



Universidade Federal  
de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE-UFCG  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA-CCT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA-PPGEM



**DÉBORA VERÔNICA SOARES DA SILVA**

**ANÁLISE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR  
TERMOGERAÇÃO, UTILIZANDO MOTORES DO CICLO DIESEL.**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2016**

**DÉBORA VERÔNICA SOARES DA SILVA**

**ANÁLISE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA  
GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR TERMOGERAÇÃO, UTILIZANDO  
MOTORES DO CICLO DIESEL.**

Trabalho de Dissertação de Mestrado apresentado como requisito para obtenção do grau de MESTRE em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

**Orientador:** Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, Débora Verônica Soares da.  
Análise das emissões atmosféricas e eficiência energética na geração de eletricidade por termogeração, utilizando motores do ciclo diesel / Débora Verônica Soares da Silva. – Campina Grande, 2016.  
83 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

"Orientação: Prof. Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa".

Referências.

1. Motores de Combustão Interna. 2. Eficiência Energética. 3. Termelétrica. 4. Ciclo Diesel. 5. Emissões. I. Costa, Yoge Jerônimo Ramos da. II. Título.

CDU 621.43(043)

“ANÁLISE DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA  
GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR TERMOGERAÇÃO UTILIZANDO MOTORES  
DO CICLO DIESEL”.

**DÉBORA VERÔNICA SOARES DA SILVA**

Dissertação Aprovada em 29/02/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes  
membros:



---

**Dr. Yoge Jerônimo Ramos da Costa**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

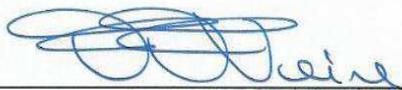


---

**Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho**

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Fernando Fernandes Vieira**

Examinador Externo

DESA/CCT/UEPB

A Deus, em primeiro lugar, por ter me dado força, paciência e sabedoria para conseguir chegar ao fim deste trabalho. Aos meus pais, irmãos, irmãs e amigos pelo amor, carinho e estímulo que me ofertaram. Dedico lhes essa conquista como gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela Vida, pelo amor, pela saúde, pela coragem e pelas oportunidades que me foram dadas. Reconheço que Ele é dono de toda Ciência e Sabedoria.

Aos meus pais (in memoriam da minha mãe), minhas irmãs e irmãos, minha tia Maria e ao meu namorado Matheus meus sinceros agradecimentos pelo: amor, carinho, paciência e a todos os esforços e sacrifícios para me ajudarem a chegar até aqui.

Serei eternamente grata por tudo.

A CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro concedido.

À Universidade Federal de Campina Grande pela magnífica Instituição de Ensino Superior, ao meu orientador Prof. Dr. Yoge Jeronimo Ramos da Costa pela dedicação e orientação neste trabalho. A banca de defesa com os Professores Drs. Celso e Fernando.

Ao Coordenador do PPGEM-UFCG, Prof. Dr. Carlos José de Araújo, e a todos os professores que fazem parte do programa que me auxiliaram na minha formação.

À Usina Termelétrica de Campina Grande, na pessoa do Gerente Administrativo e Financeiro Sr. Sérgio Vinicius da Costa Cândido por novamente conceder a oportunidade de realizar mais um trabalho em parceria com a empresa.

Agradeço ao apoio aos que fizeram parte da área de Operações da UTE, ao Gerente Sr. Ricardo Farias e sua equipe de técnicos de operação e a equipe de Operadores, Supervisores e ao Gerente de Planta Sr. Josiel Alves da Silva da Empresa Wärtsilä Brasil Ltda. pela ajuda e pelas experiências repassadas e vivenciadas na Usina Termelétrica de Campina Grande-PB.

Aos meus colegas de mestrado: Bruno Ferreira, Mirenia Kalina, Francisca Cibele e João Paulo.

E a todos que fazem parte da minha vida e torcem pelo meu crescimento pessoal e profissional, meu muito obrigado.

## RESUMO

A crise energética em 2001 evidenciou a necessidade de expansão dos investimentos no Setor Elétrico Brasileiro. Em função da crise hidráulica, ocorreu um incentivo governamental para a geração elétrica a partir do acionamento das Termelétricas. Em 2013, o setor elétrico brasileiro emitiu cerca de 115 kg de CO<sub>2</sub> para produzir 1 MWh. No Brasil, atualmente cerca de 41 Termelétricas utilizam óleo combustível e 2122 utilizam óleo diesel. Os combustíveis utilizados no motor da Termelétrica em estudo são do tipo: diesel e óleo combustível que contém baixo teor de enxofre. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é analisar as emissões em uma Termelétrica para compostos formados na combustão dos motores: CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub> tendo como elemento de comparação as emissões do O<sub>2</sub> residual da combustão. Experimentos foram realizados em escala de potências crescente e decrescente no motor com capacidade de geração de 8,45 MW com intervalos de 1 MW. Os dados das emissões dos gases no motor foram coletados através do equipamento analisador de gases de exaustão e serão comparados com dados das condições do motor em operação através do sistema de monitoramento da UTE que possibilita armazenar os dados e a visualização dos sistemas que compõem o motor em tempo real. O estudo comparativo com a Tese de Costa (2007) em um motor de 150 KW instalado no laboratório de Termogeração da UFCG mostra que elevação do consumo de diesel com elevação da potência de acordo com a literatura. Apontando a tendência da redução do consumo de combustível poluente, diesel, por um combustível de fonte mais limpa, o gás natural, em motores de 8,45 MW de uma Termelétrica, visando a redução das emissões dos poluentes primários da combustão devido à utilização do modo dual, operando com diesel e gás natural nos motores da Termelétrica, mantendo as características originais do motor, o bom desempenho e elevando a eficiência energética.

**Palavras-Chave:** Motores de Combustão Interna. Eficiência Energética. Termelétrica. Ciclo Diesel. Emissões.

## ABSTRACT

The energy crisis in 2001 highlighted the need for expansion of investments in the Brazilian power sector. Depending on the hydraulic crisis, there was a government incentive for electricity generation from the drive of Thermoelectric. In 2013, the Brazilian electricity sector issued about 115 kg of CO<sub>2</sub> to produce 1 MWh. In Brazil, currently about 41 thermoelectric plants use fuel oil and diesel oil use in 2122. The fuel used in the thermoelectric engine studied are like, diesel and fuel oil containing low-sulfur. In this sense, the objective of this research is to analyze the issues in a Thermal Power Plant to compounds formed in combustion engines: CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub> having as comparator emissions from residual O<sub>2</sub> combustion. Experiments were performed on a scale of increasing and decreasing the engine power 8.45 MW of generating capacity of 1 MW ranges. The data of emissions of gases in the engine were collected through the analyzer of exhaust gas equipment and will be compared with data from the engine conditions in operation through the UTE monitoring system that enables stores data and visualization systems that make up the engine in real time. The comparative study with the Thesis Costa (2007) in a 150 kW engine installed on Thermogeneration UFCG laboratory shows that rising diesel consumption with power lift according to the literature. Pointing the trend of reducing polluting fuel consumption, diesel by a cleaner fuel source, natural gas in engines of 8.45 MW of thermoelectric aimed at reducing emissions of primary pollutants from combustion due to the use of dual mode, operating with diesel and natural gas in the thermoelectric engines, maintaining the original characteristics of the engine, good performance and increasing energy efficiency.

**Keywords:** Internal Combustion Engines. Energy efficiency. Thermoelectric. Diesel cycle. Emissions.

## LISTA DE ABREVIACOES

<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural
<b>BEN</b>	Balanço Energético Nacional
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional de Meio ambiente
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>EPA</b>	Agência de proteção ao meio ambiente – Estados Unidos
<b>GLP</b>	Gás Liquefeito de Petróleo
<b>GNL</b>	Gás natural liquefeito
<b>GNV</b>	Gás Natural Veicular
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrognio
<b>HC</b>	Hidrocarbonetos
<b>ICE</b>	Ignição por centelha
<b>ICO</b>	Ignição por compressão
<b>IHM</b>	Interface Homem Máquina
<b>MME</b>	Ministério das Minas e Energia
<b>MP</b>	Material particulado
<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrogênio
<b>NO</b>	Monóxido de nitrogênio
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de nitrogênio
<b>NO<sub>x</sub></b>	xidos de nitrogênio
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio
<b>OCB 1</b>	leo combustível pesado, com teor de enxofre máx de 1% em massa
<b>PCI</b>	Poder Calorífico Inferior
<b>PMI</b>	Ponto morto inferior
<b>PMS</b>	Ponto morto superior
<b>PLC</b>	Comunicação da Linha de Energia
<b>SE</b>	Subestação distribuidora de energia elétrica
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de enxofre
<b>S-500</b>	leo diesel com 500 ppm de enxofre em sua composição química
<b>UAM</b>	Unidade Acadmica de Engenharia Mecânica
<b>DEM</b>	Departamento de Engenharia Mecânica
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Campina Grande
<b>UTE</b>	Usina Termelétrica
<b>VLT</b>	Valores Limites de Tolerância

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Esquema de um motor de combustão interna, operando em um ciclo de quatro tempos .....	19
<b>Figura 2</b> - Esquema de funcionamento do Ciclo Otto para motores quatro tempos.....	21
<b>Figura 3</b> - Diagrama P-V e T-S para o Ciclo Termodinâmico Otto .....	22
<b>Figura 4</b> - Esquema de funcionamento do Ciclo Diesel para motores quatro tempos.....	22
<b>Figura 5</b> - Diagrama P-V e T-S para o Ciclo Termodinâmico Diesel .....	24
<b>Figura 6</b> - Diagrama P-V e T-S para o Ciclo Termodinâmico Dual.....	25
<b>Figura 7</b> - Matriz Elétrica Brasileira .....	37
<b>Figura 8</b> - Fluxograma de operação da UTE .....	44
<b>Figura 9</b> - Seção transversal do motor V20W32 .....	45
<b>Figura 10</b> - Seção transversal do motor V20W32 .....	45
<b>Figura 11</b> - Interface gráfica do banco de dados da UTE- temperatura média dos cilindros do motor de 8,45 MW .....	46
<b>Figura 12</b> - Interface gráfica do banco de dados da UTE- temperatura, fluxo mássico de combustível do motor de 8,45 MW .....	47
<b>Figura 13</b> - Interface gráfica do banco de dados da UTE- temperatura da água de entrada e saída do motor de 8,45 MW .....	47
<b>Figura 14</b> - Analisador de gases utilizado na UTE.....	48
<b>Figura 15</b> - Sonda do analisador de gases instalada no motor de 8,45 MW .....	49
<b>Figura 16</b> - Consumo mássico do diesel em função da potência no motor de 8,45 MW .....	53
<b>Figura 17</b> - Consumo mássico de combustível em função da potência no motor de 150 KW operando no modo diesel e dual.....	54
<b>Figura 18</b> - Temperatura de água na entrada e saída do motor em função da potência no motor de 8,45 MW .....	55
<b>Figura 19</b> - Temperatura de água na entrada e saída do motor operando com diesel puro, em função da potência no motor de 150 KW .....	56

<b>Figura 20</b> - Temperatura de água na entrada e saída do motor operando com modo “Dual” em função da potência no motor de 150 KW .....	56
<b>Figura 21</b> - Temperatura do óleo lubrificante em função da potência no motor de 8,45 MW .....	57
<b>Figura 22</b> - Temperatura do óleo lubrificante em função da potência no motor de 150 KW .....	58
<b>Figura 23</b> - Temperatura dos gases de escape do motor de 8,45 MW em função da Potência.....	58
<b>Figura 24</b> - Temperatura dos gases de escape do motor de 150 KW em função da Potência.....	59
<b>Figura 25</b> - Temperatura ambiente da sala do motor de 8,45 MW em função da Potência.....	60
<b>Figura 26</b> - Temperatura ambiente da sala do motor de 150 KW em função da Potência.....	60
<b>Figura 27</b> - Excesso de Ar no motor de 8,45 MW em função da potência.....	61
<b>Figura 28</b> - Excesso de Ar no motor de 150 KW em função da potência .....	62
<b>Figura 29</b> - Eficiência da combustão do motor de 8,45 MW.....	62
<b>Figura 30</b> - Eficiência da combustão do motor de 150 KW .....	63
<b>Figura 31</b> - Eficiência Energética do motor de 8,45 MW .....	64
<b>Figura 32</b> - Eficiência Energética do motor de 150 KW .....	65
<b>Figura 33</b> - Emissão de O <sub>2</sub> do motor de 8,45 MW .....	66
<b>Figura 34</b> - Emissão de O <sub>2</sub> do motor de 150 KW .....	67
<b>Figura 35</b> - Emissão de CO em função da potência do motor de 8,45 MW .....	67
<b>Figura 36</b> - Emissão de CO em função da potência no motor de 150 KW.....	68
<b>Figura 37</b> - Emissão de CO <sub>2</sub> em função da potência no motor de 8,45 MW.....	68
<b>Figura 38</b> - Emissão de CO <sub>2</sub> em função da potência no motor de 150 KW .....	69
<b>Figura 39</b> - Emissão de NO em função da potência no motor de 8,45 MW.....	70
<b>Figura 40</b> - Emissão de NO em função da potência no motor de 150 KW .....	71

<b>Figura 41</b> - Emissão de NOx em função da potência no motor de 8,45 MW .....	72
<b>Figura 42</b> - Emissão de NOx em função da potência no motor de 150 KW .....	72
<b>Figura 43</b> - Emissão de SO <sub>2</sub> em função da potência no motor de 8,45 MW .....	73
<b>Figura 44</b> - Emissão de SO <sub>2</sub> em função da potência no motor de 150 KW.....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Especificações do óleo diesel comercializado no Brasil .....	29-30
<b>Tabela 2</b> - Especificações dos combustíveis pela Portaria da ANP nº80/99 .....	31
<b>Tabela 3</b> - Características do gás natural .....	32
<b>Tabela 4</b> - Especificações Técnicas do Gás Natural Brasileiro .....	33
<b>Tabela 5</b> - Propriedades Físico-químicas dos combustíveis utilizados na operação dos motores da 150 KW e 8,45 MW .....	41
<b>Tabela 6</b> - Especificações Técnicas do analisador de gases utilizados nos motores da UTE .....	49
<b>Tabela 7</b> - Consumo versus potência do motor de 8,45 MW operando com óleo Diesel .....	52
<b>Tabela 8</b> - Consumo versus potência do motor de 150 KW operando em modo diesel e dual .....	53
<b>Tabela 9</b> - Temperatura de água de entrada e saída para refrigeração do motor de 8,45 MW em variação de potência.....	55
<b>Tabela 10</b> - Cálculo da Eficiência energética do motor de 8.45 MW .....	64

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 OBJETIVOS .....	15
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	15
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	15
1.3 MOTIVAÇÃO .....	16
1.4 DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO.....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI) .....	17
<b>2.1.1 Classificação dos Motores</b> .....	18
2.2 TIPO DE ALIMENTAÇÃO DE AR NOS MOTORES .....	20
<b>2.2.1 Motores Aspirados</b> .....	20
<b>2.2.2 Motores Turbinados</b> .....	20
2.3 CICLO TERMODINÂMICO DO MOTOR.....	20
<b>2.3.1 Ciclo Otto</b> .....	21
<b>2.3.2 Ciclo Diesel</b> .....	22
<b>2.3.3 Ciclo Dual</b> .....	24
2.4 COMBUSTÍVEIS .....	27
<b>2.4.1 Óleo Diesel</b> .....	28
<b>2.4.2 Óleo Combustível</b> .....	30
<b>2.4.3 Gás Natural</b> .....	32
2.5 COMBUSTÃO .....	34
2.6 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	36
2.7 DEMANDA DE COMBUSTÍVEL NO BRASIL ATÉ 2030 .....	37
2.8 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	38
<b>2.8.1 Poluentes Atmosféricos</b> .....	38
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	41
3.1 METODOLOGIA .....	41
3.2 USINA TERMELÉTRICA DE CAMPINA GRANDE .....	42
<b>3.2.1 Especificações Técnicas da UTE-CG</b> .....	42
<b>3.2.2 Fluxograma operacional da Usina Termelétrica</b> .....	42
<b>3.2.3 Sala de máquinas da UTE</b> .....	44
<b>3.2.4 Sala de Controle da UTE</b> .....	45
<b>3.2.5 Sistema de análise dos gases de escape</b> .....	48
<b>3.2.6 Procedimentos e metodologias utilizados durante os experimentos na UTE</b> .....	50
<b>3.2.6.1 Realização dos Testes</b> .....	50
<b>3.2.6.2 Aquisição de Dados do Motor</b> .....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	52
4.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS ANALISADOS NESTA PESQUISA .....	52

4.2 ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA.....	52
4.3 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DO MOTOR EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA.....	54
4.4 EXCESSO DE AR NOS MOTORES.....	60
4.5 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS MOTORES .....	62
4.6 ANÁLISE DAS EMISSÕES DO MOTOR APÓS A COMBUSTÃO.....	65
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>76</b>
5. 1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se um elemento essencial, tanto para o desenvolvimento econômico, quanto para o social na vida humana. A energia elétrica é a maior, a mais revolucionária e útil fonte de desenvolvimento já descoberta. Contudo, com o crescimento exagerado da demanda, particularmente neste século, este tão importante benefício tem a ameaça de ser transformado na grande lacuna aos paradigmas da qualidade de vida propostos pelo mundo sustentável de hoje. (ENERGIA ELETRICA, 2015)

Opta-se ainda na maior parte do mundo pela energia elétrica gerada nas Usinas Termelétricas (UTES) ou Usinas Térmicas, por suas versatilidades construtivas, sua simplicidade e rapidez de produção (ENERGIA ELETRICA, 2015). Nos países desenvolvidos, cerca de 70% da energia elétrica ainda é produzida em usinas desse tipo.

A crise energética em 2001 evidenciou a necessidade de expansão dos investimentos no setor elétrico brasileiro. Em função da crise hidráulica, ocorreu um incentivo governamental para produção e geração da eletricidade a partir do acionamento das UTE's.

O Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2009) descreve que no passado o parque hidrelétrico chegou a representar 90% da capacidade instalada. Dados atuais indicam que as UHE's representam atualmente 62% da capacidade instalada e as UTE's representam 28% (BIG, 2015).

A participação do gás natural e dos derivados de petróleo na matriz energética nacional em 2013 atingiu o patamar de 11,3 % e 4,4 % respectivamente. No mesmo período a geração térmica a gás natural teve um acréscimo de 47,6% e os derivados de petróleo 36,2% (EPE, 2014).

Em 2013, o total de emissões **antrópicas** (resultado da ação humana) à matriz energética brasileira atingiu 459 MtCO<sub>2</sub>-eq, indicando um aumento de 7% em relação a 2012. Outros setores como: agropecuário, serviços, energético e elétrico, tiveram crescimento de 29,7% (136,5 MtCO<sub>2</sub>), ficando atrás do setor de transporte com 46,9% (215,3 MtCO<sub>2</sub>) (EPE, 2015).

A participação do gás natural na matriz energética nacional atingiu o patamar de 12,8%. A geração térmica a gás natural teve um acréscimo de 47,6%, atingindo o

patamar de 69,0 TWh. Em 2013, o gás natural alcançou média de 42,7 milhões de m<sup>3</sup>/dia, representando um aumento de 57,8% ante 2012 (EPE, 2014).

O setor elétrico brasileiro emitiu 115 kg de CO<sub>2</sub> para produzir 1 MWh, um índice baixo comparado internacionalmente com o setor elétrico dos EUA e da China que emitem, respectivamente, 9 e 14 vezes mais que o Brasil (EPE 2014).

O governo americano diz que o setor energético já reduziu 13% das emissões desde 2005 e vem incentivando a substituição do carvão pelo gás natural para geração de eletricidade pelas UTE's Moura (2016).

Segundo o presidente Chinês, até 2030 cerca de 20% da energia produzida no país vai ter origem em fontes limpas e renováveis e não mais do carvão. EcoD (2016).

## 1.1 OBJETIVOS

### *1.1.1 Objetivo Geral*

O objetivo geral neste trabalho é analisar as emissões em uma termelétrica do motor de 8,45 MW operando com óleo diesel para os compostos formados na combustão: CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub> tendo O<sub>2</sub> como elemento de referência para as concentrações destes compostos.

### *1.1.2 Objetivos Específicos*

- Identificar e avaliar as necessidades nas emissões de motores de 8,45 MW de potência para geração de eletricidade em uma UTE e motores de 150 KW na UFCG ambos operando com combustível diesel;
- Analisar e avaliar as metodologias da UTE para viabilizar o presente trabalho;
- Coletar dados da operação dos motores de 8,45 MW para posterior comparação com o motor de 150KW.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

A principal motivação desse trabalho é o aprofundamento dos estudos envolvendo motores de combustão interna do tipo estacionário, no ciclo Diesel para geração de eletricidade visando demonstrar a influência do desempenho, consumo, eficiência nas emissões de poluentes para atmosfera.

Outras motivações que influenciaram este trabalho, foram;

- a) A reestruturação do setor energético brasileiro nos últimos 20 anos com incentivo à geração de eletricidade por Usinas Térmicas;
- b) Aumento na participação do gás natural e a redução de óleos combustíveis na geração termelétrica ao longo dos anos;
- c) Poucos trabalhos acadêmicos relacionados ao tema;
- d) Indicar a “repotencialização dos motores”, ou seja, motor operar no modo dual, com dois combustíveis gás natural e diesel mantendo as características originais e podendo alcançar novos valores máximo de potência e afim de observar a redução de emissão de poluentes da combustão.

### 1.4 DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO

A estrutura dessa dissertação foi dividida em capítulos para apresentação do conteúdo proposto. No capítulo 1 são apresentados os objetivos, a introdução do assunto e as motivações desse trabalho. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica do assunto em questão, a qual foi dividida em tópicos específicos que abordam fundamentos para o estudo de eficiências em motores de combustão interna voltadas a termogeração, características de combustíveis utilizados em motores nos ciclos: Otto, Diesel e Dual, emissões de gases e impactos ao meio ambiente. O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada e a modelagem para obtenção dos resultados. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e os comentários. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões de pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão abordados alguns tópicos referentes às literaturas consultadas que dispõe de informações para a composição deste trabalho, destacando: motores de combustão interna, ciclos termodinâmicos, motores a diesel operando com o modo dual, combustíveis, combustão, central termelétrica, emissões atmosféricas dos motores operando com diesel e gás natural.

### 2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

O motor de combustão interna é classificado como uma máquina térmica que converte energia química de um combustível em energia mecânica. A energia química do combustível converte-se primeiramente em energia térmica, através da combustão, devido à queima do combustível com ar, no interior do motor, sendo, em seguida, convertida em mecânica. Normalmente, essa energia é disponibilizada na forma de rotação do eixo de saída do motor.

Fazendo um breve histórico sobre a concepção e desenvolvimento dos motores de combustão interna, teremos a seguinte ordem cronológica.

