

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

DANIEL ALMEIDA HECKTHEUER

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM GRUPO MOTOR-GERADOR CICLO DIESEL
ABASTECIDO COM DIESEL S10, S500 E MISTURAS COM BIODIESEL E ETANOL**

Porto Alegre
2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM GRUPO MOTOR-GERADOR
CICLO DIESEL ABASTECIDO COM DIESEL S10, DIESEL S500
E MISTURAS COM BIODIESEL E ETANOL**

DANIEL ALMEIDA HECKTHEUER
ENGENHEIRO MECÂNICO
MESTRE EM ENGENHARIA

**TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre
Agosto, 2019**



**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM GRUPO MOTOR-GERADOR
CICLO DIESEL ABASTECIDO COM DIESEL S10, DIESEL S500
E MISTURAS COM BIODIESEL E ETANOL**

DANIEL ALMEIDA HECKTHEUER

Engenheiro Mecânico

Mestre em Engenharia

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS

Tese realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Agosto, 2019**

Ficha Catalográfica

H449a Hecktheuer, Daniel Almeida

Análise de desempenho de um grupo-gerador ciclo diesel
abastecido com diesel S10, diesel S500 e misturas com biodiesel e
etanol / Daniel Almeida Hecktheuer . – 2019.

100 f.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.

1. Grupo Motor-Gerador. 2. Desempenho. 3. Diesel. 4. Biodiesel. 5.
Etanol. I. Santos, Carlos Alexandre dos. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363

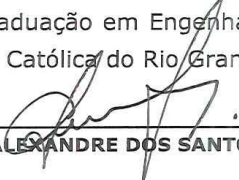


Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Análise de Desempenho de um Grupo Motor-Gerador Ciclo Diesel abastecido com Diesel S10, Diesel S500 e Misturas com Biodiesel e Etanol

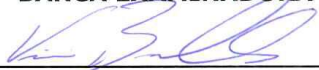
CANDIDATO: DANIEL ALMEIDA HECKTHEUER

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. CARLOS ALEXANDRE DOS SANTOS - ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



DR. VINICIUS KARLINSKI DE BARCELLOS - DEPARTAMENTO DE METALURGIA - UFRGS



DR. JULIANO D'ORNELAS BENFICA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PUCRS



DR. MARCUS SEFERIN - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/politecnica

“Quando podes medir quando se dizes, expressando-o em números, tu conheces alguma coisa a respeito; mas, quando não podes medi-lo, expressá-lo em números, teu grau de conhecimento é fraco ou insatisfatório: ele poderá ser o início do conhecimento, mas em tuas ideias, estás com dificuldade de avançar ao estágio de Ciência”

(Lord Kelvin)

DEDICATÓRIA

A meus pais, Fernando Haertel Hecktheuer e Iani Almeida Hecktheuer, pelo amor, apoio, incentivo e modelo de caráter.

A minha esposa, Jéssica Silveira Batista, meu amor, inspiração e eterna companheira.

A meu amor e singela semente, Isabela Batista Hecktheuer razão pela qual dedico parte imperativa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Empresa BSBIOS INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE BIODIESEL SUL BRASIL S/A pela doação do biodiesel utilizado neste trabalho.

A Empresa IPIRANGA PRODUTOS DE PETRÓLEO S/A, pela doação do etanol anidro utilizado neste trabalho.

Ao IFSul, campus Passo Fundo, pelo financiamento e apoio concebido aos meus estudos.

Aos familiares e colegas do IFSul pelas contribuições ao longo desta jornada.

Um agradecimento especial ao Prof. Carlos Alexandre dos Santos que através de seus nobres conhecimentos contribuíram definitivamente para a realização e conclusão desta etapa importante no desenvolvimento da pesquisa.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	7
AGRADECIMENTOS.....	8
SUMÁRIO	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	14
RESUMO.....	16
ABSTRACT.....	17
1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	207
2.1. Objetivos Específicos	207
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	218
3.1. Motor Diesel.....	218
3.1.1. Parâmetros de Desempenho dos Motores de Combustão Interna.....	230
3.2. Fontes de Energia	241
3.3. Combustíveis.....	274
3.3.1. Óleo Diesel.....	285
3.3.2. Álcool	307
3.3.3. Biodiesel	318
3.4. Misturas de Combustíveis	341
3.4.1. Misturas Binárias	352
3.4.2. Mistura Ternária Diesel-Biodiesel-Etanol.....	3942
4. MATERIAIS E MÉTODOS	485
4.1. Análise Preliminar das Misturas	485
4.2. Combustíveis e Misturas	496
4.3. Grupo Motor-Gerador.....	507
4.4. Banco de Resistências	518
4.5. Aquisição dos Dados	530
4.6. Local da Realização dos Ensaios	563
4.7. Metodologia dos Ensaios	574

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1. Ensaio de Longa Duração	60
5.2. Ensaio de Adição Máxima de Etanol	62
5.3. Análise da Temperatura do Óleo	63
5.4. Análise das Rotações	66
5.5. Análise da Potência.....	69
5.6. Análise do Torque	71
5.7. Análise do Consumo.....	73
5.8. Correlação das Características.....	74
6. CONCLUSÕES	807
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
ANEXO A	94
ANEXO B	95
ANEXO C	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Funcionamento de um motor 4 tempos ciclo diesel.	23
Figura 3.2. Consumo global de energia por fonte.	25
Figura 3.3. Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil.	34
Figura 3.4. Diagrama ternário DBE95% a temperatura ambiente.	46
Figura 3.5. Diagrama ternário DBE99,5% e DBE99,9% a temperatura ambiente.	46
Figura 3.6. Diagrama ternário DBE99,5% a 10°C e a 20°C.	47
Figura 3.7. Diagrama ternário DBE99,5% a 30 °C e 40°C.	47
Figura 4.1. Diagrama elétrico do banco de cargas resistivas.	53
Figura 4.2. Fluxograma do programa.	54
Figura 4.3. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.	56
Figura 4.4. Diagrama esquemático do sistema de testes.	59
Figura 5.1. Relação temperatura x potência.	61
Figura 5.2. Relação entre: temperatura ambiente, unidade, pressão atmosférica. ...	62
Figura 5.3. RPM instável com adição de 5% de etanol.	63
Figura 5.4. Comparação entre as médias das temperaturas do óleo por potência das misturas S10	652
Figura 5.5. Comparação entre as médias das temperaturas do óleo por potência das misturas S500.	663
Figura 5.6. Comparação entre os valores médios das rotações por potência das misturas S10.	674
Figura 5.7. Comparação entre os valores médios das rotações por potência das misturas S500.	685

Figura 5.8. Potência média das misturas por potência das misturas com S10.	707
Figura 5.9. Potência média das misturas por potência das misturas com S500.	718
Figura 5.10. Torque médio das misturas por potência das misturas com S10	7269
Figura 5.11. Torque médio das misturas por potência das misturas com S500	729
Figura 5.12. Consumo horário das misturas por potência das misturas com S10...	741
Figura 5.13. Consumo horário das misturas por potência das misturas com S500.	751
Figura 5.14. Consumo específico das misturas por potência das misturas com S10	752
Figura 5.15. Consumo específico das misturas por potência das misturas com S500	763

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades dos combustíveis.....	40
Tabela 4.1. Especificações do motor.	51
Tabela 4.2. Especificações do gerador.	51
Tabela 5.1. Consumo específico família S10.....	75
Tabela 5.2. Consumo específico família S500.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AVR	Regulador Automático de Tensão
A/D	Analog/digital
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
B0 a B100	Proporção cujo numeral indica o percentual em volume de biodiesel
Ce	Consumo específico de combustível
CI	Circuito integrado
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CR	Common-rail
DBE	Diesel-Biodiesel-Etanol
EAC	Etanol Anidro Combustível
EGR	Sistema de recirculação dos gases
E2 a E11	Proporção cujo numeral indica o percentual em volume de álcool anidro
Eh2 a Eh11	Proporção cujo numeral indica o percentual em volume de etanol hidratado
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GMG	Grupo Motor-Gerador
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i>
I/O	Inputs/Outputs
MCI	Motor de combustão interna
MCE	Motor de combustão externa
NBR	Norma Brasileira
NC	Número de cetano
Ne	Potência efetiva
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

ppm Parte por milhão

PROCONVE Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

RAR Regulador Automático de Rotação

Rpm Rotações por minuto

THC Hidrocarbonetos totais

RESUMO

HECKTHEUER, Daniel Almeida. **Análise de Desempenho de um Grupo Motor-Gerador Ciclo Diesel Abastecido com Diesel S10, Diesel S500 e Misturas com Biodiesel e Etanol.** Porto Alegre. 2019. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A geração de energia elétrica por meio de sistemas descentralizados representa um importante instrumento para a universalização do acesso à energia elétrica, principalmente em localidades isoladas. Para alcançar este objetivo, o desenvolvimento de sistemas de geração de energia elétrica que utilizam combustíveis renováveis apresenta-se como uma alternativa atraente em função das questões econômicas e ambientais. O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um grupo motor-gerador, com potência nominal de 13,2 kW a 3600 rpm, originalmente projetado para operar com diesel comercial, quando abastecido com diferentes tipos de combustíveis. As condições de ensaios foram baseadas na norma ABNT NBR ISO 1585 e consistiram em avaliar óleos diesel S10 e S500 com diferentes misturas ternárias diesel/biodiesel/etanol, submetidas a diferentes potências aplicadas ao gerador, variando entre 25%, 50% e 75% da potência nominal. Foram analisados parâmetros de temperatura do óleo lubrificante, rotação, potência, torque e consumo de combustível entre as diferentes misturas, especificando seus consumos específicos. Os resultados obtidos mostraram que 2% de etanol anidro é o percentual máximo de adição na mistura. As misturas com 30% de biodiesel e 2% de etanol apresentaram maior semelhança com as comerciais sem comprometer o desempenho. Não foram encontradas variações nos comparativos das variáveis estudadas entre o diesel S10 e S500, devendo ser priorizado a utilização da opção S10 por conter menor teor de enxofre.

Palavras-Chaves: Grupo Motor-Gerador, Desempenho, Diesel, Biodiesel, Etanol, Misturas Ternárias.

ABSTRACT

HECKTHEUER, Daniel Almeida. **Performance Analysis of a Diesel Engine-Generator Group Fueled with Diesel S10, Diesel S500 and Blends with Biodiesel and Ethanol.** Porto Alegre. 2019. PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The electric power generation by decentralized systems represents an important instrument for universalizing the access to electricity, especially in isolated locations. To achieve this goal, electric energy generation system development using renewable fuels represents an attractive alternative due to economic and environmental aspects. The present work focuses on the performance analysis of a diesel engine-generator group, 13.2 kW nominal power at 3600 rpm, originally designed to operate with commercial diesel, when fueled with different types of fuels. The test conditions were based on the ABNT NBR ISO 1585 standard consisting on evaluation of S10 and S500 diesel oils with different diesel/biodiesel/ethanol ternary blends, submitted to different power applied to the generator, varying between 25%, 50% and 75% of the nominal power. Parameters such as lubricating oil temperature, rotation, power, torque and fuel consumption between the different blends were analyzed, specifying their specific consumption. The results showed that 2% of anhydrous ethanol is the maximum percentage of addition in the mixture. The mixtures with 30% of biodiesel and 2% of ethanol presented the highest similarity with the commercial diesel without compromising performance. No variations were found in the comparative variables studied between the S10 and S500 diesel, and the use of the S10 option should be prioritized due to the lowest sulfur content.

