



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado – Doutorado

ADAPTAÇÃO DE UM MOTOR DIESEL PARA ATUAR COMO BICOMBUSTÍVEL: DIESEL-GÁS NATURAL

por

Rennan Jackson Ferreira Macedo

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica*

João Pessoa - Paraíba

Julho, 2018

RENNAN JACKSON FERREIRA MACEDO

**ADAPTAÇÃO DE UM MOTOR DIESEL PARA ATUAR
COMO BICOMBUSTÍVEL: DIESEL-GÁS NATURAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. Emerson Freitas Jaguaribe

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M141a Macedo, Rennan Jackson Ferreira.

Adaptação de um motor diesel para atuar como
bicombustível: diesel-gás natural / Rennan Jackson
Ferreira Macedo. - João Pessoa, 2018.

63f. : il.

Orientação: Emerson Freitas Jaguaribe.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Motor diesel. 2. Motor dual. 3. Gás natural. I.
Jaguaribe, Emerson Freitas. II. Título.

UFPB/BC

ADAPTAÇÃO DE UM MOTOR DIESEL PARA ATUAR COMO BICOMBUSTÍVEL: DIESEL - GÁS NATURAL

por

Rennan Jackson Ferreira Macedo

Dissertação aprovada em 25 de julho de 2018



Prof. Dr. EMERSON FREITAS JAGUARIBE
Orientador – UFPB



Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DE MIRANDA MONTENEGRO
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ADRIANO SITÔNIO RUMÃO
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Antônia Odete e Carlos Alberto. A meu irmão, Carlos Filho e a meus avós, Antônia Macêdo, Joaquim Secundo (*In memoriam*) e Expedita Ferreira.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar em todos os momentos da minha vida. Aos meus pais e avós, Antônia Odete, Carlos Alberto, Joaquim Secundo (*In memoriam*), Antônia Macêdo e Expedita Ferreira, por todo o amor e dedicação, por me apoiarem e ampararem em todas as decisões da minha vida, não medindo esforços para o meu sucesso e felicidade. À meu irmão, Carlos Filho, pelo apoio, carinho, compreensão e todos os conselhos. Ao meu orientador Emerson Freitas Jaguaribe, por me apoiar durante a realização deste trabalho, me incentivando e ensinando sempre. Ao professor Adriano Sitônio Rumão, pelos ensinamentos cotidianos e essenciais para vivência no Laboratório de Inovação. Aos amigos que fiz durante esse Mestrado, em especial a Everton, Fábio, Anderson, Vinicius, Júlio, Carlos, Batista, Braulio, Otavio, André, Fernanda, Petrônio e Daniel que sempre estiveram comigo e ajudaram imensamente na minha formação. À todos que fazem a Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela atenção dispensada. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro que foi de suma importância para esse trabalho.

ADAPTAÇÃO DE UM MOTOR DIESEL PARA ATUAR COMO BICOMBUSTÍVEL: DIESEL-GÁS NATURAL

RESUMO

O Brasil está entre os países mais consumidores de energia elétrica do mundo, sendo o terceiro do continente americano, superado apenas por Estados Unidos e Canadá. O maior consumidor de energia elétrica no Brasil é o setor industrial, seguido do residencial e do comercial, com 35,7%, 28,8% e 19,1%, respectivamente. Desta forma, o setor industrial é o mais afetado por problemas de abastecimento de energia. Tendo em vista a redução dos gastos e a garantia do fornecimento de energia elétrica em horários cujas tarifas são mais caras, as indústrias costumam fazer uso de grupos geradores acionados por motores a diesel. Esses motores, entretanto, contaminam o meio ambiente devido à emissão de grandes quantidades de material particulado e compostos de enxofre em seus gases de exaustão. Neste contexto, novos combustíveis vêm sendo estudados para serem empregados em motores Diesel, como por exemplo, o gás natural. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo realizar a adaptação de um motor Diesel MWM, modelo D229-4 para atuar de forma Dual com diesel e gás natural. Nesta adaptação, buscou-se, principalmente, a redução nos custos de operação do motor, assim como, a diminuição da emissão de particulados para o meio ambiente. Após a realização dos ensaios e comparando os resultados do motor original com os do motor dual, foi possível constatar uma redução no custo de operação de até 17,92 R\$/h, tendo em vista que existe variação no percentual de economia, que vai de 3,49% até 48,77%, a depender da carga aplicada. Outro fator importante, foi a redução da opacidade da fumaça oriunda da combustão. Desta forma, o conjunto de resultados obtidos, certifica que a conversão de motores Diesel para funcionar de forma Dual (diesel/gás natural) é economicamente viável e proporciona uma redução considerável na poluição do meio ambiente.

Palavras-Chave: Motor diesel, Motor dual, Gás natural.

A DIESEL ENGINE ADAPTATION TO RUN AS A DIESEL ENGINE (DIESEL/NATURAL GAS)

ABSTRACT

Brazil figures as one of the greatest consumers of electric power in the world, being third in the American continent, surpassed only by the United States and Canada. The largest consumer of electricity in Brazil is the industrial sector, followed by residential and commercial, with 35.7%, 28.8% and 19.1%, respectively. In this way, the industrial sector is most affected by problems of energy supply. In order to reduce costs and guarantee the supply of electricity at times of more expensive tariffs, industries usually make use of generator sets powered by engines that use diesel. These engines, however, contaminate the environment due to the emission of large amounts of particulate matter and sulfur compounds in their exhaust gases. In this context, new fuels have been studied for use in diesel engines, such as natural gas. In this sense, this paper aims to adapt a MWM diesel engine, model D229-4 to act in a Dual way with diesel and natural gas. In this adaptation, the main objective was to reduce the operation costs of the engine, as well as the reduction of the emission of particulates to the environment. After performing the tests and comparing the results of the original engine with those of the dual engine, it was possible to verify a cost reduction of operation of up to 17.92 R\$ per hour, considering that there is variation in the percentage of economy, that goes from 3.49% to 48.77%, depending on the applied load. Another important factor was the reduction of the opacity of the smoke originated during combustion. In this way, the set of results obtained certifies that the conversion of Diesel engines to Dual mode (diesel / natural gas) is economically viable and provides a considerable reduction in pollution of the environment.

Keywords: Diesel engine, Dual engine, Natural gas.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	3
REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
3.1 INTRODUÇÃO	3
3.2 O MOTOR DUAL	3
3.3 GÁS NATURAL COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO.....	5
3.4 ESTUDO DA TECNOLOGIA DUAL	9
3.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MOTOR DUAL	9
3.6 PROCEDIMENTOS JÁ UTILIZADOS PARA TORNAR UM MOTOR DUAL.....	10
CAPÍTULO III	16
MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
4.1 INTRODUÇÃO	16
4.2 O APARATO EXPERIMENTAL	16
4.3 O GRUPO GERADOR.....	16
4.4 O SIMULADOR DE CARGA	17
4.5 A BALANÇA	18
4.6 O COMPUTADOR.....	18
4.7 O OPACÍMETRO.....	19
4.8 O DECIBELÍMETRO	21
4.9 O TERMOPAR.....	21

4.10	O MOTOR DIESEL	22
4.11	O MOTOR DUAL	23
4.12	AVALIAÇÃO DO CONSUMO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA	26
4.13	DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO ÓLEO DIESEL	26
4.14	DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO GÁS NATURAL	27
4.15	INSPEÇÃO DA EMISSÃO DE PARTICULADOS	28
4.16	AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DO RUÍDO	29
4.17	ACOMPANHAMENTO DA TEMPERATURA DOS GASES DE ESCAPE	29
CAPÍTULO IV		31
RESULTADOS E DISCUSSÃO		31
5.1	INTRODUÇÃO	31
5.2	CONSUMO ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR ORIGINAL	31
5.3	CONSUMO ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR DUAL	32
5.4	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO DIESEL PELO GÁS NATURAL	33
5.5	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR DUAL E ORIGINAL	34
5.6	AS EFICIÊNCIAS TÉRMICAS DOS MOTORES, DUAL E ORIGINAL	35
5.7	CUSTO DE OPERAÇÃO DOS MOTORES	36
5.8	ESTIMATIVA DE VIABILIDADE ECONÔMICA	37
5.9	EMISSÃO DE PARTICULADOS	38
5.10	TEMPERATURA DOS GASES DE ESCAPE	39
5.11	A INTENSIDADE DO NÍVEL DE RUÍDO	40
CAPÍTULO V		42
CONCLUSÃO		42
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		44
REFERÊNCIAS		45
APÊNDICE		48
APÊNDICE I		48

APÊNDICE II.....49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Injeção de gás para o interior da câmara de combustão em um motor Dual Fuel de injeção direta.....	4
Figura 2 – Admissão da pré-mistura (combustível gasoso/ar) através do coletor de admissão em um motor Dual Fuel.....	4
Figura 3 – Tanque de armazenamento de gás natural veicular.....	8
Figura 4 – Diagrama de um kit Dual Fuel de primeira geração.	11
Figura 5 – Esquema de funcionamento de um kit Dual Fuel de segunda geração.	12
Figura 6 – Principais componentes de um kit Dual Fuel de terceira geração.	13
Figura 7 – Sistema de conversão Dual Fuel de quarta geração.	14
Figura 8 – Grupo gerador utilizado nesse trabalho.....	17
Figura 9 – a) Painel de controle e banco de resistência do simulador de carga e b) Gerador. .	17
Figura 10 – Balança eletrônica digital.....	18
Figura 11 – Computador.....	19
Figura 12 – Opacímetro com a sonda.....	20
Figura 13 – Tela do software Igor.	20
Figura 14 – Decibelímetro.....	21
Figura 15 – Termopar.....	22
Figura 16 – Configuração original da bomba injetora.....	23
Figura 17 – Misturador tipo “boca de fogão”.....	24
Figura 18 – Misturador tipo “boca de fogão” instalado entre o filtro de ar e o coletor de admissão.	24
Figura 19 – a) Redutor de pressão e b) Válvula manual controladora de fluxo.....	25
Figura 20 – Modificação no ajuste da bomba injetora.	26
Figura 21 – Recipiente com a função de um tanque de combustível.	27
Figura 22 – Medidor volumétrico de gás natural fornecido pela PBGÁS.....	28
Figura 23 – Sonda do opacímetro inserida no cano de escape do motor.....	29
Figura 24 – Termopar instalado após o coletor de escape.....	30

Figura 25 – Curva de consumo específico em função do percentual de potência $((P_{\text{útil}}/P_{\text{útil_Máx}}).100)$ do motor diesel original, onde $P_{\text{útil_Máx}}$ é a potência (kW) máxima suportada pelo motor.	32
Figura 26 – Curva de consumo específico em função do percentual de potência $((P_{\text{útil}}/P_{\text{útil_Máx}}).100)$ do motor dual, onde $P_{\text{útil_Máx}}$ é a potência (kW) máxima suportada pelo motor.....	33
Figura 27 – Redução percentual do consumo de diesel utilizado no motor dual com relação ao original.....	34
Figura 28 – Curvas de potências, em função das frequências de rede, relacionadas com o motor dual e o original a diesel.	35
Figura 29 – Curvas de potências em função da eficiência térmica, geradas a partir do motor original, a diesel, e do dual.	36
Figura 30 – Curvas de potências, em função do custo de operação, geradas a partir do motor original, a diesel, e do dual.	37
Figura 31 – Curva de economia, obtida com uso do gás natural e diesel no motor dual, em relação ao uso do diesel no motor original.	38
Figura 32 – Curvas de opacidade da fumaça para o motor dual e original a diesel.	39
Figura 33 – Curvas da temperatura dos gases de escape do motor dual e original.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do gás natural.....	6
Tabela 2 – Emissões oriundas da combustão de uma mistura estequiométrica.	8
Tabela 3 – Propriedades do Gás Natural, fornecidas pela PBGÁS.....	28
Tabela 4 – Limites de exposição aos níveis de ruído, segundo a NR 15 do Ministério do Trabalho.....	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CARB - California Air Resource Board

GNL - Gás Natural Liquefeito

GNC - Gás Natural Comprimido

HPDI - High Pressure Direct Injection

MCI - Motores de Combustão Interna

PMS - Ponto Morto Superior

PMI - Ponto Morto Inferior

LI – Laboratório de Inovação

LACOM - Laboratório de Combustíveis

PBGÁS - Companhia Paraibana de Gás

dB - decibel

Hz – Hertz

kW - kilowatt

cv – Cavalo Vapor

η t - eficiência térmica;

Puti - potência útil;

PCI - poder calorífico inferior;

m - vazão mássica;

E% - percentual de economia;

Cdiesel - custo com combustível para manter funcionando o motor diesel por uma hora;

Cdual - custo com combustível para manter funcionando o motor dual por uma hora;

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os países mais consumidores de energia elétrica do mundo, sendo o terceiro do continente americano, superado apenas por Estados Unidos e Canadá (MME, 2015). Dentre os fatores que contribuem para que o consumo de energia elétrica no país esteja nos patamares atuais encontram-se o crescimento populacional e industrial, aumento do emprego de eletrodomésticos, etc.

O maior consumidor de energia elétrica no Brasil é o setor industrial, seguido do residencial e do comercial, com 35,7%, 28,8% e 19,1%, respectivamente (EPE, 2017). Desta forma, o setor industrial é o mais afetado por problemas de abastecimento de energia, sofrendo prejuízos financeiros devido às perdas na produção e à altos preços das tarifas elétricas. Tendo em vista a redução dos gastos e a garantia do fornecimento de energia elétrica em horários cujas tarifas são mais caras, as indústrias costumam fazer uso de grupos geradores acionados por motores a diesel (BARROS, 2015).

O motor a diesel foi destaque na época de seu lançamento pelo alto desempenho comparado aos motores que existiam até então. Sua missão era a de substituir os motores estacionários a vapor utilizados em indústrias e navios. Devido à sua robustez, à capacidade de torque e o baixo custo do óleo diesel, este motor continua sendo até hoje muito empregado em tais setores como fonte alternativa de geração de energia elétrica (OLIVEIRA, 2012).

Esses motores, entretanto, contaminam o meio ambiente devido à emissão de grandes quantidades de material particulado e compostos de enxofre em seus gases de exaustão. Estas emissões são cancerígenas e contribuem para o aparecimento de doenças cardiovasculares e respiratórias. Além disso, podem favorecer o aumento da acidificação de águas, solos e plantas (SANTANA, 2012 apud FERRAZ, 2014).