- a) Rochás (1862), propôs e patenteou os princípios de funcionamento dos motores de 4 tempos de combustão interna com êmbolos que, devido as suas características, apresentava condições de eficiência elevada. Nunca obteve sucesso na aplicação de suas teorias, ou seja, nunca conseguiu construir seu motor.
- b) Otto (1876), em 1876, apresentou um motor de quatro cilindros que funcionava com os princípios dos ciclos estabelecidos por Beau de Rochas em 1862. Esse motor era bem mais compacto e leve, com aproximadamente 1/3 do peso do anterior e, uma eficiência próxima a 14%. As características básicas dele como: cabeçote, bloco e cárter são as mesmas encontradas nos motores de hoje.
- c) Em 1892, o engenheiro alemão de naturalidade francesa Rudolf Christian Karl Diesel registrou a patente do motor que leva seu nome até hoje, com ignição por compressão, onde não existia centelha elétrica para inflamar a mistura. A característica fundamental desse motor é que o combustível é injetado pela bomba de

alta pressão dentro de uma câmara de combustão que já contém o ar aquecido e pressurizado. A combustão da mistura se produz pela compressão (combustão espontânea) devido às condições combinadas de pressão e temperatura elevadas, e não por uma centelha, como ocorre no caso dos motores do ciclo Otto.

Geralmente, os motores de combustão interna são classificados em duas categorias quanto à queima do combustível: motores de ignição por centelha -ICE (ciclo Otto) e motores de ignição por compressão-ICO (ciclo Diesel).

Nos motores de ignição por centelha, a mistura de ar/combustível é comprimida até que a temperatura obtida nessa compressão fique abaixo do ponto de ignição. Assim, sob essas condições, a mistura recebe uma centelha da vela de ignição, que provoca a queima da mistura ar/combustível em um instante pré-determinado por um sistema de controle de ignição.

Nos motores de ignição por compressão, o ar é comprimido a pressões e temperaturas nas quais o combustível, que facilmente entra em ignição, explode espontaneamente quando injetado e queima progressivamente depois da ignição (MORAN E SHAPIRO, 2013).

Em estudos dos fatores que influenciam no rendimento de MCI, deve-se não somente utilizar as análises de Primeira Lei da Termodinâmica, mas também aplicar as análises de Segunda Lei, onde aparecem os conceitos de entropia, irreversibilidades e da análise energética, tornando-se possível uma verificação minuciosa dos pontos críticos ao rendimento do sistema e às oportunidades de melhorias dos projetos (GALLO, 1990).

### ***2.1.1 Classificação dos Motores***

Os motores de combustão interna podem ser classificados em:

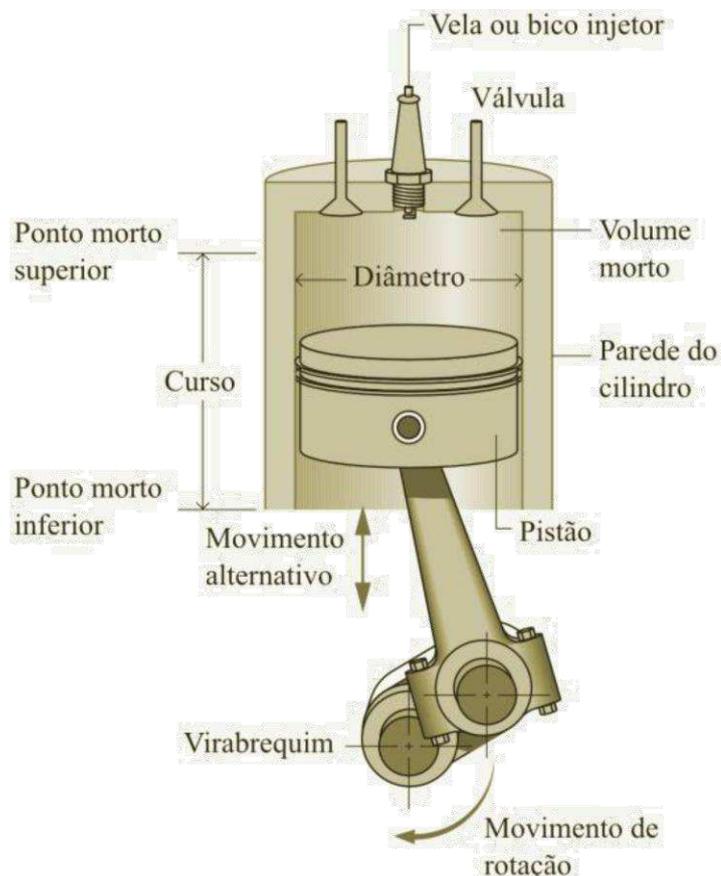
a) **Motores de dois tempos:** São motores onde existe uma explosão a cada giro, ou seja, um ciclo é executado a cada volta. O ciclo de dois tempos é composto por dois movimentos do pistão: um ascendente e outro descendente. Antes do pistão atingir o PMS (ponto morto superior), uma centelha na vela é liberada, provocando a combustão da mistura. Os gases produzidos expandem-se e empurram o pistão para baixo, que inicia seu movimento descendente. No movimento descendente do pistão,

os gases da combustão são expelidos pela janela de escape. Logo após, abre-se a janela de transferência e a mistura do cárter é forçada a se dirigir para o interior do cilindro (MÁQUINAS TÉRMICAS, 1998);

b) **Motores de quatro tempo:** São motores que executam duas revoluções da árvore de manivela, ou seja, cada cilindro requer quatro cursos do seu pistão. Os motores de ignição por centelha e por compressão utilizam desde ciclo que compreende (SENAR, 2010);

A Figura 1 apresenta um esquema de um motor de combustão interna, operando em um ciclo de quatro tempos, quais sejam: admissão, compressão, explosão e descarga. Os quatro tempos do motor ocorrem dentro do limite do cilindro que está compreendido entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior. A este limite entre os pontos mortos, chamamos de cilindrada, o que corresponde ao volume varrido pelo pistão no seu deslocamento do PMS até o PMI.

**Figura 1-** Esquema de um motor de combustão interna, operando em um ciclo de quatro tempos



**Fonte:** Moran e Shapiro, 2013.

Os valores de taxa de compressão  $r$  variam geralmente de 8:1 a 12:1 para motores de ignição por centelha operando com gasolina e de 12:1 a 50:1 para motores de ignição por compressão operando com diesel (HEYWOOD, 1988).

## 2.2 TIPO DE ALIMENTAÇÃO DE AR NOS MOTORES

Quanto ao tipo de alimentação de ar nos motores, estes podem ser classificados como:

### *2.2.1 Motores Aspirados*

Nos motores do ciclo Otto, o próprio motor realiza o trabalho de puxar para os cilindros a mistura ar/combustível pelo deslocamento do pistão do PMS para o PMI a pressão atmosférica.

### *2.2.2 Motores Turbinados*

Nos motores do ciclo Diesel, o fornecimento de ar para o motor é feita com auxílio de compressores acoplados a uma turbina que aproveita a saída dos gases do escapamento do motor para girar um eixo, promovendo a superalimentação de ar no motor com uma pressão superior a atmosférica (SENAR, 2010).

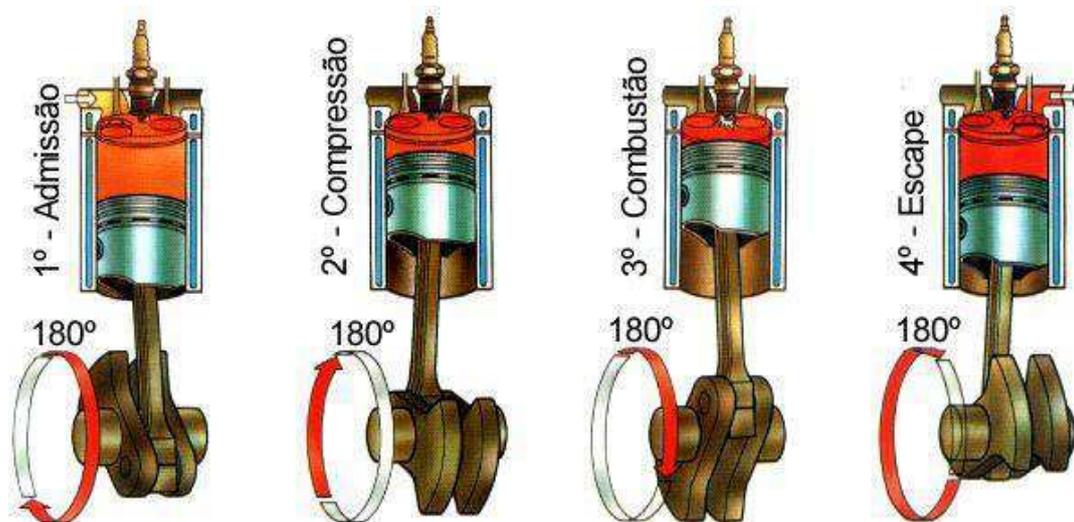
## 2.3 CICLO TERMODINÂMICO DO MOTOR

Um ciclo termodinâmico se constitui de qualquer série de processos termodinâmicos, onde ao decorrer do curso de sua realização o sistema retorne ao seu estado inicial, ou seja, as grandezas termodinâmicas próprias do sistema sejam nulas. Os ciclos termodinâmicos utilizados para operar os motores térmicos são em circuito fechado, onde um fluido passa por diversas transformações físicas produzindo calor continuamente (SENAR, 2010).

### 2.3.1 Ciclo Otto

A Figura 2 apresenta um esquema do funcionamento do motor de combustão interna, operando em um ciclo Otto de quatro tempos.

**Figura 2** - Esquema de funcionamento do Ciclo Otto para motores quatro tempos



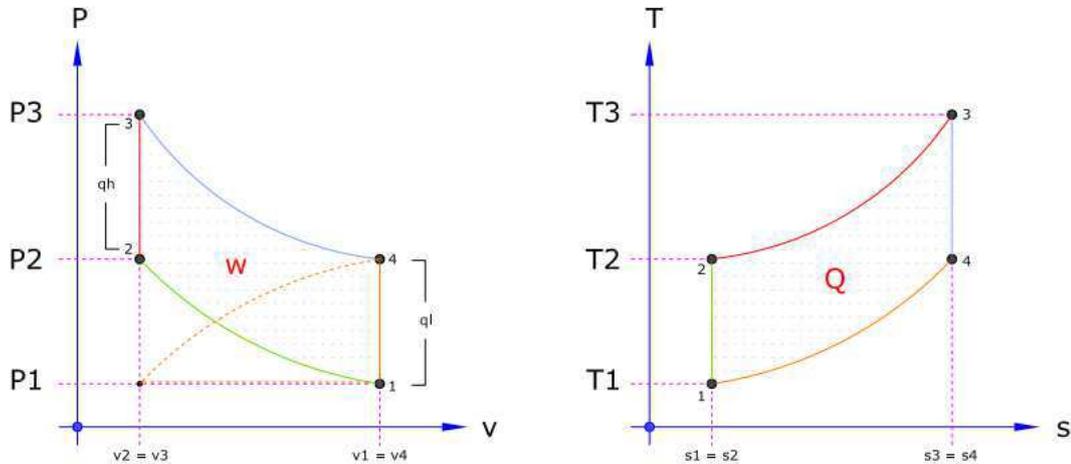
**Fonte:** Curso de Engenharia Elétrica, 2015.

As fases desenvolvidas pelo Ciclo Otto de quatro tempos apresentados na Figura 2 são descritas abaixo por Maquinas Térmica (1998):

- 1º Tempo: *Fase de admissão*, o ciclo inicia com a mistura ar-combustível no cilindro em quantidade pré-estabelecida sob o efeito da pressão atmosférica;
- 2º Tempo: *Fase compressão*, inicia no PMI até o PMS, a mistura ar-combustível ainda não se queima nesta transformação pois a compressão é baixa;
- 3º Tempo: *Fase de combustão e explosão*, quando o pistão se aproxima do PMS ocorre a produção da centelha que inicia a ignição da mistura ar-combustível que está aquecida e comprimida. Ao chegar no PMS ocorre a liberação de energia e a expansão dos gases da combustão com uma elevada temperatura;
- 4º Tempo: *Fase de exaustão*, os gases quentes da combustão que realizaram trabalho no eixo das manivelas do motor são expelidos com abertura da válvula de escape.

A Figura 3 abaixo apresenta o diagrama P-V (Trabalho realizado) e o diagrama T-S (Transferência de Calor) para o Ciclo Otto.

**Figura 3** - Diagrama P-V e T-S para o Ciclo Termodinâmico Otto



**Fonte:** Guimarães, 2015.

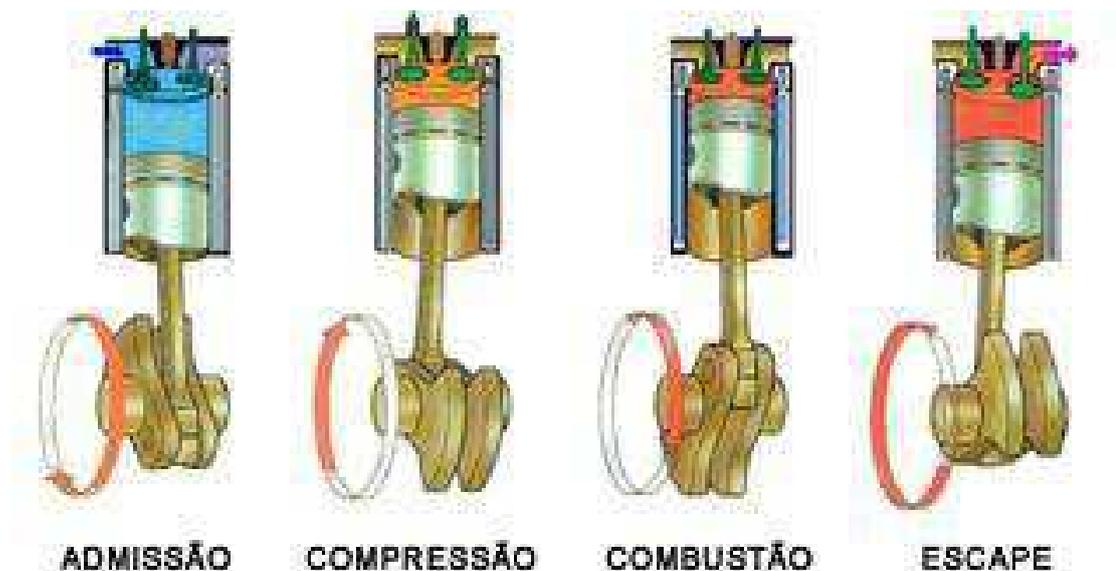
As etapas do diagrama da Figura 3 são descritas por Santos (2006) abaixo:

- a) 1-2: *Compressão Isentrópica*;
- b) 2-3: *Combustão Isométrica*– ocorre a explosão e a transferência de calor isocórica a volume constante;
- c) 3-4: *Expansão Isentrópica*;
- d) 4-1: *Exaustão Isométrica*: escape de gases queimados e admissão de combustível mais ar da fonte fria.

### 2.3.2 Ciclo Diesel

A principal diferença no funcionamento entre o ciclo Diesel e o ciclo Otto se encontra na forma como ocorre a explosão. Nos motores a diesel a mistura do combustível é inflamada pelo aquecimento do ar sob o efeito da compressão, enquanto nos motores Otto que são movidos por gasolina/álcool é necessária uma faísca, cedida por uma vela de ignição, para que ele entre em funcionamento (SENAR, 2010).

**Figura 4** - Esquema de funcionamento do Ciclo Diesel para motores quatro tempos



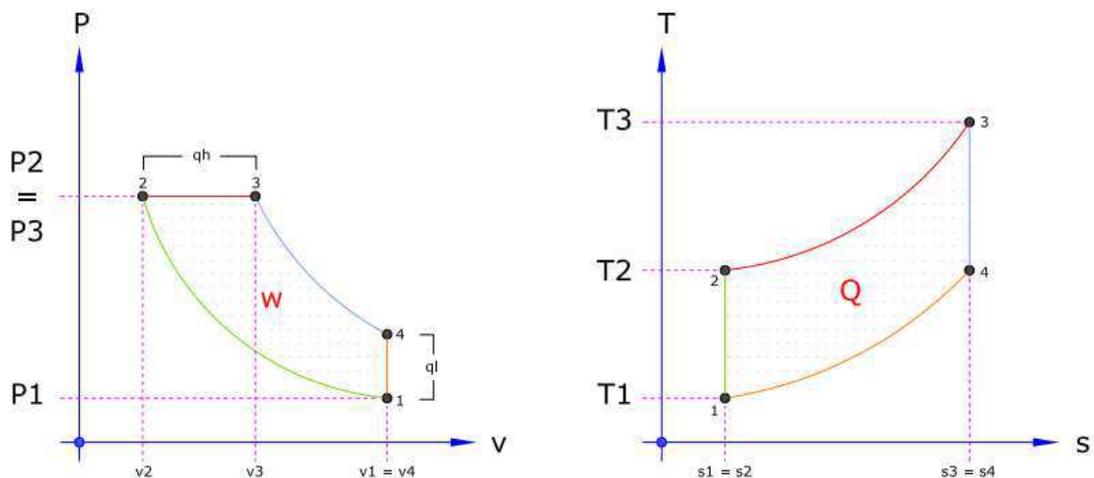
**Fonte:** Clube do Diesel, 2011.

As fases desenvolvidas pelo Ciclo Diesel de quatro tempos apresentados na Figura 4 são descritas a seguir:

- a) 1º Tempo: *Fase de admissão*, inicia-se com o pistão no Ponto Morto Superior (PMS). A válvula de admissão se abre e o pistão ao descer aspira o ar para dentro do cilindro;
- b) 2º Tempo: *Fase compressão*, o pistão encontra-se no PMI e inicia-se a compressão até o PMS com as válvulas fechadas. Isto acarreta a elevação da temperatura e pressão do ar dentro do cilindro e que aumenta substancialmente com a diminuição do volume;
- c) 3º Tempo: *Fase de combustão e explosão*, pouco antes do pistão se aproxima do PMS o combustível é pulverizado pelo “Bico Injetor” que se mistura com o ar quente pressurizado e dá início a combustão espontânea. A expansão dos gases dentro do cilindro desloca o pistão para baixo, gerando trabalho pela liberação de energia na forma de calor;
- d) 4º Tempo: *Fase de exaustão*, o pistão que se encontra no PMI movimenta-se novamente para o PMS e faz com que os gases de combustão sejam expulsos do cilindro, retomando assim os 4 tempos do motor.

A Figura 5 em seguida apresenta o diagrama P-V (Trabalho realizado) e o diagrama T-S (Transferência de Calor) para o Ciclo Diesel.

**Figura 5** - Diagrama P-V e T-S para o Ciclo Termodinâmico Diesel



**Fonte:** Guimarães, 2015.

As etapas do diagrama da Figura 5 são descritas por Santos (2006) a seguir:

- 1-2: *Compressão Isentrópica*;
- 2-3: *Combustão Isobárica*: de forma espontânea ocorre a transferência de calor a volume não constante;
- 3-4: *Expansão Isentrópica*;
- 4-1: *Exaustão Isométrica*; escape dos gases queimados e admissão de combustível mais ar.

### 2.3.3 Ciclo Dual

Segundo Çengel e Boles (2013) os motores modernos funcionam por ignição e por compressão e são de alta velocidade, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão com um avanço de ângulo se comparado aos motores diesel. Com a inflamação do combustível no final do curso da compressão a realização da combustão ocorre quase que a volume constante. Permanece a injeção do combustível até o pistão atingir o PMS, e a combustão do combustível se mantém a uma alta pressão durante o curso da expansão. O ciclo dual é um modelo mais

realista para uma representação moderna dos motores de ignição por compressão de alta velocidade.

Nwafor e Rice (1994) realizaram ensaios em um motor dual (diesel + gás natural) de injeção direta e alta rotação para estudar o comportamento da potência, eficiência térmica e a emissão de poluentes quando o motor trabalha no modo diesel puro e no modo dual. Os autores verificaram que a emissão de poluentes é bastante reduzida, a eficiência do motor praticamente se mantém e ocorre um aumento considerável da pressão de explosão, devido a um retardo no tempo de queima da mistura combustível.

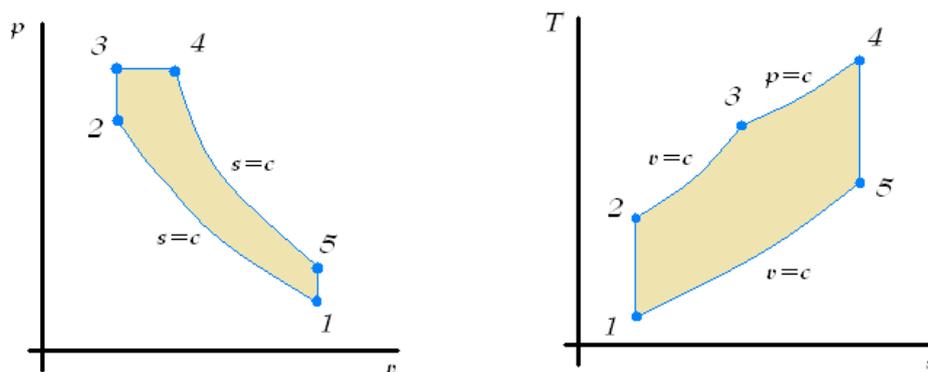
Santos (2006) descreve a relação do padrão de ar para os ciclos Otto e Diesel,

**No ciclo de ar padrão Otto**, ocorrem duas transformações isentrópicas e duas isométricas, constituindo os quatro estados termodinâmicos. Os motores no ciclo Otto têm baixa razão de compressão, são mais indicados para operar combustíveis de elevado número de octano\* (SANTOS, 2006, p. 25).

**No ciclo de ar padrão Diesel**, ocorrem duas transformações isentrópicas, uma isobárica e uma isométrica. Os motores ciclo Diesel são recomendados para queimar combustíveis com elevado número de cetano\*\* (SANTOS, 2006, p. 28).

A Figura 6 abaixo apresenta o diagrama P-V (Trabalho realizado) e o diagrama T-S (Transferência de Calor) para o Ciclo Dual.

**Figura 6** - Diagrama P-V e T-S para o Ciclo Termodinâmico Dual



Fonte: Moran e Shapiro, 2013.