Key-words: Engine-Generator Group, Performance, Diesel, Biodiesel, Ethanol, Ternary Blends.

1. INTRODUÇÃO

Existe um grande interesse dos órgãos de fomento à pesquisa, entre eles o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e do Governo Federal em apoiarem projetos que viabilizem a sustentabilidade econômica e ambiental, e a obtenção de infraestrutura básica para as regiões onde estes recursos serão desenvolvidos.

A produção de biocombustível constitui-se numa alternativa para a geração de empregos e renda no setor primário, importante para o desenvolvimento social. No Brasil, o girassol, a mamona, o dendê, a gordura animal e a soja são matérias-primas frequentemente utilizadas para a fabricação de biodiesel que recentemente foi introduzido na matriz energética brasileira através da Lei N° 11.097 (publicada no Diário Oficial da União de 13 de janeiro de 2005).

O setor de transportes é um dos que mais demandam energia no Brasil, cerca de 32,4% do montante. Esse consumo é devido ao alto uso de diesel e gasolina neste setor, que corresponde a 72,3% do uso de derivados de petróleo, conforme EPE, (2017a). Esse largo uso de combustíveis com origem fóssil ocasiona o aumento da poluição do ar em decorrência dos gases gerados pelo processo de combustão, principalmente, em grandes centros, onde a frota de veículos é maior. De acordo com dados disponibilizados pelo *Statistical Review of World Energy* (BP, 2018) o Brasil em 2016 produziu cerca de 458 milhões de toneladas de dióxido de carbono.

Conforme a ANP (2018a), os biocombustíveis que são derivados de biomassa renovável se tornam uma alternativa interessante uma vez que podem substituir, parcialmente ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia. O etanol é um dos biocombustíveis que está sendo estudado como uma alternativa a ser misturado com diesel, contudo, uma desvantagem da mistura diesel-etanol é que ela é

imiscível em temperaturas mais baixas e a quantidade de água no etanol prejudica essa propriedade, devido às diferenças de estrutura e características químicas entre esses combustíveis. Isso pode resultar em separação de fases (Kwanchareon et al., 2007). O biodiesel pode ser misturado em qualquer proporção com o diesel, ou seja, não tem necessidade de modificações mecânicas nos motores de combustão interna quando usado essa mistura. Além disso, esse combustível diminui a poluição atmosférica, é um ótimo lubrificante e reduz a emissão de poluentes. Ademais, ele pode ser produzido a partir de qualquer oleaginosa (girassol, soja, canola, entre outras), que é um ponto estratégico uma vez que o País possui grande capacidade de produção dessas plantas, gerando assim fonte de renda aos produtores rurais (BIODIESELBR, 2018).

Estudos mostraram que a mistura ternária diesel-biodiesel-etanol (DBE) tem melhores propriedades físico-químicas se comparada com as misturas de diesel-biodiesel ou diesel-etanol. Por consequência, o uso dessa mistura ternária é justificado porque ela pode diminuir o uso de aproximadamente 30% de combustível fóssil (Shahir et al., 2014). Futuramente, com o incremento da produção de biocombustíveis, como é objetivo atual do Governo Federal, a geração de energia elétrica utilizando esses combustíveis estará contribuindo para a diversificação da matriz energética, o que, por motivos estratégicos, apresenta-se como um agente de significativa relevância. Em decorrência do apresentado até aqui, a questão central a ser abordada neste trabalho de tese refere-se a analisar as influências da adição do etanol anidro e do biodiesel ao diesel, em relação aos parâmetros característicos de desempenho do motor.

Cabe ressaltar a contribuição e relevância do presente trabalho de tese que, na fase da revisão bibliográfica, verificou-se que existem inúmeros estudos experimentais que avaliam o desempenho dos motores Ciclo Diesel abastecidos com diferentes percentuais de adição de biodiesel e etanol ao diesel. Contudo, não existem investigações experimentais que analisam ambos os diesel comercializados atualmente, S10 e S500, em relação a variação da parte renovável na mistura, com a intenção de identificar um padrão de comportamento. Nesse cenário, o presente trabalho possui a intenção de contribuir à demanda por estudos que identificam, de forma detalhada, as características de funcionamento de motores com substituição parcial do diesel fóssil por biocombustíveis. A necessidade de um estudo comparativo entre o diesel S10 e S500 é também um fator relevante da tese.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho de um grupo motor-gerador, ciclo diesel, sem alteração mecânica, utilizando como combustíveis diferentes dieseis comerciais (S10 e S500) com adições de biodiesel e etanol, a fim de realizar uma análise comparativa de potência, torque e consumo de combustível, determinando assim o melhor rendimento do motor em função do consumo específico.

2.1. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Avaliar os consumos dos diferentes combustíveis no grupo motor-gerador, para misturas com adição de 2% de etanol anidro (em volume) a 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de biodiesel, complementados com diferentes dieseis comerciais (S10 e S500), correlacionando com as propriedades termofísicas dos combustíveis;
- Comparar o desempenho mecânico utilizando as variáveis potência, torque e consumo de combustível do grupo motor-gerador alimentado com diferentes dieseis e misturas biodiesel e etanol, quando submetidos a 0%, 25%, 50% e 75% da potência nominal do grupo;
- Determinar qual das misturas obtém o melhor desempenho comparadas aos diesel comerciais S10 e S500, sem comprometer a funcionalidade do motor.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Motor Diesel

Máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar o calor da combustão, a energia elétrica ou outras fontes em trabalho (BRUNETTI, 2012). Os motores térmicos são, por sua vez, as máquinas que tem como objetivo transformar a energia química do combustível em energia mecânica, ou seja, força motriz de acionamento (MENEZES, 2009). Dessa forma, a obtenção de trabalho é devido a sequência de processos realizados sobre uma substância denominada fluido ativo, formada por ar e combustível antes da combustão e por produtos residuais depois dela (BRUNETTI, 2012).

O objetivo do motor de combustão interna (MCI) é a obtenção de potência mecânica através da energia química contida no combustível. Em um motor desses, diferentemente de um motor de combustão externa (MCE), a energia é obtida através da queima ou oxidação do combustível dentro do motor (HEYHOOD, 1988).

Os motores de combustão interna podem ser classificados pelo ciclo termodinâmico de funcionamento. Os principais são os motores ciclo diesel (compressão) e os motores ciclo Otto, eles receberam os nomes de seus respectivos inventores (MORETTI, 2013). Do ponto de vista mecânico esses motores são bem similares. Entretanto eles se diferenciam, principalmente, pela forma de alimentação de cada um deles (MENEZES, 2009).

Nos motores ciclo Otto, diferentemente dos motores ciclo diesel, o combustível e o ar são misturados no sistema de admissão e conduzidos através de uma válvula até o cilindro para depois serem comprimidos. A reação de oxidação inicia-se no final da compressão dessa mistura na vela de ignição por uma descarga elétrica. Após a inflamação uma chama turbulenta se desenvolve e se propaga até atingir as paredes da câmara de combustão (HEYHOOD, 1988).

Em um motor ciclo diesel uma massa de ar é previamente admitida na câmara de combustão e comprimida pelo pistão. Durante a compressão ocorre no cilindro, um aumento da pressão e da temperatura desse fluido com a diminuição do volume (MOREIRA, 2008). Então, nesse momento, o combustível líquido é injetado em alta velocidade pelo sistema de injeção direto na câmara. Ele se vaporiza e se mistura com a massa de ar de alta pressão e alta temperatura. Como a temperatura e a pressão estão acima do ponto de ignição do combustível, ou seja, temperatura que acontece a queima espontânea, a mistura ar-combustível entra em ignição (HEYHOOD, 1988).

Os motores ciclo diesel podem ser com aspiração natural onde o ar é sugado na descida do pistão que gera um decréscimo de pressão no interior da câmara de combustão. Além disso, eles podem ser turboalimentados, onde o funcionamento desse modelo se dá através de um compressor, que é acionado por uma turbina movida pelos gases de escape que comprime o ar antes dele entrar no cilindro (MORETTI, 2013).

De acordo com Brunetti (2012), Ferguson e Kirkpatrick (2015) o funcionamento geral de um motor ciclo diesel, ou ignição por compressão, pode ser descrito de acordo com o ciclo de operação, que é a sequência de processos periódicos sofridos pelo fluido ativo. Ainda, esse autor descreve o funcionamento de um motor quatro tempos da seguinte maneira, que pode ser melhor visto na Figura 3.1 de Mechstuff (2018).

Tempo de admissão: O pistão desloca-se do ponto morto superior ao ponto morto inferior, que são, respectivamente, o ponto mais alto e o mais baixo que o pistão atinge dentro do cilindro. Neste movimento do pistão ocorre uma sucção que permite um fluxo de ar através da válvula de admissão, que se encontra aberta.

Tempo de Compressão: Fecha-se a válvula de admissão e o pistão se desloca do ponto morto inferior ao ponto morto superior, comprimindo a massa de ar. A compressão deve ser elevada o suficiente para que se ultrapasse a temperatura de autoignição do combustível.



Figura 3.1. Funcionamento de um motor 4 tempos ciclo diesel.

Fonte: Mechstuff, 2018.

Tempo de Expansão: É injetado o combustível que se mistura com o ar quente, iniciando-se uma combustão espontânea. Isso provoca um grande aumento da pressão que empurra o pistão para o ponto morto inferior. O fluido ativo sofre um processo de expansão e realiza o trabalho útil do motor.

Tempo de Escape: Com a válvula de escape aberta, o pistão desloca-se do ponto morto inferior ao ponto morto superior fazendo que os gases saiam do cilindro para se reiniciar o ciclo.

Os motores podem ser classificados em 4 tipos quanto a sua aplicação. Eles podem ser veiculares, marítimos, industriais e estacionários (MORETTI, 2013). Os motores tipo diesel estacionários são destinados para fornecer energia mecânica para máquinas estacionárias, como por exemplo: geradores, máquinas de solda, bombas e outras máquinas que operem com rotação constante (LEMPEK, 2016).

3.1.1. Parâmetros de Desempenho dos Motores de Combustão Interna

Os parâmetros que mostram como o motor de combustão interna estão realizando o trabalho de forma eficiente são: a potência efetiva, o torque e o consumo específico de combustível.

Potência efetiva (N_e): esta potência é comumente designada ao freio ou efetiva, possuindo grande interesse prático, pois representa a potência retirada no

eixo do motor. Pode ser medida com um dispositivo frenante aplicado ao eixo do motor, chamado de dinamômetro (HEYWOOD, 1988).

Podem ser obtidos dois tipos de potência efetiva, bruta ou líquida. A bruta é obtida com o motor básico, ou seja, equipado apenas com os componentes essenciais a sua operação. A líquida é obtida com o motor completamente equipado, com todos os seus componentes necessários ao seu funcionamento autônomo, segundo sua aplicação (HEYWOOD, 1988).

Torque: é o momento de torção ao qual está sujeito o motor. O valor do torque pode ser medido através do banco dinamométrico. Este relaciona a força aplicada a um determinado ponto do eixo através de um braço de alavanca e o torque é diretamente proporcional ao comprimento do braço (HEYWOOD, 1988).