Neste contexto, novos combustíveis vêm sendo estudados para serem empregados em motores Diesel, seja de forma parcial (sistema *Dual Fuel*) ou de forma total. O gás natural é uma das principais opções devido à sua queima limpa e praticamente livre de particulados e de enxofre (FERRAZ, 2014). O sistema *Dual Fuel* é caracterizado pela utilização de dois combustíveis, geralmente um gasoso como combustível primário e um líquido para promover a ignição. Em motores *Dual Fuel* alimentados a gás natural e a diesel, por exemplo, a emissão dos poluentes citados é significativamente reduzida comparado à sistemas apenas a diesel. Devido a complexidade do tema, vários estudos vêm sendo realizados para melhorar o desempenho do motor quando operando de forma *Dual*.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo realizar uma adaptação de um motor Diesel para atuar de forma *Dual* com diesel e gás natural. Para isso, faz-se necessário: converter um motor MWM, modelo D229-4, original a diesel, para *Dual* com tecnologia simples e própria; substituir parte do combustível líquido pelo gás natural, garantindo o bom funcionamento do motor; e buscar, por meio de adaptações técnicas simples a redução nos custos de operação do motor, diminuindo também a emissão de particulados para o meio ambiente.

Ensaio experimentais foram realizados no Laboratório de Inovação, LI/UFPB, tanto no motor a diesel original, como no motor após sua adaptação para *Dual*, comparando-se os dois casos. Dentre os propósitos da realização destes ensaios, estariam: a avaliação do consumo em função da potência, a avaliação do ruído provocado pelo motor, a inspeção da emissão de particulados oriundos da combustão e o acompanhamento da temperatura dos gases de escape.

Este documento está dividido em cinco capítulos. Este capítulo trata da Introdução. No Capítulo II é apresentada Revisão Bibliográfica sobre motores *Duais*, descrevendo-se o seu princípio de funcionamento, suas vantagens e desvantagens. Discute-se, ainda, a utilização do gás natural como combustível alternativo e descrevem-se as técnicas já utilizadas para tornar um motor *Dual*. Além do mais, abordam-se as principais características dos motores de combustão interna, explicando-se o princípio de funcionamento. No Capítulo III são apresentados os instrumentos e equipamentos utilizados, bem como os métodos empregados na realização dos testes. No Capítulo IV são analisados os resultados obtidos a partir dos testes realizados. O Capítulo V apresenta as conclusões. Por fim, posteriormente são feitas as Sugestões para Trabalhos Futuros.

CAPÍTULO II

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os principais conceitos referentes à tecnologia Dual, bem como ao uso do gás natural como combustível alternativo. É apresentada uma revisão histórica da tecnologia Dual, suas principais vantagens e desvantagens, e as técnicas já utilizadas para tornar um motor Dual.

2.2 O MOTOR DUAL

Um motor dual (também chamado de motor *Dual Fuel*) consiste em um motor de combustão interna capaz de consumir dois tipos de combustíveis, em geral, um líquido e outro gasoso, de valor mais barato, mantendo níveis de desempenho e emissão de poluentes satisfatórios (FIGUEIRAL, 2016). Vários combustíveis já têm sido implementados com sucesso no conceito de *Dual Fuel*, são alguns: gás liquefeito de petróleo, gás natural, gasolina, etanol e diesel (TÖRMÄNEN, 2015).

De acordo com Oliveira (2016), quanto ao método de introdução do combustível gasoso, existem, atualmente, dois tipos de operação *Dual Fuel*. No sistema de injeção direta, ambos os combustíveis, líquido e gasoso, são injetados diretamente na câmara de combustão, sendo a combustão produzida pela presença do ar que entra na câmara, ver Figura 1. Por outro lado, na operação *Dual Fuel* convencional (Figura 2), uma pré-mistura de combustível gasoso e ar é admitida pelo coletor de admissão, seguido pela injeção de combustível líquido, na câmara de combustão quando a pré-mistura já está ali estabelecida.

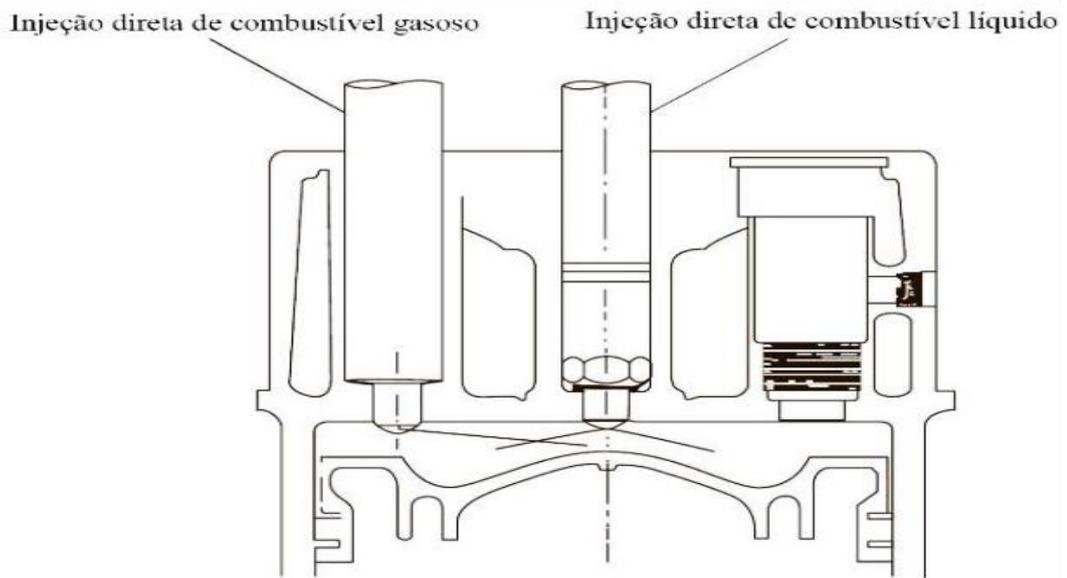


Figura 1 – Injeção de gás para o interior da câmara de combustão em um motor Dual Fuel de injeção direta.

Fonte: Extraído de Figueiral (2016).

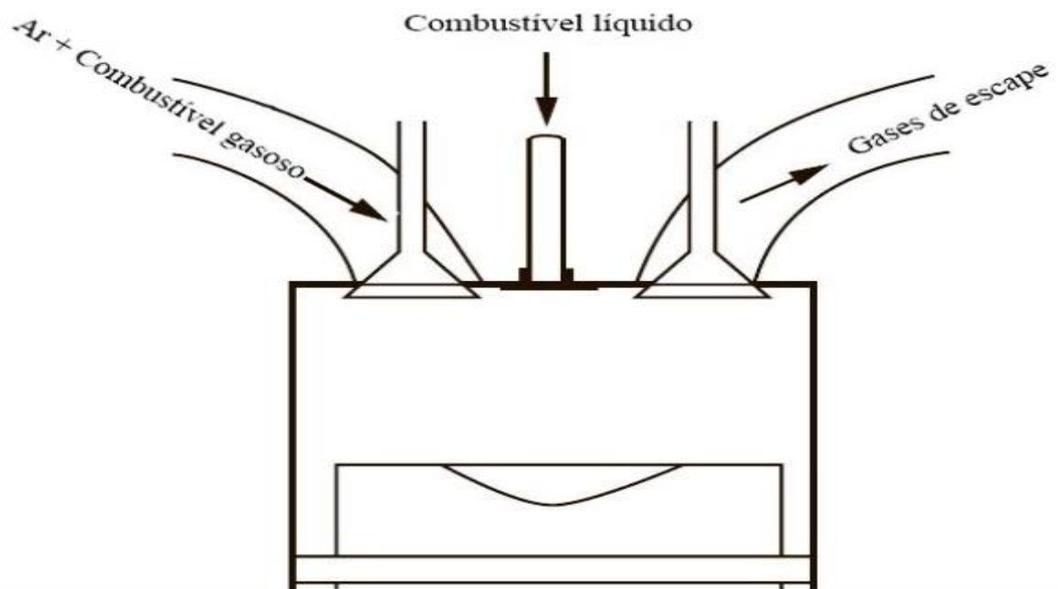


Figura 2 – Admissão da pré-mistura (combustível gasoso/ar) através do coletor de admissão em um motor Dual Fuel.

Fonte: Extraído de Figueiral (2016).

O sistema de injeção direta é caracterizado por uma limitação de 20% no volume de injeção do combustível líquido. O combustível gasoso é injetado na câmara de combustão sob alta pressão e atua como combustível principal, enquanto que o combustível líquido é considerado como a fonte de ignição. A limitação na redução de óxidos de nitrogênio e material particulado comparado com a operação *Dual Fuel* convencional, tem feito esse princípio de operação menos atrativo e seu uso não é tão extensivo como a operação convencional. Na operação convencional, a porcentagem de combustível líquido pode variar de 0,5% à 100%. Como mencionado anteriormente, a pré-mistura de ar e combustível gasoso é admitida no coletor de admissão e introduzida no cilindro por meio das válvulas de admissão. Quando o tempo de compressão está se aproximando do ponto morto superior, a injeção de combustível gasoso ocorre causando a queima devido ao seu maior nível de reatividade (OLIVEIRA, 2016).

2.3 GÁS NATURAL COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

FIGUEIRAL, 2016, cita várias vantagens em se utilizar combustíveis gasosos nos sistemas de combustão, são elas:

- Elevados rendimentos de combustão para vários intervalos de tempo, com melhorias dos limites de estabilidade da chama;
- Maior facilidade e menor tempo para formar misturas adequadas para a ocorrência da combustão, resultando em sistemas de admissão de ar e de injeção de combustíveis, relativamente, mais simples;
- Gases de escape, relativamente limpos, caracterizados pela ausência de partículas sólidas, como cinzas e fuligem;
- Mais baratos do que os combustíveis líquidos derivados do petróleo, resultando em economia, sobretudo, em veículos pesados que apresentam elevado consumo de combustível.

Os pontos negativos se restringem ao risco iminente de incêndio, explosão ou intoxicação, no caso de vazamentos, além da dificuldade de armazenamento e de abastecimento. (Estes perigos vêm sendo reduzidos com a aplicação de novas legislações e com o desenvolvimento de materiais que permitem a construção de sistemas mais sofisticados, tornando o uso desses combustíveis mais seguro) (FIGUEIRAL, 2016).

Gás natural, óleo e carvão são os chamados hidrocarbonetos. O gás natural consiste de hidrocarbonetos em fase gasosa, sob padrões de pressão e de temperatura. Seus componentes principais são: metano, etano, propano e butano, sendo o metano seu componente principal (70-90%) (VELÁZQUEZ, 2014). A Tabela 1 resume os principais componentes do gás natural.

Tabela 1 – Componentes do gás natural

Principais componentes hidrocarbonetos de um “típico” gás natural		
Metano	CH ₄	65% - 95%
Etano	C ₂ H ₆	2% - 15%
Propano	C ₃ H ₈	0,25% - 5%
Butano	C ₄ H ₁₀	0% - 5%
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,05% - 2%
Componentes não hidrocarbonetos produzidos com gás natural		
Nitrogênio	N ₂	0% - 20%
Sulfato de Hidrogênio	H ₂ S	0% - 15%
Dióxido de Carbono	CO ₂	0% - 20%

Fonte: Adaptado de Velázquez (2014).

O gás natural se origina, assim como os combustíveis fósseis, de matéria orgânica presa em sedimentos e é encontrada em conjunto com depósitos de óleo e carvão. Diferentemente do petróleo, que é formado quase que exclusivamente de matéria orgânica em sedimentos marinhos, o gás natural é formado em ambas rochas marinhas e terrestres (GARNER, 1999).

Uma plataforma de perfuração é usada para penetrar a superfície da Terra e extrair o gás natural. O gás natural é transmitido por uma série de tubos para fábricas de processamento e depois enviado para empresas de transmissão, antes de chegar ao usuário final (WONG, 2005).

O gás natural foi inicialmente utilizado como combustível para ferver água, acender lâmpadas de rua, e ganhou aceitação ao redor do mundo para ser usado nas residências em aquecedores de água, secadoras de roupa e na cozinha. O período do “boom” do gás natural começou nos anos 1950 nos Estados Unidos, onde uma grande rede de instalações e

encanamentos de distribuição foram construídos com o propósito de promover o uso de gás natural. O uso de gás natural no setor de transporte começou na década de 1930 e teve pouco desenvolvimento desde então (WONG, 2005).

O gás natural se tornou atrativo como combustível, pois, o mesmo não requer refinamento, exige pouco processamento, produz combustão limpa, e fornece mais calor por unidade de peso do que qualquer outro combustível fóssil. O uso de gás natural como combustível veicular possui várias vantagens em comparação com outros combustíveis alternativos. Os resultados de testes conduzidos em veículos a gás natural, comparados com veículos com outros combustíveis alternativos (exceção de veículos elétricos e solar), são resumidos abaixo (GARNER, 1999):

- O gás natural é o combustível mais barato entre os combustíveis alternativos;
- Sua disponibilidade é maior do que a de outros combustíveis alternativos;
- A conversão de motores a gasolina para gás natural deu provas de ser uma tecnologia confiável;
- Veículos a gás natural são os que menos emitem monóxido de carbono.

Veículos a gás natural não contribuem para a poluição recente, tanto quanto os veículos a gasolina, pois, os mesmos queimam o combustível de forma mais eficiente. O combustível já está no estado gasoso e não precisa ser atomizado, resultando numa combustão que é mais eficiente e menos combustível não queimado é liberado como poluente. A habilidade do gás natural de ser queimado de forma mais completa, ajuda a aliviar ambos os problemas de poluição e de produção de fumaça (TUSSING & TIPPEE, 1995, apud GARNER, 1999).

Testes conduzidos pelo *California Air Resource Board* (CARB) mostraram uma redução significativa na poluição que veículos a gás natural produzem, quando comparados à veículos com combustíveis alternativos, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Emissões oriundas da combustão de uma mistura estequiométrica.

Combustível do Motor	Gases Orgânicos Reativos	Monóxido de Carbono (CO)	Óxidos de Nitrogênio (NO)	Equivalentes de Dióxido de Carbono (CO ₂)
Gasolina	0,444	3,4	0,400	384
Gasolina Aditivada	0,252	3,4	0,400	384
Propano Líquido	0,250	3,4	0,400	342
Gás Natural	0,021	0,4	0,040	318
Metanol 85	0,444	3,4	0,400	385

Fonte: Adaptado de Garner (1999).

A partir dos resultados, é obvio que o gás natural produz menos poluição em comparação com outros combustíveis alternativos. O gás natural produz 3 gramas a menos de CO, 0,360 gramas a menos de NO, e 66 gramas a menos de CO₂, por milha, quando comparado com a gasolina.

De acordo com ZHANG (2015), o gás natural veicular utiliza gás natural majoritariamente em duas formas: Gás Natural Liquefeito (GNL) e Gás Natural Comprimido (GNC). O GNC é mais leve do que o ar, sendo armazenado sob alta pressão (20-32 MPa). É necessário um tanque robusto para o armazenamento, o que toma um espaço adicional no veículo, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – Tanque de armazenamento de gás natural veicular.

Fonte: Extraído de Zhang (2015).