\* Indica o poder antidetonante de um combustível para os motores de combustão interna ciclo Otto. Quanto maior a octanagem, maior é o poder antidetonante e a taxa de compressão que se pode adotar, sem que surja o efeito da detonação. <http://www.infomotor.com.br/site/2009/03/combustivel-octanagem-e-numero-de-cetano/> (2016)

\*\* A tendência de um combustível para os motores a Diesel queimar espontaneamente é indicado pelo seu número de cetano: quanto mais alto este índice, maior é sua capacidade de combustão dentro do motor. E quanto mais elevada esta, maior a redução no atraso da ignição e, portanto, um funcionamento mais regular do motor. <http://www.infomotor.com.br/site/2009/03/combustivel-octanagem-e-numero-de-cetano/> (2016)

As etapas do diagrama da Figura 6 são descritas por Sonntag e Borgnakke (2011), abaixo:

- a) 1-2: *Compressão Isentrópica*; compressão de volume com elevação de temperatura e pressão;
- b) 2-3: *Adição de calor Isocórica*: de forma espontânea ocorre a transferência de calor a volume constante;
- c) 3-4: *Adição de Calor Isobárica*; ocorre adição de calor a pressão constante;
- d) 4-5: *Expansão Isentrópica*: primeira parte do curso da potência com a realização do trabalho no eixo de manivelas sem fornecimento de calor com a expansão dos gases de combustão;
- e) 5-1: *Rejeição de Calor Isocórica*; descarga dos gases de combustão e admissão da mistura fresca a volume constante.

De acordo com Obert (1971), nesses motores, o óleo diesel continua sendo usado normalmente, porém apenas como combustível piloto para proporcionar a ignição por compressão, dando início à combustão do combustível principal (gás ou líquido vaporizado) que é admitido no cilindro pelo coletor de admissão, semelhante à alimentação de um motor de ciclo Otto, mas com mistura pobre.

Observa-se que no motor diesel a variação na relação de mistura ar/combustível é muito grande, podendo-se chegar a relações de até 50:1 em massa, segundo Giacosa (1964), isto proporciona uma condição de queima de qualquer quantidade de diesel que for injetada na câmara de combustão.

Costa (2007), realizou estudo experimental utilizando diesel e gás natural, com taxa de substituição em torno de 85%, e relatou a viabilidade econômica do uso de motores diesel operando no com dois combustíveis, modo dual.

O motor dual permite, além da redução do custo/kWh em operação, uma redução da emissão do particulado característico dos motores diesel convencionais, permitindo um nível de emissões que corresponde aos objetivos dos órgãos regulamentadores, sem a necessidade de modificações substanciais na parte mecânica destes motores (OLIVEIRA et al, 2007).

## 2.4 COMBUSTÍVEIS

O nosso planeta possui dois tipos de fontes de energia: renováveis e as não renováveis. Define-se energia como a capacidade de produzir trabalho. Pode ser encontrada em diferentes formas, tais como elétrica, radiante, sônica, movimento, térmica, mecânica, química, nuclear e gravitacional. A energia pode ser armazenada e/ou convertida, dependendo da aplicação (DERMIRBAS, 2008).

As fontes de energias não renováveis em teoria têm seus recursos limitados, como no caso dos combustíveis fósseis. Os combustíveis fósseis podem ser de origem vegetal ou animal (o carvão é de origem predominantemente vegetal e o petróleo e de origem vegetal e animal). A maior parte deles são hidrocarbonetos, e as composições típicas são: carbono, hidrogênio e oxigênio (GUEVARA & LEITE, 2013).

Esses compostos, com fórmula química geral  $C_x(H_2O)_y$ , são produzidos pelas plantas nos processos de fotossíntese, após a morte das plantas e animais, os compostos carboníferos foram convertidos, sob ação de altas pressões e temperaturas, em compostos hidrocarbonetos com fórmula geral  $C_nH_m$  (GERAÇÃO TERMELÉTRICA, 2004).

Os combustíveis fósseis mais conhecidos são: gasolina, diesel, querosene, outros óleos combustíveis pesados com variações no teor de enxofre, gás natural e carvão mineral. A queima destes combustíveis contribui para o aumento de emissões atmosféricas poluentes.

As fontes de energias renováveis são aquelas onde há reutilização e renovação da fonte, o que se mantém constante ao longo do tempo de forma adequada para que não haja esgotamento. Os tipos mais comuns de energia renováveis são: eólica, solar, hidráulica, biomassa, bicombustível, hidrogênio, biogás, maremotriz.

O atual relatório síntese do Balanço Energético Nacional -BEN (EPE, 2015), apresenta a repartição da oferta de energia interna por fontes.

**As fontes renováveis** destacaram-se dentro da matriz com **39,4%** de aproveitamento, são estas:

- a) Biomassa de cana 15,7%;
- b) Hidráulica 11,5%;

c) Lenha e carvão vegetal 8,1%;

Já as fontes não renováveis obtiveram consumo na matriz de **60,6%**, com destaque para:

- a) Petróleo e derivados 39,4%
- b) Gás Natural 13,5%
- c) Carvão Mineral 5,7 %
- d) Uranio 1,3 %
- e) Demais fontes 0,6%

#### ***2.4.1 Óleo Diesel***

Combustível derivado do petróleo, constituído basicamente por hidrocarbonetos, o óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio e selecionados de acordo com as características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel. É um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico.

O óleo diesel é utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão (motores do ciclo diesel) empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo). E tem a liberação de poluentes com sua queima como: CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> que reagem com água formando a chuva ácida.

A Resolução ANP nº 65 foi revogada pela Resolução ANP nº 50 de 23.12.2013 que define apenas duas versões de diesel, conforme o teor máximo de enxofre (S10 e S500). O Diesel Podium, exclusivo dos Postos da Petrobras, possui 10 ppm de enxofre (CARVALHO,2014).

Em maio de 2006, o biodiesel passou a ser adicional ao diesel automotivo. Desde julho de 2014 o percentual de biodiesel na mistura diesel-biodiesel foi sendo acrescentado gradativamente de acordo com artigo 1º da Medida Provisória do Congresso Nacional nº647 de 28 de maio de 2014:

*Art. 1º Ficam estabelecidos os seguintes percentuais de adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, medidos em volume, em qualquer parte do território nacional: I - seis por cento, a partir de 1o de julho de 2014; II - sete por cento, a partir de 1o de novembro de 2014; III – oito por cento, a partir de 1º de abril de 2015; IV – nove por cento, a partir de 1º de abril de 2016; e, V – dez por cento, a partir de 1º de abril de 2017(CONGRESSO NACIONAL, 2016).*

As principais características do diesel que influenciam na eficiência dos motores são:

- a) **Número de cetano (NC):** é um dos mais comuns indicadores da qualidade do óleo diesel. Ele mede a capacidade do combustível entrar em autocombustão quando injetado no motor e dependendo da composição do combustível, pode impactar o desempenho de partida a frio do motor, o nível de ruído e as emissões da exaustão (KNOTHE, 2006). Combustíveis que possuem NC entre 30 a 50 são os mais favoráveis para uso em motores a diesel (SZKLO; ULLER, 2008);
- b) **Densidade:** é a propriedade que indica a relação massa por volume que é injetado no motor, se houver aumento da massa de combustível, isto tende a provocar aumento de emissões de material particulado e monóxido de carbono;
- c) **Viscosidade:** é a força de coesão das moléculas do fluido para que ocorra o escoamento do combustível, valores elevados dificultam a formação de gotas, alterando as temperaturas de evaporados, retardando assim o processo;
- d) **Resíduos de carbono:** acarreta na formação de depósitos de carvão no interior dos cilindros;
- e) **Ponto de fulgor:** é a menor temperatura necessária para ocorrer a vaporização do combustível e se formar uma mistura explosiva com o ar;
- f) **Água e sedimentos:** a contaminação do combustível pode ser através de água e impurezas que causem desgaste no motor durante a combustão.

A Tabela 1 apresenta as especificações para o óleo diesel comercializado no Brasil.

**Tabela 1** - Especificações do óleo diesel comercializado no Brasil

Características	Uso automotivo a partir de 2012			
	S10	S50	S500	S1800
Água e sedimentação, % vol. máx.	0,05	0,05	0,05	0,05
Cinzas, % massa, máx.	0,10	0,10	0,10	0,10
Cor ASTM, máx.	3	3,0	3,0	3,0
Corrosividade ao cobre (3h a 50 °C) máx.	1	1	1	1
Destilação, 50% recuperados, °C mín./máx. 85% evaporados, °C máx.	245/295	245/310	245/310 360	245/310 370
Enxofre, % máx.	10	50	500	1800
Índice de cetanos calculado, min.	48	46	42	42
Teor de biodiesel, % volume	5	5	5	5
Massa específica a 20°C, kg/m <sup>3</sup>	820 a 850	820 a 850	820 a 865	820 a 880
Resíduo de carbono Ramsbottom, Determinado nos 10% finais da destilação, % massa máx.	0,25	0,25	0,25	0,25
Viscosidade a 40 °C, mm <sup>2</sup> /s	2,5 a 4,5	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0

**Fonte:** Adaptado da ANP (2014) resolução ANP nº 65, de 9.12.2011.

#### 2.4.2 Óleo Combustível

Os óleos combustíveis são óleos residuais de alta viscosidade, obtidos do refino do petróleo ou através da mistura de destilados pesados com óleos residuais de refinaria. São utilizados como combustível para indústria, de modo geral, em equipamentos destinados à geração de calor, tais como fornos, caldeiras e secadores, ou, indiretamente, em equipamentos destinados a produzir trabalho a partir de uma fonte térmica (turbinas ou geradores) (GERAÇÃO TERMELÉTRICA, 2004).

Quimicamente estes óleos são constituídos de hidrocarbonetos de peso molecular elevado (resina e asfalto) cujas proporções dependem do petróleo e dos processos utilizados. Isto faz com que este tipo de combustível atenda a uma ampla demanda de consumidores com exigências específicas em diferentes faixas de viscosidades.

Em 30 de abril de 1999 a ANP-Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, através da sua Portaria nº80 e do Regulamento Técnico nº003/99, estabeleceu a existência formal e os requisitos de apenas quatro tipos de óleos combustíveis, sendo dois de baixo teor de enxofre e dois com alto teor de enxofre,

não ultrapassando 2,5% em massa, desde que haja concordância do órgão ambiental local e anuência da ANP este valor pode chegar a 4% (GARCIA, 2013).

Na Tabela 2 pode-se conferir as especificações dos combustíveis (óleos pesados) consumidos no Brasil.

**Tabela 2** - Especificações dos combustíveis pela Portaria da ANP nº80/99

Características	Unidades	Tipo			
		OC A1	OC B1	OC A2	OC B2
Viscosidade cinemática, máx.	mm <sup>2</sup> /s	620	620	960	960
Viscosidade SSF, máx.	s	600	600	900	900
Enxofre, máx.	% massa	2,5	1,0	2,5	1,0
Água e Sedimentos, máx.	% vol.	2	2,0	2,0	2,0
Ponto de Fulgor, min.	°C	66	66	66	66
Densidade 20/4°C	-	Anotar	anotar	anotar	anotar
Ponto de fluidez superior	°C	Ver observações		-	-

**Fonte:** Garcia, 2013.

Segundo Santos (2006), as principais características dos óleos combustíveis são:

- a) **Densidade:** relação entre a densidade do óleo e a densidade da água a 20°C, com aumento da temperatura a densidade do óleo diminui;
- b) **Ponto de fulgor:** é a menor temperatura na qual o vapor do óleo em contato com o ar, inflama-se momentaneamente ao se aplicar uma chama;
- c) **Viscosidade cinemática:** a viscosidade varia exponencialmente com a temperatura, este parâmetro é de grande importância para a operação de usinas termelétricas;
- d) **Teor de enxofre:** durante a combustão são formados os óxidos de enxofre SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> que ao se combinarem com os vapores de água formam ácido sulfúrico que causa corrosão no aquecedor de ar para a temperatura dos gases nas faixas de 130°C a 178°;
- e) **Vanádio e metais alcalinos:** Na faixa de temperatura de 500°C a 1300°C os sulfatos alcalinos SO<sub>4</sub> Ca, SO<sub>4</sub> Na<sub>2</sub> e os pentóxidos de vanádio V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> são corrosivos e podem causar desgaste na estrutura dos tubos do superaquecedor e reaquecedor;

- f) **Poder calorífico:** é a quantidade de energia térmica liberada por quantidade de combustível consumida durante a combustão. Quanto maior o poder calorífico do combustível, maior energia liberada durante a combustão. São fornecidos o poder calorífico inferior e o poder calorífico superior. Para cálculos do rendimento térmico é usado o poder calorífico inferior, por que não se consegue na prática utilizar a energia do vapor d'água existente dos gases da combustão. Desta forma, a energia contida neste vapor é jogada na atmosfera.

### 2.4.3 Gás Natural

Gás natural é todo hidrocarboneto ou mistura de hidrocarbonetos que permanecem em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, resultantes de decomposição de matéria orgânica fóssil no interior da Terra (PANP 009/2000).

No seu estado bruto, como encontrado na natureza, o gás natural é composto principalmente por metano, além de apresentar proporções de etano, propano, butano, hidrocarbonetos mais pesados e também em menores proporções de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, água, ácido sulfúrico e outras impurezas.

A Tabela 3 descreve as características principais do gás natural encontrado no Brasil.

**Tabela 3 - Características do gás natural**

Características	Composição %
CH <sub>4</sub>	86,73
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	9,66
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,67
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,09
CO <sub>2</sub>	0,56
N <sub>2</sub> e O <sub>2</sub>	1,29
PCS Kcal/m <sup>3</sup>	9.569
Densidade	0,629

**Fonte:** Santos, 2006.

De acordo com Santos (2006), o gás natural é um combustível de aplicação em vários ciclos térmicos com as seguintes vantagens:

- a) Alto poder calorífico, o que reduz o consumo específico e possibilita a operação das máquinas por longos períodos;
- b) Baixo nível de emissões de particulado, hidrocarboneto, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e de enxofre, o que reduz os desgastes dos motores, turbinas, caldeiras, diminuindo os custos com manutenções;
- c) Baixo custo da instalação de termelétricas, devido as simplificações do projeto, como (redução da área de recebimento do combustível, eliminação de aquecedores de combustível, simplificação dos queimadores e eliminação dos sistemas de tratamento dos gases de exaustão).

A Tabela 4 apresenta as especificações Técnicas do Gás Natural comercializado no Brasil.

**Tabela 4** - Especificações Técnicas do Gás Natural Brasileiro

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE <sup>(2)(3)</sup>			MÉTODO	
		Norte <sup>(5)</sup>	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	ASMT	ISO
Poder calorífico superior <sup>(4)</sup>	kJ/m <sup>3</sup>	34.000 a 38.400	35.000 a 42.000		D	6976
	kWh/m <sup>3</sup>	9,47 a 10,67	9,72 a 11,67		3588	
Índice de Wobbe <sup>(5)</sup>	kJ/m <sup>3</sup>	40.500 a 45.000	46.500 a 52.500			6976
Metano, mín.	% vol.	68,0	86,0		D1945	6974
Etano, máx.	% vol.	12,0	10,0			
Propano, máx.	% vol.	3,0				
Butanos e mais pesados, máx.	% vol.	1,5				
Oxigênio, máx.	% vol.	0,8	0,5			
Inertes (N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> ) máx.	% vol.	18,0	5,0	4,0		
Nitrogênio, máx.	% vol.	Anotar	2,0			
Enxofre Total, máx	mg/m <sup>3</sup>	70,0			D5504	6362-2 6362-5
Gás Sulfídrico, (H <sub>2</sub> S), máx. <sup>(6)</sup>	mg/m <sup>3</sup>	10,0	15,0	10,0	D5504	6362-2 6362-5
Ponto de orvalho de água a 1 atm, máx.	°C	-39	-39	-45	D5454	--

Fonte: PANP 104/2002.

\*Observações da Tabela 4:

- a) O gás natural não deve conter traços visíveis de partículas sólidas ou líquidas.
- b) Os limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca\*, exceto os pontos de orvalho\*\* de hidrocarbonetos e de água.
- c) Os limites para a região Norte se destinam às diversas aplicações exceto veicular e para esse uso específico devem ser atendidos os limites equivalentes à região Nordeste.
- d) O poder calorífico de referência de substância pura empregado neste Regulamento Técnico encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.
- e) O índice de Wobbe\* é calculado empregando o poder calorífico superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do poder calorífico superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado de acordo com a fórmula do Regulamento Técnico.
- f) O gás odorizado não deve apresentar o teor de enxofre total superior a 70 mg/m<sup>3</sup>.

## 2.5 COMBUSTÃO

A combustão é um fenômeno que envolve reações químicas bastante complexas, consistindo em vários estágios, que ocorrem em maior ou menor extensão dependendo de vários fatores: o combustível, o grau de mistura com o oxigênio, a temperatura a que é submetida esta mistura (GARCIA, 2013).

O processo de combustão ocorre a partir da união do combustível, que fornece a energia para o processo, do comburente, que é o elemento que reage quimicamente com o combustível, e a fonte de calor que dá início à reação entre os dois elementos anteriores. O combustível é na realidade uma mistura de

---

\* Teor de umidade base seca é a razão entre o peso da água e o peso da matéria seca.

\*\* O ponto de orvalho é definido como a temperatura até a qual o ar (ou gás) deve ser resfriado para que a condensação de água se inicie, ou seja, para que o ar fique saturado de vapor de água. Na temperatura do ponto de orvalho a quantidade de vapor de água presente no ar é máxima.

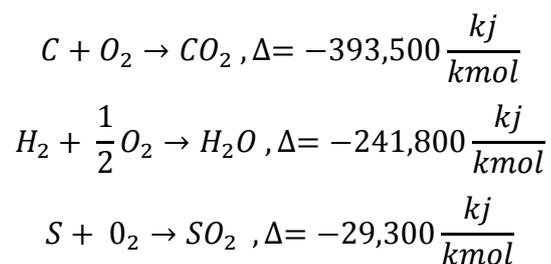
(I<sub>w</sub>) é uma medida do conteúdo energético de um gás, medido com base no seu poder calorífico por unidade de volume à pressão e temperatura padrão, utilizada como indicador da interoperabilidade de equipamentos, em geral queimadores, face à mudança do gás combustível que os alimenta.

hidrocarbonetos que contém também outros materiais, tais como enxofre, vanádio, sódio, potássio, etc., principalmente os combustíveis derivados do petróleo. O ar é definido como uma mistura de diversos gases, e este é utilizado como comburente.

O oxigênio contido no ar é o que realmente interessa para o processo de combustão. Os demais gases, a exemplo do nitrogênio, ao se combinar com o oxigênio formando os óxidos nítricos, compostos indesejáveis, os quais são lançados na atmosfera misturando-se ao ar que respiramos o que pode provocar a irritação das vias respiratórias superiores (MARTINELLI, 2003).

O processo de combustão pode ocorrer de duas formas: completa ou incompleta. Considera-se uma combustão completa quando todo o carbono presente no combustível é queimado e forma dióxido de carbono, todo o hidrogênio é queimado e forma água, todo o enxofre é queimado e forma dióxido de enxofre e todos os elementos são completamente oxidados. A combustão é considerada incompleta se as condições citadas não forem atendidas (MORAN E SHAPIRO, 2013).

De acordo com Bizzo (2003), as reações de combustão são reações químicas que envolvem a oxidação completa de um combustível. Materiais ou compostos são considerados combustíveis industriais quando sua oxidação pode ser feita com liberação de energia suficiente para aproveitamento industrial. Os principais elementos químicos que constituem um combustível são: carbono, hidrogênio e em alguns casos, enxofre. Estes elementos reagem com oxigênio, e na sua forma pura apresentam a seguinte liberação de calor:



Se a combustão for realizada com ar úmido o nitrogênio que atua normalmente como um gás inerte, não se oxida e sua atuação na combustão é como moderador, absorvendo uma parcela do calor liberado na combustão, causando uma regulação da temperatura de combustão ( $t_c$ ), ou temperatura de chama.

A temperatura da chama é calculada considerando-se que todo o calor resultante da combustão é transformado em entalpia dos produtos de combustão, isto é temperatura adiabática de chama. Não havendo nenhuma perda de calor neste cálculo para o meio ambiente ou mesmo por dissociação do combustível (GARCIA, 2003).

$$T_{chama} = T_{ar} + m_c \cdot PCI / (m_g \cdot CP_g)$$

Onde:

- $T_{chama}$  = Temperatura de chama, K
- $T_{ar}$  = temperatura de entrada do ar de combustão, K
- $PCI$  = poder calorífico inferior,  $\frac{kJ}{kg}$ .
- $m_c$  = massa do combustível queimado,  $\frac{kg}{s}$
- $m_g$  = massa dos gases de combustão,  $\frac{kg}{s}$
- $CP_g$  = calor específico dos gases de combustão,  $\frac{kJ}{kg.K}$

Os fatores que controlam o grau de dissociação para qualquer reação dada (isto é, a posição de equilíbrio) são: temperatura, pressão e concentração. O princípio de *Le Chatelier* diz que: “se uma variável que afeta o equilíbrio de um sistema é modificada, então a posição de equilíbrio é deslocada para se opor à mudança” (BIZZO, 2003).

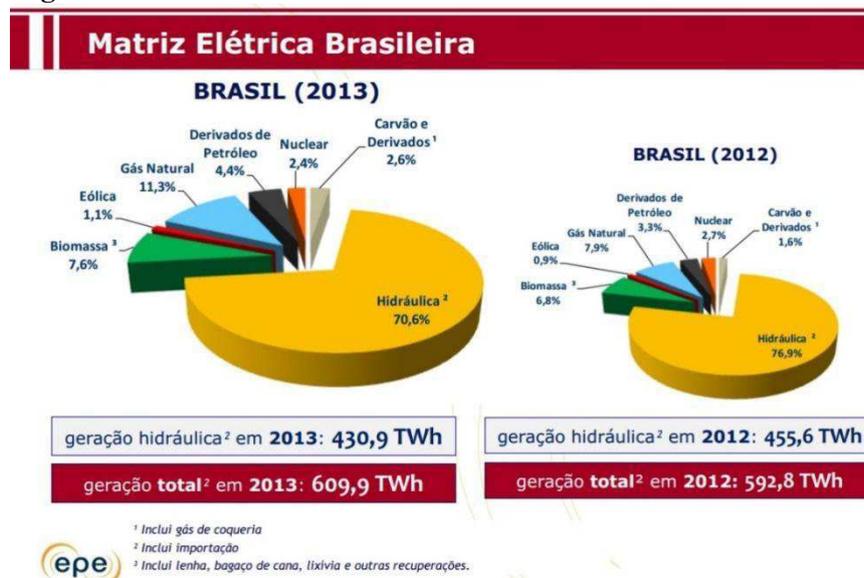
## 2.6 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Brasil vem aumentando investimentos em energias renováveis chegando a mais de 93% do que no ano de 2014. Os maiores investimentos foram em energia eólica e biocombustíveis. Houve muitos investimentos em termelétricas a óleo entre 2005 e 2008, mas após 2009, os investimentos se concentraram mais em energias renováveis com leilões da ANEEL em térmicas à gás e outras fontes de energia. As usinas hidrelétricas são responsáveis pela geração de mais de 70,6% da eletricidade do País. Vale lembrar que a matriz energética mundial é composta por

13% de fontes renováveis no caso de países industrializados, caindo para 6% entre as nações em desenvolvimento (ESTADÃO, 2016).

A Figura 7 apresenta a Matriz Energética Brasileira, tendo como ano base 2013 e apresentando comparativo com ano de 2012.