Consumo específico de combustível (C_E): é a quantidade de combustível que um motor gasta para cada unidade de potência produzida, durante certo período de funcionamento. É um parâmetro muito usado para mostrar quanto um motor está transformando combustível em trabalho. Para se obter o consumo específico de combustível de um motor a uma dada rotação divide-se o consumo horário pela potência efetiva, produzida à mesma rotação (HEYWOOD, 1988).

Os ensaios destinados a obtenção da potência, torque e consumo específico de combustível, realizado em motor de ciclo diesel, utilizando dinamômetro de bancada, deve seguir a norma ABNT – NBR ISO 1585. Essa norma especifica um método de ensaio de motores automotivos, ela se aplica a avaliar o desempenho, observando, em particular, a apresentação das curvas de potência e de consumo específico de combustível no motor.

3.2. Fontes de Energia

O desenvolvimento de qualquer civilização depende, essencialmente, da disponibilidade de recursos naturais e de energia. Isso pode ser evidenciado na crescente demanda de energia em todos os setores produtivos presentes nas sociedades contemporâneas. Conforme a *Energy Information Administration* (EIA), (2017) é notável o crescimento do uso de energia por fonte, exceto pela energia nuclear, no período analisado de 1990 até o presente. Além disso, através da projeção de consumo até o ano de 2040, que pode ser vista na Figura 3.2, percebe-se que a utilização de todos os combustíveis cresce, com exceção do carvão.

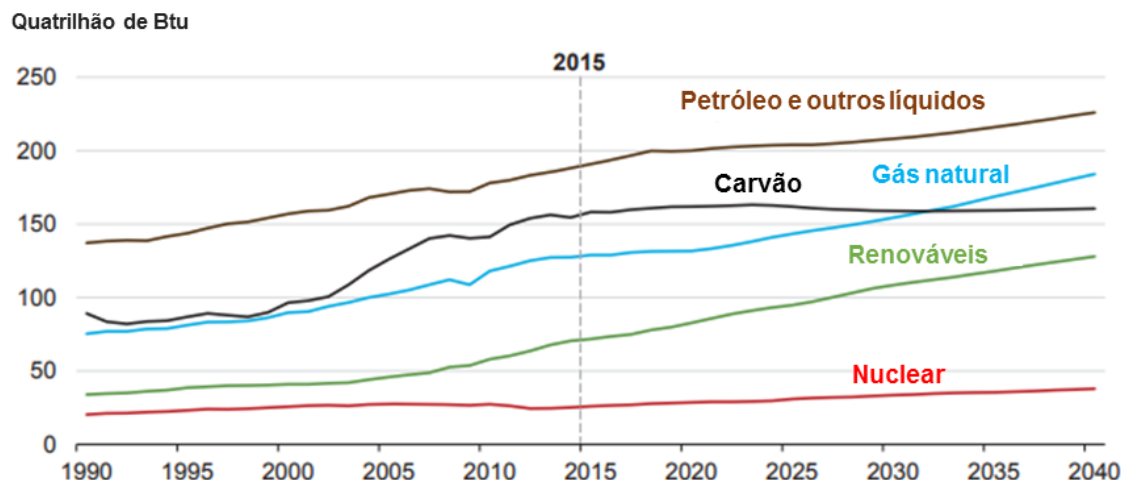


Figura 3.2. Consumo global de energia por fonte.

Fonte: EIA, 2017.

O Brasil, em 2016, produziu cerca de 294,7 milhões de toneladas, equivalentes de petróleo, em energia, de acordo com dados disponíveis no Balanço Energético Nacional de 2017. Essa produção é representada, principalmente, pelo petróleo e derivados (36,5%), produtos da cana de açúcar (17,5%), hidráulica e eletricidade (12,6%) e gás natural (12,3%) (EPE, 2017a). Conforme a resenha energética brasileira (2017) as fontes renováveis representaram 43,5% na oferta interna de energia em 2016. Esse dado representa a supremacia brasileira na produção de energia renovável quando comparado com o valor da média mundial, que é de 14,2%.

O controle da emissão dos poluentes por veículos automotores é abordado desde os anos 80 no País. Com a intenção de regulamentar a emissão de poluentes, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou em 1986, em sua resolução, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Ele tem como alguns de seus objetivos a redução dos níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, para atender os padrões de qualidade do ar, e promover o desenvolvimento tecnológico na engenharia automobilística (BRASIL, 1986).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2026, em 2020 as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil atingirão a marca de, aproximadamente, 405 milhões de toneladas de gás carbônico equivalente (MtCO₂e). Esse resultado mostra que o País atende com folga a meta do decreto

7390/10, que estipula um valor máximo absoluto das emissões entre 634 a 680 MtCO₂e no ano de 2020. A expansão de fontes renováveis para a geração de energia elétrica, o crescimento do uso de biocombustíveis e o aumento das medidas de eficiência energética são algumas ações tomadas que permitirão ao Brasil manter seus indicadores como um dos países que menos emitem gases de efeito estufa na produção e no consumo de combustíveis (EPE, 2017b).

O uso de biocombustíveis iniciou-se no Brasil a partir da metade da década de 1970 com a criação de políticas públicas específicas e do estabelecimento de um amplo conjunto de regras de comercialização feitas pelo Governo Federal em reação às crises do petróleo. Com a criação do Proálcool, em 1975, iniciou-se a adição de etanol anidro na gasolina e, além disso, as regras de comercialização para a colocação no mercado do etanol hidratado foram definidas (EPE, 2017c). A lei 13.033 de 24/09/2014 definiu como limites de adição de etanol anidro na gasolina 18% a 27,5% (BRASIL, 2014). Em 2015 esses valores foram alterados para 27% para a gasolina comum e 25% para a gasolina premium (BRASIL, 2015).

A adição de biodiesel ao diesel fóssil no Brasil teve início em 2004 de forma experimental. A obrigatoriedade veio com a Lei nº 11.097/2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira. Em janeiro de 2008 entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória com 2% de biodiesel (B2) (ANP, 2018a). Com o amadurecimento do mercado brasileiro essa percentagem aumentou gradativamente até os 10%, que é porcentagem atual permitida, conforme estipulado pela lei 13.263 de 2016. Ademais, a mistura com 15%, em volume, de biodiesel poderá ser inserida no mercado nacional, em até trinta e seis meses contados da promulgação desta Lei, após a realização de testes e ensaios em motores que validem a sua utilização (BRASIL, 2016).

Há muito tempo o petróleo se tornou a fonte de energia mais utilizada em todo mundo, porém com o aumento de seu consumo e a enorme preocupação com o meio ambiente, a opção foi à busca por fontes renováveis de energia. Há aproximadamente 35 anos cientistas alertaram sobre o aquecimento global que mostrava o aumento da temperatura da Terra devido às ações dos seres humano. Um aspecto negativo como esse fez crescer o aumento por fontes de combustíveis renováveis que não afetassem tanto o planeta, mostrando assim um crescimento eficaz para diminuir a dependência de fontes não renováveis de energia (KUSS, et. al. 2015).

Óbvio que o aumento de energia com toda certeza melhorou o nível de vida de todos, dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, e isso fez com que o crescimento e utilização de combustíveis fósseis aumentassem, mas com seu aumento desenfreado, a quantidade de gases de efeito estufa aumentou gradativamente, e deve-se muito esse aumento constante ao setor de transporte. Com isto, a grande liberação de gases de efeito estufa e os problemas ambientais começaram a crescer e se agravar devido a queima desses combustíveis em todo o mundo. Assim, estudos estão sendo feitos para reverter o quanto antes esse quadro que se tornaria irreversível se continuasse da forma que estava (PRAMOD, 2015).

Com estudos e pesquisas avançadas foi possível considerar os bicomcombustíveis renováveis uma das formas mais sustentáveis para substituição de fontes de energia fóssil, outro fator que agrega valor ao seu uso é devido à redução do efeito estufa (CREMONEZ, et. al. 2015).

3.3. Combustíveis

Com o diagnóstico do esgotamento das fontes fósseis se previu a necessidade de proteger o meio ambiente, desta forma foi preciso encontrar uma forma ambiental viável para reverter esse quadro. Logo, a busca por biocombustíveis começou a crescer, pois de alguma forma muito significativa trariam vantagens ambientais para este meio (MASSON, 2013).

Uma das formas de produção de biocombustíveis é a partir de algas, onde elas não competem com alimentos e podem ser cultivados em lagos ou até mesmo tanques fechados, também é importante lembrar que algas podem ser produzidas durante todo o ano, não havendo limitação da irradiação de luz (DUTTA, 2014).

Na Europa a gestão de resíduos se tornou um desafio, com o objetivo de reduzir resíduos poluentes e que favoreçam a reciclagem, a recuperação do meio ambiente e o desvio de resíduos de aterros. Assim para que esta gestão seja alcançada foi proposta a hierarquia de resíduos, o que tem como objetivo principal a redução de desperdícios, reciclagem e reutilização. Ainda neste segmento, materiais com uma forte influência no que se diz respeito à energia estão disponíveis para compostagem, podendo classificá-los como: papéis, plásticos, têxteis e madeira. Materiais caracterizados como ricos em energia podem ser denominados como

fontes de energia potenciais, e podem ser processados para fins de se obter resíduos para a preparação de combustíveis (PEDDIREDDY, 2015).

Segundo JOHNSON (2014), o Brasil como tantos outros países fez o reconhecimento que os biocombustíveis poderiam contribuir com desenvolvimento energético. Essa tendência iria se tornar um fenômeno em questões de mercado e política, o que fez de forma significativa o mercado de biocombustíveis renováveis se expandisse. O Brasil possui lugar de destaque quanto à produção de bioetanol em relação aos países desenvolvidos (CREMONEZ, et. al. 2015).

Nos EUA existem mais de 800 agências de trânsito, com quase 65.000 ônibus em operação e, consumidoras de biocombustíveis. A intenção com toda certeza é causar a baixa emissão de poluentes na atmosfera terrestre, essa atitude faz com que existam possibilidades e abram ideias para outras formas de combater a poluição (XU, et. al. 2015).

3.3.1. Óleo Diesel

O óleo diesel é uma mistura formada principalmente por átomos de carbono e hidrogênio. Além disso, em baixas concentrações, é constituído por enxofre, nitrogênio e oxigênio. É um combustível derivado do petróleo, inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico (PETROBRAS, 2018a). Sua cadeia atômica contém entre 8 a 24 átomos de carbono. Durante seu processo de produção ele é destilado do petróleo em temperaturas na faixa de 130°C a 370°C. A composição final desse combustível varia conforme a origem do petróleo e com os processos de refino (MORETTI, 2013).

O diesel é um combustível que atende as mais variadas necessidades de consumo e tecnologias em motores. Esse combustível é usado em motores que são utilizados no transporte de cargas e de passageiros, em embarcações, na indústria, na geração de energia, nas máquinas para construção civil, nas máquinas agrícolas e até em locomotivas (PETROBRAS, 2018b).

No ano de 2016 o volume consumido de diesel no Brasil foi de, aproximadamente, 54,77 bilhões de litros (ANP, 2018b). Isso equivale a 18,1% do consumo total de energia nesse ano. A principal justificativa desse elevado consumo

é o largo uso desse combustível no setor de transportes, cerca de 45% do total (EPE, 2017a).