O GNL, por outro lado, possui duas vezes mais densidade de energia do que o GNC, sendo armazenado em tanques especialmente desenvolvidos com baixa temperatura (-165°C) e baixa pressão (70-150 psi). É geralmente utilizado em veículos comerciais pesados (ZHANG, 2015).

2.4 ESTUDO DA TECNOLOGIA DUAL

A descoberta do motor *Dual* é creditada à Cave em 1929 e Helmore et al. em 1930, quando o hidrogênio foi introduzido como combustível suplementar em motores Diesel. Entretanto, naquela época, o *Dual Fuel* tinha algumas limitações que o fizeram menos popular à comercialização. Dentre elas incluem-se complexidade mecânica, componentes caros e alta ineficiência. Apenas durante a Segunda Guerra Mundial foi que a tecnologia *Dual Fuel* começou a ter grande destaque devido às reservas de petróleo estarem escassas. Após a guerra, o mercado voltou os interesses ao óleo combustível por causa das preocupações ambientais associadas ao carvão e devido ao grande suprimento de óleo combustível muito barato vindo da Arábia Saudita. Isto proporcionou uma expansão da indústria de gás de petróleo e muitas empresas de transporte de gás começaram a aumentar a sua produção e expandir os gasodutos naquele período (MANSOR, 2014).

Nos motores recentes, o desenvolvimento da tecnologia *Dual Fuel* é motivada por regulamentações de emissões que requerem que limites específicos sejam cumpridos para poluentes liberados na atmosfera. O desenvolvimento também é motivado pelas potenciais economias nos custos de operação para motores *Dual Fuel* comparado com motores Diesel. Por esta razão, muitos motores diesel são convertidos para operar com combustíveis gasosos tais como o gás natural e manter características positivas da operação com diesel (MANSOR, 2014).

2.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO MOTOR DUAL

Dentre as vantagens de motores com a tecnologia *Dual Fuel* pode se destacar (COMINO, 2013):

- Requer mínima modificação no motor, uma vez que o injetor do combustível primário fica localizado no coletor de ar de admissão. Além disso, o controle do combustível pode ser gerenciado por um dispositivo simplificado;

- O sistema de combustível primário é separado do sistema do combustível líquido. Esta flexibilidade torna possível que o motor, equipado com sistema de fumigação, também possa operar apenas com o combustível líquido. O motor pode trocar de operação *Dual Fuel* para operação apenas com o combustível líquido e vice-versa;
- O tempo do combustível líquido mantém o exaustor mais frio e fornece melhor limpeza, contribuindo para maior densidade de potência e maior vida útil da válvula;
- A alta taxa de compressão, melhora sua eficiência;
- A capacidade de combustão de mistura pobre, muito além dos sistemas de ignição por centelha, contribuindo para reduzir falhas na ignição, melhorar a eficiência, elevar a densidade de potência e reduzir as emissões de NO_x;
- Combinado com gás limpo, o combustível líquido proporciona lubrificação das válvulas e anéis. Desta forma, os intervalos entre as manutenções desses sistemas são maiores.
- Emissões de poluentes, sobretudo, os óxidos de nitrogênio, CO₂ e particulados são significativamente reduzidas;
- Redução de falhas nas operações, uma vez que se um problema acontecer no sistema de gás, o combustível líquido passa a ser utilizado;

Algumas desvantagens do motor *Dual* são (COMINO, 2013):

- Requerem o combustível líquido para ignição;
- Alta emissão de CO comparado com motores apenas a diesel;
- Dois sistemas de combustível para manutenção.

2.6 PROCEDIMENTOS JÁ UTILIZADOS PARA TORNAR UM MOTOR DUAL

Os sistemas de conversão *Dual Fuel* passaram por uma evolução tecnológica ao longo da história. O objetivo era aperfeiçoar a técnica de injeção do combustível líquido e do gás combustível. Neste sentido, estes sistemas podem ser classificados em quatro gerações.

A primeira geração era constituída dos seguintes componentes básicos (CARVALHO, 2014):

- (1) Sistema para abastecer e armazenar gás sob alta pressão ou liquefeito;
- (2) Sistema para redução ou evaporação do gás;
- (3) Sistema de redução da injeção do óleo diesel;

(4) Sistema de dosagem e mistura gás-ar.

Na Figura 4 pode ser visualizada a disposição destes componentes em um motor Diesel.

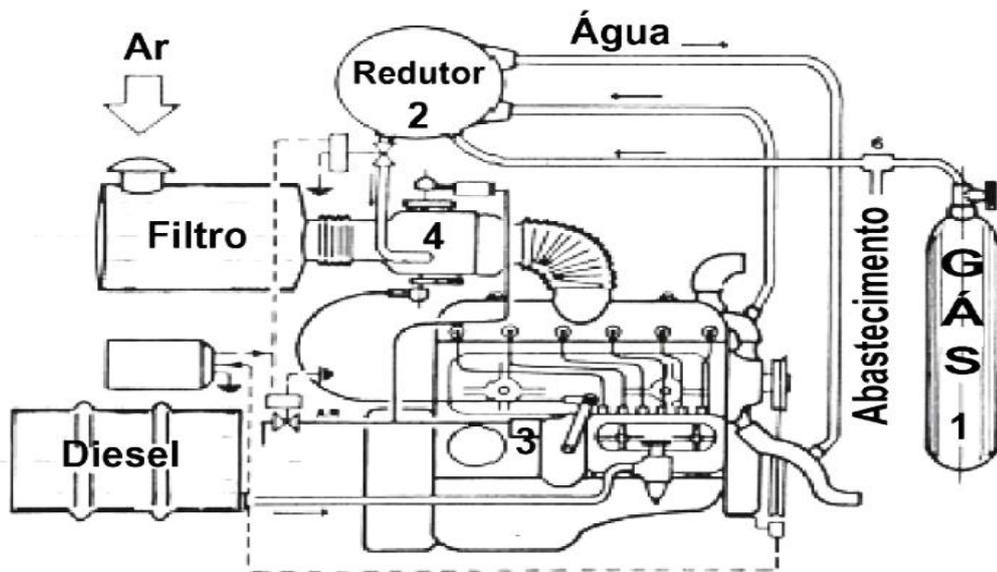


Figura 4 – Diagrama de um kit Dual Fuel de primeira geração.

Fonte: Extraído de Carvalho (2014).

No sistema de segunda geração, um Venturi é utilizado na alimentação do gás, porém, a dosagem do combustível líquido é feita de maneira eletrônica. Sensores enviam informações para uma central eletrônica, que, por sua vez, realiza a injeção-piloto do combustível líquido de maneira apropriada, de acordo com a condição de operação do motor (MACHADO, 1996 apud CARVALHO, 2014). O esquema de funcionamento desse sistema de conversão pode ser visualizado na Figura 5.

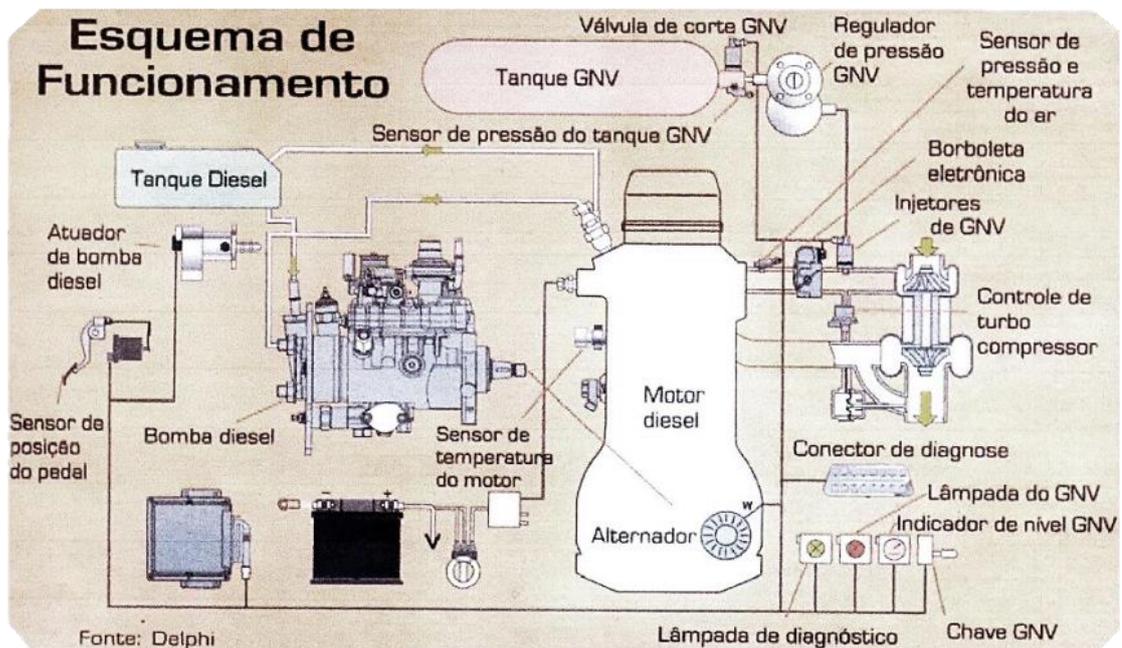


Figura 5 – Esquema de funcionamento de um kit Dual Fuel de segunda geração.

Fonte: Extraído de Carvalho (2014).

Nos sistemas de terceira geração, o controle eletrônico é empregado tanto na injeção do combustível líquido como na do combustível gasoso. Além do mais, a condição da mistura, também, é controlada a partir do monitoramento das condições dos gases de escape. Uma sonda, denominada sonda lambda, é a responsável por esse monitoramento (MACHADO, 1996 apud CARVALHO, 2014).

A Figura 6 ilustra os principais componentes desse sistema de conversão *Dual Fuel*.

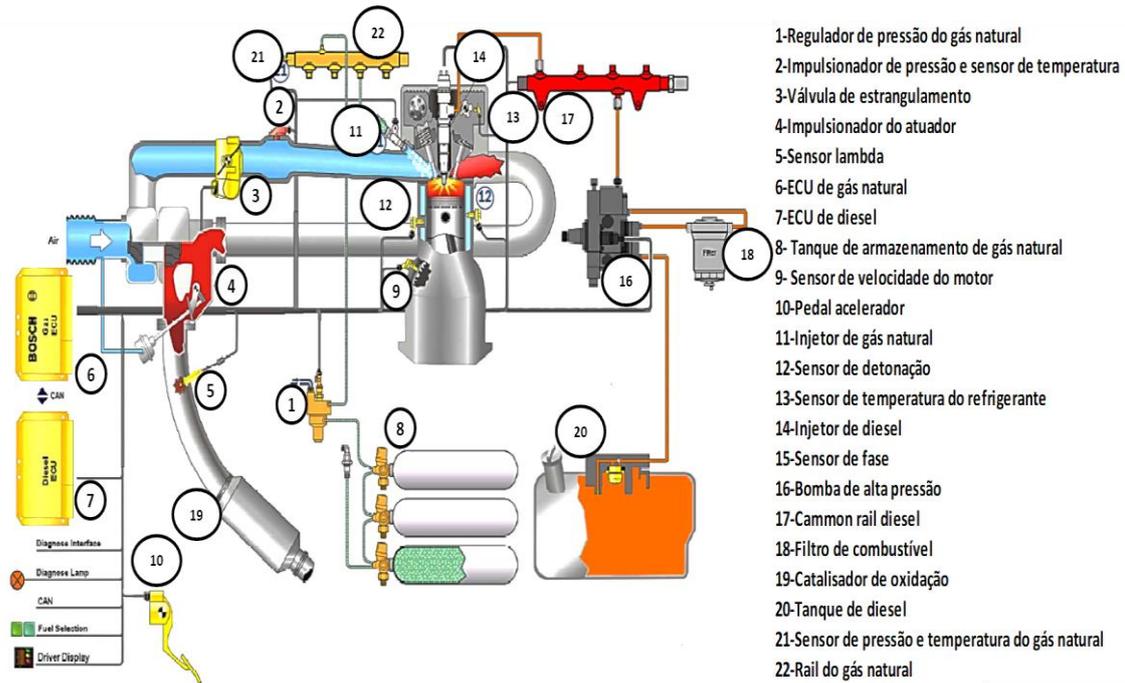


Figura 6 – Principais componentes de um kit Dual Fuel de terceira geração.

Fonte: Extraído de Carvalho (2014).

A quarta geração de sistemas de conversão *Dual Fuel* ainda está em pesquisas. Sua principal evolução tecnológica é a utilização de um único injetor para os combustíveis líquido e gasoso. A injeção simultânea proposta consiste na injeção do gás sob alta pressão no fim do tempo de compressão do motor, injetando imediatamente depois o jato-piloto do combustível líquido para providenciar a ignição. Esta tecnologia é denominada *High Pressure Direct Injection* (HPDI) e é atrativa somente para motores veiculares. Devido ao controle independente do tempo de injeção e à dosagem de cada combustível, proporciona ao motor uma otimização no desempenho e na emissão de poluentes. A capacidade de torque é de 10% à 30% maior e as emissões podem diminuir em 40% de NO_x , 60% de materiais particulados e 20% de CO_2 (CARVALHO, 2014). Na Figura 7 é apresentado um esquema de bico injetor desse tipo.

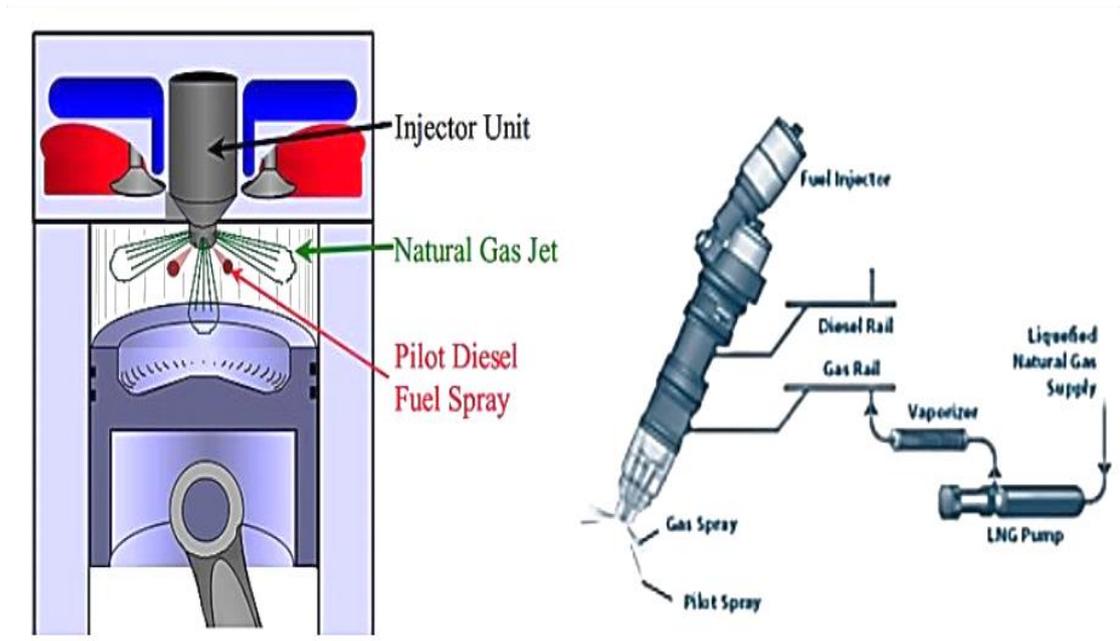


Figura 7 – Sistema de conversão Dual Fuel de quarta geração.

