

LI, Menghan et al. A comprehensive review of pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: Factors affecting combustion, emissions and performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109653, 2020.

MACEDO, Rennan Jackson. **Adaptação de um motor diesel para atuar como biocombustível: diesel-gás natural**. 2018. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2018.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MAURYA, Rakesh Kumar; MISHRA, Prashant. Parametric investigation on combustion and emissions characteristics of a dual fuel (natural gas port injection and diesel pilot injection) engine using 0-D SRM and 3D CFD approach. **Fuel**, v. 210, p. 900-913, 2017.

MERCEDES BENZ. **Motores Diesel**. 2006. Disponível em: <https://www.mercedes-benz-trucks.com.br/onibus/motores-bluetec/>. Acesso em: 13 de jun. 2023.

MUMFORD, David; GOUDIE, Dale; SAUNDERS, James. **Potential and Challenges of HPDI**. SAE Technical Paper, 2017.

MWM INTERNATIONAL. **Manutenção e operação**. 2009. Disponível em: <https://www.mwm.com.br/site.aspx/Manutencao-e-Operacao>. Acesso em: 13 de jun. 2023.

PAPAGIANNAKIS, Roussos G. et al. Avaliação numérica dos efeitos da taxa de compressão e do tempo de injeção de óleo diesel sobre o desempenho e as emissões de um motor bicombustível diesel-gás natural fumigado. **Journal of Energy Engineering**, v. 142, n. 2, p. E4015015, 2016.

PARK, Hyunwook; SHIM, Euijoon; BAE, Choongsik. Improvement of combustion and emissions with exhaust gas recirculation in a natural gas-diesel dual-fuel premixed charge compression ignition engine at low load operations. **Fuel**, v. 235, p. 763-774, 2019.

PETROBRÁS. **Óleo Diesel: Informações Técnicas**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2019. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/default.asp>. Acesso em: 13 de jun. 2023.

ROCHA, Márcio Andrade. **Estudo do avanço de injeção de biodiesel em um motor dual de ignição por compressão utilizando gás natural e biodiesel**. 2020. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

SANTOS, L. B. **Análise e Desenvolvimento de Técnica e Controle Eletrônico na Utilização Conjunta de Biodiesel-GNV em Motores do Ciclo Diesel**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SANTOS, Dener Fachinelli dos et al. Análise Experimental de um Motor Diesel de Médio Porte em Operação Mono e Bicombustível. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, v. 4, n. 1, p. 38-47, 2016.

SILVA, Débora Verônica Soares da. **Análise das emissões atmosféricas e eficiência energética na geração de eletricidade por termogeração, utilizando motores do ciclo diesel.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

TAVARES DE LUNA, Francisco Everton. **Análise de desempenho de um motor turbo diesel adaptado para operar no modo dual (diesel e gás natural) através da utilização de um kit dual-fuel.** 2025. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2025.

WEAVER, Christopher S.; TURNER, Sean H. **Dual fuel natural gas/diesel engines: technology, performance, and emissions.** SAE Technical Paper, 1994.

WOODYARD, Doug. **Pounder's marine diesel engines and gas turbines.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.