Conforme Moretti (2013) é necessária a melhora da qualidade do diesel para a redução dos contaminantes por ele gerados. Isso porque o óleo diesel é o combustível de maior consumo no Brasil e consequentemente é o que mais contribui para a poluição atmosférica.

A Resolução da ANP nº 50, de 23 de dezembro de 2013 determina duas principais classificações para o óleo diesel rodoviário (ANP, 2013):

- I. Óleo diesel A: combustível produzido nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores. Sem adição de biodiesel;
- II. Óleo diesel B: óleo diesel A, adicionado de biodiesel no teor estabelecido pela legislação vigente.

Ademais, fica estabelecido que os óleos diesel A e B deverão apresentar as seguintes nomenclaturas, conforme o teor máximo de enxofre:

- I. Óleo diesel A S10 e B S10: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 10 mg/kg;
- II. Óleo diesel A S500 e B S500: combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 500 mg/kg.

A vantagem do ponto de vista ambiental em utilizar diesel com menor teor de enxofre (S10) é a redução de gases tóxicos e material particulado que deixam de ser liberados no ambiente, entretanto, existe algumas diferenças nas propriedades do diesel como: redução da lubricidade, da densidade, da condutividade elétrica e de compostos anti-oxidantes que ajudam a prevenir a formação de gomas, bem como redução de compostos anti-corrosivos e do ponto de entupimento (DUNN, 2011).

Uma das propriedades que merece destaque neste estudo é o número de cetano. O número de cetano no diesel está para o motor ciclo Diesel assim como o número de octanas na gasolina está para o motor ciclo Otto, no qual mede a qualidade de ignição de um combustível na máquina diesel e tem influência direta na partida do motor e no seu funcionamento sob carga. Combustíveis com alto teor de parafinas apresentam alto número de cetano, enquanto produtos ricos em hidrocarbonetos aromáticos apresentam baixo número de cetano, sendo os combustíveis mais favoráveis aos motores diesel atuais são aqueles cujo índice se situa entre 45 e 50 cetanos (KNOTHE, 2016).

3.3.2. Álcool

O desenvolvimento de sistemas de combustão mais ecológicos e eficientes faz com que o uso de combustíveis alternativos se torne cada vez maior. Os álcoois são um desses combustíveis com potencial para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, onde se destaca o grande potencial do etanol para se tornar o combustível alternativo mais significativo para os veículos automotores (MURCAK et al., 2015).

Os álcoois mais conhecidos e utilizados são o metanol e o etanol. As principais aplicações são: combustível e reagente químico. O metanol não é tão utilizado como combustível quanto o etanol, uma vez que ele é mais tóxico que o etanol. Há um tempo atrás, o metanol era obtido a partir da destilação da madeira, ou melhor, do aquecimento da madeira a altas temperaturas e na ausência de ar. Daí surgiu a denominação: álcool da madeira. Atualmente, ele é produzido a partir da hidrogenação catalítica do monóxido de carbono à temperaturas e pressões elevadas. (MEDEIROS, 2004).

O etanol ou bioetanol, nomenclatura utilizada quando ele é produzido a partir de fontes renováveis, é um combustível líquido renovável, incolor e transparente. Ele é biodegradável e pode ser produzido, principalmente, através de matérias vegetais como a cana de açúcar, batata doce, milho, beterraba e resíduos agrícolas (ALPTEKIN et al., 2015).

O etanol pode ser especificado como EAC (Etanol Anidro Combustível), componente de mistura na formação da gasolina comercial, com coloração alaranjada, ou como EHC (Etanol Hidratado Combustível), comercializado em todo o país como um combustível acabado, límpido e incolor (ANP, 2018d).

O etanol se apresenta como um interessante substituto ao óleo diesel, especialmente pelo motivo de redução de poluentes. Isso se deve ao fato de que ele contém oxigênio em sua molécula e é um combustível muito volátil, características que são, geralmente, favoráveis para uma boa combustão. Além disso, a menor composição do carbono nos álcoois favorece a emissão quase nula de material particulado (EGÚSQUIZA, 2011).

Para produzir etanol é necessário extrair o álcool de outras substâncias uma vez que ele não é um produto encontrado de forma pura na natureza. A fermentação é o processo mais simples e mais antigo. Basicamente, essa técnica consiste em

adicionar micro-organismos ao caldo da cana-de-açúcar. Eles são responsáveis por metabolizar em escala microscópica as moléculas simples de açúcar transformando-as em duas moléculas de etanol, mais duas moléculas de gás carbônico, esse produto obtido é conhecido como etanol de 1ª geração. Por sua vez, o etanol de segunda geração é resultado da decomposição de açúcares complexos, como a celulose, em açúcares simples para posterior fermentação e destilação (RAELE et al., 2014; NOVACANA, 2018). Além desses processos, existem ainda a hidratação do etileno e a redução do acetaldeído como possíveis caminhos para a obtenção do etanol (NOVACANA, 2018).

A produção nacional de etanol em 2016 foi de 28,7 milhões de m³, um decréscimo de 4,33% em relação ao ano de 2015. Desse total, a produção de etanol hidratado combustível foi equivalente a 17 milhões de m³ enquanto a de etanol anidro combustível foi de 11,7 milhões de m³. O estado de São Paulo é o possui maior representatividade na produção tanto de etanol hidratado, cerca de 46% da produção nacional, quanto do anidro, aproximadamente 45,6%. Em termos de região, a sudeste é a que mais contribui para o total produzido (ANP, 2017a).

3.3.3. Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível líquido obtido por processos químicos a partir de óleos vegetais ou gorduras animais e um álcool. Ele pode ser utilizado em motores diesel sozinho ou misturado com o óleo diesel. A American Society for Testing and Materials (ASTM) define o biodiesel como sendo uma mistura de ésteres monoalquílicos de cadeia longa de ácidos graxos obtidos a partir de recursos renováveis, para uso em motores a diesel (ROMANO; SORICHETTI, 2011).

Biodiesel pode ser produzido através de diversas espécies vegetais, conhecidas como oleaginosas. Dentre elas se destacam a soja, o babaçu, o dendê, a canola, a mamona e a palma. Além disso, esse combustível também pode ser produzido a partir de sebo bovino, óleo residual de frituras, banha de porco e óleo de peixe. O Brasil por ser um país continental com condições favoráveis ao cultivo de plantas e criação de animais figura como um dos países com grande capacidade de produção de biodiesel (D'AGOSTO et al., 2015; LEMPKE, 2016).

O biodiesel tem recebido grande atenção como substituto do óleo diesel, uma vez que é uma alternativa econômica e segura aos combustíveis fósseis. Além

disso, ele possui muitos aspectos ambientais e sociais favoráveis (POUSA et al., 2007; DI; CHEUNG; HUANG, 2009; BIODIESELBR, 2018):

- I. É biodegradável;
- II. Pode ser produzido a partir de materiais renováveis;
- III. Pode ser utilizado em motores sem alteração mecânica;
- IV. Os ésteres de ácidos graxos etílicos ou metílicos não contêm enxofre;
- V. O biodiesel diminui consideravelmente a emissão de fuligem (até 50%);
- VI. O biodiesel, quando queimado, emite aproximadamente a mesma quantidade de CO_2 que é absorvida durante o cultivo da semente oleaginosa;
- VII. Não contém nenhum dos carcinógenos encontrados no óleo diesel;
- VIII. O biodiesel não é considerado um material perigoso, precisa de uma fonte de calor acima de 150°C para explodir, o que favorece o transporte e manuseio;
- IX. O biodiesel representa uma saída adequada para a indústria de óleos vegetais, servindo como uma importante ferramenta para a regulação do mercado;
- X. Aumenta a vida útil do motor devido a uma maior capacidade de lubrificação.

Entretanto, quando comparado ao diesel, o biodiesel apresenta algumas desvantagens que devem ser levadas em consideração (ROMANO; SORICHETTI, 2011):

- I. Consumo de combustível ligeiramente maior devido ao menor valor calorífico do biodiesel;
- II. Emissões de óxido nitroso (NO_x) ligeiramente superiores;
- III. Maior ponto de congelamento que o diesel, isso pode acarretar problemas em climas frios;
- IV. É menos estável que o diesel, ou seja, o armazenamento a longo prazo (mais de seis meses) de biodiesel não é recomendado.

O processo de transesterificação (também chamado de alcoólise) é a reação de um óleo ou gordura com um álcool para formar ésteres e glicerol, mais comumente utilizado para a produção de biodiesel. Um catalisador é geralmente usado para melhorar o desempenho da reação. A fim de evitar a possibilidade de uma reação de reversão, o excesso de álcool é usado para deslocar a balança para

o lado os produtos. Alguns dos álcoois que podem ser usados na transesterificação são metanol, etanol, propanol, butanol e álcool amílico. Quando o processo usa metanol, é chamado de transesterificação por via metílica e quando utiliza etanol, por via etílica (D'AGOSTO et al., 2015).

A produção nacional de biodiesel em 2017 foi de 4.291.294 m³, um acréscimo de 12,89% em relação ao ano de 2016. O Rio Grande do Sul é o estado com maior representatividade na produção, cerca de 26,47%. Em termos de região, a centro-oeste é a que mais contribui para o montante nacional, aproximadamente 44,19% (ANP, 2018d).

O principal produto para a produção de biodiesel no Brasil é o óleo de soja, que em 2016 teve uma representatividade de 79,14%. A segunda matéria-prima mais utilizada foi a gordura animal, com aproximadamente 16,30% do total. Além dessas fontes, o óleo de algodão, com 2% de participação, e outros materiais graxos, com 1,6% do total, são as principais fontes para a produção desse combustível no país (ANP, 2017b).

O biodiesel pode ser utilizado tanto puro como em misturas diesel/biodiesel e tem o mesmo campo de aplicação que o diesel mineral. Apesar do biodiesel poder ser utilizado diretamente nos motores diesel, este é usado na forma de mistura diesel/biodiesel. As misturas diesel/biodiesel costumam receber um atributo em sua designação. O B2, por exemplo, corresponde a uma mistura contendo 2% em volume de biodiesel; o biodiesel puro é denominado de B100. No início do século XX, foram realizados testes com o emprego de óleos vegetais em motores diesel, mas devido aos baixos preços dos derivados de petróleo, essas iniciativas pararam. Nos anos de 1970, com a crise do petróleo, os óleos vegetais passaram a ser alvo de estudos em motores diesel, mas na década de 80 voltou a estagnar, devido a grande oferta e aos baixos preços do petróleo. A partir dos anos 90, avanços importantes foram realizados na produção e uso do biodiesel, principalmente na Europa, devido à consolidação do conceito de desenvolvimento sustentável e também pela possibilidade de escassez dos combustíveis fósseis (PARENTE, 2003).

Em 2005, o Governo Federal, através do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), organizou a cadeia produtiva, definiu linhas de financiamento, estruturou a base tecnológica e editou o marco regulatório do novo combustível.

A Lei 11097, aprovada em 13 de janeiro de 2005, estabelece quantidades mínimas de biodiesel na venda de diesel no País. O Brasil iniciou fazendo misturas obrigatórias de diesel/biodiesel 2% (B2) em 2008, permaneceu com progressões anuais e atualmente, em junho 2019 para 11% (B11). Esta evolução adicional de biodiesel pode ser melhor explicitada na Figura 3.3. As especificações do biodiesel são regulamentadas pelo o Regulamento Técnicas ANP Nº. 1/2008, através da RESOLUÇÃO DA AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS-ANP Nº. 7 de 19 de março de 2008. O biodiesel no Brasil é comercializado em leilões da ANP com as várias indústrias produtoras e este só será comercializado se estiver de acordo com as especificações.