Fonte: Extraído de Carvalho (2014).

Sabe-se que a Eq. (1) representa a eficiência térmica de um motor, pois, segundo Taylor (1971), a eficiência térmica é baseada em uma quantidade de calor característica, denominada de poder calorífico, relacionada ao combustível.

Por sua vez, o poder Calorífico de um combustível, é a quantidade de energia, por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases), liberada durante sua queima. No entanto, existe o Poder Calorífico Superior (PCS), que leva em conta a energia usada na vaporização da água e o Poder Calorífico Inferior (PCI), que não leva em consideração essa energia de vaporização da água.

Para efeito de cálculo, e por razões intrínsecas à energia líquida, na expressão da supracitada eficiência, apenas o PCI é relacionado. Assim, pela própria definição da eficiência térmica, se escreve:

$$\eta_t = \frac{P_{uti}}{PCI \cdot \dot{m}} * 100 \quad (1)$$

Onde,

η_t , eficiência térmica;

Puti, potência útil;

PCI, poder calorífico inferior;

m, vazão mássica;

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão considerados os equipamentos e a instrumentação utilizados nos testes com um grupo gerador (motor/gerador) operando apenas com diesel, como também de forma dual (diesel/gás natural). Descrevem-se ainda a realização dos testes e as melhorias implantadas para assegurar o melhor desempenho na operação.

3.2 O APARATO EXPERIMENTAL

Os experimentos desse trabalho foram realizados no Laboratório de Inovação (LI) do Centro de Tecnologia da UFPB. Dentre os equipamentos utilizados nos testes pode-se destacar como principal, o grupo gerador.

3.3 O GRUPO GERADOR

O grupo gerador utilizado nesse trabalho, ver Figura 8, é composto por um motor estacionário a diesel da marca MWM, de injeção direta, modelo D229-4, tipo aspirado, com cilindrada total de 3,92 litros; taxa de compressão 17:1 e potência nominal 60 cv (44,13 kW) a 1800 rpm. Já o gerador é da marca Bambozzi, trifásico, modelo 46151/07, com potência nominal de 36 kVA a 1800 rpm, com frequência de 60 Hz.

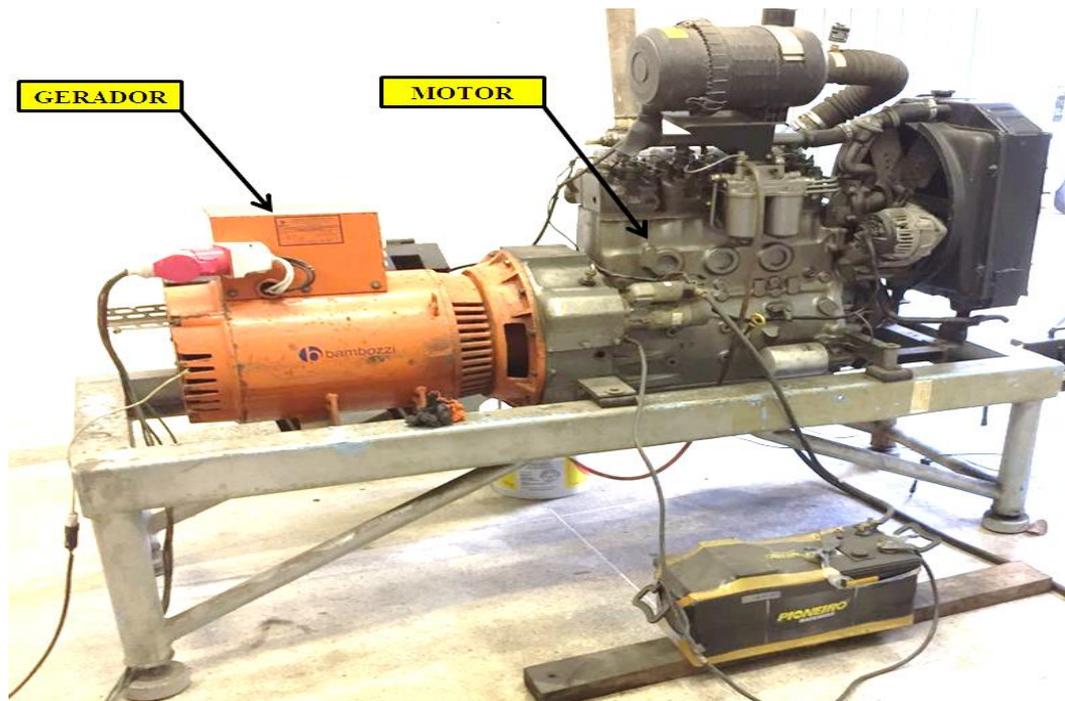


Figura 8 – Grupo gerador utilizado nesse trabalho

3.4 O SIMULADOR DE CARGA

O simulador de cargas é constituído de um banco de resistência, um painel de controle e um gerador elétrico, ver Figura 9. Este tem por objetivo disponibilizar ao motor acoplado a um gerador elétrico, de forma contínua, cargas progressivas, ou regressivas, advindas da maior, ou menor excitação de um banco de resistências.

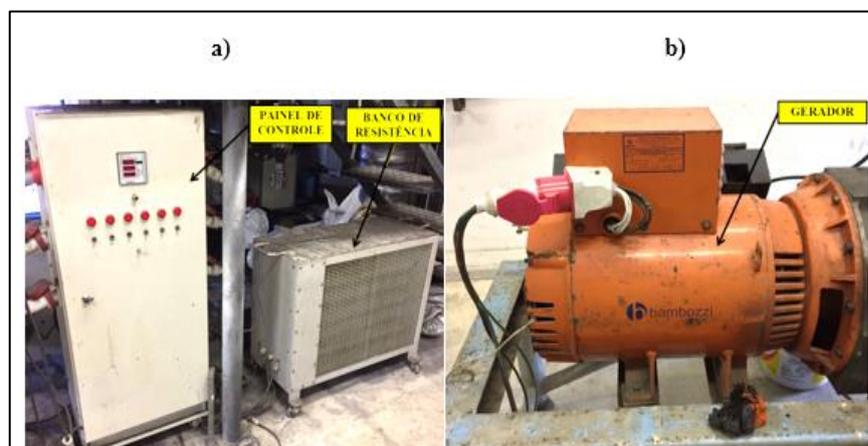


Figura 9 – a) Painel de controle e banco de resistência do simulador de carga e b) Gerador.

3.5 A BALANÇA

Nos experimentos utilizou-se uma balança eletrônica do tipo digital, marca Ramuza, modelo IDR-10.000, com exatidão de 50 g, ver Figura 10. Este equipamento foi utilizado para coleta dos dados de consumo do diesel.



Figura 10 – Balança eletrônica digital

3.6 O COMPUTADOR

O computador utilizado para auxiliar nos experimentos foi da marca Itautec, ver Figura 11, com processador AMD Athlon X2 e memória de 512 MB.



Figura 11 – Computador.

3.7 O OPACÍMETRO

Opacímetro é um equipamento para medição da opacidade de fumaça, por fluxo parcial do gás de escapamento gerado por motores Diesel, através da absorção da luz. O utilizado nos experimentos foi o modelo TM 133 da Tecnomotor, composto pelo opacímetro e uma sonda, interligada ao software Igor, ver Figuras 12 e 13.

A medição da turvação da fumaça do Diesel é um dos processos mais desenvolvidos até agora e também adequado para análise de campo. Opacidade é tecnicamente conhecida como índice de enegrecimento de fumaça da combustão e a unidade utilizada para medi-la é conhecida como coeficiente de absorção de luz, $K \text{ (m}^{-1}\text{)}$.

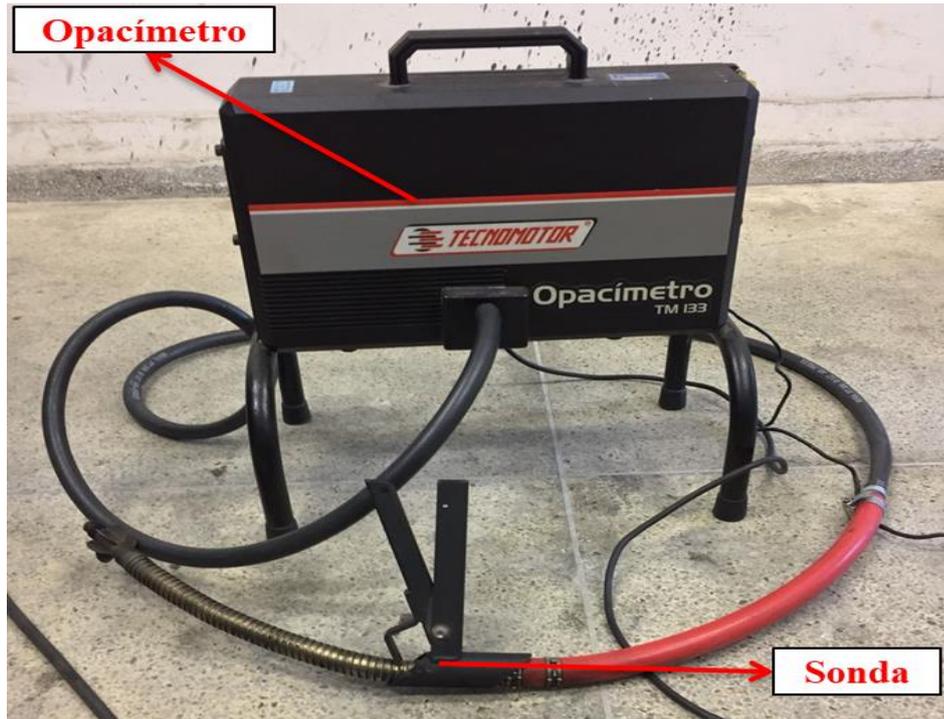


Figura 12 – Opacímetro com a sonda.

TECNOMOTOR - Resultados do opacímetro

Ficha: 0000002 | Montadora: FORD | Veículo: F1000 HSD | Motor: | Combustível: DIESEL | 21/09/2017 | Versão: 2.0

ACELERAÇÃO LIVRE

Amostra	RPM	RPM corte	Mínimo	Valor	Máximo
01	---	---	0,00	0,11	0,00
02	---	---	0,00	0,11	0,00
03	---	---	0,00	0,10	0,00
04	---	---	0,00	0,11	0,00
05	---	---	0,00	0,11	0,00
06	---	---	0,00	0,11	0,00
07	---	---	0,00	0,11	0,00
08	---	---	0,00	0,11	0,00
09	---	---	0,00	0,11	0,00
10	---	---	0,00	0,11	0,00

Média: 0,11
Desvio: 0,00

Observações
2. Condições do teste
a. Temperatura do óleo = --- °C
d) Altitude do local de ensaio < 350 m

MODO DIAGNÓSTICO

F1 Gravar
 F4 Gráfico
 F6 Resumo
 F7 Imprimir
 F8 Anterior
 F9 Próxima

Figura 13 – Tela do software Igor.

3.8 O DECIBELÍMETRO

Decibelímetro é um equipamento eletrônico usado para medir a intensidade sonora de uma fonte, ver Figura 14. A unidade utilizada para medir a intensidade sonora é o decibel, dB. O empregado no presente trabalho é composto de duas curvas de ponderação, A e C, onde a principal diferença está na resposta de frequência dos graves, sendo a curva “A” a que reproduz as frequências do ouvido humano. Além das curvas de ponderação, têm-se as escalas alta (Hi), de 60 a 130 dB, e baixa (Lo), de 30 a 100 dB, com tempos de respostas, lento (slow), de 1s, e rápido (fast), de 125 ms.



Figura 14 – Decibelímetro

3.9 O TERMOPAR

Termopar é um sensor utilizado para a medição da temperatura que é constituído, em geral, por dois fios metálicos diferentes, soldados nas extremidades que, quando submetidos a temperaturas diferentes, estabelecem uma força eletromotriz. O utilizado pode ser visto na Figura 15.

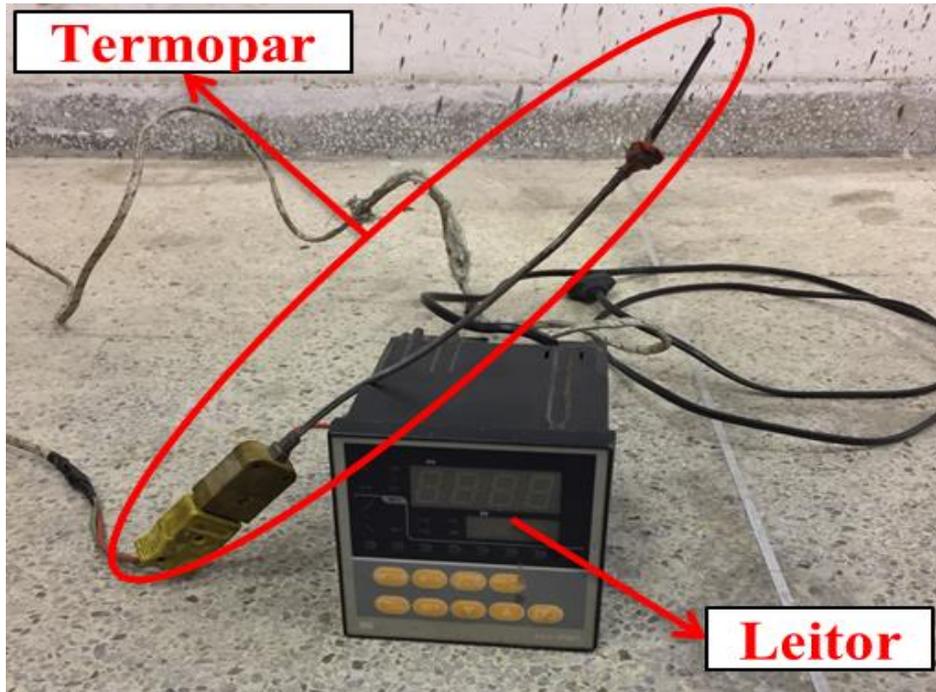


Figura 15 – Termopar.

3.10 O MOTOR DIESEL

Nos ensaios, foi utilizado todo o aparato experimental e instrumental descrito anteriormente. O motor diesel original foi avaliado mantendo-se as características oriundas do fabricante, inclusive, no que diz respeito à bomba injetora, que não sofreu ruptura do lacre, nem alteração em seu avanço, ver Figura 16.