**Figura 7 - Matriz Elétrica Brasileira**



Fonte: EPE, 2015.

## 2.7 DEMANDA DE COMBUSTÍVEL NO BRASIL ATÉ 2030

A participação de petróleo e derivados na oferta até interna de energia aumentou 34%, em 1970, para 46% no ano 2000, e estima-se recuar a 31% em 2030.

Vale a pena ressaltar o aumento da participação do etanol e do óleo diesel e a redução da participação do óleo combustível e da nafta na demanda final de energia. A queda da demanda da nafta e do óleo combustível se deve basicamente ao aumento esperado para o consumo de gás natural como combustível e matéria-prima no setor petroquímico (BRASIL,2007).

## 2.8 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Os motores diesel estacionários realizam o processo de combustão a altas temperaturas e, durante este processo, oxida uma parcela dos componentes que são admitidos no interior do cilindro (oxigênio); os demais gases, a exemplo do nitrogênio, ao se combinarem com o oxigênio, podem produzir compostos indesejáveis, os quais são lançados na atmosfera, misturando-se ao ar. Alguns desses compostos são prejudiciais e atualmente é objeto de preocupação mundial. As organizações internacionais, como a EPA, nos Estados Unidos, o CONAMA, do Brasil e outras entidades, vem estabelecendo padrões para controle dos níveis de emissões desses poluentes (COSTA, 2007).

Para os motores de combustão interna do ciclo diesel lento utilizado nas UTE's não há atualmente regulamentação brasileira de padrões definidos para emissões atmosféricas, utiliza-se dos dados do fabricante do motor para observar os valores limites de tolerância especificados para as emissões.

Em anos recentes, tem-se aumentado a preocupação com relação as emissões de dióxido de carbono  $CO_2$  e outros gases considerando gases de efeito estufa que contribuem ao aquecimento global. Os motores de combustão interna, dada a sua elevada eficiência térmica (fundamentalmente os de ignição por compressão), apresentam emissões específicas relativamente baixas deste poluente (GERAÇÃO TERMELÉTRICA, 2004).

### *2.8.1 Poluentes Atmosféricos*

Os principais poluentes que se formam durante a queima de qualquer combustível orgânico, são:

#### **a) Material Particulado (MP)**

São minúsculas partículas sólidas ou líquidas de fuligem, poeira, fumaça, vapores. O tamanho das partículas, 10 microns (ou menor). Consiste em uma mistura complexa de sólidos com diâmetro reduzido, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas.

Em geral o material particulado é classificado de acordo com o diâmetro das partículas, devido à relação existente entre diâmetro e possibilidade de penetração no trato respiratório.

**Efeitos** - estudos indicam que os efeitos do material particulado sobre a saúde incluem: câncer respiratório, arteriosclerose, inflamação de pulmão, agravamento de sintomas de asma (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

#### **b) Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)**

É um gás tóxico, incolor, pungentes pode ser emitido por fontes naturais ou por fontes antropogênicas e pode reagir com outros compostos na atmosfera, formando material particulado de diâmetro reduzido e também contribuindo para o desdobramento e formação do SO<sub>3</sub>.

**Efeitos** - entre os efeitos a saúde, podem ser citados o agravamento dos sintomas da asma e aumento de internações hospitalares, decorrentes de problemas respiratórios. São precursores da formação de material particulado secundário. No ambiente, podem reagir com a água na atmosfera formando chuva ácida (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

#### **c) Monóxido e Dióxido de Carbono (CO e CO<sub>2</sub>)**

É um gás inodoro e incolor, formado no processo de queima de combustíveis em condições não ideais, em que não há oxigênio suficiente para realizar a queima completa do combustível. Quando a combustão é completa, o CO é convertido em CO<sub>2</sub>. Mistura rica, com menor quantidade de ar que a desejada na mistura ar/combustível contribui para que isso aconteça (NABI ET AL., 2006).

**Efeitos** - este gás tem alta afinidade com a hemoglobina no sangue, substituindo o oxigênio e reduzindo a alimentação deste ao cérebro, coração e para o resto do corpo, durante o processo de respiração. Em baixa concentração causa fadiga e dor no peito, em alta concentração pode levar a asfixia e morte (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

#### d) **Óxido e Dióxido de Nitrogênio (NO, NO<sub>x</sub> e NO<sub>2</sub>)**

O NO<sub>x</sub> é formado pela soma do óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>).

É um processo de formação complexa afetado por diferentes características do motor de combustão interna, tais como: projeto da câmara de combustão e sistema de alimentação de combustível e de ar (SUN, 2010).

O dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) é um gás poluente com ação altamente oxidante, sua presença na atmosfera é fator chave na formação do ozônio troposférico. Além de efeitos sobre a saúde humana apresenta também efeitos sobre as mudanças climáticas globais.

**Efeitos**- altas concentrações podem levar ao aumento de internações hospitalares, decorrente de problemas respiratórios, problemas pulmonares e agravamento à resposta das pessoas sensíveis a alérgenos. No ambiente pode levar a formação de smog fotoquímico e a chuvas ácidas (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

#### e) **Hidrocarbonetos (HC)**

São compostos que resultam de emissões quando as moléculas de combustível no motor queimam apenas parcialmente. Alguns compostos de HC são os principais poluentes atmosféricos e podem ser participantes ativos no processo fotoquímico ou afetar a saúde, são formados de carbono e hidrogênio e que podem se apresentar na forma de gases, partículas finas ou gotas. Podem ser divididos em:

- THC - hidrocarbonetos totais;
- CH<sub>4</sub> - hidrocarboneto simples, conhecido como metano;
- NMHC - hidrocarbonetos não metano, compreendem os HC totais

(THC) menos a parcela de metano (CH<sub>4</sub>).

**Efeitos** - são precursores para a formação do ozônio troposférico e apresentam potencial causador de efeito estufa (metano) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e metodologias utilizadas nesta pesquisa, contendo a descrição dos equipamentos utilizados e suas características técnicas.

#### 3.1 METODOLOGIA

A metodologia utilizada está baseada em duas partes para compreensão deste trabalho. Fazendo referência a Tese de Costa (2007) estaremos comparando os resultados obtidos nos testes com o motor Cummins de 6 cilindros em linha, modelo DGFK 1463, série C01T213734, turbinado e intercalado com cilindrada de 8,3 litros e potência nominal de 206Kw a 1800 rpm instalado no Laboratório de Termogeração da UFCG em relação aos dados obtidos como motor de 8,45 MW durante os testes na sala de máquinas da Usina Termelétrica.

A Tabela 5 traz informações sobre as propriedades físico-químicas dos combustíveis utilizados nos motores de 150 KW e 8,45 MW para fins de cálculo e comparativo de eficiência energética.

**Tabela 5** - Propriedades Físico-químicas dos combustíveis utilizados na operação dos motores da 150 KW e 8,45 MW

<b>PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA</b>	<b>DIESEL (Motor 150 KW)</b>	<b>GÁS (Motor 150 KW)</b>	<b>DIESEL (Motor 8,45 MW)</b>
<b>DENSIDADE (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,8497	0,00071	0,82 - 0,88
<b>VISCOSIDADE CINEMÁTICA 40°C (CST)</b>	3,04	-	2,5 - 5,5
<b>PCI (kJ/kg). Líquidos (kcal/m<sup>3</sup>) Gás</b>	43.802	9.916	43.802

**Fonte:** Elaborada pelo Autor, 2015.

### 3.2 USINA TERMELÉTRICA DE CAMPINA GRANDE

A Usina Termelétrica de Campina Grande, foi constituída no ano de 2007, no Leilão A-3, nº 002 da ANEEL no mês de julho, com o propósito específico de desenvolvimento, construção e operação do Projeto denominado UTE Campina Grande. O empreendimento é dotado dos mais modernos recursos tecnológicos existentes no mundo, na área de geração de energia elétrica, fato que traduz na prática, índices de poluição extremamente reduzidos, atendendo as exigências da legislação internacional.

#### *3.2.1 Especificações Técnicas da UTE-CG*

- a) **Potência Instalada:** 169 MW (W20V32)
- b) **Localização:** Campina Grande- Paraíba
- c) **Tipo de Unidade:** Motores ciclo diesel acoplado a alternador
- d) **Combustível:** Óleo combustível (OCB-1) e óleo diesel (S-500)
- e) **Tensão de Conexão:** 230,0 kV
- f) **SE Conectada:** SE Campina Grande I
- g) **Resolução Autorizada:** ANEEL nº 230 de 24/04/2002
- h) **Operação Comercial:** 28/01/2011 as 17:23h

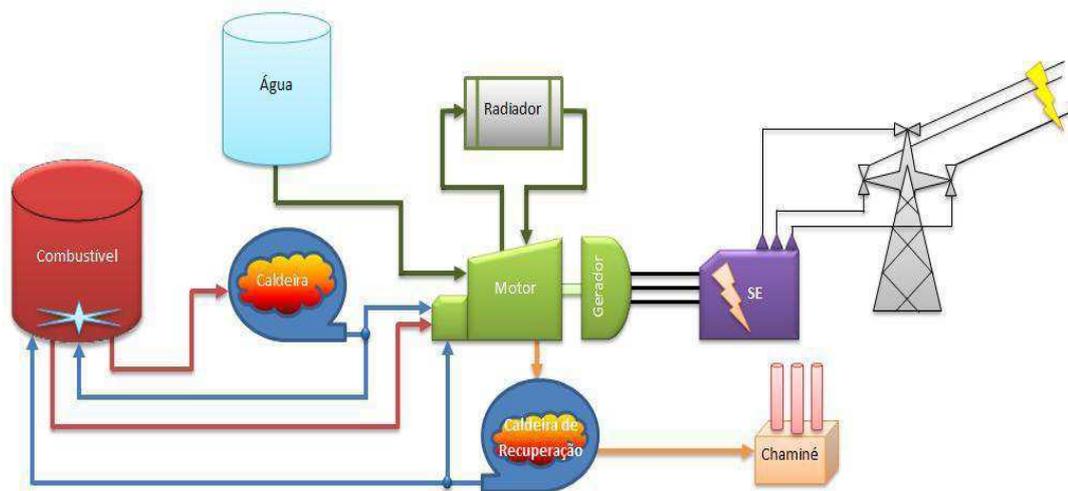
#### *3.2.2 Fluxograma operacional da Usina Termelétrica*

A operação da Usina Termelétrica apresentada na Figura 8 funciona da seguinte forma em caso da planta estivesse parada:

- a) Os combustíveis utilizados na Usina termelétrica a qual realizamos o estudo são do tipo: óleo combustível pesado com baixo teor de enxofre (OCB1) e óleo diesel (S-500), estes combustíveis chegam via modal rodoviário em caminhões tipo rodo trem, em média são 30 caminhões por dia para abastecimento da planta em operação;

- b) A caldeira auxiliar é acionada, operando com óleo diesel, este equipamento é responsável pelo aquecimento inicial por geração de vapor para as tubulações da planta;
- c) Após isso, parte inicialmente os motores de 8,45 MW operando com óleo diesel, devido a densidade do óleo diesel ser menor que o óleo combustível OCB1 a potência máxima do motor não ultrapassa dos 7 MW;
- d) O motor de 8,45 MW após acionados devem estar acoplados a caldeiras de recuperação tipo flamotubular, pois os gases da combustão do motor passam por dentro dos tubos das caldeiras e durante a troca de calor ocorre o aquecimento da água da caldeira gerando vapor, a partir deste momento a caldeira auxiliar é desligada;
- e) O aquecimento das tubulações pela geração e vapor das caldeiras de recuperação se deve a inclinação da válvula de passagem dos gases da combustão do motor de 8,45 MW para dentro das caldeiras ou para a chaminés;
- f) Com aquecimento total da planta o motor de 8,45 MW passa a operar com óleo combustível pesado do tipo OCB-1 (com teor de enxofre máximo de 1%) e com isso consegue chegar a sua potência nominal de 8,45 MW;
- g) A água que abastece os motores de 8,45 MW passa por uma unidade de tratamento de água que possuem: filtros de areia, filtros de carvão, resinas catiônicas e membrana polimérica, esse procedimento deve ocorrer para que água que alimenta os equipamentos, motores e caldeiras, esteja com baixa condutividade e dureza para evita a formação de pontos de corrosão nas tubulações;
- h) A água de entrada e saída dos motores funcionada em sistema fechada o que reduz as perdas do sistema, a recirculação da água no motor e dada pelos radiadores, cada motor possuem 12 radiadores;
- i) O gerador recebe a energia mecânica do eixo do motor e converte em energia elétrica, essa por sua vez é transportada para um transformador que eleva a tensão da corrente para que seja escoada pelas linhas de transmissão da Subestação de 230 Kv que transporta a energia elétrica para as distribuidoras e esta repassa as distribuidoras de energia que revende para os consumidores.

**Figura 8** - Fluxograma de operação da UTE



Fonte: Silva, 2012.

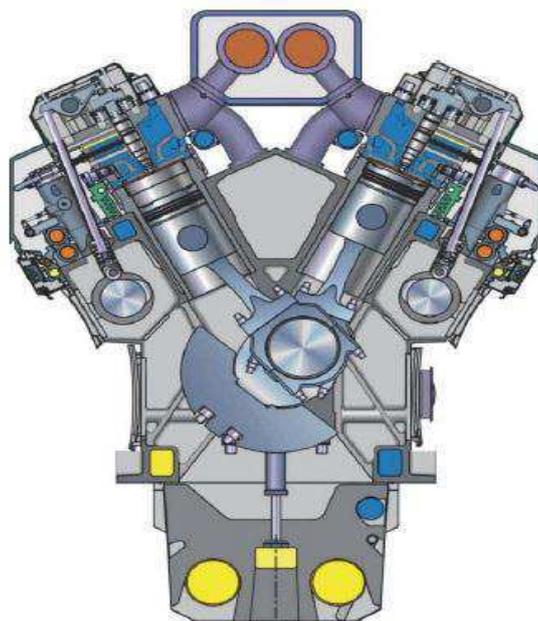
### 3.2.3 Sala de máquinas da UTE

A casa de máquinas da UTE onde estão instalados 20 motores da Empresa *Wärtsilä* modelo W20V32, ou seja, é um motor no modelo em V com 20 cilindros, 10 em cada bancada do cabeçote e tem 32cm o diâmetro destes cilindros. O regime de funcionamento destes motores é classificado como Diesel Lento - trabalham a uma rotação de 400 a 800 RPM, tendo sua plena carga de 100% de geração com 720 RPM, podendo chegar a 110% com 800 RPM (STATION MANUAL,2008).

Os motores do ciclo diesel podem ser alimentados por meio de injeções diretas ou pneumáticas de combustível, atualmente a forma mais utilizada é por meio da injeção mecânica, pois utiliza de bombas mecânicas para injetar o combustível na câmara de combustão. Estas bombas podem ser unitárias por motor ou múltiplas, onde cada cilindro ou conjunto de cilindros possui uma bomba independente.

Na Figura 9 é apresentado a seção transversal do motor V20W32 e na Figura 10 uma visão interna e lateral da frentes dos motores da casa de máquinas de uma Usina Termelétrica .

**Figura 9:** Seção transversal do motor V20W32



**Fonte:** GERAÇÃO TERMELÉTRICA, 2004.

**Figura 10 -** Seção transversal do motor V20W32



**Fonte:** Tevisa, 2015.

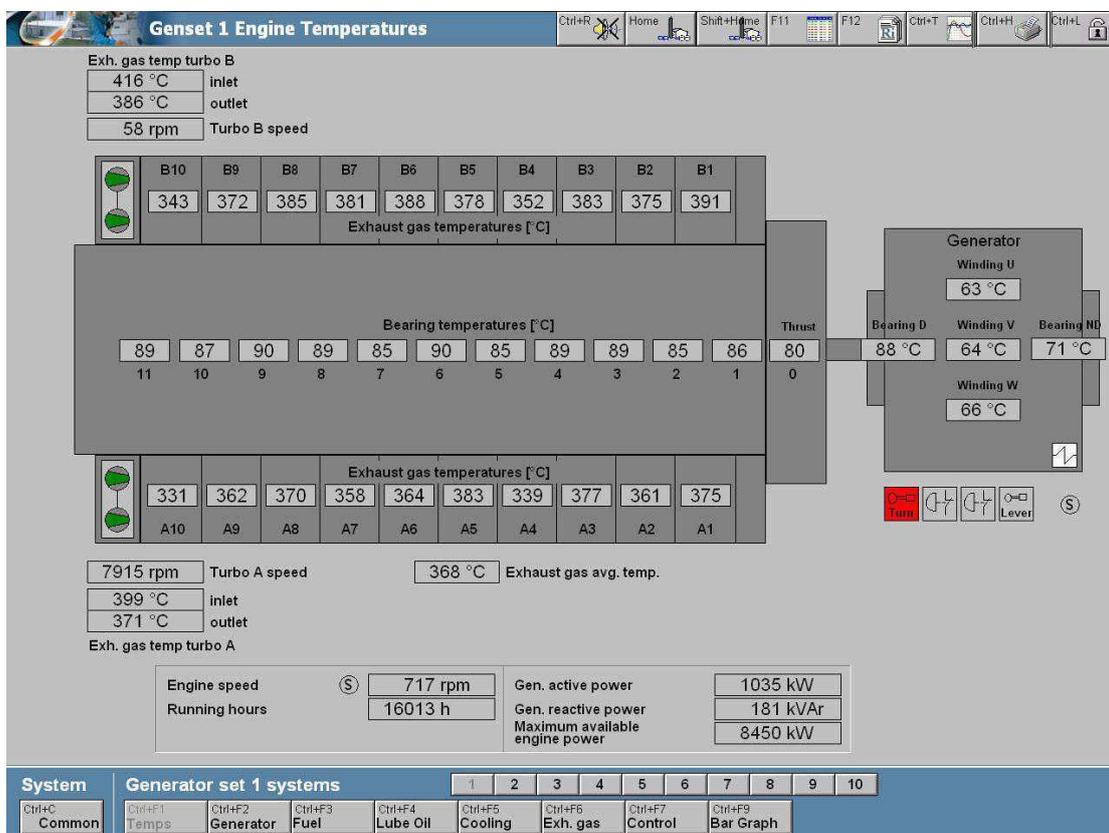
### ***3.2.4 Sala de Controle da UTE***

A sala de controle da UTE consiste em sistema de monitoramento e controle da planta desde o recebimento de combustível até a saída dos gases de escape dos

motores, isso tudo por meio de computadores que fazem a Interface Homem-Máquina (IHM) que registra e converte os dados digitais dos sensores acoplados aos equipamentos em dados visuais reportados pela Comunicação com linha de energia (PLC) por redes de energia elétrica interna da planta. Essa interface faz parte do sistema computacional que determina como os supervisores podem controlar e monitorar as máquinas.

A Figura 11 representa uma das telas de visualização da interface computacional que existe na UTE.

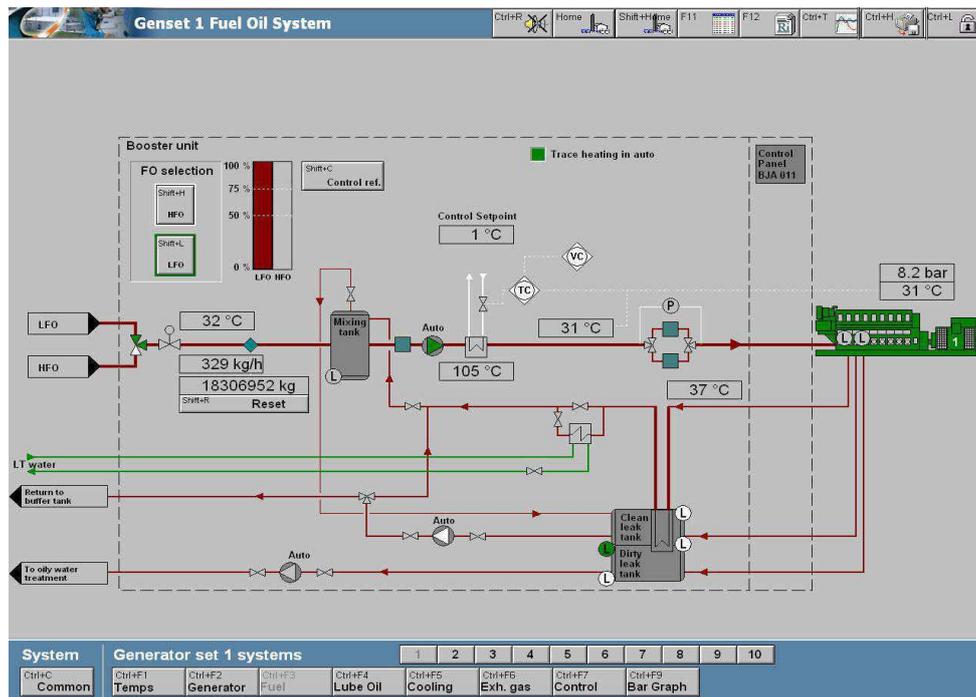
**Figura 11** - Interface gráfica do banco de dados da UTE- temperatura média dos cilindros do motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Pode-se verificar na Figura 12, as informações das temperaturas médias dos cilindros e dos mancais do eixo do motor de 8,45 MW em operação com óleo diesel durante os testes.

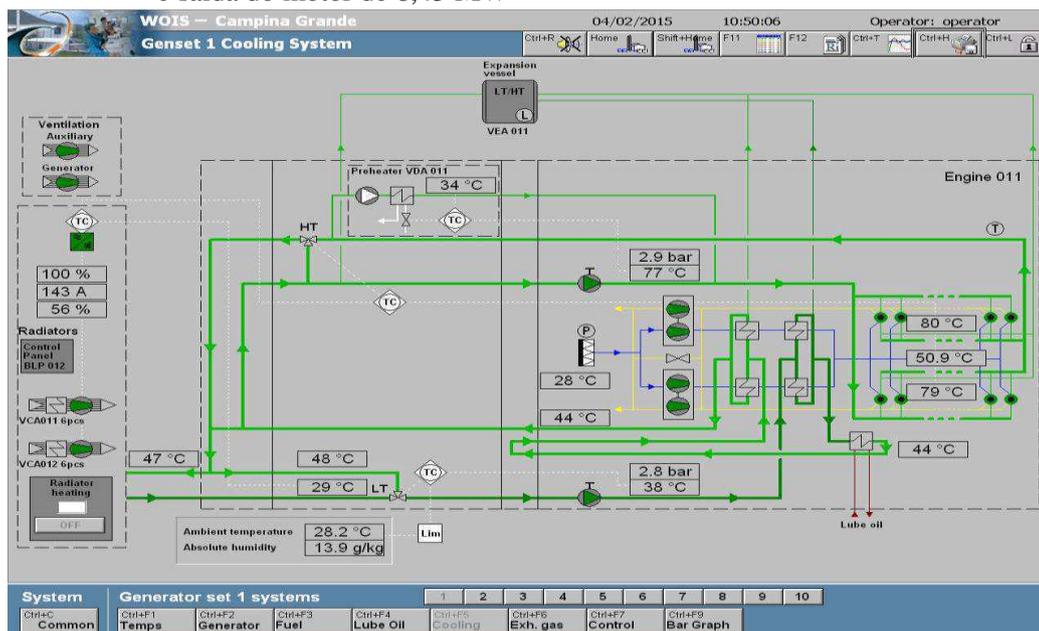
**Figura 12** - Interface gráfica do banco de dados da UTE- temperatura, fluxo mássico de combustível do motor de 8,45 MW



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

Na Figura 12 pode-se verificar as informações dos fluxos mássicos de combustível e as temperaturas do fluido que passar por filtros, trocadores de calor e tanques dentro do sistema interno do motor de 8,45 MW.