Figura 3.3. Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil.

Fonte: BSBIOS (2018).

3.4. Misturas de Combustíveis

A evolução da indústria aliada com o crescimento do setor dos transportes aumentou exponencialmente o consumo de combustíveis no mundo. A utilização excessiva de combustíveis fósseis desencadeou uma maior degradação do meio ambiente e riscos para a saúde. Isso fez com que novas normas de controle de emissão de poluentes fossem criadas na tentativa de reduzir os danos gerados. Frente a isso, muito esforço tem sido feito para encontrar fontes renováveis alternativas de combustíveis a fim de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Através dessas pesquisas as misturas com combustíveis renováveis adicionados no diesel vêm ganhando atenção. O biodiesel e etanol são fortes candidatos para substituir parcialmente os combustíveis de origem fóssil uma vez que eles podem ser utilizados nos motores existentes, proporcionam benefícios

ambientais, energéticos e, além disso, podem ser produzidos internamente (HULWAN; JOSHI, 2011; TSE et al., 2015; SHAHIR et al., 2015).

3.4.1. Misturas Binárias

As misturas que possuem 2 combustíveis principais em sua formulação podem ser chamadas de misturas binárias. Dentre elas, pode-se destacar a mistura comercial de gasolina, que atualmente é adicionado 25% de etanol anidro à gasolina comum (BRASIL, 2015), e a mistura comercial de diesel, que conforme a lei 13.263 de 2016 hoje é formada por diesel acrescentado de 10% de biodiesel. As misturas binárias de maior interesse para esse trabalho são as formadas por diesel acrescentado de biodiesel ou etanol. Isso porque o estudo da interação desses biocombustíveis com o diesel, separadamente, permite um maior entendimento do comportamento deles.

3.4.1.1. Mistura Diesel-Etanol

A crise global de combustíveis nos anos 70 despertou a consciência de muitos países quanto a sua vulnerabilidade a embargos e falta de petróleo. A partir disso, iniciou-se a procura por fontes alternativas de combustíveis, sendo que os álcoois tiveram um enfoque mais acentuado. A formulação de misturas de combustíveis com a adição de etanol ao diesel foi objeto de pesquisa na década de 1980, onde os estudos demonstraram que elas eram tecnicamente aceitáveis para os motores diesel existentes. Todavia, o custo relativamente alto da produção do etanol para aquela época significava que esse combustível só poderia ser utilizado em casos de escassez de petróleo (HANSEN; ZHANG; LYNE, 2005).

No momento atual, os estudos da adição de etanol ao diesel são justificados pela preocupação em reduzir a emissão de gases de efeito estufa, poluição local e a diversificação das fontes de energia para o transporte. Além disso, ele tem um forte potencial como combustível devido a sua disponibilidade em grande volume (PIDOL et al., 2012). Outro atrativo do etanol é que esse combustível possui cerca de 34% em peso de oxigênio, tornando a mistura binária com diesel mais oxigenada (HULWAN; JOSHI, 2011).

Conforme Pidol et al. (2011) a adição de etanol ao diesel pode ser realizada com diferentes métodos, que podem ser complexos e ter soluções custosas:

- I. Mistura dos combustíveis antes da injeção;
- II. Mistura com o etanol como componente principal do combustível, para isso soluções tecnicamente complexas são necessárias;
- III. Fumigação com etanol, ou seja, a adição de álcoois ao ar de admissão;
- IV. Injeção dupla, isto é, sistemas de injeção separados para cada combustível;

A primeira metodologia é geralmente a escolhida dentre as opções porque sua implementação é mais fácil do que as outras e não é necessário realizar modificações no motor. Contudo, devido à falta de miscibilidade entre o etanol e o diesel, apenas uma pequena quantidade de etanol é permitida na mistura para a obtenção de bons resultados nos processos de combustão. Esse valor corresponde a menos de 5% em volume.

A solubilidade do etanol no diesel é dependente de, principalmente, dois fatores: temperatura e teor de água da mistura. Quando a temperatura da mistura se eleva aumenta a solubilidade do etanol e, conseqüentemente, ela se torna mais estável. Por outro lado, quando o teor de água da mistura aumenta a solubilidade do etanol diminui favorecendo a separação de fases (HANSEN; ZHANG; LYNE, 2005; LAPUERTA; ARMAS; GARCIA-CONTRERAS, 2007).

Além da estabilidade do combustível outras propriedades sofrem alteração com a adição de etanol. A densidade e a viscosidade dessas misturas são menores do que as do diesel comercial. Isso faz com que se reduza a capacidade de lubrificação do combustível (BARABÁS et al., 2010). O conteúdo energético, que influencia diretamente a potência de saída do motor, diminui em aproximadamente 2% para cada 5% de etanol, em volume, adicionado (HANSEN; ZHANG; LYNE, 2005). Outra propriedade que tem mudança é o número de cetano, que se torna menor que o óleo diesel. A adição de 10% em volume de etanol diminui o número de cetano em aproximadamente 30% (SHAHIR et al., 2015).

A potência de saída de motores não modificados alimentados com misturas diesel-etanol geralmente é menor do que quando eles utilizam diesel comercial. Essa redução é aproximadamente equivalente à do conteúdo energético (HANSEN; ZHANG; LYNE, 2005). Além disso, essa mistura tem aumento no atraso de ignição,

as pressões máximas dos cilindros são levemente reduzidas e suas temperaturas são reduzidas durante a primeira parte da combustão, nivelando-se mais tarde (RAKOPOULOS et al., 2011).

Em termos de emissões, as misturas com etanol mostram redução significativa de material particulado, cerca de 20-27% e 30-41% para uma adição de 10% e 15% de etanol respectivamente. As reduções nos óxidos de Nitrogênio (NO_x) variam de zero a 4-5%. Além disso, ocorrem tanto aumento quanto diminuição nas emissões de gás carbônico (CO) e as emissões de hidrocarbonetos totais (THC) aumentam substancialmente, ambos ficam abaixo do limite de emissões reguladas (HANSEN; ZHANG; LYNE, 2005). No estudo apresentado por Sayin (2010), as emissões de CO e THC diminuíram enquanto as de NO_x aumentaram.

Santos, Dodd e Lena (1983) desenvolveram métodos para o estudo de diagramas de fases das misturas etanol/diesel e concluíram que a adição de até 5 % de etanol ao diesel era viável, sem grandes variações nas propriedades físico-químicas do combustível.

Ajav e Akingbehin (2002) realizaram experimentos com algumas propriedades do diesel e de misturas diesel/etanol com o objetivo de estabelecer sua conformidade para o uso em motores de ignição por compressão. Foram avaliadas seis misturas de etanol com diesel, nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, em volume de etanol no diesel. Os resultados mostraram que as misturas contendo 5%, 10%, 15% e 20% de etanol apresentaram algumas propriedades aceitáveis como combustível para uso em motores de ignição por compressão. Entretanto, o ponto de fulgor das misturas ficou em torno de 25°C , resultado que traz riscos de explosão e incêndio e a viscosidade das misturas contendo 25% e 30% de etanol no diesel ficou com valores abaixo, que pode trazer problemas para o motor.

Lapuerta, Armas e Garcia-Contreras em (2007) estudaram as emissões de poluentes e o consumo específico de um motor diesel utilizando etanol anidro misturado ao diesel convencional, nas proporções de 10% em volume de etanol no diesel. As emissões foram medidas, em cinco condições de estado estacionário, para veículos leves, por meio de um sistema instrumental conectado a um dinamômetro; o material particulado foi obtido por distribuição de tamanho de partículas; e o consumo de combustível foi medido usando uma balança gravimétrica. Os resultados dos ensaios de emissões foram comparados com o diesel puro. Os pesquisadores comprovaram que a utilização deste componente

renovável no diesel prevê uma redução significativa nas emissões de particulados, sem aumento substancial de outros gases poluentes, o que o torna útil, pois contribui para adequação as legislações europeias e impede o acréscimo de particulados causados pelos transportes, principalmente os com motores diesel.

Lu, Huang e Zhang (2004) estudaram as características detalhadas da combustão e das emissões de um motor diesel, de injeção direta, monocilíndrico, quatro tempos, aspiração natural de ar, queimando biodiesel misturado com etanol, através de uma porta de injeção. A velocidade do motor ao longo do experimento foi fixada em 1800 rpm. A análise mostrou que a liberação de calor com a introdução do etanol aumentou bastante o tempo global do atraso de ignição. A partir desses dados foi possível concluir que os valores máximos de liberação de calor e de eficiência térmica atingiram o ponto máximo nas proporções de pré-mistura, que variou de 20% a 40% de etanol. Quanto às emissões de NOx e particulados, estas diminuíram a níveis muito baixos com a introdução do etanol no biodiesel alcançando valores de 35% a 85% quando comparadas com os motores movidos a biodiesel puro.

Zhiqiang et al. (2011) estudaram as emissões e a eficiência da combustão de misturas diesel/etanol nas proporções de 10%, 20% e 30% de etanol no diesel e compararam ao diesel convencional. O motor utilizado para realização dos ensaios foi um motor ciclo diesel, monocilíndrico, quatro tempos, refrigerado a água. A rotação do motor foi variada de 800 a 2000 rpm, em intervalos de 200 rpm. Os resultados de potência em função da rotação foram menores, em média 1,5%, para as misturas contendo etanol. Em relação às emissões, os resultados só foram significativos para adições de etanol no diesel acima de 14%. Os resultados das emissões mostraram reduções significativas de monóxido de carbono, material particulado e hidrocarbonetos não queimados para misturas contendo 30% de etanol no diesel. As emissões de óxidos de nitrogênio foram maiores para as misturas de etanol/diesel em relação ao diesel nas rotações de 800 a 1200 rpm, mas para as demais rotações as emissões de NOx foram menores. Os pesquisadores concluíram que as misturas acima de 14% de etanol minimizam emissões de gases poluentes.

3.4.1.2. Mistura Diesel-Biodiesel

A utilização de óleos vegetais em motores a combustão interna não é um fato recente. Na verdade, o primeiro registro é de 1900 quando Rudolf Diesel usou óleo de amendoim em motores. Porém, o petróleo se tornou a principal fonte de energia por ser de baixo custo e fácil disponibilidade, fazendo com que o diesel fosse o combustível mais usado em motores. As crises do petróleo nos anos de 1970 e 1990 aliadas com a crescente preocupação ambiental propulsaram novos esforços na busca de fontes renováveis para substituir os combustíveis fósseis (POUSA et al., 2007).

A disponibilidade em grande volume do biodiesel juntamente com as características de ser biodegradável, oxigenado, não tóxico e ambientalmente correto o tornam uma boa opção para motores de combustão interna. Além disso, ele possui propriedades de interesse para os processos de combustão, como: maior número de cetano, quase nenhum enxofre, nenhum aromático e contém 10 a 11% de oxigênio em peso. Além disso, algumas propriedades físicas e químicas do biodiesel são similares com as do diesel, justificando a formulação de misturas com esses combustíveis. Aliás, elas são as únicas que podem ser usadas em motores de combustão interna sem alteração mecânica. (DEMIRBAS, 2009; HASAN; RAHMAN, 2017).