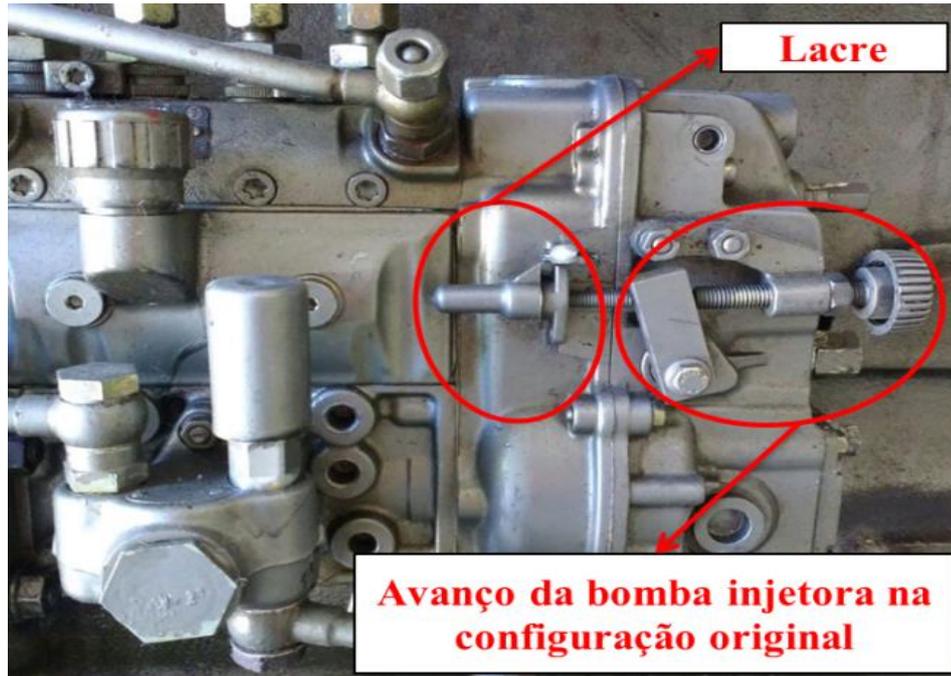


Figura 16 – Configuração original da bomba injetora.

Nos ensaios, ao se dar partida no motor, esperava-se aproximadamente 10 minutos até que suas condições de funcionamento entrassem em regime. Em seguida, adicionavam-se as cargas, fazendo uso do simulador de cargas, partindo-se da mínima potência (10 kW) até a máxima atingida, com incrementos de 5 kW. Concomitantemente, eram registrados todos os dados pertinentes à avaliação de desempenho do motor. O tempo de avaliação, em cada carga, era de, aproximadamente, 5 minutos e a frequência observada no painel de controle do simulador de cargas, variava de 62,8 Hz, na carga mínima até 58,2 Hz, na máxima carga.

Os testes realizados tiveram os seguintes propósitos: avaliação do consumo em função da potência, inspeção da emissão de particulados oriundos da combustão, avaliação do ruído provocado pelo funcionamento do motor e acompanhamento da temperatura dos gases de escape.

3.11 O MOTOR DUAL

A metodologia aqui utilizada para converter o motor original Diesel para o dual, não é considerada complexa quando comparada a outras já existentes, como as descritas no tópico 2.6.

O primeiro passo, para essa conversão, foi introduzir um misturador do tipo “boca de fogão”, ver Figura 17, entre o filtro de ar e o coletor de admissão do motor, ver Figura 18.



Figura 17 – Misturador tipo “boca de fogão”.

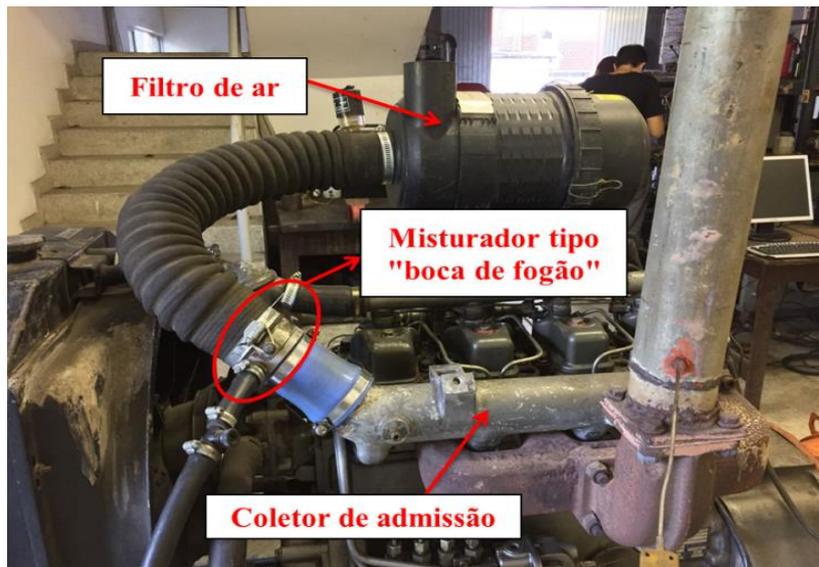


Figura 18 – Misturador tipo “boca de fogão” instalado entre o filtro de ar e o coletor de admissão.

Após instalar o misturador, o segundo e último passo foi a canalização da linha de gás natural até o misturador. Porém, fez-se necessário introduzir um redutor de pressão e uma válvula manual controladora de fluxo, ver Figura 19.

O redutor de pressão foi instalado com o propósito de reduzir a pressão e assim ser possível um maior controle da mistura ar/gás natural através da válvula com ajuste manual, que serve para balancear tal mistura.

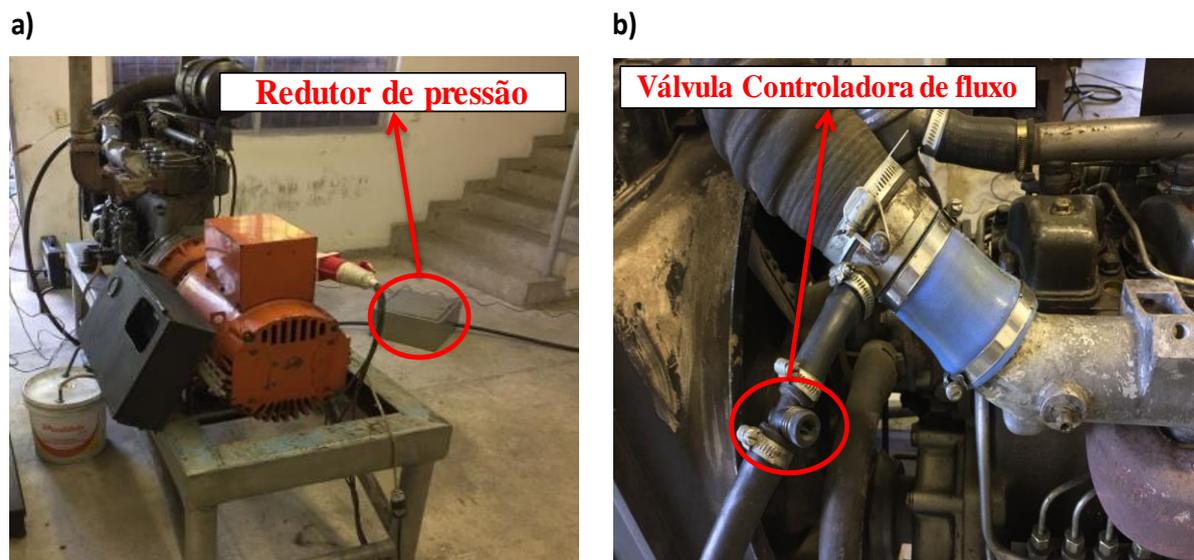


Figura 19 – a) Redutor de pressão e b) Válvula manual controladora de fluxo.

Nos experimentos realizados no motor dual foi utilizado todo o aparato experimental e instrumental já descrito nesse capítulo. Os testes realizados tiveram os seguintes propósitos: avaliação do consumo em função da potência, inspeção da emissão de particulados oriundos da combustão, avaliação do ruído provocado pelo funcionamento do motor e acompanhamento da temperatura dos gases de escape.

O motor dual, inicialmente, foi avaliado levando-se em conta os mesmos parâmetros do fabricante, porém, percebeu-se que no decorrer dos testes a frequência mantinha-se em torno de 64 Hz. Percebida esta particularidade, promoveu-se uma modificação no ajuste da bomba injetora, ver Figura 20, regulando-a para que a partir da primeira potência (10 kW) a frequência se estabelecesse em 60 Hz. A partir dessa mudança, novos ensaios foram realizados. Ao se dar partida no motor, esperava-se aproximadamente 10 minutos até que suas condições de funcionamento entrassem em regime. Em seguida, adicionavam-se as cargas,

fazendo uso do simulador de cargas, partindo-se da mínima potência (10 kW) até a máxima atingida, com incrementos de 5 kW. Concomitantemente, eram registrados todos os dados pertinentes à avaliação de desempenho do motor.



Figura 20 – Modificação no ajuste da bomba injetora.

3.12 AVALIAÇÃO DO CONSUMO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA

Para se efetuar a avaliação do consumo do motor, foi utilizado o simulador de carga, já descrito no item 3.3, ver Figura 8.

Com o grupo gerador em funcionamento, por meio do simulador, foi possível aplicar cargas ao motor, fazendo uso do painel de controle, no intervalo de 10 kW a 35 kW, verificando assim, a variação da massa ou volume de combustível com o tempo.

3.13 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO ÓLEO DIESEL

Para se determinar a vazão de óleo diesel, em função da mudança de carga, adotou-se a pesagem do diesel ao longo de seu consumo. Para tanto, foi utilizado um recipiente com a função de um tanque de combustível, com capacidade para 20 L, ver Figura 21.

Após se fazer funcionar o motor a uma determinada potência, com o recipiente em cima da balança, e dispendo-se de um cronômetro, acionava-o exatamente quando o medidor da balança mudava de leitura e voltava a parar o cronômetro exatamente quando a leitura na balança mudava novamente, coletando-se, assim, as medidas de massa e de tempo, e conseqüentemente, a vazão mássica.

Conhecendo a vazão mássica, foi possível se avaliar a vazão volumétrica do óleo diesel através da relação com a massa específica ($712,5 \text{ kg/m}^3$) que fora calculada no Laboratório de Combustíveis (LACOM) da UFPB.



Figura 21 – Recipiente com a função de um tanque de combustível.

3.14 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DO GÁS NATURAL

A determinação da vazão do gás natural foi realizada com o auxílio de um cronômetro e de um medidor volumétrico de gás natural, já instalado no LI, pela Companhia Paraibana de Gás (PBGÁS), ver Figura 22.



Figura 22 – Medidor volumétrico de gás natural fornecido pela PBGÁS.

Após um determinado tempo de funcionamento do grupo gerador, para todas as potências, acionava-se o cronômetro e registrava-se a leitura inicial contida no medidor. Alguns minutos depois, pausava-se o cronômetro e registrava-se a leitura final. Sendo possível, com esses dados, o cálculo da vazão volumétrica e consequentemente a vazão mássica, através da relação com densidade do gás natural, fornecida pela PBGÁS, ver Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do Gás Natural, fornecidas pela PBGÁS

Propriedade	Gás Natural
Massa específica (kg/m ³)	0,766
Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)	45308,46

Fonte: PBGÁS.

3.15 INSPEÇÃO DA EMISSÃO DE PARTICULADOS

No decorrer dos experimentos, era inserida a sonda do Opacímetro, descrito no item 3.6, no interior do cano de escape do motor, ver Figura 23, em seguida, era feito o

acompanhamento da opacidade da fumaça pela tela do computador, através do software Igor, interligado ao Opacímetro.



Figura 23 – Sonda do opacímetro inserida no cano de escape do motor.

3.16 AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DO RUÍDO

Com auxílio de um decibelímetro, descrito no item 3.7, era feita a avaliação da intensidade do ruído do motor, no momento da execução dos testes, mantendo-se o equipamento à aproximadamente um metro de distância do grupo gerador.

A configuração utilizada no decibelímetro foi a curva de ponderação “A” e resposta lenta (slow).

3.17 ACOMPANHAMENTO DA TEMPERATURA DOS GASES DE ESCAPE

Durante a realização dos experimentos, a temperatura dos gases de escape era monitorada para cada carga aplicada, com o auxílio de um termopar que foi posicionado após o coletor de escape do motor, ver Figura 24.

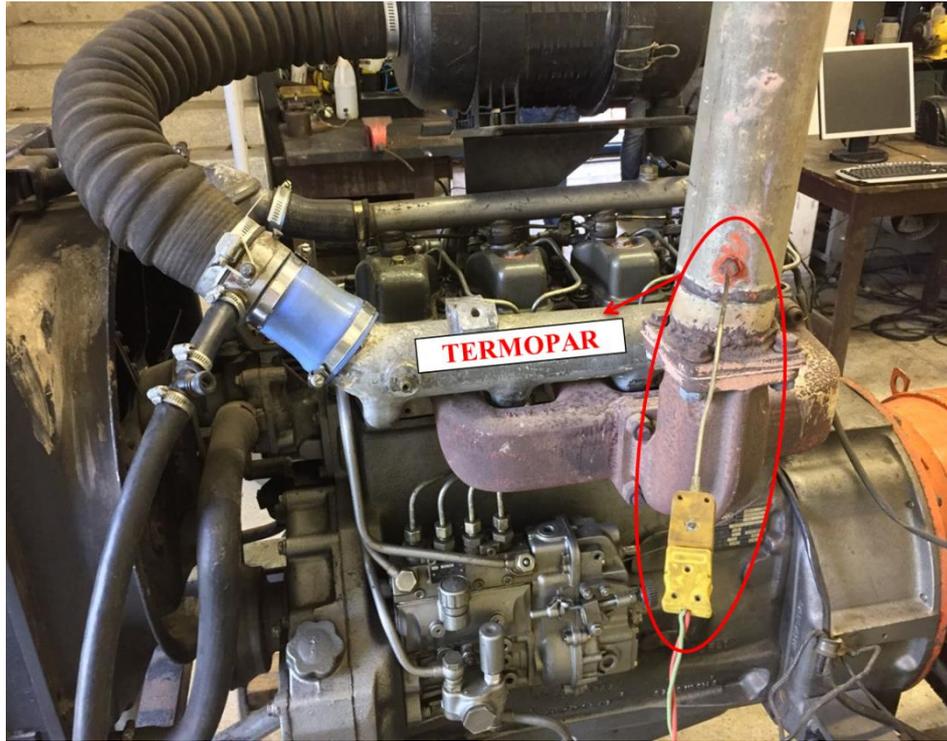


Figura 24 – Termopar instalado após o coletor de escape.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Serão demonstrados neste capítulo, os resultados e suas análises referentes aos ensaios discutidos no Capítulo III, sendo estes realizados no motor original a diesel e no dual (diesel/gás natural).