**Figura 13** - Interface gráfica do banco de dados da UTE- temperatura da água de entrada e saída do motor de 8,45 MW



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

Pode-se verificar na Figura 13 as informações dos fluxos de entrada e saída de água para arrefecimento do motor de 8,45 MW a existência de trocadores de calor e de válvulas de “três vias” para manobras operacionais.

### 3.2.5 Sistema de análise dos gases de escape

Com o objetivo de se avaliar a emissão de poluentes do motor operando em rampa de carga, foi utilizado um analisador de gases apresentado na Figura 14, fabricado por Kane International Limited, modelo *Kane 940*, com as especificações técnicas mostradas na Tabela 5, juntamente com uma sonda para coleta de gases no sistema de descarga do motor em tempo real nos testes realizados dentro da casa de máquinas da UTE.

**Figura 14** - Analisador de gases utilizado na UTE



**Fonte:** Guimarães, 2015.

A Figura 15 mostra o sistema de acoplamento da sonda do analisador de gases de combustão na tubulação de escapamento de gases do motor.

**Figura 15** - Sonda do analisador de gases instalada no motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Na Figura 15 vê-se a sonda do analisador de gases, que se encontra instalada na tubulação de escapamento do motor, onde os gases são captados para análise. Os dados foram coletados *IN LOCO* e em tempo real. As especificações técnicas do analisador estão representadas a seguir, na Tabela 6.

**Tabela 6** - Especificações Técnicas do analisador de gases utilizados nos motores da UTE

Parâmetro	Escala	Resolução	Precisão
Temperatura	0-600°C	1,0°C	±2,0°C ±0.3% Valor medido
CO	0 - 10.000 ppm	1 ppm	±20 ppm<400 ppm±5% da leitura <5000 ppm ppm±10% da leitura >2000 ppm
CO <sub>2</sub>	0 - 99,9%	0,1%	+/- 0,3% Valor medido
NO	0 - 5.000 ppm	1 ppm	+/- 5 ppm< 100 ppm+/- 5% da leitura > 100 ppm
NO <sub>2</sub>	0 - 1.000 ppm	1 ppm	+/- 5 ppm< 100 ppm+/- 5% da leitura > 500 ppm
SO <sub>2</sub>	0 - 5.000 ppm	1 ppm	+/- 5 ppm< 100 ppm+/- 5% da leitura > 100 ppm
Pressão	+/- 150 mbar	0,01 mbar	+/- 0,2% fundo da escala
Perdas	0 - 99,9%	0,1%	+/- 1% da Leitura
Eficiência de queima	0 - 99,9%	0,1%	+/- 1% da Leitura
Excesso de Ar	0 - 2885%	0,1%	+/- 0,2% da Leitura
Índice de Toxicidade	0 - 99,9%	0,01%	±0,01% da Leitura
Oxigênio	0 - 21%	0,1%	+/- 0,2% da Leitura

**Fonte:** Highmed, 2015.

### **3.2.6 Procedimentos e metodologias utilizados durante os experimentos na UTE**

A realização dos testes com o motor de 8,45 MW se deu em rampa de potência com variação entre 1MW, tendo duração média de 1:30 h. Devido a utilização do combustível diesel que tem a densidade menor que o óleo combustível, há uma redução de potência o motor, a nova potência máxima passa a ser 7MW. Assim teremos 7 escalas de potência com 5-7 leituras por potência, tendo aproximadamente uma média de 50 leituras por teste.

#### **3.2.6.1 Realização dos Testes**

Para a realização de cada teste no motor de 8,45 MW na UTE se verificava as condições do motor e dos sistemas auxiliares. Para isso fez-se uso das informações do sistema de bancos de dados que monitoram os sistemas de: controle, potência, as temperaturas do motor, do combustível, da água, do óleo lubrificante, sistema de escapamento de gases como também as pressões do sistema de arrefecimento.

Verificada todas estas condições fazia o acoplamento do equipamento Analisador de gases do modelo Kane 940 à sonda de leitura que já se encontra instalada no motor 8,45 MW. Após isso ligou-se o equipamento para calibrar no modo de leitura para *Light Oil*, pois os testes eram realizados com óleo diesel/S-500.

Confirmando que todas as condições estavam adequadas para realização do teste deram-se início os procedimentos nas seguintes condições:

- a) O tempo médio de realização dos testes foi de 1:30 h em escala de crescente e decrescente de potência, para isso aguardava o motor estabilizar a potência desejada e em seguida aferia cerca de 5 a 7 medições com o equipamento analisador de gases por potência. O tempo médio de leitura por potência era cerca de 10 minutos, o intervalo entre leituras foi de 1 minutos;
- b) Após as medições na potência desejada, seguindo a escala crescente ou decrescente de potência, para permitir que o equipamento calibrasse o nível de oxigênio do ar ambiente (21%) retirava-se a sonda do analisador pelo tempo de 1 minuto, em seguida as repetia as informações descritas nos itens 1 e 2.

As leituras foram confirmadas pela média de dois testes realizados, um em escala crescente e outro em escala decrescente de potência, pôde-se verificar que não houveram alterações significativas nos valores encontrados durante os dois tipos de escalas analisadas. Os dados das leituras ficavam salvos no banco de dados do analisador de gases, e ao fim de cada teste os arquivos eram transferidos para o computador pessoal.

### **3.2.6.2 Aquisição de dados do motor**

Aquisição dos dados das condições operacionais do motor durante os testes foram coletados em tempo real pelo responsável técnico do fabricante do motor no momento da operação dos testes, estes dados foram armazenados em um dispositivo eletrônico-*pendrive*. Assim, com posse desse cruzamento de informações do sistema operacional do motor da UTE e dos dados armazenados no analisador de gases, teremos condições para as análises comparativas entre o motor de 8,45 MW com o motor de 150 KW ambos operando com óleo diesel em rampa de carga.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS ANALISADOS NESTA PESQUISA

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos experimentalmente no motor de 8,45 MW da Usina Termelétrica em comparativo com o motor de 150 KW comparativo com a Tese de Costa (2007). O termo “dual” se refere ao modo de operação do motor quando este funciona com dois combustíveis (diesel e gás natural), e o percentual de substituição de diesel por gás natural, alcançou valores de 85% na operação do motor, de acordo com trabalho de Costa (2007). Os resultados apresentados serviram de comparativo com as teorias apresentadas nas literaturas, com as práticas aplicadas nas duas metodologias: motor de 8,45 MW e 150 KW.

### 4.2 ANÁLISE DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA

#### a) Consumo mássico de combustível

O consumo mássico de diesel para geração de energia pelo motor de 8,45 MW é verificada no Tabela 4.1 e representado no gráfico da Figura 4.1.a uma variação linear crescente, variando de 336 a 1486 kg/h para as potências de 1 a 7 MW respectivamente. Isto ocorreu quando o motor opera com óleo diesel, acarretando um desprendimento de energia gerada no processo de combustão.

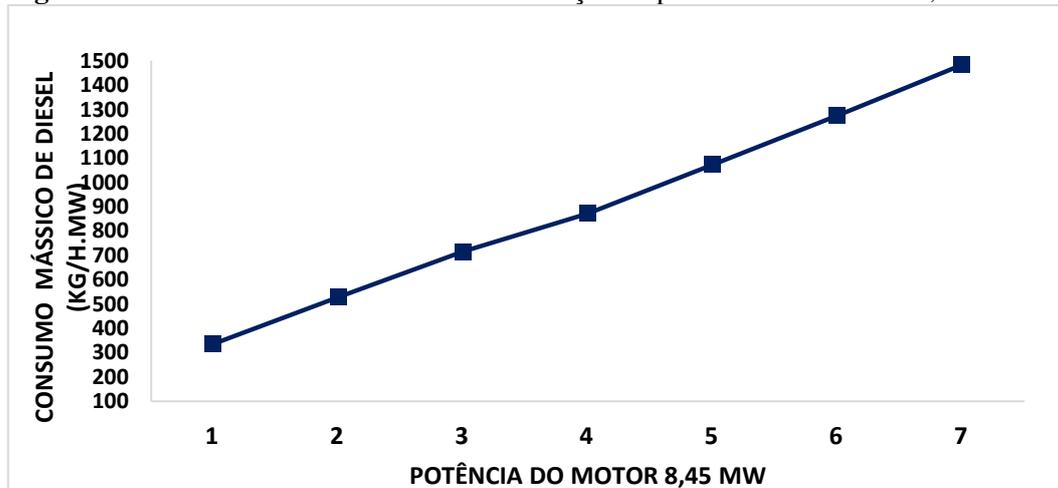
**Tabela 7** - Consumo versus potência do motor de 8,45 MW operando com óleo diesel

Potência (MW)	Consumo de Diesel (kg/h)
1	336
2	528
3	715
4	872
5	1.073
6	1.275
7	1.483

**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

A Figura 16 representa os dados informados na tabela 7.

**Figura 16** - Consumo mássico do diesel em função da potência no motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

A Tabela 8 nos traz informações da variação do consumo de combustível versus a potência no motor de 150 KW.

**Tabela 8** - Consumo versus potência do motor de 150 KW operando em modo diesel e dual “diesel/gás”

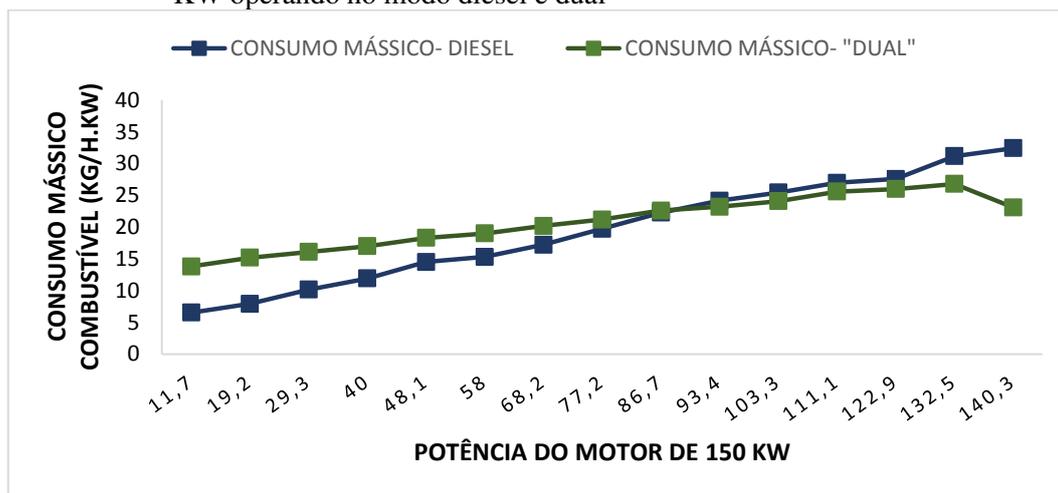
Potência (KW)	Consumo Diesel (kg/h)	Consumo Gás (m <sup>3</sup> /h)
11,7	6,53	13,8
19,2	7,91	15,2
29,3	10,17	16,1
40	11,92	17
48,1	14,52	18,3
58	15,32	19
68,2	17,22	20,2
77,2	19,73	21,2
86,7	22,29	22,6
93,4	24,16	23,2
103,3	25,44	24,1
111,1	26,97	25,6
122,9	27,59	26
132,5	31,17	26,8
140,3	32,43	23,1

**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

De posse dos dados da Tabela 8 confeccionou-se o gráfico da Figura 17, e pode-se verificar no motor de 150 KW operando no modo diesel um comportamento

semelhante ao motor de 8,45 MW, operando apenas com diesel. Percebeu-se que durante a operação no modo “dual” até 86.7 KW o consumo mássico do motor de 150 KW operando com diesel foi maior que no modo “dual”, após isso ocorre uma redução no consumo de combustível para o motor operando em modo dual com “diesel/gás” e uma elevação para operação com diesel puro.

**Figura 17** - Consumo mássico de combustível em função da potência no motor de 150 KW operando no modo diesel e dual



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

### 4.3 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DO MOTOR EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA

#### a) Temperatura de água na entrada e saída do motor

A temperatura da água de entrada no motor em operação com diesel apresentou elevações com variações de potência, de acordo com a literatura, isto é uma tendência de comportamento normal.

As faixas de temperaturas de entrada e saída da água do motor de 8,45 MW em operando com óleo combustível pesado – OCB1, são: **78 a 82°C** para entrada e **92 a 96°C** para saída, respectivamente aos valores de entrada. Para fins de comparação com ao motor operando com óleo diesel, podemos verificar que estes valores são semelhantes ao apresentado na Tabela 9.

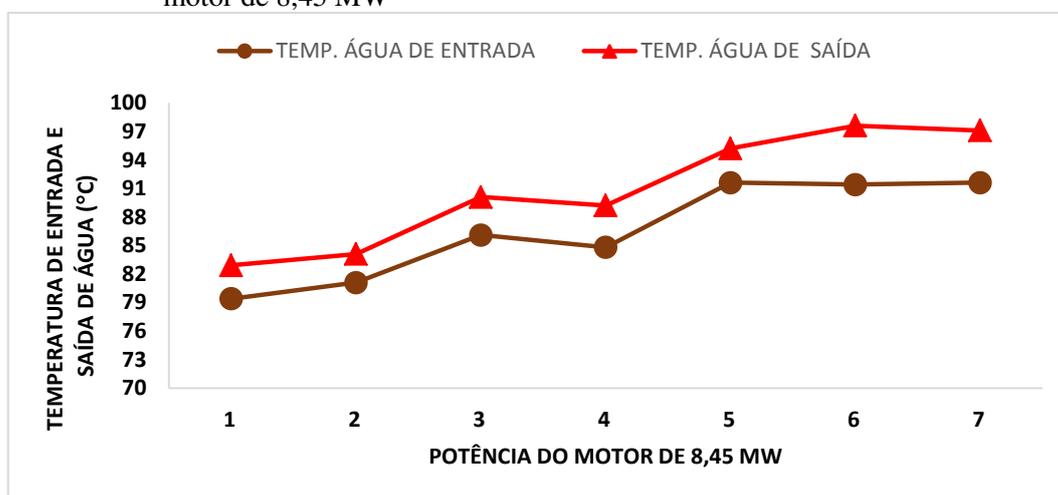
**Tabela 9** - Temperatura de água de entrada e saída para refrigeração do motor de 8,45 MW em variação de potência

POTÊNCIA	TEMP. ÁGUA ENTRADA	TEMP. ÁGUA SAÍDA
MW	(°C)	(°C)
1	79,4	82,9
2	81,1	84,1
3	86,1	90,1
4	84,8	89,2
5	91,6	95,2
6	91,4	97,6
7	91,6	97,1

**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Com os valores apresentados na Tabela 9 fez-se o gráfico da Figura 18, que representou a variação de 5°C na temperatura de entrada e saída de água para cada potência. Com isso a variação da elevação da temperatura da água de entrada no motor 8,45 MW foi 12,2°C da menor para maior potência e para a água de saída a variação foi de 14,5°C respectivamente.

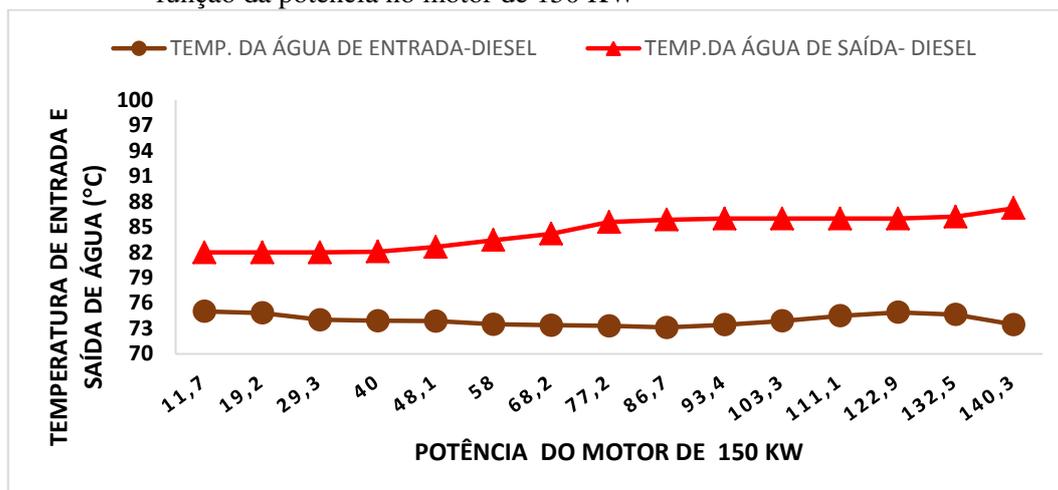
**Figura 18** - Temperatura de água na entrada e saída do motor em função da potência no motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Pelo gráfico da Figura 19 tem-se as condições de temperatura de entrada e saída da água do motor de 150 KW para as condições modo diesel com diferença mínima de 7°C e máxima de 14°C entre a temperatura de entrada e saída para os limites de potência.

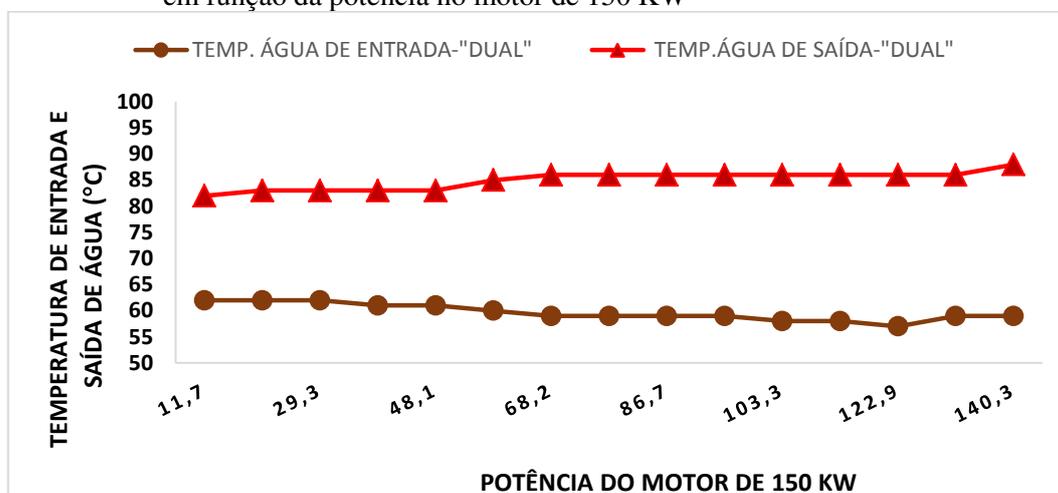
**Figura 19** - Temperatura de água na entrada e saída do motor operando com diesel puro, em função da potência no motor de 150 KW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

No gráfico da Figura 20 verifica-se a semelhança de comportamento do modo “Dual” nas condições de entrada e saída de água em relação ao modo diesel da Figura 21.

**Figura 20** - Temperatura de água na entrada e saída do motor operando com modo “Dual” em função da potência no motor de 150 KW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

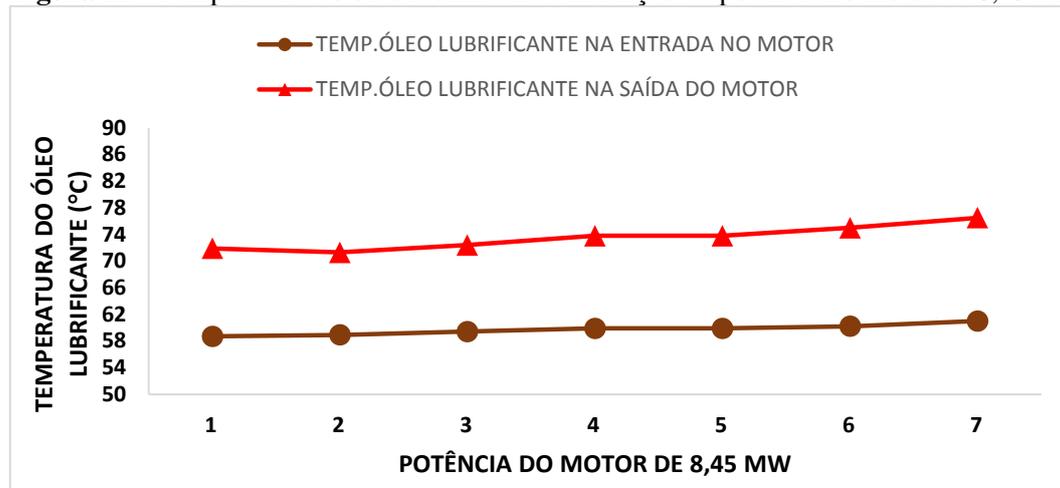
De acordo com Brunetti (2012), a temperatura da água do motor deve ser mantida em torno de 90°C, em todos os regimes de trabalho.

Esta tarefa é realizada pela válvula termostática situada entre a saída da água do motor no cabeçote e do radiador que mantem o motor na temperatura ideal de funcionamento.

### b) Temperatura do óleo lubrificante

A temperatura do óleo lubrificante cresce com o aumento do tempo de operação do motor, isto também tem relação direta com aumento da potência. O gráfico da Figura 4.3.a apresentou a variação de 12 a 15°C da temperatura de entrada e a de saída do óleo lubrificante, foi percebido que isto não comprometeu a boa condição de operação do motor.