As misturas diesel-biodiesel são mais viscosas que o diesel propriamente dito devido ao fato que o biodiesel adicionado apresenta um valor de viscosidade cinemática maior. Entretanto, uma mistura com até 30% de biodiesel possui valores semelhantes aos do diesel. Ademais, essa propriedade apresenta ligação direta com a densidade, ou seja, quanto maior for a densidade maior será o valor da viscosidade cinemática. (HASAN; RAHMAN, 2017). A densidade da mistura diesel-biodiesel aumenta linearmente com o aumento da concentração de biodiesel. Contudo, não há diferença significativa entre as densidades das misturas com adição de até 20% de biodiesel ao diesel (ALPTEKIN; CANAKCI, 2009).

Em geral, o número de cetano do biodiesel é maior que o do diesel. Com o aumento do percentual desse combustível renovável na mistura ocorre, conseqüentemente, o aumento do número de cetano. Porém misturas com até 30% de biodiesel apresentam valores próximos ao do diesel. Por outro lado, o valor calorífico dessas misturas é geralmente menor. Esses valores variam em torno de 35,6 a 44,16 MJ/kg enquanto o diesel comum varia de 43 a 47 MJ/kg (HASAN; RAHMAN, 2017). Vale ressaltar que essas misturas binárias apresentam uma

melhora significativa na lubricidade. Mesmo níveis de biodiesel abaixo de 1% podem fornecer um aumento de 30% na lubrificação (DEMIRBAS, 2009).

Em termos de desempenho, Castellanelli et al. (2008) observaram que misturas com 2%, 5% e 10% de biodiesel apresentaram resultados semelhantes aos do diesel. A mistura com adição de 20% foi a única que apresentou um desempenho superior. Além disso, aquelas com adição de 50% e 75% resultaram em uma queda do desempenho de forma gradual conforme o aumento de biodiesel na mistura. Esses mesmos resultados foram encontrados por Buyukkaya (2010). Ele afirma que concentrações menores de 20% de biodiesel proporcionam eficiência, desempenho e emissões melhores ou iguais ao do diesel comum.

Os estudos já realizados nessas misturas mostraram que elas levam a uma redução na emissão de material particulado, hidrocarbonetos totais e monóxido de carbono. Contudo, ocorre o aumento na emissão de óxidos de Nitrogênio se comparado com o diesel. No entanto, o nível de emissões varia de um motor para outro e depende das condições de operação dele, da qualidade do combustível e do design do motor (HASAN; RAHMAN, 2017).

Nurun et al. (2006) estudaram as emissões de um motor de quatro tempos abastecido com diesel puro e misturas diesel com biodiesel (sendo este último obtido a partir de óleos não comestíveis). Os resultados mostraram que as misturas diesel/biodiesel reduziram as emissões de CO e material particulado quando comparadas ao diesel, mas foi registrado acréscimo nas emissões de NOx. Como nesse ensaio foi utilizado um sistema de recirculação dos gases (EGR), as emissões de NOx para as misturas diesel/biodiesel foram ligeiramente menores que as do diesel. Estes autores concluíram que o uso das misturas diesel/biodiesel com o auxílio do sistema de recirculação contribuiu para a diminuição das emissões.

Rakopoulos et al. (2006) realizaram um estudo experimental para avaliar e comparar várias misturas de ésteres metílicos e óleos in natura com diesel nas proporções 10/90 e 20/80 com o diesel puro, em um motor diesel, na rotação de 2000 rpm em carga média e alta. Foi testada uma grande variedade de misturas de óleos in natura (algodão, soja, girassol, e seus respectivos ésteres metílicos). Nos ensaios foram obtidas as propriedades físico-químicas, consumo específico de combustível, eficiência térmica ao freio, e as emissões de gases. Os resultados de densidade e da viscosidade das misturas dos óleos in natura foram maiores quando comparadas ao diesel puro e aos ésteres metílicos. O número de cetano das

misturas com óleos in natura também mostraram resultados ruins. As emissões das misturas contendo óleo in natura/diesel foram maiores que as do diesel puro, bem como o consumo específico, para as duas condições de cargas. Nas misturas de ésteres metílicos, houve uma pequena redução nas emissões de todos os parâmetros estudados em todas as cargas, exceto as de hidrocarbonetos, que foram maiores que o diesel puro. Os resultados mostraram que as misturas contendo óleo in natura tiveram resultados piores tanto nas propriedades físico-químicas, bem como nas emissões.

Hebbal, Reddy e Rajagopal (2006) estudaram o uso de óleo vegetal não comestível (óleo de cânhamo) para uso como combustível alternativo. Algumas técnicas foram usadas objetivando reduzir a viscosidade do óleo para valores usados em motores diesel. As técnicas usadas pelos pesquisadores foram diluições do óleo com diesel e aquecimento. Os pesquisadores estudaram o desempenho e as características das emissões em cargas variáveis a uma rotação constante de 1500 rpm, comparando os resultados com o diesel puro. Os resultados mostraram que o aumento do diesel no óleo de cânhamo reduziu bastante a viscosidade, mas ainda apresentando valores acima do diesel puro. Os pesquisadores concluíram que misturas com até 25% de óleo de cânhamo no diesel e até 50% com a mistura pré-aquecida, podem ser usadas sem a necessidade de grande alteração mecânica.

Greg Wu, Lin e Chang (2007) estudaram as diferentes emissões e a importância da purificação de combustíveis produzidos por diversos ésteres metílicos derivados de óleos usados na alimentação humana e gordura animal. Os autores observaram que os ésteres metílicos utilizados apresentaram maior densidade, viscosidade, ponto de fulgor e baixo poder calorífico quando comparados ao diesel comum. Nos ensaios em motores diesel, em rotações acima de 1400 rpm, todos os combustíveis ensaiados apresentaram maiores quantidades emitidas de CO₂, NO_x e material particulado, quando comparados ao diesel.

Lin, Greg e Chang (2007) utilizaram óleos de rejeitos de restaurante para produzir biodiesel puro através de transesterificação, sendo este utilizado para preparar misturas de biodiesel/diesel (B20, B50 e B80) com o objetivo de comparar as emissões em um motor diesel operando com biodiesel puro, misturas de biodiesel/diesel e diesel mineral. Os pesquisadores observaram que a mistura B20 produziu a menor concentração de monóxido de carbono em todas as velocidades do motor; a mistura B50 produziu a maior quantidade de CO₂ para todas as rotações

do motor, exceto a 2000 rpm, onde a mistura B20 foi maior. O biodiesel puro e as misturas biodiesel/diesel produziram NO_x maior ao esperado para todas as rotações do motor; a formação de SO₂ mostrou uma tendência crescente com o aumento do percentual de diesel na mistura e o acréscimo da velocidade do motor; e a concentração de material particulado para o biodiesel puro foi superior a do diesel comum. No geral, estes autores concluíram que o B20 e o B50 foram as melhores misturas de combustível testadas no estudo.

Rakopoulos et al. (2008) fizeram uma investigação experimental para avaliar o uso de misturas de ésteres metílicos de girassol e de algodão com diesel em um motor diesel de seis cilindros e injeção direta. As misturas foram preparadas nas proporções de 10/90 e 20/80. Os testes foram realizados com essas misturas e com o motor trabalhando em duas velocidades (1200 e 1500 rpm) e três cargas (baixa, intermediária e alta). Foram avaliados o consumo de combustível, as emissões de fumaça e as emissões de NO_x, CO e hidrocarbonetos totais. Os resultados mostraram que houve acréscimo nas emissões de NO_x e de hidrocarbonetos totais para as misturas de biodiesel quando comparadas ao diesel normal. Mas, as emissões de monóxido de carbono e fumaça foram menores. Quanto aos parâmetros de desempenho, o diesel puro mostrou menor consumo de combustível e maior eficiência térmica.

Candeia et al. (2009) estudaram a influência da concentração de biodiesel nas misturas de diesel/biodiesel com 5%, 15%, 25% e 50% em volume. Para cada mistura, tanto o biodiesel de metanol como de etanol foram investigados. As amostras de biodiesel foram caracterizadas quanto as suas propriedades físico-químicas. Os pesquisadores observaram que os biocombustíveis apresentaram acréscimo no ponto de fulgor, no número de cetano e na viscosidade cinemática, quando comparados ao diesel puro. Ainda com relação às propriedades reológicas, as misturas de biodiesel apresentaram um comportamento similar quando comparadas entre si.

3.4.2. Mistura Ternária Diesel-Biodiesel-Etanol

As misturas de combustíveis que são homogêneas e que contém 3 componentes majoritários diferentes em sua formulação são frequentemente chamadas ternárias. Normalmente, procura-se unir os benefícios de cada um deles

formando outro com propriedades de interesse melhores. O foco desse estudo é a manipulação de misturas com etanol anidro, biodiesel metílico e diesel comercial, onde na Tabela 3.1, adaptado de Martins (2006) apresenta a média das principais propriedades destes combustíveis.

Tabela 3.1. Propriedades dos combustíveis.

	DIESEL	BIODIESEL METÍLICO	ETANOL
Massa Específica kg/m ³	845	875	791
Poder Calorífico kcal/kg	10277	8963	8160
Número de Cetano	48	56	5
Viscosidade mm ² /s	3,5	4,8	1,1

As pesquisas já realizadas sobre a substituição parcial do diesel destinado a motores com misturas diesel-biodiesel-etanol (DBE), tiveram como objetivo principal a identificação e o teste de novos combustíveis alternativos com propriedades similares do diesel comercial, com alto teor de biocombustível adicionado. A base para esses estudos foi que, utilizando misturas de DBE, algumas propriedades do biodiesel e do etanol são mutualmente compensadas, resultando em misturas com propriedades muito similares às do diesel (Barabás; Todorut, 2011).

Prommes, Apanee e Samai (2007) estudaram diferentes misturas diesel/biodiesel/etanol, variando as quantidades de etanol, em diagramas de fases, a diferentes temperaturas, com o objetivo de estudar as propriedades e as emissões destas misturas e compará-las à diesel base. As propriedades estudadas foram: densidade, calor de combustão, número cetano e o ponto de fulgor. Os resultados mostraram que o elevado número de cetano do biodiesel poderia compensar a diminuição do número de cetano causada pela presença do etanol. O aquecimento da mistura contendo valor inferior a 10% de etanol não foi significativamente diferente à diesel base. Com relação às emissões da mistura, foi verificado que o monóxido de carbono e os hidrocarbonetos não queimados reduziram em relação ao diesel. Estes concluíram que a mistura contendo 80% de diesel, 15% biodiesel e 5% etanol foi a mais adequada quanto às propriedades e, também, na redução das emissões.

Park, Youn e Lee (2011) investigaram o efeito de misturas etanol/diesel nas características da combustão e das emissões de um motor diesel de quatro cilindros com sistema de injeção Common-rail. Neste trabalho foram estudadas, também, as características gerais da pulverização, tais como penetração do bico, do ângulo e do cone de injeção, com relação à concentração da mistura de etanol.