4.2 CONSUMO ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR ORIGINAL

A Figura 25 mostra o gráfico do consumo específico em função do percentual da potência do motor diesel original.

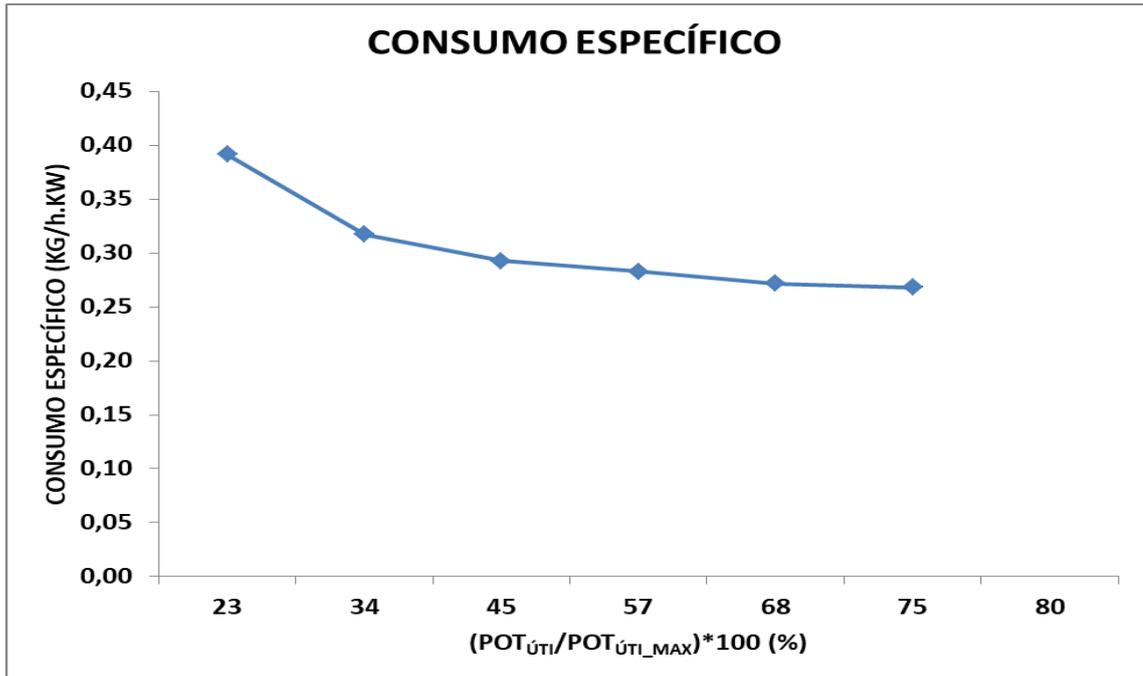


Figura 25 – Curva de consumo específico em função do percentual de potência $((P_{\text{útil}}/P_{\text{útil_Máx}}).100)$ do motor diesel original, onde $P_{\text{útil_Máx}}$ é a potência (kW) máxima suportada pelo motor.

Como pode ser observado na Figura 25, o que se conseguiu alcançar, com o motor diesel original, nos ensaios foi 75% da potência nominal que consta na carta fornecida pelo fabricante do motor, ver Apêndice I. Este percentual corresponde a 33 kW.

4.3 CONSUMO ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR DUAL

A Figura 26 mostra o gráfico do consumo específico, de diesel e gás natural em função do percentual da potência do motor dual.

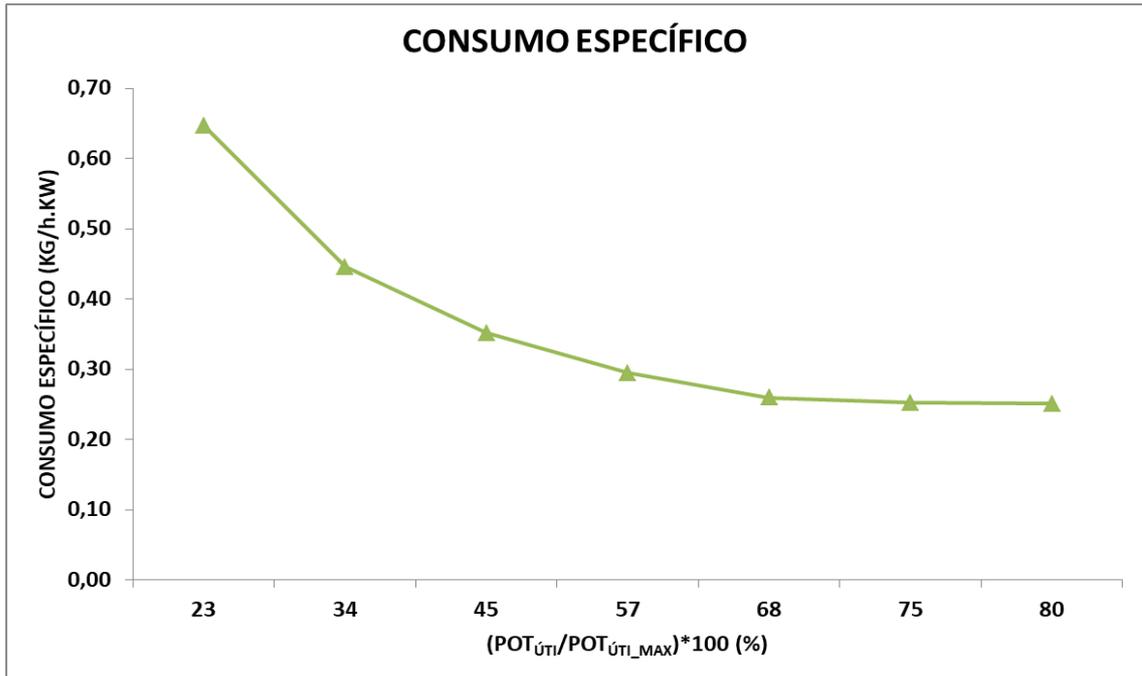


Figura 26 – Curva de consumo específico em função do percentual de potência $((P_{\text{útil}}/P_{\text{útil_Máx}}).100)$ do motor dual, onde $P_{\text{útil_Máx}}$ é a potência (kW) máxima suportada pelo motor.

Observando a Figura 26, pode-se perceber que a potência máxima alcançada, com o motor dual, foi 80% da potência nominal do motor. Este percentual corresponde a 35 kW.

4.4 SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO DIESEL PELO GÁS NATURAL

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 27 mostra o percentual de redução do consumo de diesel do motor dual com relação ao motor original, para cada carga aplicada.

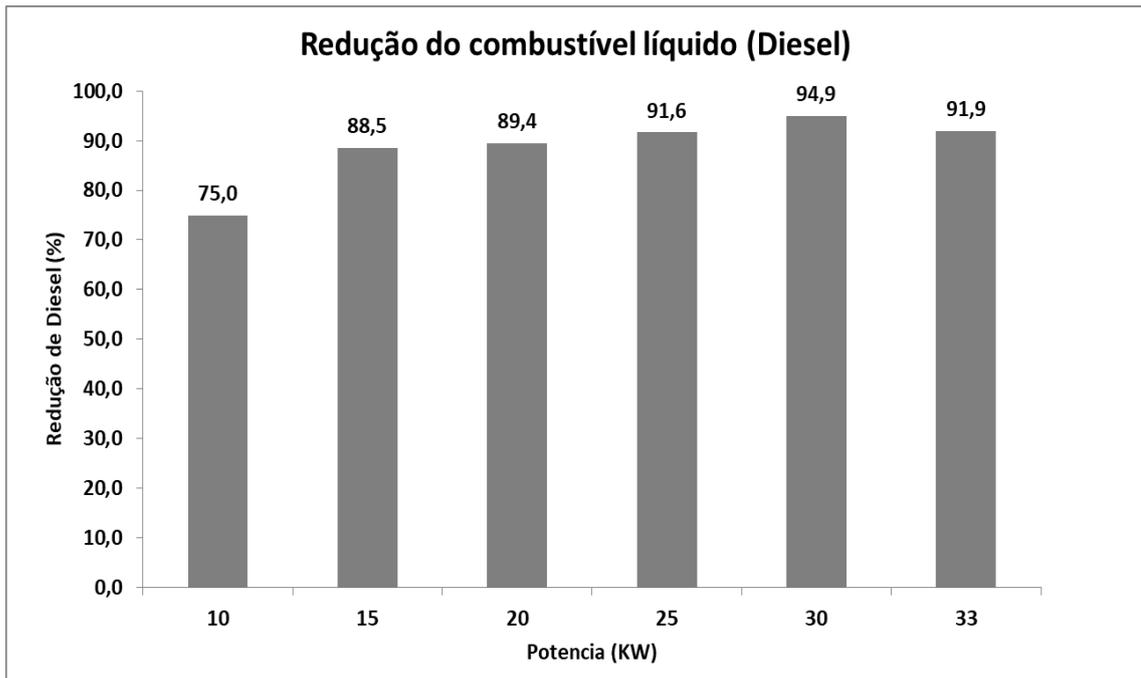


Figura 27 – Redução percentual do consumo de diesel utilizado no motor dual com relação ao original.

Como pode ser observado na Figura 27, conseguiu-se a maior substituição de diesel pelo gás natural na potência de 30 kW. Logo, foi possível operar o motor com apenas 5,1% de diesel. Vale ressaltar que na Figura 27 não é demonstrado a redução de diesel na potência de 35 kW, pois apenas no motor dual foi possível reproduzi-la.

4.5 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR DUAL E ORIGINAL

A Figura 28 mostra o gráfico da potência em função da frequência, do motor dual e do original a diesel.

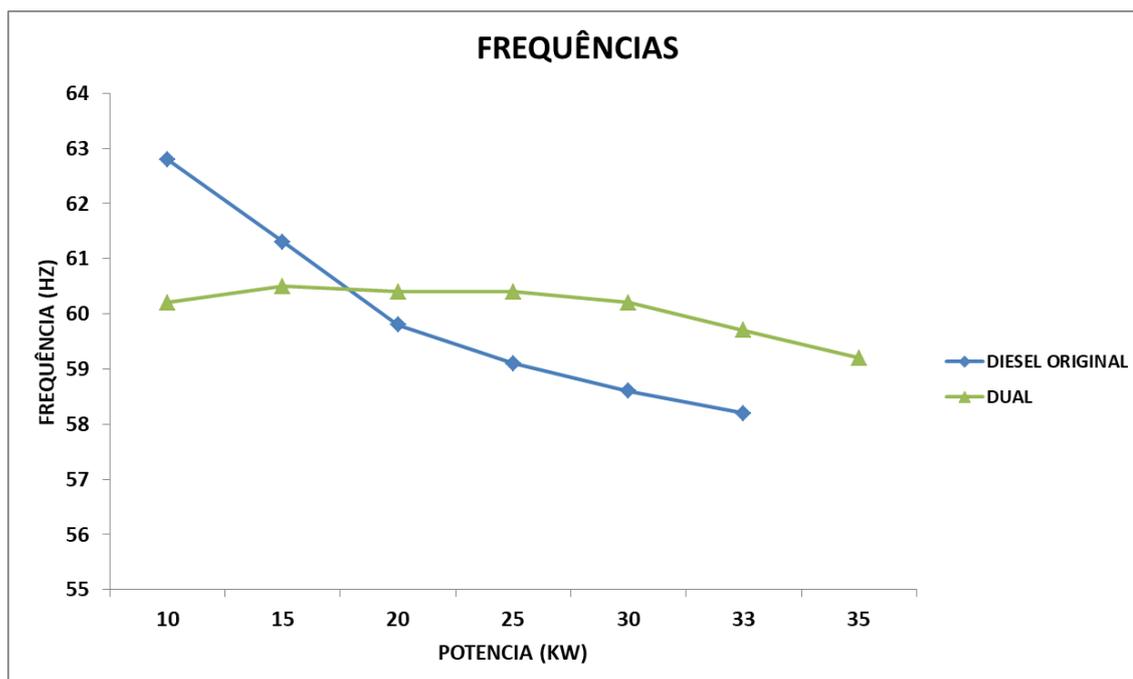


Figura 28 – Curvas de potências, em função das frequências de rede, relacionadas com o motor dual e o original a diesel.

Na Figura 28, verifica-se que o motor dual obteve um ganho de potência de 5,7 %, como, também, maior estabilidade na frequência, que se manteve bem próxima da frequência de rede (60 Hz). A curva do fabricante MWM, ver Apêndice I, especifica para este motor, uma potência máxima de 44,13 kW (60 cv), mas o motor só conseguiu, nos testes realizados no LI, a potência máxima de 33 kW (44,87 cv).

4.6 AS EFICIÊNCIAS TÉRMICAS DOS MOTORES, DUAL E ORIGINAL

Levando-se em consideração a Eq. (1) na página 14, considerando o PCI do gás natural igual a 45308,46 kJ/kg, ver Tabela 3 na página 28, e o PCI do diesel 42551,28 kcal/kg (10170 kcal/kg), ver Apêndice II, construiu-se a Figura 29, com as curvas de eficiência dos motores original a diesel e o dual.

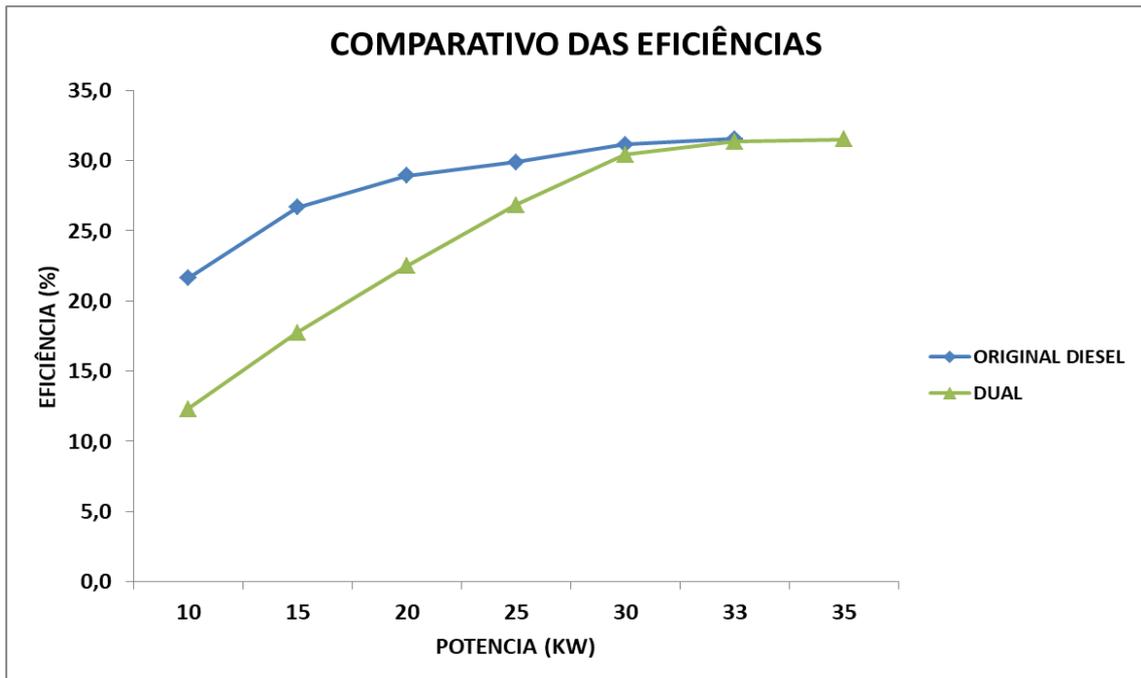


Figura 29 – Curvas de potências em função da eficiência térmica, geradas a partir do motor original, a diesel, e do dual.