**Figura 21** - Temperatura do óleo lubrificante em função da potência no motor de 8,45 MW



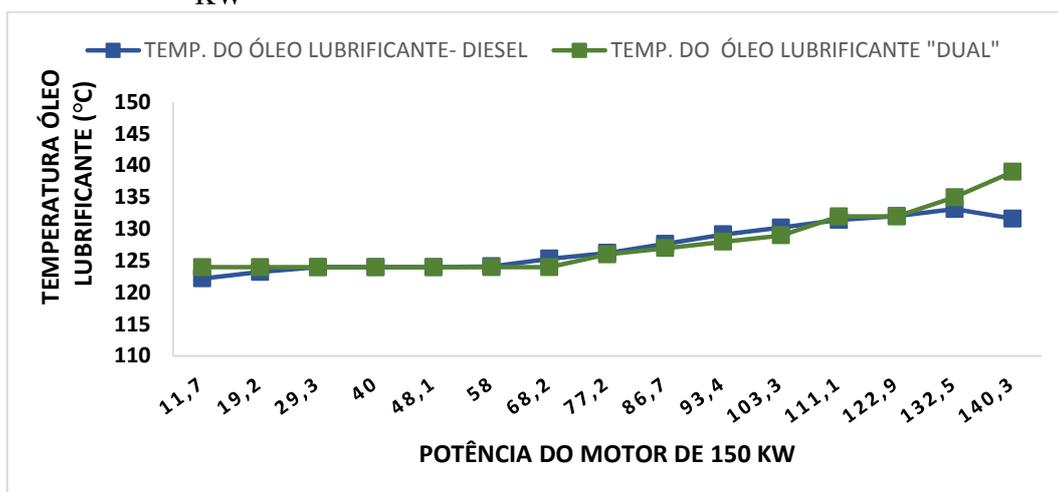
**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

No gráfico da Figura 22 foi possível verificamos que a diferença entre o motor de 8,45 MW e o motor de 150 KW está no controle da temperatura de entrada e saída do óleo lubrificante com tempo de operação de 1:30 h. A condição normal de temperatura do motor de 8,45 MW operando com óleo combustível OCB-1 tem os seguintes valores para as faixas de menor a maior potência (1 a 8,45MW): **59 a 63°C** para entrada e **72 a 81°C** para saída respectivamente aos valores de entrada.

Porém pode-se constatar que as condições são semelhantes ao longo das escalas de potência, mas para cargas acima de 140KW ocorre a disparidade de valores, neste momento para o modo diesel ocorre uma redução e para o modo dual “Dual” ocorre uma elevação de temperatura.

Este fato pode ser explicado pela maior quantidade de gás natural em substituição ao diesel, visto que o gás apresenta um tempo de queima menor que o diesel e como o gás apresenta nesta condição final uma substituição de até 85% do combustível diesel.

**Figura 22** - Temperatura do óleo lubrificante em função da potência no motor de 150 KW

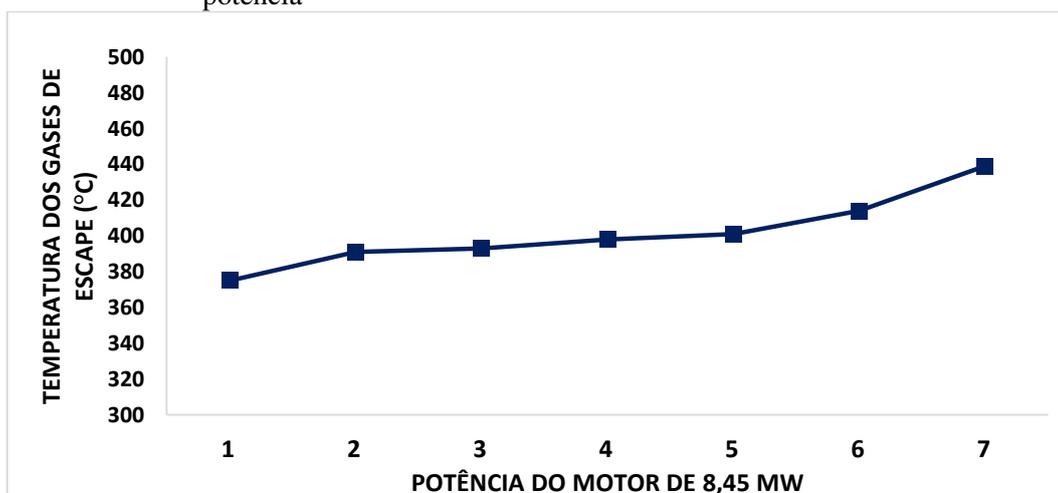


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

### c) Temperatura dos gases de escape medidos pela sonda do analisador

A temperatura dos gases de escape é de suma importância para visualizar e analisar o comportamento de outros parâmetros. Nota-se através da Figura 23 que ocorre um aumento de temperatura até a potência de 2 MW, em seguida ocorre uma queda na temperatura, o que repercute na redução das emissões dos poluentes primários. Neste aspecto, podemos observar que o motor entrou em equilíbrio e a temperatura dos gases de exaustão ficou em torno de 420 °C.

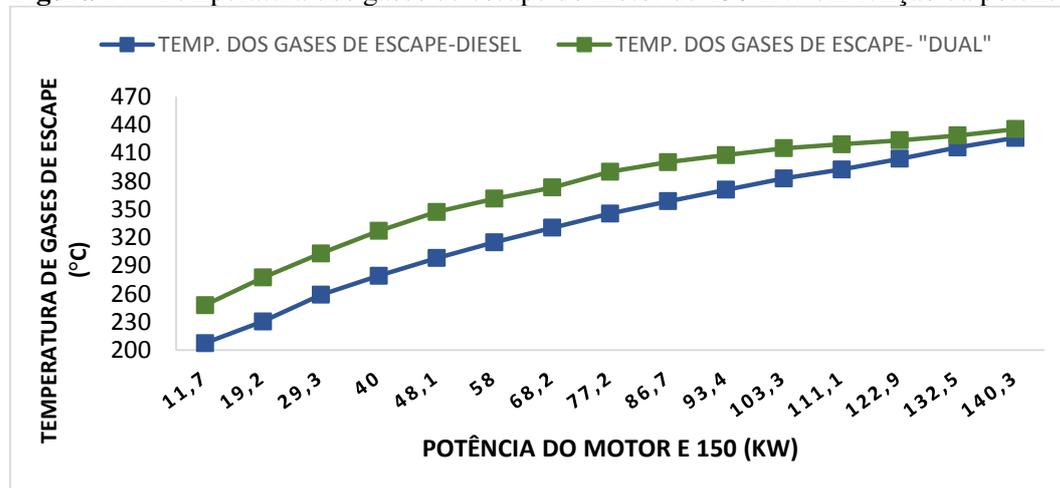
**Figura 23** - Temperatura dos gases de escape do motor de 8,45 MW em função da potência



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

No gráfico da Figura 24 pode-se perceber que as temperaturas inferiores a 500°C está de acordo com Braga et al (2006) quando se refere a uma taxa de substituição de aproximadamente 86%. Isto também e referenciado por Nwafor (2000) e comprovado por Costa (2007).

**Figura 24** - Temperatura dos gases de escape do motor de 150 KW em função da potência



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Ainda em relação ao gráfico da Figura 24, é notório a elevação da temperatura dos gases de exaustão com aumento da potência, independentemente da composição da mistura, em altas cargas pode-se perceber que a quantidade de energia dos gases de escape é praticamente a mesma, chegando a uma temperatura de 430°C à potência de 140 kW.

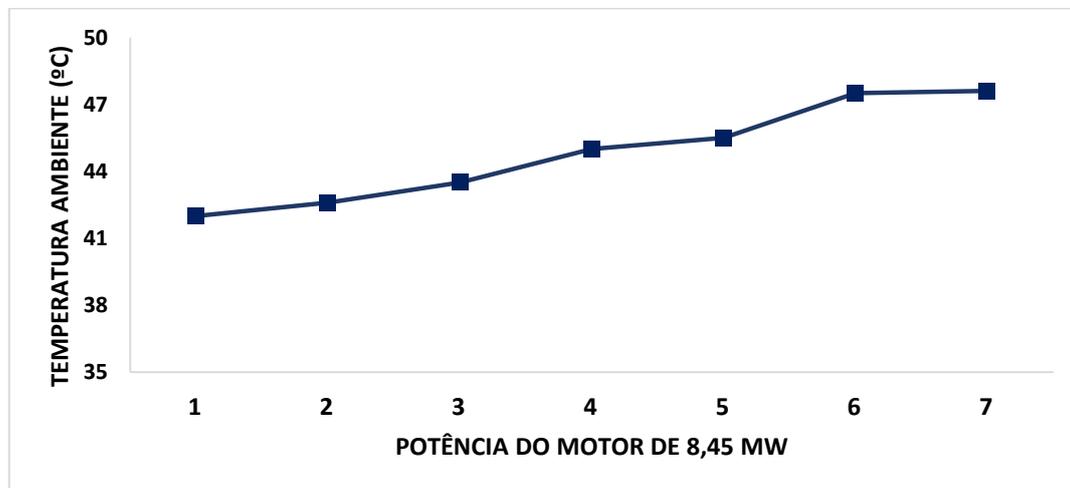
#### d) Temperatura ambiente da sala de máquinas

A importância de aferir a temperatura na sala de máquinas dos motores e de verificar a variação gradativamente com o clima, umidade e com o tempo de operação dos motores, o que torna difícil ter controle absoluto sobre este local para fins de comparação dos dias de realização dos ensaios. Em casos de estudos futuros, estes dados podem servir de parâmetro para Análises Exegéticas.

No gráfico da Figura 25, apresenta a elevação da temperatura ambiente com o aumento da potência, o que é esperado, uma vez que ocorre irradiação do calor do motor para a sala. Mesmo o ambiente, sala de máquinas, contendo ventiladores e exaustores não houve uma dissipação significativa do calor, isto pode devido as paredes da sala que são de material termo acústico, contribuindo para a elevação

gradual da temperatura do ambiente mediante aumento da potência. A elevação de temperatura na sala durante 1:30h de teste foi em média 5,6°C.

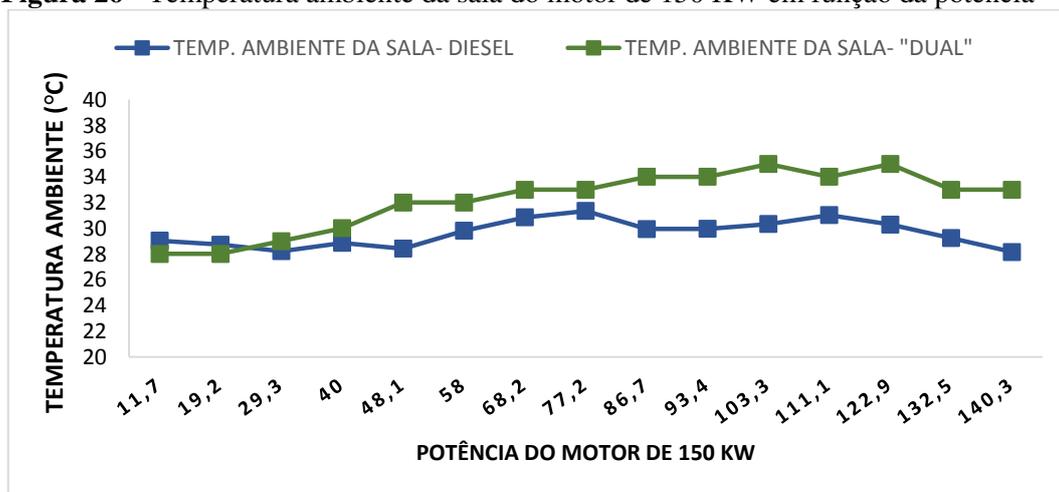
**Figura 25** - Temperatura ambiente da sala do motor de 8,45 MW em função da potência



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Através do gráfico da Figura 26 foi possível observar o comportamento da temperatura do ambiente da sala que opera apenas um motor de 150 KW referenciado por Costa (2007), as variações de temperatura podem ser ocasionadas pelo clima, umidade e tempo de operação do motor. A UTE possui 20 motores de 8,45 MW ligados em paralelo, dissipando energia e promovendo o aumento de calor, realizamos os testes em apenas 1 motor.

**Figura 26** - Temperatura ambiente da sala do motor de 150 KW em função da potência



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

#### 4.4 EXCESSO DE AR NOS MOTORES

Os motores diesel têm uma particularidade quando o elevado excesso de ar existe em baixas potências, ocorre a redução da temperatura da câmara de combustão, o que dificulta a formação de gases como NOx e diminui o rendimento térmico do motor.

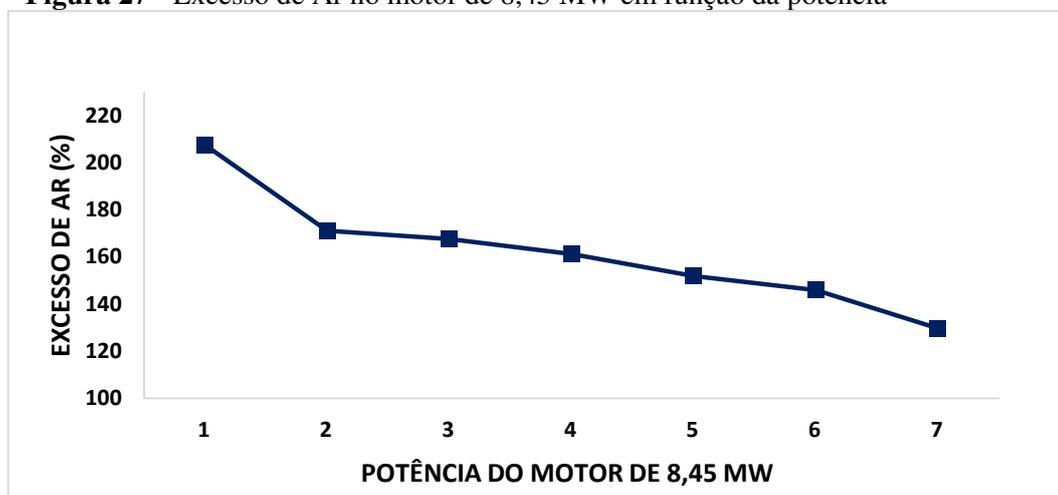
As Figuras 24 e 25 tiveram os dados fornecidos pelo analisador de gases de combustão fabricado por Kane International Limited, modelo *Kane 940*, este mesmo equipamento no seu manual informa a equação para o cálculo do Excesso de ar:

$$\text{Excesso de ar} = [(20,9/(20,9-\text{O}_2 \text{ medido em } \%) )-1] \times 100$$

**Fonte:** Manual do Usuário, 2016.

O gráfico da Figura 27 apresenta o comportamento do excesso de ar no motor de 8,45 MW variando com a potência. Na maior potência a falta de ar na mistura ar-combustível provoca a combustão incompleta, enquanto com grande excesso de ar na mistura ar-combustível nas menores potências tem-se uma combustão completa.

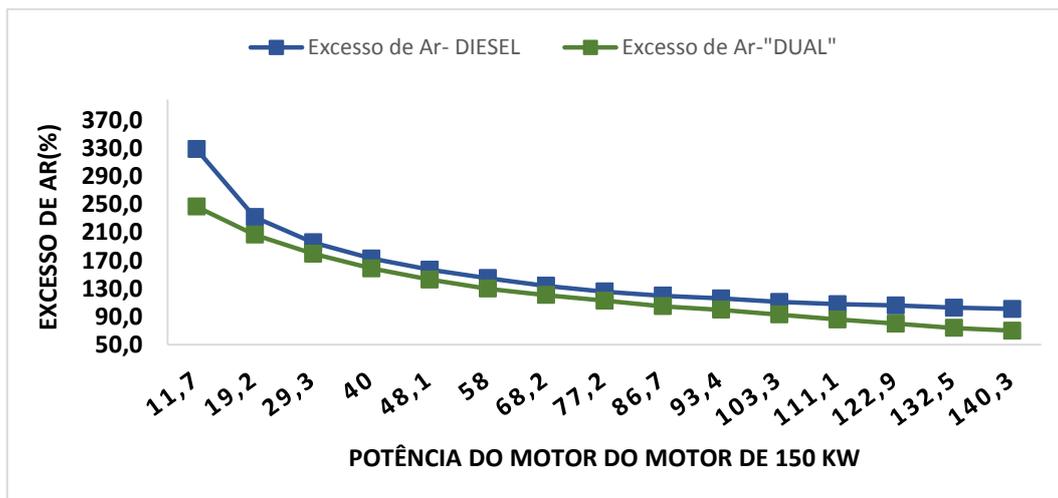
**Figura 27** - Excesso de Ar no motor de 8,45 MW em função da potência



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

No gráfico da Figura 27 temos o motor de 150 KW referente aos dados de Costa (2007) o comportamento da curva de excesso de ar pela potência no modo “dual” apresentou resultados de excesso de ar inferior ao do diesel comercial, este fato justifica a melhor eficiência de combustão do combustível diesel até a potência de 110KW conforme o gráfico da Figura 28.

**Figura 28** - Excesso de Ar no motor de 150 KW em função da potência



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

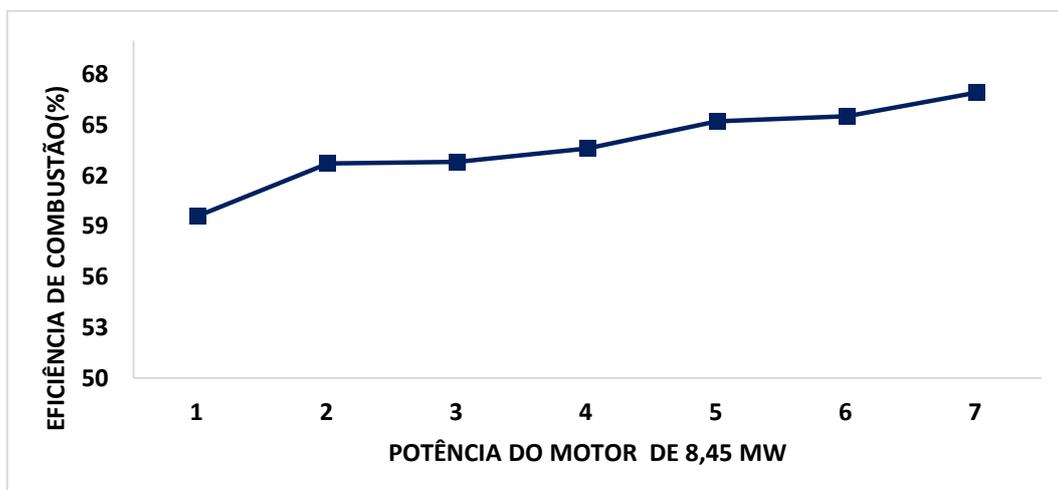
#### 4.5 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS MOTORES

##### a) Eficiência de combustão do motor

A eficiência de combustão mostrada nas Figuras 27 e 28 foi obtida através dos dados do analisador de gases.

No gráfico da Figura 29 verificou-se um crescimento pequeno da eficiência da combustão com aumento da potência, o que é referenciado na literatura. Os valores iniciais foram de 59% e finais de 66% para as potências de 1 a 7 MW.

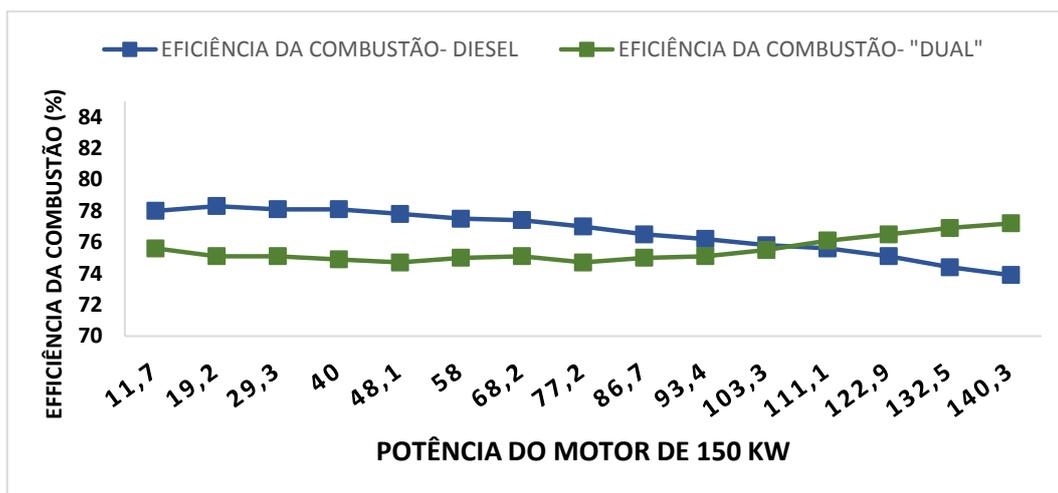
**Figura 29** - Eficiência da combustão do motor de 8,45 MW



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

O gráfico da Figura 30 mostra o motor de 150 KW referente aos estudos de Costa (2007) operando no modo diesel puro e “dual” (85% de taxa de substituição diesel por gás natural) conseguiu valores de eficiência da combustão variando de 76 a 77% aproximadamente. Em elevadas potências o modo dual sobressai na eficácia de combustão diante do modo diesel.

**Figura 30** - Eficiência da combustão do motor de 150 KW



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

### b) Eficiência de energética do motor

A eficiência energética pode ser definida como um índice ou percentual de aproveitamento da energia inserida no motor, ou seja, quanto da energia de entrada é convertida em trabalho útil na forma de potência, e neste caso, em potência elétrica Heywood (1988).

$$\eta = \frac{3600}{C_e * C} * 100$$

**Onde:**

$\eta$  = eficiência energética (%);

$C_e$  = consumo específico (g/kWh);

$C$  = poder calorífico inferior do combustível (MJ/kg).

Os dados para cálculos da eficiência energética foram utilizados para o consumo específico de combustível de acordo com a Tabela 4.1 e para o poder calorífico inferior - PCI está na Tabela 10.

De posse destes dados confeccionou a Tabela 10 com os valores para eficiência energética do motor de 8,45 MW.

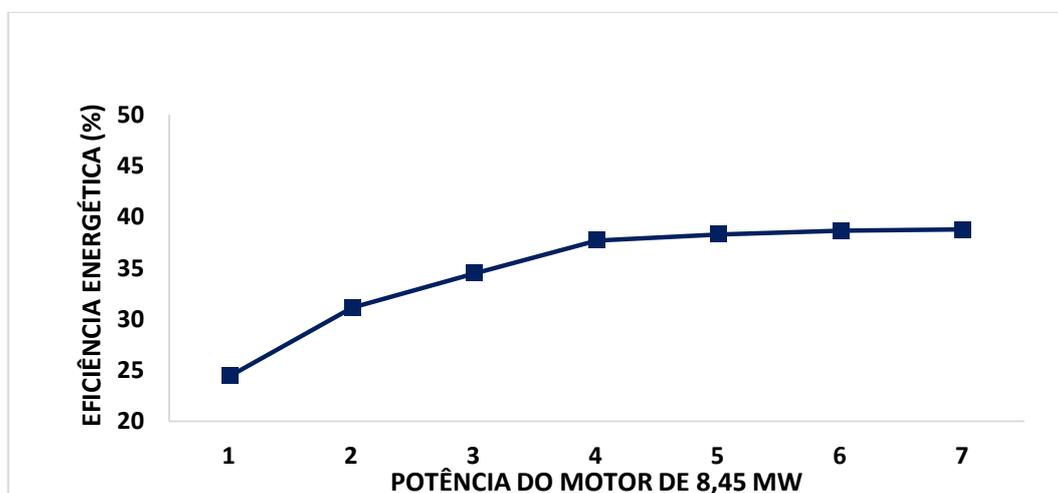
**Tabela 10** - Cálculo da Eficiência energética do motor de 8.45 MW

POTÊNCIA	MASSA DE DIESEL PURO	PCI DIESEL	$R = \frac{Potência}{\left(\frac{massa\ combustivel}{3600}\right)}$	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
MW	Kg/h	(Kj/Kg)		$\eta = \frac{R}{PCI} * 100$ (%)
1	336	43802,721	10714,3	24,46
2	528	43802,721	13636,4	31,13
3	715	43802,721	15104,9	34,48
4	872	43802,721	16513,8	37,70
5	1073	43802,721	16775,4	38,30
6	1275	43802,721	16941,2	38,68
7	1483	43802,721	16992,6	38,79

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

No gráfico da Figura 31 verifica-se que a eficiência energética do motor de 8,45 MW operando no modo diesel aumenta com a elevação da potência, partindo de 24,5 % nas potências inferiores e chegando a 38,79% na última potência de 7MW.