Os combustíveis usados foram diesel puro, misturas diesel/etanol/biodiesel nas proporções de (80/10/10 e 70/20/10) e etanol puro. Os resultados mostraram poucas diferenças quanto à injeção e a pulverização dos combustíveis, sendo que o diesel puro teve uma maior penetração. As emissões de NO_x diminuíram quando a proporção de etanol aumentou na mistura. Em relação às emissões de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono, as misturas contendo etanol aumentaram, mas quando a carga do motor foi crescendo as emissões destes gases foram diminuindo.

Dessa forma, as misturas ternárias permitem ter uma maior adição de combustíveis alternativos ao diesel comercial do que as binárias. Ou seja, com elas é possível ter uma maior substituição da parte fóssil da mistura uma vez que há uma maior concentração de combustíveis renováveis, tornando-as mais ecologicamente amigáveis.

3.4.2.1. Estabilidade da Mistura Diesel-Biodiesel-Etanol

Um dos objetivos do uso de misturas ternárias é manter mínima a modificação do motor. Para isso, é necessário que o combustível esteja em um sistema líquido monofásico e homogêneo a nível molecular (SHAHIR et al., 2014).

Para compreender melhor o conceito de estabilidade é necessário entender a diferença entre solubilidade e miscibilidade. Os autores Fernando e Hanna (2004) explicam que apesar desses conceitos parecerem similares eles possuem significados diferentes. A miscibilidade é a formação de uma fase única e homogênea quando duas ou mais fases líquidas são misturadas, independentemente da proporção de uma para a outra. Por outro lado, a solubilidade é a incorporação de material de uma segunda fase a uma solução única e homogênea na primeira fase líquida, quando duas ou mais fases são reunidas, a quantidade de material de uma fase que pode ser incorporada em outra é finita.

A estabilidade das misturas ternárias DBE sofre influência do comportamento de cada um de seus componentes. Conforme Hasan e Rahman (2017), é possível misturar diesel com biodiesel em qualquer concentração. Entretanto, isso não acontece com a adição de etanol que, conforme já visto, é mais suscetível a separação de fase conforme a temperatura e o teor de água da mistura.

Conforme Shahir et al. (2014) o biodiesel presente nas misturas ternárias com diesel, biodiesel e etanol age como um co-solvente. Ele funciona como um agente de ligação através de compatibilidade molecular e de ligação para produzir uma mistura homogênea.

Kwanchareon et al. (2007) investigou a estabilidade de sistemas ternários diesel-biodiesel-etanol em diferentes concentrações dos componentes e em diferentes temperaturas através de diagramas ternários. Eles analisaram misturas compostas por etanol com três purezas distintas (95%, 99,5% e 99,9%) e biodiesel oriundo do óleo de palma. Cada um dos combustíveis variou de 0% a 100% com um incremento de 10%. Depois de manipulados os tratamentos foram deixados em repouso em temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C a fim de verificar a estabilidade física.

De acordo com esses autores, a pureza do etanol influencia na estabilidade dos sistemas ternários. A mistura com etanol hidratado, que possui 5% de água em sua composição, apresentou-se em duas fases, parte polar e parte não polar, após 7 dias. Neste caso, parece que a adição de biodiesel não melhora solubilidade do diesel e desse álcool. Isso pode ser explicado pela maior quantidade de água presente na mistura. Isso faz com que ela aumente a parte polar da molécula da mistura devido a sua alta polaridade. Com isso, o diesel, que é não polar, não é compatível com esse tipo de álcool. A solubilidade do par diesel-biodiesel não é limitada, assim como o par biodiesel-etanol. Isso por ser verificado na Figura 3.4, onde as circunferências verdes representam uma única fase, enquanto os triângulos vermelhos representam os combustíveis em duas fases. Quando analisado as misturas que contém etanol anidro, 99,5 e 99,9% de pureza, os autores verificaram que todos os tratamentos estavam em uma única fase. Isso porque ambas composições apresentam uma menor quantidade de água. A Figura 3.5 mostra o resultado dessa análise.

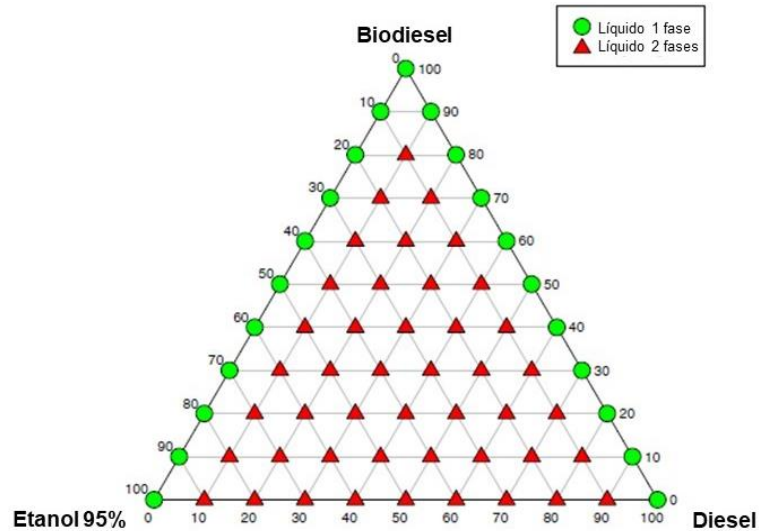


Figura 3.4. Diagrama ternário DBE95% a temperatura ambiente.

Fonte: Adaptado de KWANCHAREON et al., 2007.

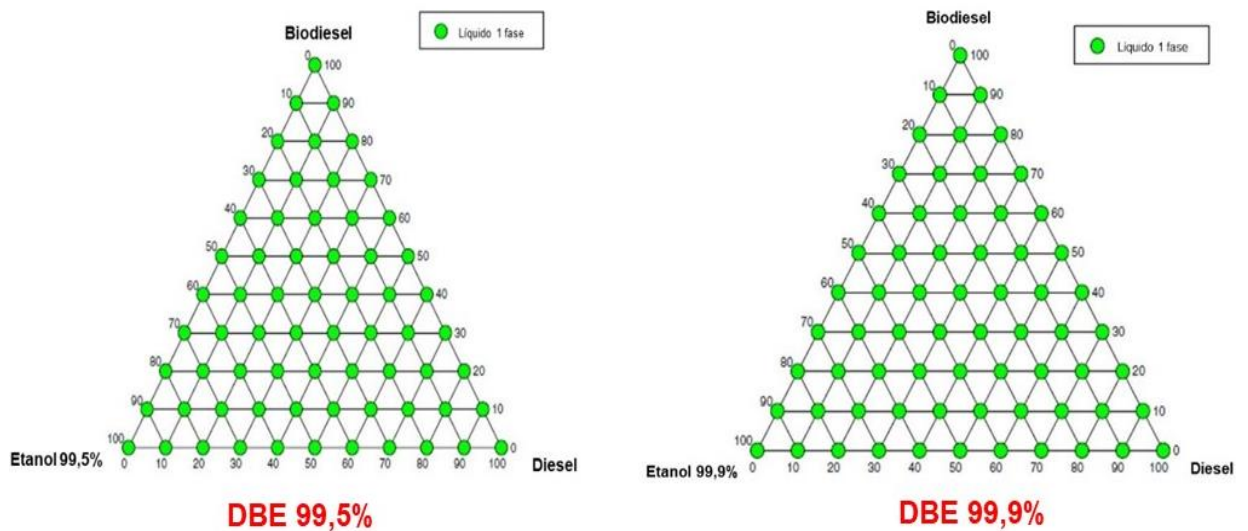


Figura 3.5. Diagrama ternário DBE99,5% e DBE99,9% a temperatura ambiente.

Fonte: Adaptado de KWANCHAREON et al., 2007.

Quanto a influência da temperatura, os autores notaram que para 10°C os sistemas ternários estavam em uma fase num estado cristalino. Porém, com o aumento de temperatura para 20°C, todos esses tratamentos ternários passaram para uma fase de líquido claro, como pode ser visto na Figura 3.6.

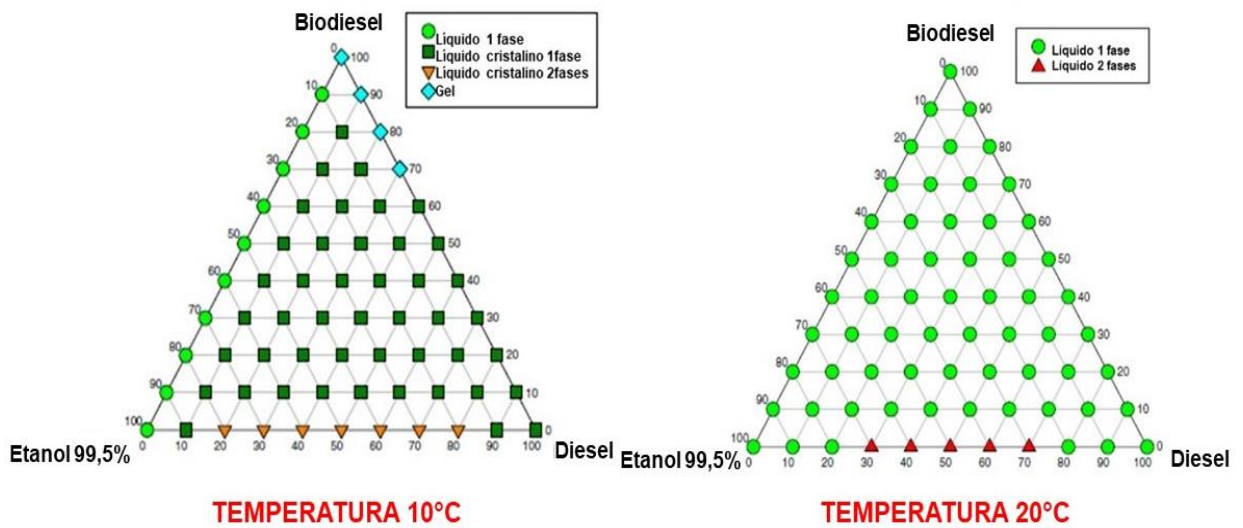


Figura 3.6. Diagrama ternário DBE99,5% a 10°C e a 20°C.

Fonte: Adaptado de KWANCHAREON et al., 2007.

Com temperaturas mais elevadas todas as misturas passaram a ser líquidas claras em uma fase. Esse comportamento foi verificado para todos os sistemas, incluindo os binários. Esses resultados, que podem ser vistos na Figura 3.7, reforçam a ideia que uma temperatura mais elevada favorece a solubilidade dos componentes. Esses resultados também foram obtidos por Fernando e Hanna (2004). Eles afirmam que a adição do biodiesel ao diesel-etanol (DE) faz com que esta mistura fique em uma fase em menores temperaturas.