Na Figura 29, percebe-se que o motor funcionando com diesel obteve uma eficiência maior, em toda a faixa de potência, do que o alimentado com diesel e gás natural simultaneamente.

4.7 CUSTO DE OPERAÇÃO DOS MOTORES

Conhecendo-se o consumo dos motores, e o valor de mercado cobrado pela aquisição dos combustíveis, pode-se determinar o custo de operação, advindo de seus funcionamentos. Na apreciação dos custos, o valor considerado para o litro do diesel comum foi R\$ 3,00, na bomba, e de R\$ 1,644, o m³ de gás natural para geração de energia, levando-se em conta os preços atuais praticados no mercado local, no mês de setembro do ano 2017.

Na Figura 30, se destaca a relação do custo de operação dos motores dual e original, operando em condições semelhantes.

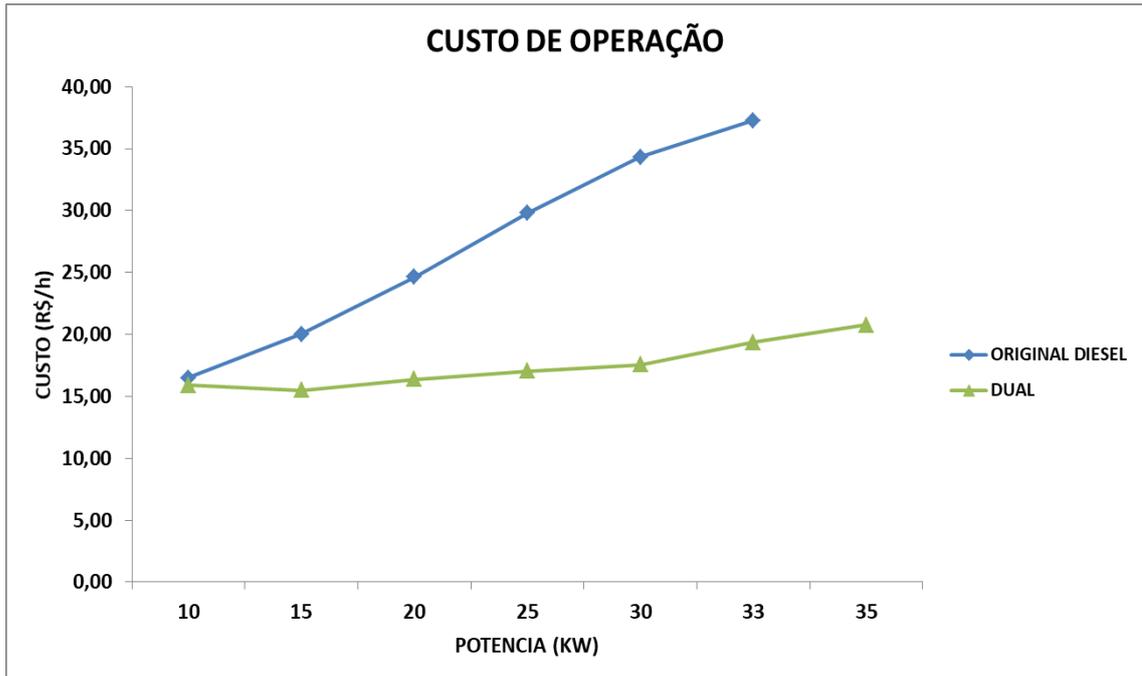


Figura 30 – Curvas de potências, em função do custo de operação, geradas a partir do motor original, a diesel, e do dual.

Observando-se a Figura 30, percebe-se que em todas as faixas de potência o motor dual teve um custo de operação menor do que o motor original, chegando a reduzir o custo de operação em até 17,92 R\$/h, produzindo a mesma potência útil.

4.8 ESTIMATIVA DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para avaliar a economia proporcionada pela conversão do motor a diesel para dual, foi estimado o percentual de economia em função da carga aplicada, através da Eq. (2).

$$E\% = \frac{C_{diesel} - C_{dual}}{C_{diesel}} * 100 \quad (2)$$

Onde,

E%, percentual de economia;

C_{diesel}, custo com combustível para manter funcionando o motor diesel por uma hora;

C_{dual}, custo com combustível para manter funcionando o motor dual por uma hora;

Na Figura 31, pode ser visualizada a curva que representa esse percentual de economia, do motor dual com relação ao diesel, em função da carga aplicada.

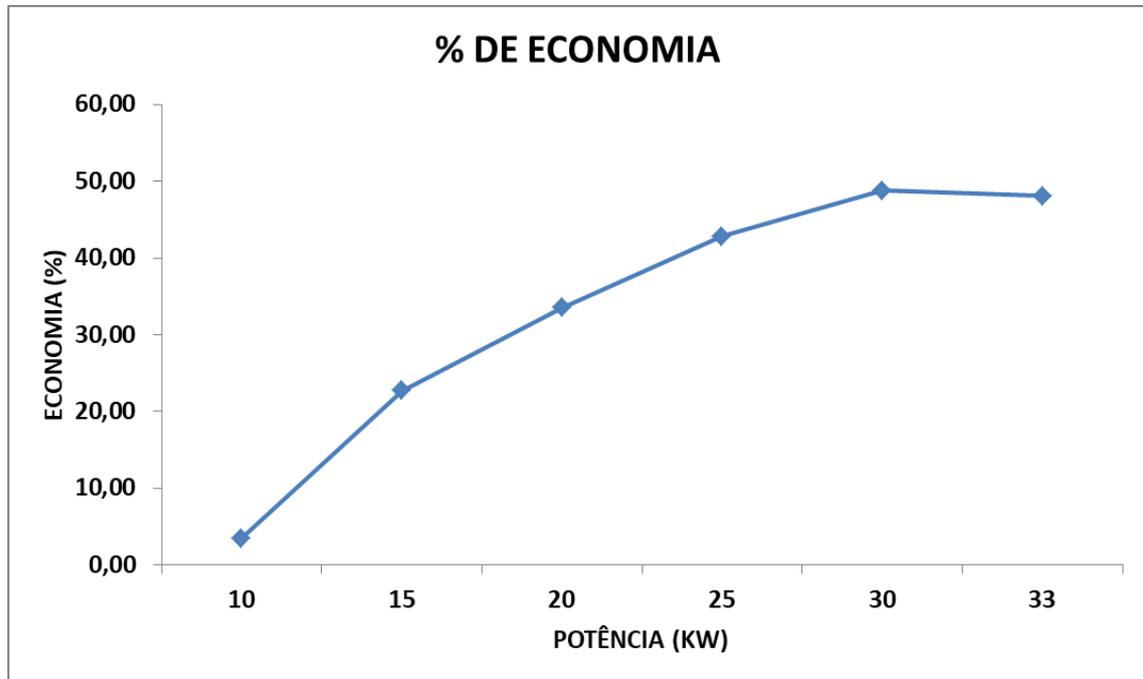


Figura 31 – Curva de economia, obtida com uso do gás natural e diesel no motor dual, em relação ao uso do diesel no motor original.

Observa-se, na Figura 31, que o uso do gás natural e diesel, simultaneamente, é mais econômico para toda faixa de potência, sendo o ponto de 10 kW o de menor economia, equivalendo-se a 3,49 % e o ponto de 30 kW o de maior economia, 48,77 %. Deve ser observado, que potências acima de 33 kW não aparecem na Figura 31, tendo em vista que o motor a diesel não suportou potências mais elevadas do que aquele limite, ver Figura 28.

4.9 EMISSÃO DE PARTICULADOS

Para se analisar os gases de escape do motor original e do dual, foi considerada apenas a emissão de particulados. Assim, determinou-se o índice de fumaça (opacidade), medida em $K (m^{-1})$, que é mensurado na inspeção veicular de motores do ciclo Diesel, em conformidade com a resolução CONAMA 8/93.

A Figura 32 retrata a emissão de particulados para cada potência, durante os ensaios realizados, tanto para o motor dual como para o motor original.

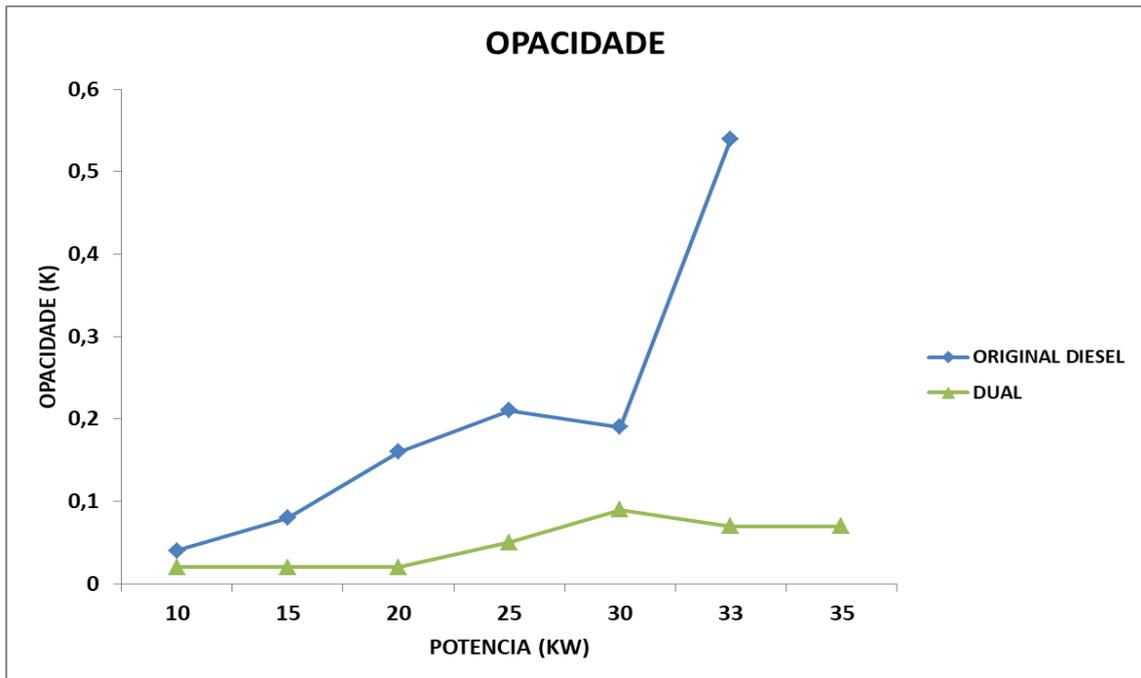


Figura 32 – Curvas de opacidade da fumaça para o motor dual e original a diesel.

Observa-se, na Figura 32, que o motor dual teve, em toda a faixa de potência, uma opacidade bem menor do que aquela apresentada pelo motor a diesel. O maior registro de opacidade no motor Diesel foi de $0,54 \text{ m}^{-1} (\text{K})$, enquanto que no motor dual foi de $0,09 \text{ m}^{-1} (\text{K})$.

4.10 TEMPERATURA DOS GASES DE ESCAPE

Observando-se a Figura 33, é possível visualizar os registros da temperatura dos gases de escape, do motor dual e do original a diesel, para cada potência.

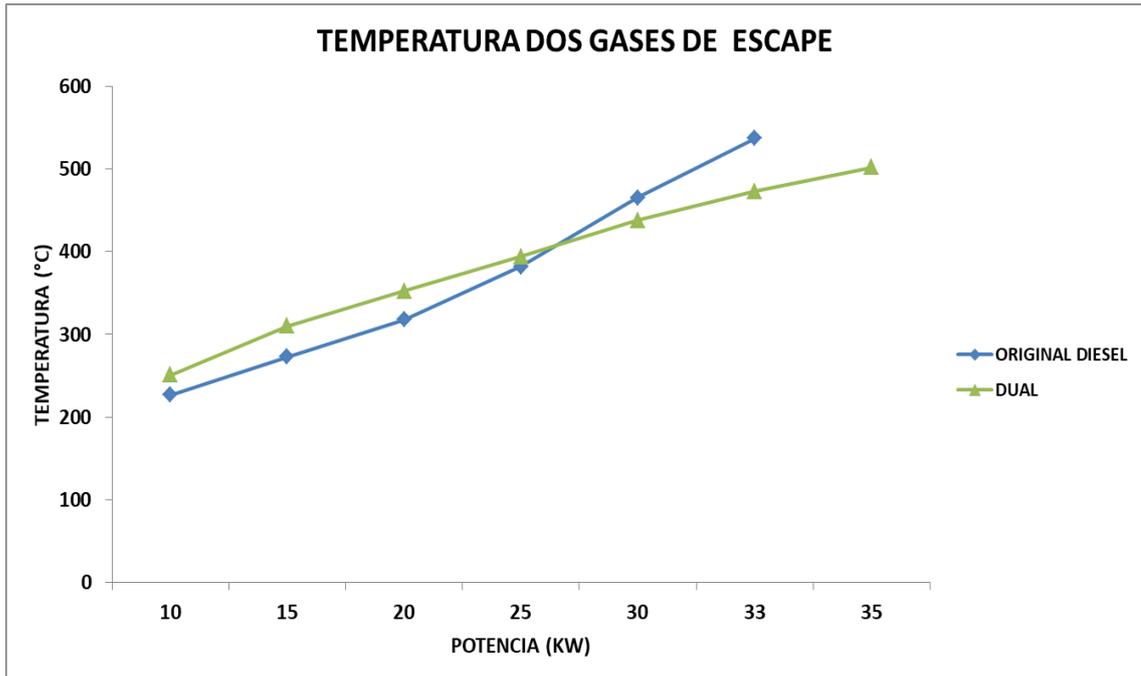


Figura 33 – Curvas da temperatura dos gases de escape do motor dual e original.

Observa-se, na Figura 33, que até, aproximadamente 27 kW, os gases de escape do motor dual apresentam uma temperatura mais elevada em relação ao motor diesel. A partir daquela potência é que os gases de escape do motor diesel passam a apresentar temperaturas maiores. Pode-se observar também que a temperatura aumenta com o aumento da potência.