**Figura 31** - Eficiência Energética do motor de 8,45 MW

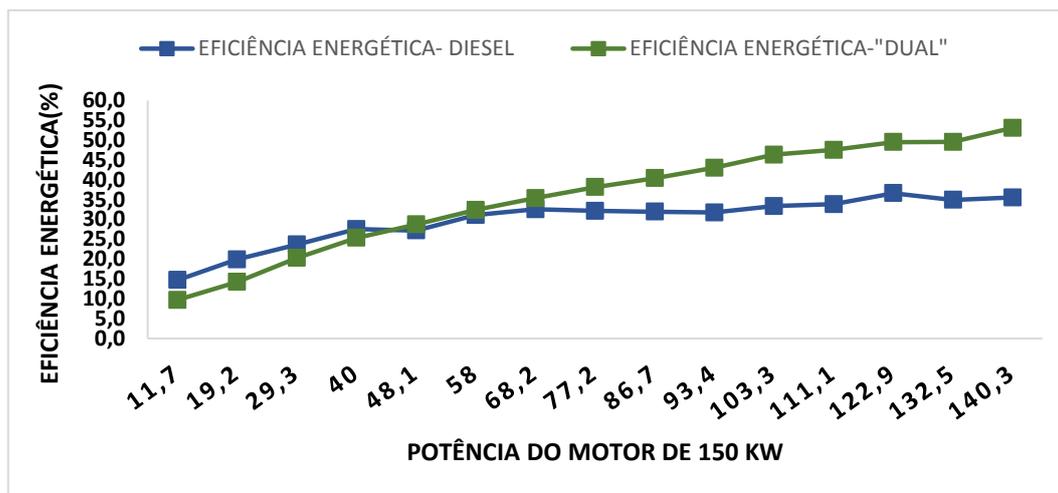


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

Na Figura 32 o motor de 150 KW operando com óleo diesel teve valores de rendimento entre 30 % a 35%. Quando o motor de 150 KW é alimentado pela mistura de gás/diesel, nota-se um aumento no rendimento do motor, nas cargas 70 kW a 140 kW, obtendo valores máximos de 53%. Tal fato comprova a boa performance do modo dual pelo alto nível de homogeneização da mistura diesel gás.

Importante afirmar, que para comparativos de eficiência energética entre o motor de 8,45 MW e o motor de 150 KW não houve realização de testes com o motor de 8,45 MW utilizando gás natural no modo dual. O que podemos visualizar através dos gráficos é uma tendência de comportamento similar das eficiências para os dois tipos de motores, neste caso operando com diesel puro e através disso observar estes indícios como possibilidade de ocorrência.

**Figura 32** - Eficiência Energética do motor de 150 KW



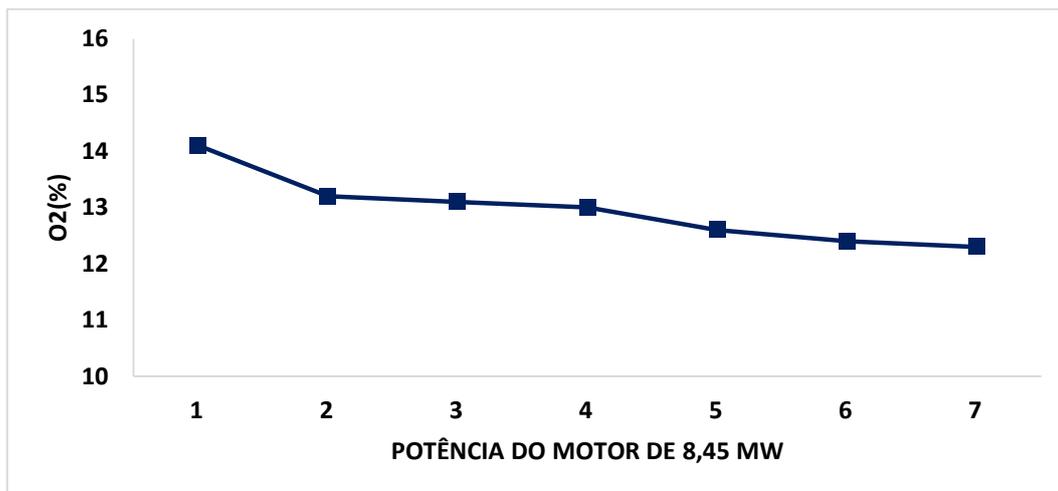
**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

#### 4.6 ANÁLISE DAS EMISSÕES DO MOTOR APÓS A COMBUSTÃO

##### a) Emissão de O<sub>2</sub>

Embora não seja poluente, conhecer a concentração de oxigênio no gás de escape é uma ferramenta importante para avaliar parâmetros da combustão do motor. Relatos de alguns pesquisadores informam que a concentração de oxigênio no combustível favorece o aumento das emissões do NO<sub>x</sub>, mas por outro lado contribui para que o processo de combustão seja mais completo e tenha como consequência a redução das emissões de CO.

Através do gráfico da Figura 33 pode-se observar o comportamento das emissões de O<sub>2</sub> pelo motor de 8,45 MW, pode-se verificar que o comportamento das emissões está em uniformidade entre 14% a 12% para variação de menor para maior potência.

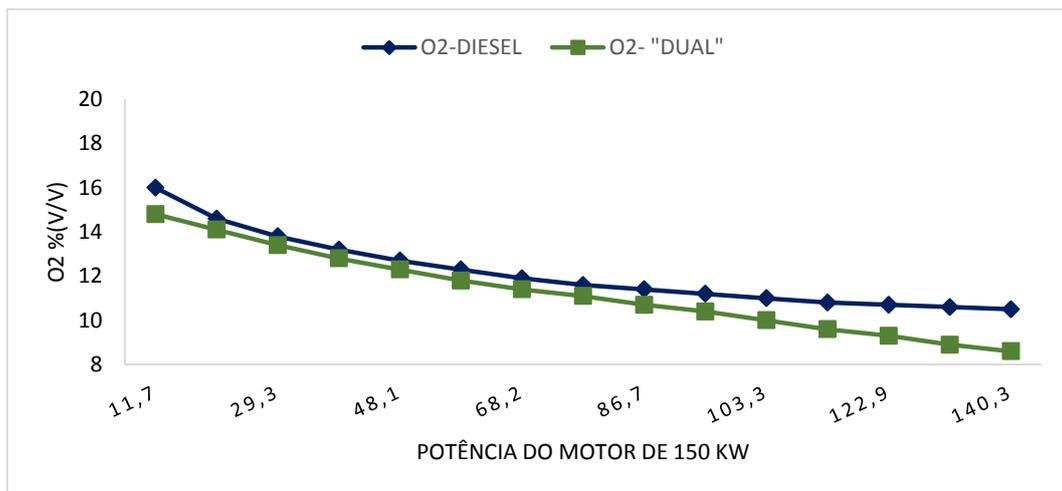
**Figura 33** - Emissão de O<sub>2</sub> do motor de 8,45 MW

**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

A quantidade de O<sub>2</sub> presente diminui na medida do aumento da potência, fato este já esperado, pois se tratando de um motor do ciclo Diesel a entrada de ar não possui nenhuma regulação ou restrição em sua passagem, sendo a potência ou a rotação do motor controlada através da dosagem de combustível fornecido ao motor.

Com o aumento da potência gerado pelo aumento do combustível fornecido, necessita-se de mais O<sub>2</sub> para a combustão, o que naturalmente irá gerar uma diminuição do O<sub>2</sub> presente no escapamento do motor (CARVALHO, 2014).

Os gráficos da Figura 34 mostra o comportamento das emissões de O<sub>2</sub> pelo motor de 150 KW. No modo diesel constata-se a semelhança de comportamento com o motor de 8,45 MW partindo de valores 16% a 10% para elevação da potência, já para o modo dual a demanda de emissão de O<sub>2</sub> está associada a aspiração conjunto do ar com o “gás” simultaneamente para promover a combustão e com a redução do excesso de ar pelo aumento da carga ocorre paralelamente a redução do O<sub>2</sub> nos gases de escape obtendo valores 14,8% a 8,6% para elevação da potência.

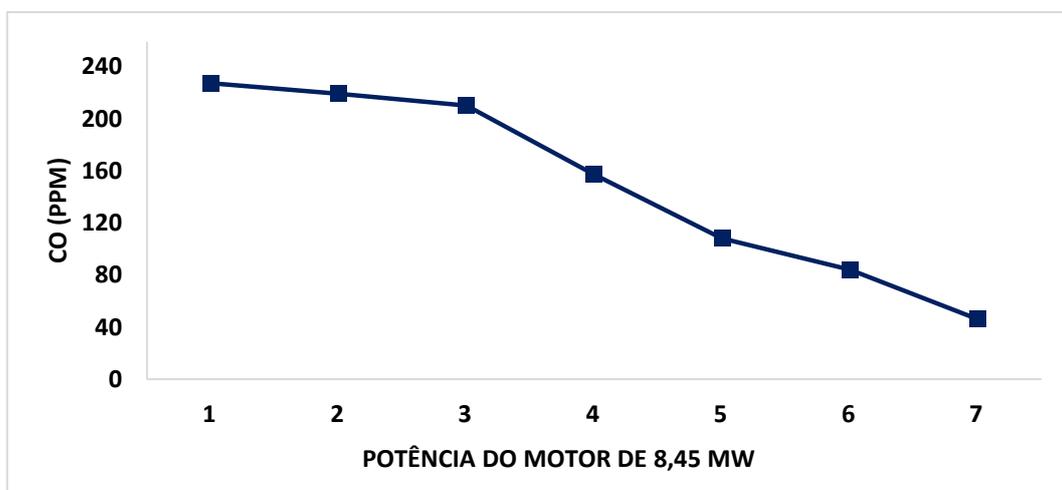
**Figura 34** - Emissão de O<sub>2</sub> do motor de 150 KW

**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

### b) Emissão de CO

O monóxido de carbono (CO) é proveniente de uma combustão incompleta do combustível. Quando a combustão é completa, o CO é convertido em CO<sub>2</sub>. Mistura rica, com menor quantidade de ar que a desejada na mistura ar/combustível contribui para que isso aconteça (NABI et al., 2006).

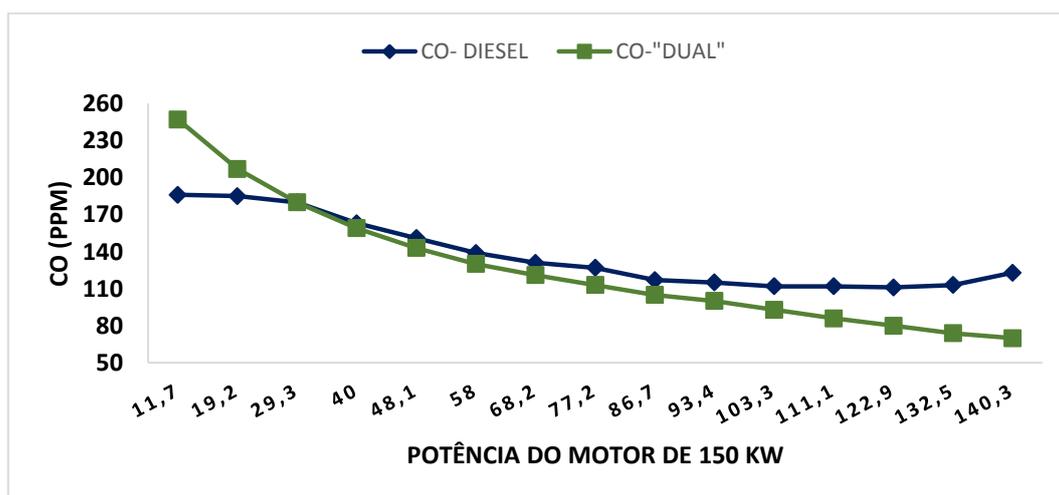
Pode-se verificar no gráfico da Figura 35 que as emissões de CO em função da potência no motor de 8,45 MW ocorrem uma redução, isto pode ser devido a qualidade do combustível que desta forma promove a conversão da etapa de combustão completa quando CO é convertido para CO<sub>2</sub>.

**Figura 35** - Emissão de CO em função da potência do motor de 8,45 MW

**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Nas emissões de CO tanto para os gráficos da Figura 35 que descreve o comportamento do motor de 8,45 MW quanto para os gráficos da Figura 36 que apresenta o comportamento do motor de 150 KW é claro a semelhança de resultados no que tange ao decréscimo de emissões referentes a combustão completa e fornecimento do aumento da conversão de CO em CO<sub>2</sub> para alta potência.

**Figura 36** - Emissão de CO em função da potência no motor de 150 KW

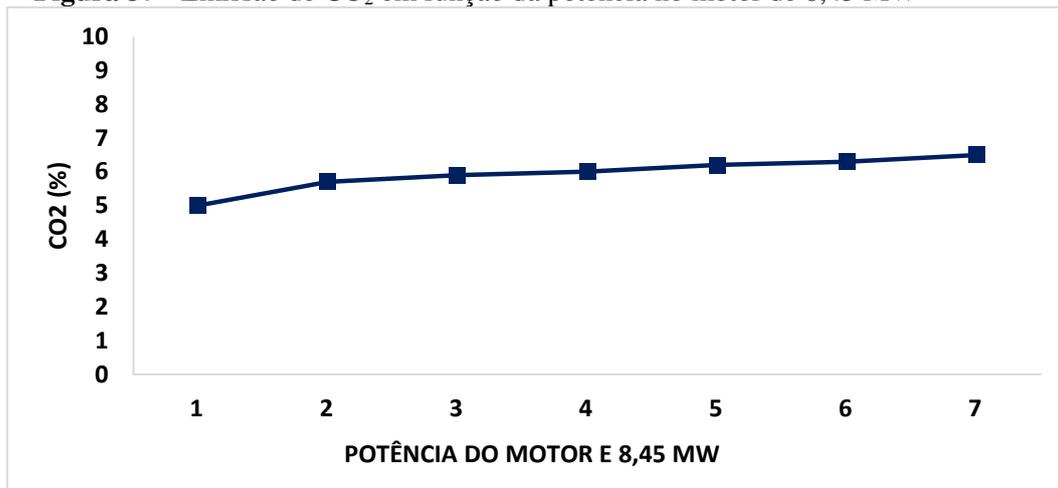


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

### c) Emissão de CO<sub>2</sub>

Verifica-se nas emissões de CO<sub>2</sub> apresentadas na Figura 37 do motor de 8,45 MW, ocorre uma tendência diretamente proporcional, com elevação das emissões deste incide com aumento da potência, o que justifica uma melhor eficiência e mais perfeita combustão pelo motor, os valores em baixas potências foi de 5%, chegando a 6,5% nas potências mais altas.

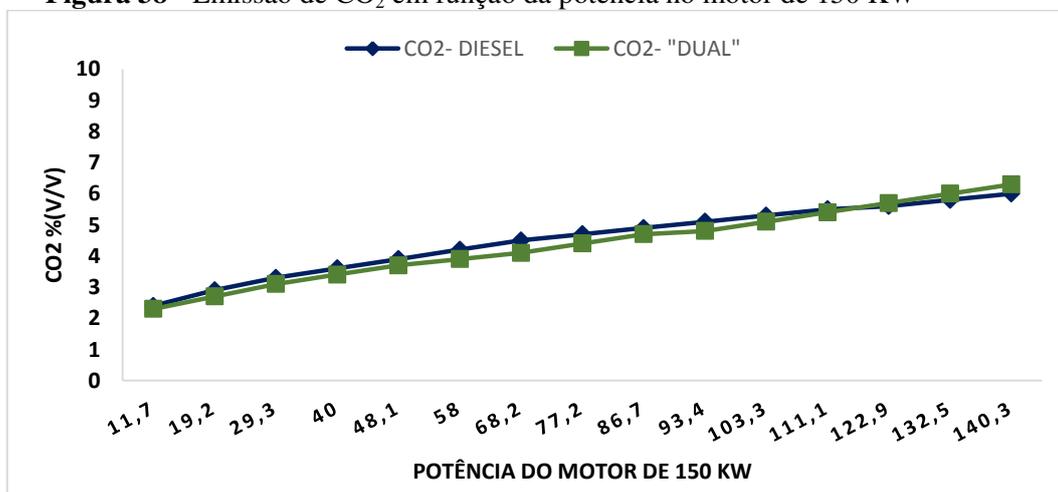
**Figura 37** - Emissão de CO<sub>2</sub> em função da potência no motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Na Figura 38 com base nos dados do motor de 150 KW pelos estudos de Costa (2007) as emissões de CO<sub>2</sub> comprova que os valores obtidos no motor de 8,45 MW para emissões de CO<sub>2</sub> estão equiparados e dentro da mesma faixa percentual, tanto para o modo dual como para o modo diesel, tendo comportamento semelhante: linear e crescente, evidencia de combustão completa.

**Figura 38** - Emissão de CO<sub>2</sub> em função da potência no motor de 150 KW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

As emissões de CO<sub>2</sub> aumentam com a elevação da potência, resultado natural da queima de maior quantidade de combustível, de onde se extrai maior energia para produção da potência necessária.

#### d) Emissão de NO

No gráfico da Figura 38, observa-se que ocorreu inicialmente um aumento dos níveis emissões de NO com o aumento da potência, isso acontece devido a este composto ser formado dependendo da temperatura na câmara de combustão.

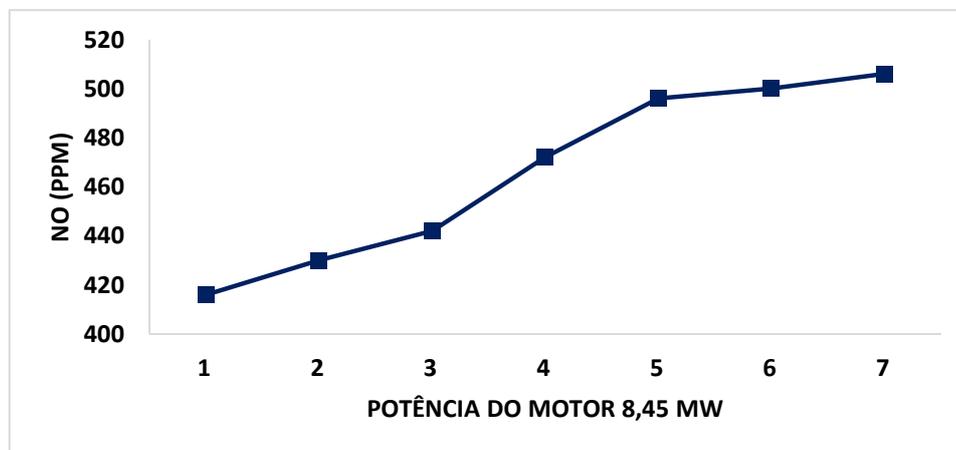
A maior proporção de emissões de compostos nitrogenados está na formação de NO, pois este desdobra para cálculos de NOx e NO<sub>2</sub> e ambos têm comportamento semelhantes de acordo com os gráficos apresentados a seguir.

A formação de monóxido de nitrogênio (NO) pode se dar a partir da temperatura, neste caso seria o nitrogênio térmico, onde a partir do nitrogênio (N<sub>2</sub>) e do oxigênio (O<sub>2</sub>) presentes na atmosfera dar-se a formação do NO. Outra forma de ocorrência do monóxido de nitrogênio (NO) seria pela quantidade de nitrogênio ou compostos nitrogenados presente no combustível e em reação com oxigênio (O<sub>2</sub>) da atmosfera resulta na formação do NO (GARCIA,2013).

Quando a potência do motor é relativamente alta ocorre pico de pressão no interior da câmara de combustão e o NO formado na combustão pode facilmente combinar-se com o oxigênio na atmosfera formando o NO<sub>2</sub>.

Através do gráfico da Figura 39 pode-se analisar o comportamento das emissões de NO do motor de 8,45 MW e pode-se verificar a formação de uma curva crescente obtendo valor de 416 a 506 ppm partindo da menor para maior potência, isto ocorre devido à combinação de alta pressão e maior carga do motor com a elevação da temperatura e, conseqüentemente, acréscimo nas emissões de óxidos de nitrogênio.

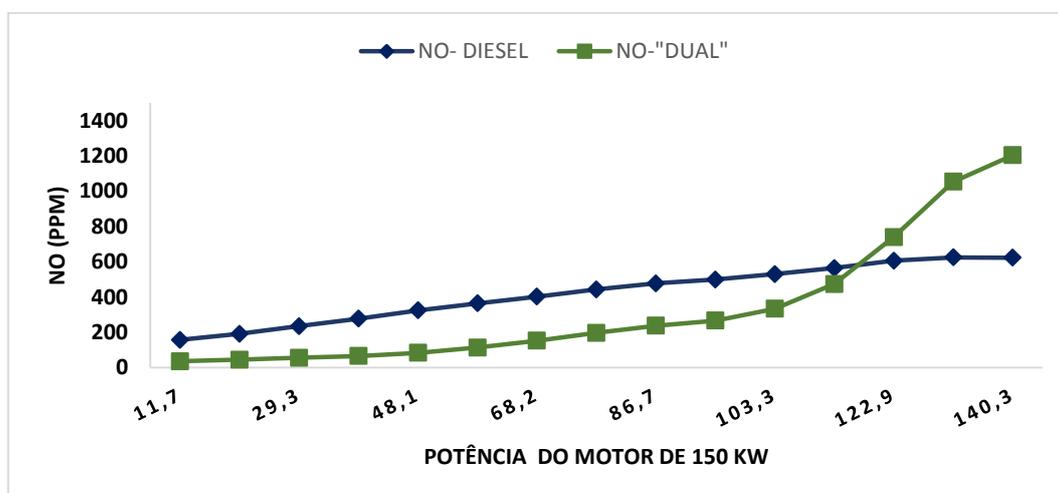
**Figura 39** - Emissão de NO em função da potência no motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Pela Figura 40 pode-se verificar o comportamento do motor de 150 KW. Quando o motor opera no modo diesel os valores das emissões de NO são superiores ao modo dual. Porém, após a potência de 110 KW ocasionado com elevação da temperatura da câmara de combustão, as emissões do modo dual sobressaem ao modo diesel. Isto é devido ao combustível no modo dual ser praticamente Metano, que tem uma cinética de reação muito rápida, favorecendo a maior elevação de temperatura da câmara de combustão e maior formação de NO.

**Figura 40** - Emissão de NO em função da potência no motor de 150 KW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Logo, podemos observar nas Figuras 39 e 40 que o comportamento das emissões do motor de 8,45 MW é semelhante ao motor de 150 KW no modo diesel.

#### e) Emissão de NOx

O NOx é formado pela soma do óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). É um processo de formação complexa que é afetada por diferentes características do motor de combustão interna, tais como: projeto da câmara de combustão e sistema de alimentação de combustível e de ar (SUN, 2010).

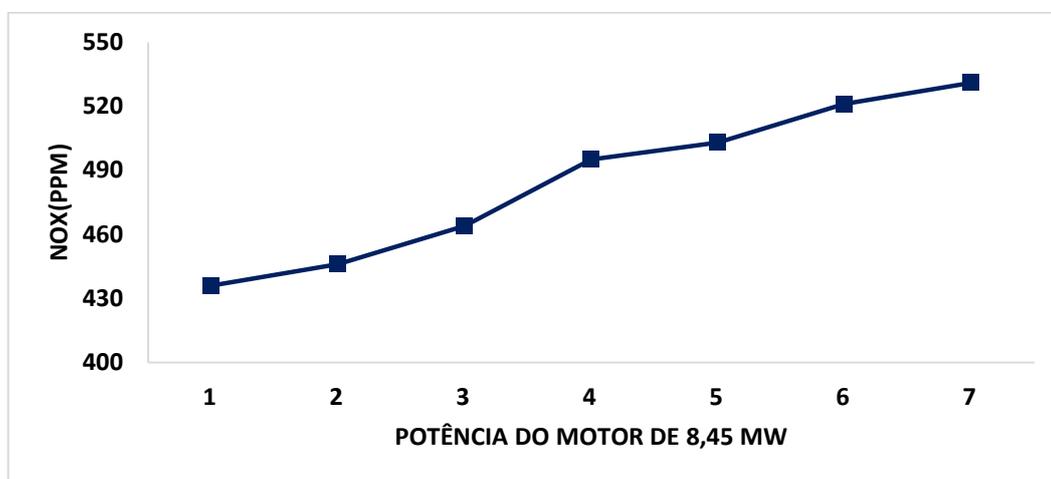
De acordo com Hazar (2009), a formação de NOx nos motores de combustão interna, geralmente acontece a altas temperaturas. Os fatores que contribuem para que isto ocorra são: presença de O<sub>2</sub>, tempo de exposição, rotação do motor, conteúdo, homogeneidade do combustível, da densidade da mistura na câmara de combustão,

mas principalmente da temperatura esta dentre todos os fatores e a que mais contribui para facilitar e acelerar a reação entre o oxigênio e o nitrogênio.

A Figura 41 ilustra o comportamento das emissões de NOx do motor de 8,45 MW, pode-se verificar a formação de uma curva linear e crescente obtendo valor a partir de 436 a 546,8 ppm, com da menor para maior potência.

Isto é comprovado pela literatura, pois a queima de combustíveis no motor diesel, a temperatura na câmara de combustão é muito elevada, fornece a energia necessária para que ocorra a formação dos óxidos de nitrogênio de forma eficiente, para a reação, mas não recomendável para o meio ambiente.

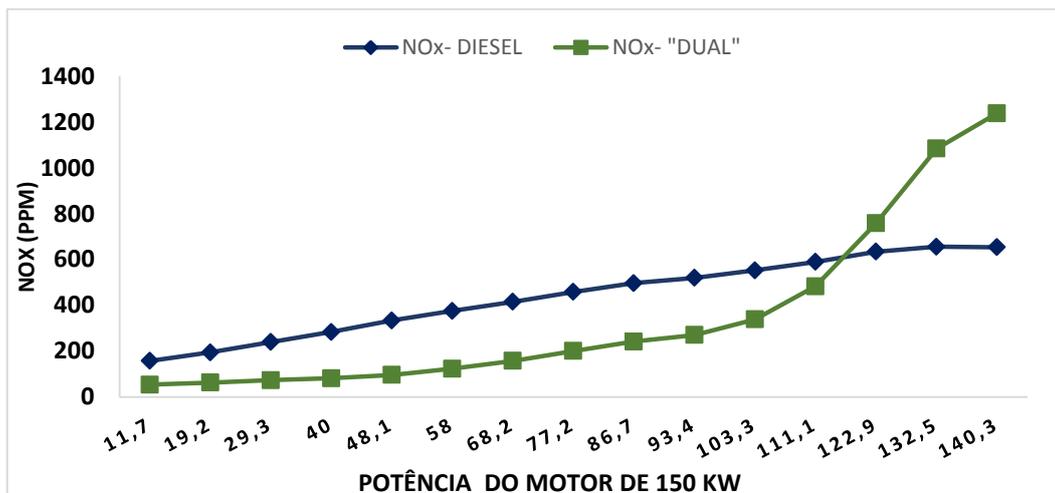
**Figura 41** - Emissão de NOx em função da potência no motor de 8,45 MW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

Através da Figura 42 ilustramos o comportamento das emissões de NOx do motor de 150 KW, o que apresenta comportamento similar no modo diesel do motor de 8,45 MW, porém, devido elevação da temperatura do ar e das condições do combustível as emissões são mais elevadas no modo dual.

**Figura 42** - Emissão de NOx em função da potência no motor de 150 KW



**Fonte:** Elaborado pelo Autor, 2015.

#### f) Emissão de SO<sub>2</sub>

Estes gases são formados pela reação do enxofre existente no combustível. A concentração resultante de compostos de enxofre nos produtos de combustão é função do percentual de enxofre contido no combustível e da razão ar-combustível.

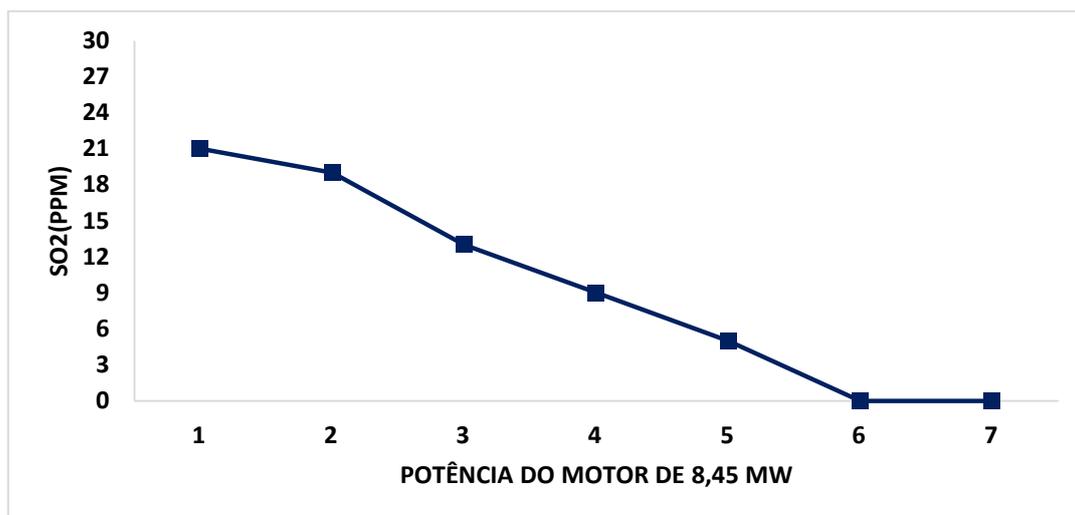
Segundo Tulcan (2009), no processo de combustão nos motores diesel, a produção de SO<sub>2</sub> é causada pela oxidação do enxofre presente no combustível.

A Figura 43 ilustra o comportamento das emissões de SO<sub>2</sub> pelo motor de 8,45 MW a formação do SO<sub>2</sub> está associada a qualidade do combustível utilizado.

O enxofre (S) é uma impureza presente na composição do combustível de origem fóssil, como o óleo diesel que é extraído do petróleo. A necessidade da presença deste composto no combustível embora que poluente é devido a sua viscosidade.

Podemos ressaltar que o controle deste composto vem sendo realizado pelas refinarias o que nos deixa mais tranquilos e em condições seguras de utilizar um combustível com boa qualidade.

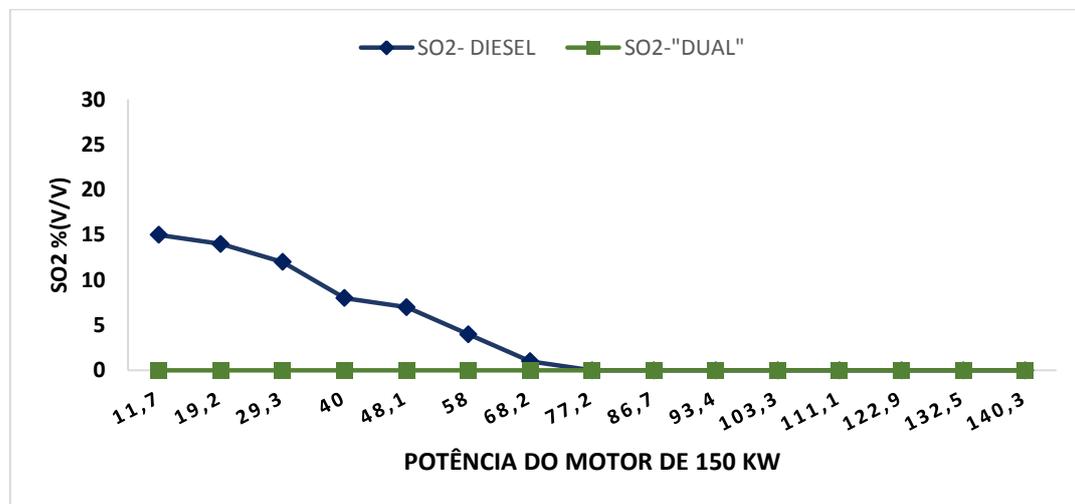
**Figura 43** - Emissão de SO<sub>2</sub> em função da potência no motor de 8,45 MW



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

Na Figura 44 foi possível observar que os valores iniciais são insignificantes para emissões encontradas nos experimentos com motor operando com diesel comercial evidenciados na Tese de Costa (2007).

**Figura 44** - Emissão de SO<sub>2</sub> em função da potência no motor de 150 KW



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2015.

Ainda na Figura 44 não houve captação de emissões de SO<sub>2</sub> no motor de 150 KW operando em modo dual. O que pode ter ocorrido, devido à elevação da potência a formação do composto SO<sub>2</sub> para SO<sub>3</sub>, como o equipamento de análise de gases não possuía o sensor para leitura deste composto, não foi detectado. Além disso, sabe-se que por motivos de segurança são adicionados **Mercaptanas** (material a base de composto de enxofre), mas os percentuais são muito pequenos em relação a

quantidade do combustível, o gás natural. Esta adição ocorrer para efeito de detecção do combustível em caso de vazamentos.

Neste trabalho não foram detectadas as emissões de:

- a) HC e MP - devido ao equipamento analisador de gases não possuir o elemento de detecção deste composto.

## 5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir a partir dos resultados obtidos no motor de 8,45 MW em comparativo com ao motor de 150 KW referenciado na Tese de Costa (2007):

- a) Os valores encontrados durante os testes no motor de 8,45 MW constatou que a elevação do consumo mássico do diesel para condições de aumento da potência do motor se apresenta de acordo com a literatura e com o apresentado no motor de 150 KW.
- b) A eficiência da combustão pelo motor modo diesel de 8,45 MW obteve valores de 65% na maior potência de 7 MW. No motor de 150 KW para a potência acima 140 kW, a eficiência da combustão do motor operando no modo dual obteve valores de 77% superiores ao modo diesel que obteve 74%.
- c) A eficiência energética do motor de 8,45 MW alcançou valores máximos de 38,79% na maior potência de 7 MW. No motor de 150 KW apresentou valores máximos operando no modo dual de 53 % para cargas na faixa de 70 kW a 140 kW em relação ao modo diesel que obteve 35% de rendimento.
- d) A medição do O<sub>2</sub> no escapamento dos motores serviu como referência para os compostos formados na combustão. Houve a redução de emissão do O<sub>2</sub> com aumento da potência tanto para o motor e 8,45MW como de 150 KW.
- e) Em decorrência ao aumento da carga aplicada houve a elevação do consumo de combustível, isto contribuiu para o motor trabalha com uma mistura rica aumento a temperatura da câmara de combustão o que favorece a produção de NO<sub>x</sub>.
- f) As emissões insignificantes de SO<sub>2</sub> do motor de 8,45 MW e o de 150KW confirmam o que relata a literatura que no Brasil o controle deste composto vem sendo realizado nas refinarias.

Logo, verificamos que há uma tendência com base neste estudo comparativo do motor de 8,45 MW de potência com o motor de 150 KW referenciado na Tese de Costa (2007) da viabilidade técnica de utilizar o motor diesel operando no modo dual para geração termelétrica dentro da faixa de substituição satisfatória para diesel por gás natural.

## 5. 1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a exergia do motor de 8,45 MW de potência e comparar esses dados com os valores para exergia obtidos no motor de 150 KW de acordo com a Tese de Costa (2007).
- Comparar o motor de 8,45 MW operando em modo diesel e dual em relação ao motor de 150 KW de acordo com a Tese de Costa (2007) afim de obter resposta satisfatória para a sugestão da elevada taxa de substituição em percentual do combustível diesel por gás natural para operação do motor.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Gás Natural**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 20 out. 2015.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). Relatório 2014. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.aspx?anoColeta=2014&anoFimColeta=2013>>. Acesso em: 10 out. 2015.

**BANCO DE INFORMAÇÃO DE GERAÇÃO DA ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 21 dez. 2015.

BIZZO, Waldir A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. São Paulo: Faculdade de Engenharia Mecânica UNICAMP, 2003. (Apostila do Curso).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, MME, EPE, 2007.

\_\_\_\_\_. Congresso Nacional. **Emendas**. Disponível em: <<http://www.senado.leg.br/atividade/materia/getPDF.asp?t=151885&tp=1>> Acesso em: 21 dez. 2015.

BRUNETTI, FRANCO. **Motores de Combustão Interna**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2012.

CARVALHO, Emanuel da Silva. **Reuso do Mesocarpo de Coco na Remoção de Contaminantes Derivados de Petróleo Presentes em Corpos d'água, Utilizando Sistema de Adsorção em Leito Diferencial**. 2014. 97f. Monografia (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2014.

ÇENGEL, Ynus A., BOLES, Michael. A. **Termodinâmica**. 7 ed. Rio de Janeiro: MCGraW-Hill Interamericana, 2013.

CLUBE DO DIESEL. **O Sistema SCR**. Disponível em: <<http://www.clubedodiesel.com.br/?cat=4>> Acesso em: 10 out. 2015.

COSTA, Y, J, R. **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. 2007. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA. **Motores**. Disponível em: <<http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/motores.php>> Acesso em: 10 out. 2015.

DEMIRBAS, A. **Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines**. Londres: Springer-Verlag, 2008.

**ECOD. Setor elétrico dos EUA terá que diminuir emissões de CO2 em 32% até 2030, anuncia Obama.** Disponível em: <<http://www.ecodesenvolvimento.org/posts/2015/agosto/setor-eletrico-dos-eua-teraque-diminuir-emissoes>> Acesso em: 10 out. 2015.

**ENERGIA ELÉTRICA. Saiba o que é Fontes de Energia Elétrica, Produção, Usinas Hidrelétricas, Transmissão.** 2015. Disponível em: <[http://www.suapesquisa.com/o\\_que\\_e/energia\\_eletrica.htm](http://www.suapesquisa.com/o_que_e/energia_eletrica.htm)> Acesso em: 10 out. 2015.

**ESTADÃO. Sustentabilidade.** Disponível em: <<http://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,brasil-e-o-setimo-maior-investidor-em-energia-renovavel-diz-estudo,1661745>> 16 jan. 2016.

**GALLO, W.L.R. Análise Exergética de Motores a Gasolina e a Álcool.** 1990. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas - São Paulo, 1990.

**GARCIA, R. Combustíveis e Combustão Industrial.** 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

**GERAÇÃO TERMELÉTRICA: planejamento, projetos e operação/** Electo Eduardo Silva Lora, Marco Antônio Rosa do Nascimento (coordenadores) - Rio de Janeiro: Interciência, 2004, 2 volumes.

**GIACOSA, D. Motores Endotérmicos.** Porto Alegre: Dossat, S. A., 1964.

**GUEVARA, Arnaldo José de Hoyos; LEITE, Ana Carolina Gomes Moreira. A Sustentabilidade Empresarial, Social e as Fontes de Energias.** Universidade Católica de São Paulo, 2013. (Boletim).

**GUIMARÃES, André L. Ciclo Otto.** Disponível em: <<http://www.alguimaraes.com.br/>> Acesso em: 10 out. 2015.

**HAZAR, H. Effects of biodiesel on a low heat loss diesel engine. Renewable Energy.** v. 34, n.6, p.1533-1537, 2009.

**HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill International,** 1988.

**KNOTHE, G. H. Analyzing biodiesel: Standards and other methods. Journal of the American Oil Chemists' Society.** v.83, n.10, p.823-833, 2006.

**MANUAL DO USUÁRIO. Analisador de Combustão Portátil Kane 940.** 2006. Disponível em: <[http://instrutemp.provisorio.ws/2010\\_09/kane%20940.pdf](http://instrutemp.provisorio.ws/2010_09/kane%20940.pdf)> Acesso em: 23 ago. 2015.

**MAQUINAS TÉRMICA. Apostila de motores de combustão interna.** 1998. Disponível em:

<[http://mecanica.scire.coppe.ufrj.br/utl/b2evolution/media/silvio/apmotoresMCI05\\_01.pdf](http://mecanica.scire.coppe.ufrj.br/utl/b2evolution/media/silvio/apmotoresMCI05_01.pdf)> Acesso em: 29 dez. 2015.

MARTINELLI JUNIOR; L. C. **Motores de Combustão Interna: conceitos básicos.** Panambi, RS: Editora da Unijuí, 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Qualidade do Ar.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua/agua-doce/sistema-de-dessanizacao/itemlist/category/63-qualidade-do-ar> > Acesso em: 20 out. 2015.

MORAN, M.; SHAPIRO, H.; BOETTNER, D.; BAILY, M. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** 7. ed. LTC Editora, 2013.

MOURA, Gisele. **EUA Pretendem Reduzir as Emissões de CO2 no Setor Energético.** Disponível em: <<https://www.greenme.com.br/informar-se/ambiente/450-eua-pretende-reduzir-30-das-emissoes-de-co2-do-setor-energetico>> Acesso em: 20 out. 2015.

NABI, Md. N., et al. Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends. **Bioresource Technology.** v.97, n.3, 372–378, 2006.

NWAFOR, O. M. I.; RICE, G. Combustion characteristics and performance of natural gas in high speed indirect injection diesel engine; **Renewable Energy**, v. 5, Part II, p. 841 - 848, 1994.

OBERT, E. F. **Motores de Combustão Interna.** Porto Alegre: Editora Globo, 1971.

OLIVEIRA, F. B.; VANDRESEN, M.; E PEREIRA, M.; **Desenvolvimento de Kit para Conversão de Motores Diesel Estacionários de Geradores para Operar com Mistura Diesel-Gás Natural.** Florianópolis: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IF-SC, 2007.

SANTOS, N. O. **Termodinâmica Aplicada às Termelétricas.** 2ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM, RURAL. **Tratores Agrícolas: manutenção de tratores agrícolas.** 2 ed. Brasília: SENAR, 2010.

SILVA, D. V. S. **Monitoramento dos Parâmetros Físico-Químicos da Unidade de Tratamento de Água para Geração de Vapor na Usina Termelétrica de Campina Grande.** 2012. 108f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Química) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2012.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C. **Fundamentos do Refino de Petróleo: tecnologia e economia.** 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

SONNTAG, R.E, & BORGANAKKE, C. **Introdução a Termodinâmica para a Engenharia.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

STATION MANUAL. **Wärtsiläfinland Oy**. Campina Grande: Plant Operation, 2008.

SUN, J., Caton, J.A., Jacobs, T.J. **Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines**. Progress in Energy and Combustion Science. v. 36, p. 677 - 695, 2010.

TEVISA. **Motores**. Disponível em: <<http://www.tevisa.com.br/>> 16 jan. 2016.

TULCAN, O. E. P. **Estudo do Desempenho do Grupo Motor-Gerador Alimentado com Diferentes Misturas Diesel-Biocombustíveis e Avaliação de Emissões**. 2009. 185f. Tese (Livre Docência) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2009.

# APÊNDICES

**APÊNDICE A: MÉDIAS DAS LEITURAS DOS TESTES EXPERIMENTAIS - MOTOR DE 8,45 MW OPERANDO COM DIESEL**

POTÊNCIA	CONSUMO DE DIESEL	EXCESSO DE AR	EFICIENCIA ENERGETICA	EFICIENCIA DE COMBUSTÃO	TEMP. ÁGUA ENTRADA	TEMP. ÁGUA SAIDA	TEMP. ÓLEO LUBRIFICANTE ENTRADA	TEMP.ÓLEO LUBRIFICANTE SAÍDA	TEMP. ÓLEO DIESEL	TEMP. AR AMBIENTE	TEMP.GASES DE ESCAPE
MW	(kg/h)	(%)	(%)	(%)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1	336	207,3	24,46	59,6	79,4	82,9	58,7	71,9	32,9	42	375
2	528	171	31,13	62,7	81,1	84,1	58,9	71,3	32,4	42,6	391
3	715	167,5	34,48	62,8	86,1	90,1	59,4	72,4	33,2	43,5	393
4	872	161,2	37,7	63,6	84,8	89,2	59,9	73,8	34,4	45	398
5	1073	151,8	38,3	65,2	91,6	95,2	59,9	73,8	34,4	45,5	401
6	1275	145,8	38,68	65,5	91,4	97,6	60,2	75	37,2	47,5	414
7	1483	129,6	38,79	66,9	91,6	97,1	61	76,5	39,2	47,6	439

**APÊNDICE B: MÉDIAS DAS LEITURAS DOS GASES DE EXAUSTÃO DO MOTOR 8,45 MW OPERANDO COM DIESEL  
DURANTE OS TESTES EXPERIMENTAIS**

<b>POTÊNCIA</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>NO</b>	<b>NOX</b>	<b>SOX</b>
<b>MW</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>PPM</b>	<b>PPM</b>	<b>PPM</b>	<b>PPM</b>
<b>1</b>	14,1	5	227	416	436	21
<b>2</b>	13,2	5,7	219	430	446	19
<b>3</b>	13,1	5,9	210	442	464	13
<b>4</b>	13	6	157	472	495	9
<b>5</b>	12,6	6,2	108	496	503	5
<b>6</b>	12,4	6,3	84	500	521	0
<b>7</b>	12,3	6,5	46	506	531	0