4.11 A INTENSIDADE DO NÍVEL DE RUÍDO

O maior valor de ruído registrado para o motor Diesel foi 97,8 dB, enquanto que no motor dual foi 95,5 dB. Com isso, constata-se que a conversão proporcionou uma redução de 2,3 dB no ruído do motor.

Essa redução, obviamente, pode proporcionar, ao trabalhador, um tempo maior de exposição ao ruído. A Tabela 4, especifica os limites estabelecidos, pelo Ministério do Trabalho (segundo a Norma Regulamentadora N° 15 – NR 15), de exposição diária do trabalhador, ao ruído contínuo, ou intermitente, que não sejam provenientes de impactos.

Tabela 4 – Limites de exposição aos níveis de ruído, segundo a NR 15 do Ministério do Trabalho.

NÍVEL DE RUÍDO DB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: Ministério do Trabalho.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi discutida a adaptação do motor MWM, modelo D229-4, a diesel para funcionar com bicomustível (diesel e gás natural), utilizando uma metodologia de conversão própria. O motor, em sua configuração original a diesel e dual, teve seu desempenho avaliado, no que diz respeito ao consumo específico de combustível, eficiência, custo de operação, emissão de particulados, temperatura dos gases de escape e intensidade do ruído.

Dessa forma, considerando os resultados experimentais obtidos através dos ensaios com o motor MWM, operando somente com diesel e também de forma dual, pode-se concluir que:

- Nos ensaios de potência, com o motor nas suas configurações originais a diesel, não foi possível reproduzir a potência máxima de 44,13 kW (60 cv) especificada pelo fabricante, ver Apêndice I. Este fato pode ser justificado pelo desgaste proporcionado devido o tempo de uso. Na prática, o que se alcançou foi 33 kW (44,87 cv), ver Figura 28. Já o motor dual, conseguiu atingir uma potência de 35 kW (47,58 cv), ou seja, ocasionou um ganho de potência de 5,7 %. Isso mostra que, tornar dual motores diesel, de forma correta e com uma tecnologia não muito complexa, pode, também, proporcionar ganho de potência útil.
- A redução do combustível líquido pelo gás é bastante considerável, pois, na menor potência (10 kW) foi possível substituir 75% do diesel pelo gás natural, sendo essa a menor redução. Já na potência de 33 kW, foi onde se conseguiu a maior substituição de diesel pelo gás, chegando a 94,9 %. Desta forma, estes dados demonstram uma economia nos custos com combustível, levando-se em conta que atualmente o gás natural é bem mais barato que o diesel.

- Grupos geradores, convertidos para funcionar com bicomcombustível (diesel/gás natural), proporcionam uma estabilidade na frequência de rede, ver Figura 28, com tensão de alimentação estável, assegurando uma maior confiabilidade, e segurança, ao serem utilizados, próximos ou conectados a equipamentos eletrônicos. O mesmo não ocorreu com o motor original, isto se deve ao fato de que o motor utilizado neste trabalho tem o governador mecânico. Por outro lado, o motor dual reproduz eficiências menores, se comparado ao motor diesel, ver Figura 29.
- Levando-se em conta os preços praticados atualmente no mercado local, para o diesel e gás natural, o motor dual é mais viável economicamente que o motor diesel. Economia esta, que chega a reduzir o custo de operação em até 17,92 R\$/h. Logo, existe variação no percentual de economia, que vai de 3,49% até 48,77%, a depender da carga aplicada.
- A conversão do motor diesel para dual proporcionou uma redução significativa na emissão de particulados (opacidade da fumaça). O maior registro de opacidade no motor diesel foi de $0,54 \text{ m}^{-1} \text{ (K)}$, enquanto que no motor dual foi de $0,09 \text{ m}^{-1} \text{ (K)}$, ver Figura 32. Esses resultados garantem uma diminuição do impacto ambiental, bem como, uma redução na opacidade da fumaça, que no motor a diesel já se encontrava dentro dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA 8/93, que é de $0,83 \text{ m}^{-1} \text{ (K)}$ para motores naturalmente aspirados.
- Houve uma diminuição no ruído, tendo passado de 97,8 para 95,5, o que permite o aumento a exposição diária do trabalhador ao ruído, por aproximadamente, mais 30 minutos, ver Tabela 4.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver um sistema de controle eletrônico do fluxo de gás natural, com o propósito de automatizar a demanda de gás solicitada pelo motor.
- Adaptar um motor turbo alimentado à condição de Dual, verificando suas condições de desempenho, economia, gases de escape, tal como se procedeu neste trabalho.

REFERÊNCIAS

BARROS, Bruno Vinícios de Menezes. **Influência da Contrapressão e do Resfriamento da Turbina no Desempenho de um Motor Diesel Ottolizado para Gás Natural**. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

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.

COMINO, Juan Carlos Cando. **Investigation of Knock Limits of Dual Fuel Engines**. 96 f. PFC (Industrial Engineering Master's) – Department of Energy, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungria, 2013.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**, 2017, p. 232.

FERRAZ, Fagner Barbosa. **Análise de Desempenho de um Motor Diesel Turboalimentado Ottolizado para Gás Natural**. 123 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

FIGUEIRAL, Carlos Miguel Almeida. **Aplicação do Conceito de Combustão *Dual Fuel* num Motor Diesel Pesado**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente) – Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2016.

GARNER, Peter. **Rio natural gas, the aternative fuel of the future**. 27 f. Thesis (Bachelor of Arts) - University of Nevada, Las Vegas, Estados Unidos, 1999.

MANSOR, Wan Nurdiana Wan. **Dual Fuel Engine Combustion and Emissions – An Experimental Investigation Coupled With Computer Simulation**. 176 f. Dissertation (Doctor of Philosophy) - Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, Estados Unidos, 2014.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. Norma regulamentadora N° 15 – NR 15. <http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-15-atividades-e-operacoes-insalubres>, acessado em: 24/07/2017, as 14:30.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Ranking Mundial de Energia e Socioeconomia**, Novembro 2015, p. 4.

OLIVEIRA, Benilton Luis Nascimento de. **Análises Energética e Exergética de um Motor Diesel com Turbocompressor Ottolizado para GLP sob a influência de Sistemas de Alimentação**. 107 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

OLIVEIRA, Alejandro Calvo. **Exhaust Gas Recirculation in Dual-Fuel Engine**. 76 f. Master's Thesis – Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finlândia, 2016.

PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477, acessado em: 24/09/2017, as 10:30.

TAYLOR, C.F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blücher, 1971. 558 p.

TÖRMÄNEN, Juhani. **Variable Valve Actuation and Dual-Fuel Combustion**. 111 f. Thesis (Master) – Department of Energy Technology, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finlândia, 2015.

VELÁZQUEZ, Stephanie Maritza Villegas. **The Road from Diesel to Natural Gas: The Impact of Changing Fuel Sources in Road Transportation: The Case of Kuehne + Negel.** 76 f. Thesis (Master) - Norwegian School of Economics, Bergen, Noruega, 2014.

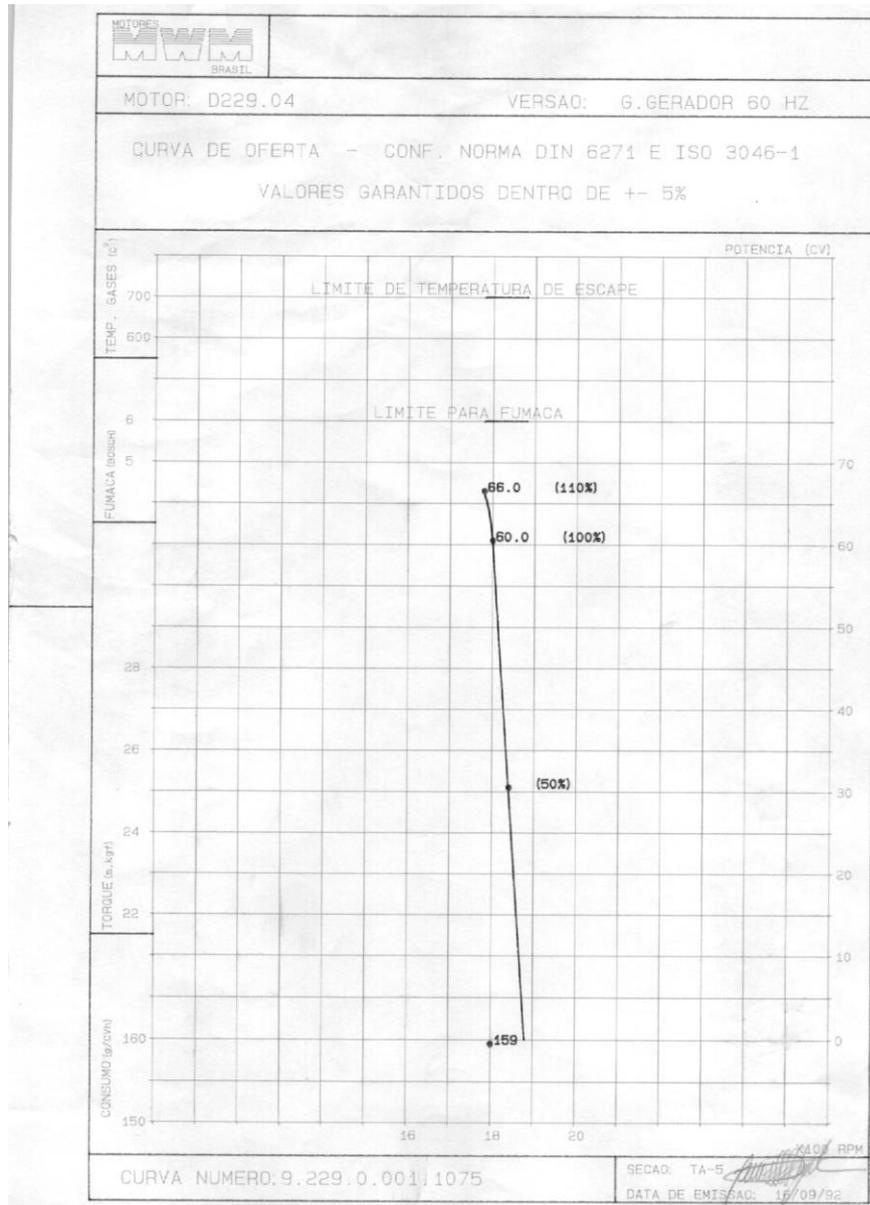
WONG, Wei Lon. **Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel in Diesel Engines.** 118 f. Dissertation (Bachelor of Mechanical Engineering) – Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Austrália, 2005.

ZHANG, Taoju. **Possibilities of Alternative Vehicle Fuels – A Literature Review.** 40 f. Student Thesis (Bachelor Degree) – Bachelor Program in Energy Systems. Department of Building, Energy and Environmental Engineering. Faculty of Engineering and Sustainable Development, University of Gävle, Gävle, Suécia, 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE I

CURVA DO MOTOR ESTACIONÁRIO MWM D229-4, FORNECIDA PELO FABRICANTE



APÊNDICE II

TABELA DE CÓDIGOS DE ENERGÉTICOS DE COMBUSTÍVEIS

TABELA DE CÓDIGOS DE ENERGÉTICOS

COD	ENERGÉTICO	UC	V _{AR} ^T	V _G ST	PCI	PCS	FATOR
101	Oleo A (BPF) - OLEO 1A	t	10.80	10.13	9560	10200	1000.0000
102	Oleo C (OC - 4)	t	11.10	10.37	9940	10800	1000.0000
103	Oleo D (BTE)	t	10.50	9.40	0	10500	1000.0000
104	Oleo E - OLEO 2A	t	10.70	10.07	9540	10100	1000.0000
105	Oleo F	t	10.45	9.40	9530	10470	1000.0000
106	Oleo G - OLEO 3A	t	10.17	9.37	9443	10000	1000.0000
107	Oleo H	t	10.15	9.34	9420	10220	1000.0000
108	Oleo Diesel	m3	11.40	10.61	10170	8935	838.0000
109	Querosene	m3			0	8750	1000.0000
110	GLP	t	12.20	11.50	10800	11900	1000.0000
111	Propano Puro	t			0	11950	1000.0000
112	Butano especial	1000 m3			0	11000	1000.0000
113	Gas Natural	1000 m3	11.17	10.98	10350	9850	0.9517
114	Gas de Nafta	t	6.40	6.08	3090	4300	1000.0000
115	Mistura 25	t			0	10512	1000.0000
116	Mistura 50	t			0	10625	1000.0000
117	Mistura 75	t			0	10738	1000.0000
118	Mistura 80	t			0	10760	1000.0000
119	Gas de Refinaria	m3	6.16	5.80	5800	6884	0.9375
120	Coque de Petroleo	t			0	8500	1000.0000
121	Oleo de Tempera B	t			0	10625	1000.0000
122	T.O. - 202	t			0	7965	1000.0000
123	Nafta	t			0	11130	1000.0000
124	Oleo 4A	t	10.16	9.35	9430	10050	1000.0000
125	Gasolina	m3			0	8250	1000.0000
126	Oleo 5A	t	10.14	9.33	9410	10000	1000.0000
127	Oleo 6A	t	10.13	9.32	9400	10000	1000.0000
128	Residuo da Prod.-Piches	t			0	9000	1000.0000
129	Oleo RV	t			0	9500	1000.0000
130	Oleo 7A	t	10.10	9.28	9370	9970	1000.0000
131	T.A.R.-Oleo Res. Asfalto	t			0	9000	1000.0000
201	Lenha (mata nativa)	m3	3.33	3.28	2890	1120	350.0000
202	Serragem	t			0	2500	1000.0000
203	Cavacos	t			0	2500	1000.0000
204	No de pinho	t			0	4000	1000.0000
205	Residuos florestais	t			0	2700	1000.0000
206	Maravalha / finos	m3			0	1300	1000.0000
207	Alcatrao madeira	t			0	5920	1000.0000
208	Lenha (reflorestamento)	m3	3.33	3.28	2890	1280	400.0000
209	Casca de madeira	t			0	3000	1000.0000
210	Carvao vegetal	t	6.96	6.90	6200	6800	1000.0000
211	Moinha carvao vegetal	t			0	4800	1000.0000
212	Bagaco cana - in natura	t	2.34	2.29	1790	2252	1000.0000
213	Alcool hidratado	m3			0	5500	1000.0000
214	Casca semen. de algodao	t			0	2800	1000.0000
215	Casca semen. de amendoim	t			0	3200	1000.0000
216	Palha e sabugo de milho	t			0	2250	1000.0000
217	Bagaco cana-20% umidade	t			0	3240	1000.0000

COD - Código do energético
 UC - Unidade Comercial
 V_{AR}^T - Volume de ar teórico em Nm³/Kg combustível
 V_GST - Volume de gases secos teóricos em Nm³/Kg combustível
 PCI - Poder Calorífico Inferior em Kcal/Kg
 PCS - Poder Calorífico Superior em Mcal/UC
 FATOR - Fator de conversão de unidade