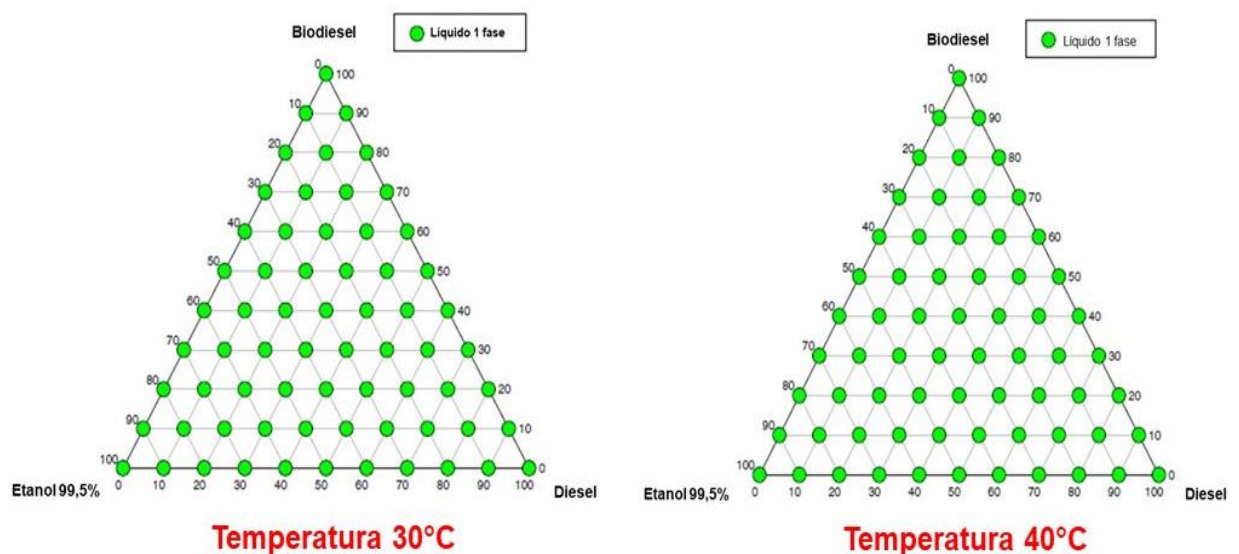


Figura 3.7. Diagrama ternário DBE99,5% a 30 °C e 40°C.

Fonte: Adaptado de KWANCHAREON et al., 2007.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os equipamentos, bem como a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho.

4.1. Análise da Solubilidade nas Misturas

O estudo inicial da estabilidade das misturas compostas por diesel, biodiesel e etanol teve como propósito avaliar a interação entre esses combustíveis a fim de selecionar algumas misturas para testes de desempenho do motor. Foram manipuladas 08 misturas ternárias com diesel B S10 e diferentes concentrações e tipos de etanol, anidro e hidratado, e biodiesel. As misturas S10B8E2, S10B8E5, S10B8E8, S10B8E11, S10B8Eh2, S10B8Eh5, S10B8Eh8 e S10B8Eh11 foram avaliadas juntamente com o diesel comercial S10, totalizando 09 misturas em análise.

A verificação da solubilização das misturas foi visual e, se demonstra eficaz pois no caso do motor utilizado para desenvolver os testes possuir sistema de armazenamento de combustível com recirculação, sendo que, uma parte do combustível é debitada pela bomba e consumida e o restante retorna ao reservatório (tanque), favorecendo a permanência da mistura em uma única fase. O volume de combustível, tanto consumido como retornado, varia proporcionalmente conforme o consumo no motor, sendo que quanto maior a carga aplicada ao gerador, mantendo a rotação constante, menor será o volume retornado ao reservatório.

Quanto maior a concentração de etanol hidratado na mistura menor transparência elas apresentavam, sendo que todas as misturas com etanol anidro permaneceram em uma fase com transparência inalterada. Nos estudos de Iacono (2017), quando as misturas ternárias sofriam incremento de 1% de etanol anidro ocorria o clareamento delas, fato que não foi notado nesse trabalho. Por sua vez, a

família com 11% de etanol apresentou as menores transparências dentre as estudadas.

O teor de biodiesel apresenta importância pois possui ação de co-solvente, que atua como um agente de ligação através de compatibilidade molecular favorecendo a mistura homogênea (SHAHIR et al., 2014). Esse estudo também foi aprofundado e confirmado por Fernando e Hanna (2004).

As misturas S10B8Eh8 e S10B8Eh11 foram consideradas inviáveis para os testes no motor, uma vez que apresentaram duas fases. A mistura S10B8Eh5 apesar de apresentar pouca transparência não pode se verificar separação de fases, portanto pode ser usada nos testes já que o motor possui sistema de recirculação do combustível não utilizado ao tanque de combustível.

Segundo de Paulo (2019), estudos realizados pela Fundação de Ciência (CIENTEC), indicaram que existe miscibilidade completa, a temperatura ambiente (20°C), entre as misturas ternária diesel-biodiesel-etanol, DB8Eh5 e DB8Eh10.

A aplicação direta em motores de combustão interna dessas misturas é viável uma vez elas atendem o requisito, estipulado por Shahir e colaboradores (2014), de ser um sistema líquido monofásico e homogêneo, ademais, a aparência desses tratamentos estudados foi semelhante ao diesel comercial.

4.2. Combustíveis e Misturas

Os óleos diesel utilizados nos ensaios foram o diesel B S10 e o B S500, ambos compostos de 10% de biodiesel (DB10), encontrados em postos das redes de abastecimento Petrobras e aprovados pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em dezembro de 2016, que estipulou que, a partir de 01/03/2018 são constituídos de 10% de biodiesel em sua composição (B10). Optou-se pela utilização de misturas com percentuais em volume de 10, 20, 30, 40 e 50 de biodiesel, todas com 2% de etanol anidro.

O teor de etanol teve como base o estudo de Barabás e Todorut (2011), onde eles afirmam que somente as misturas ternárias com no máximo 5% de etanol anidro apresentaram resultados satisfatórios de estabilidade e desempenho do motor, já os estudo de Moretti (2013), justificam que 3% é a maior porcentagem de etanol que pode ser usada a fim de manter as propriedades da mistura dentro dos padrões aceitáveis.

Foram realizados testes preliminares no grupo motor-gerador estudado, utilizando diferentes porcentagens de etanol, 11, 8, 5, 4, 3 e 2%, onde com estes, não apresentaram funcionamento estável, com sucessivas quedas na rotação e excesso de fumaça. O percentual de 2% adicionado de etanol anidro apresentou funcionamento regular e favorece o estudo de uma possível mistura que possa vir a ser comercializada futuramente, bem como aconteceu com o biodiesel em 2008, que foi implantado em 2%. As nomenclaturas das misturas foram constituídas das seguintes formulações:

Misturas com diesel B S10:

- S10: 90% de óleo diesel, 10% de biodiesel e 0% de etanol anidro.
- S10B10E2: 88% de óleo diesel, 10% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S10B20E2: 78% de óleo diesel, 20% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S10B30E2: 68% de óleo diesel, 30% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S10B40E2: 58% de óleo diesel, 40% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S10B50E2: 48% de óleo diesel, 50% de biodiesel e 2% de etanol anidro.

Misturas com diesel B S500:

- S500: 90% de óleo diesel, 10% de biodiesel e 0% de etanol anidro.
- S500B10E2: 88% de óleo diesel, 10% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S500B20E2: 78% de óleo diesel, 20% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S500B30E2: 68% de óleo diesel, 30% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S500B40E2: 58% de óleo diesel, 40% de biodiesel e 2% de etanol anidro.
- S500B50E2: 48% de óleo diesel, 50% de biodiesel e 2% de etanol anidro.

4.3. Grupo Motor-Gerador

Para os testes foi utilizado um grupo motor-gerador (GMG) da marca Branco, modelo BD15000E3 G2, onde o motor trabalha com potência contínua de 13,2 kW (18 CV) e o gerador com potência nominal de 13,2 kVA, ambos a 3600 rpm, conforme especificações do fabricante, que podem ser visualizadas nas Tabelas 4.1 e 4.2. Dados de torque máximo nominal não foram fornecidos no manual técnico do motor.

Conforme informação fornecida pelo fabricante, a engenharia de construção deste motor permite utilizar como combustível o diesel B S10 ou o B S500.

Tabela 4.1. Especificações do motor.

Tipo	Motor 2 cilindros em "V" (90° graus); refrigerado a ar
Potência máxima	22cv a 3600rpm
Potência contínua	18cv a 3600rpm
Cilindrada	870 cm ³
Ignição	Injeção Diesel
Diâmetro x Curso	88 x 72 mm
Relação Consumo de Combustível	298/320 (g/cv.h)
Quantidade de óleo	2,1 L
Folga de Válvulas	Admissão = 0,10mm / Descarga = 0,15 mm

Fonte: Branco (2018).

Tabela 4.2. Especificações do gerador.

Gerador	BD-12.000E	BD-15.0000E3
Motor	BD-22.0	
Frequência (Hz)	50 ou 60	
Potência nominal (kVA)	12	13,2
Potência máxima (kVA)	12,5	14,0
Tensão (V)	220	220 ou 380
Tensão tomada auxiliar (V)	-	110 ou 220
Corrente nominal (A)	50	18,3
Fase	Monofásico	Trifásico
Fator de potência (cos α)	0,9 (lag)	0,8 (lag)
N.º Pólo	2	
Excitação	Escova, Excitação auto-tensão constante (com AVR)	
Carregador de bateria	12V, 10A	
Peso líquido (kg)	215	
Capacidade do tanque (L)	20	
Dimensões (C x L x A) mm	870 x 630 x 700	

* cos α = 0,8

Fonte: Branco (2018).

4.4. Banco de Resistências

Para gerar curvas características do motor é necessário impor ao seu eixo um momento externo resistente de mesmo valor que o produzido pelo motor. Esse efeito pode ser obtido com o uso de um freio denominado freio dinamométrico ou dinamômetro. O dinamômetro de corrente alternada, gerador, é indicado para trabalhos de pesquisa, pois proporciona excelente controle das variáveis, potência, corrente, tensão e rotação.

Conforme Heywood (1988), grupo motor-gerador é um equipamento que possui um motor de combustão interna acoplado a um gerador de energia elétrica. O motor de combustão interna converte a energia química proveniente da combustão interna em energia mecânica, e o transformador acoplado no motor converte energia mecânica em energia elétrica.

Com finalidade de reproduzir as condições reais de funcionamento do grupo gerador, foi construído um banco de resistências com a intenção de aplicar diferentes e controladas cargas de consumo. A carga resistiva, ou simplesmente banco de cargas, é um sistema que proporciona um meio de se acoplar cargas elétricas resistivas a geradores para fins de testes de funcionamento. As configurações podem ser variadas de forma a atender a tensões tanto em ligação estrela como em ligações triângulo, sendo a estrela a escolhida para montagem do banco para utilização neste trabalho.

Este banco é composto por 12 resistências, blindadas utilizadas em fornos elétricos domésticos, de 1000W e 220V cada uma. Foram instaladas de forma que fosse possível selecionar a carga elétrica para consumo de energia do gerador separadas de 3 em 3 resistências. Os quatro conjuntos de cargas resistivas (CH2, CH3, CH4 e CH5) estão ligados ao barramento trifásico do gerador, com ligação geral pelo disjuntor (CH1), em tipologia estrela (220V). Foram montados circuitos elétricos, onde ao acionar um disjuntor (CH2), energiza-se 3 resistências de 1000W (25% da potência nominal do gerador); permanecendo o primeiro disjuntor acionado, acionando o segundo disjuntor (CH3) acrescenta-se mais 3000W (50%), com o terceiro disjuntor (CH4) adiciona-se mais 3000W (75%) e com o acionamento do quarto disjuntor (CH5), finalizando a adição de mais 3000W (100%), totalizando 12000W. Toda esta energia é suprida pelo gerador que possui capacidade nominal de 13,2kVA e 18,3A.

O diagrama elétrico do esquema de acionamento dos bancos de cargas resistivas pode ser visualizado na Figura 4.1.

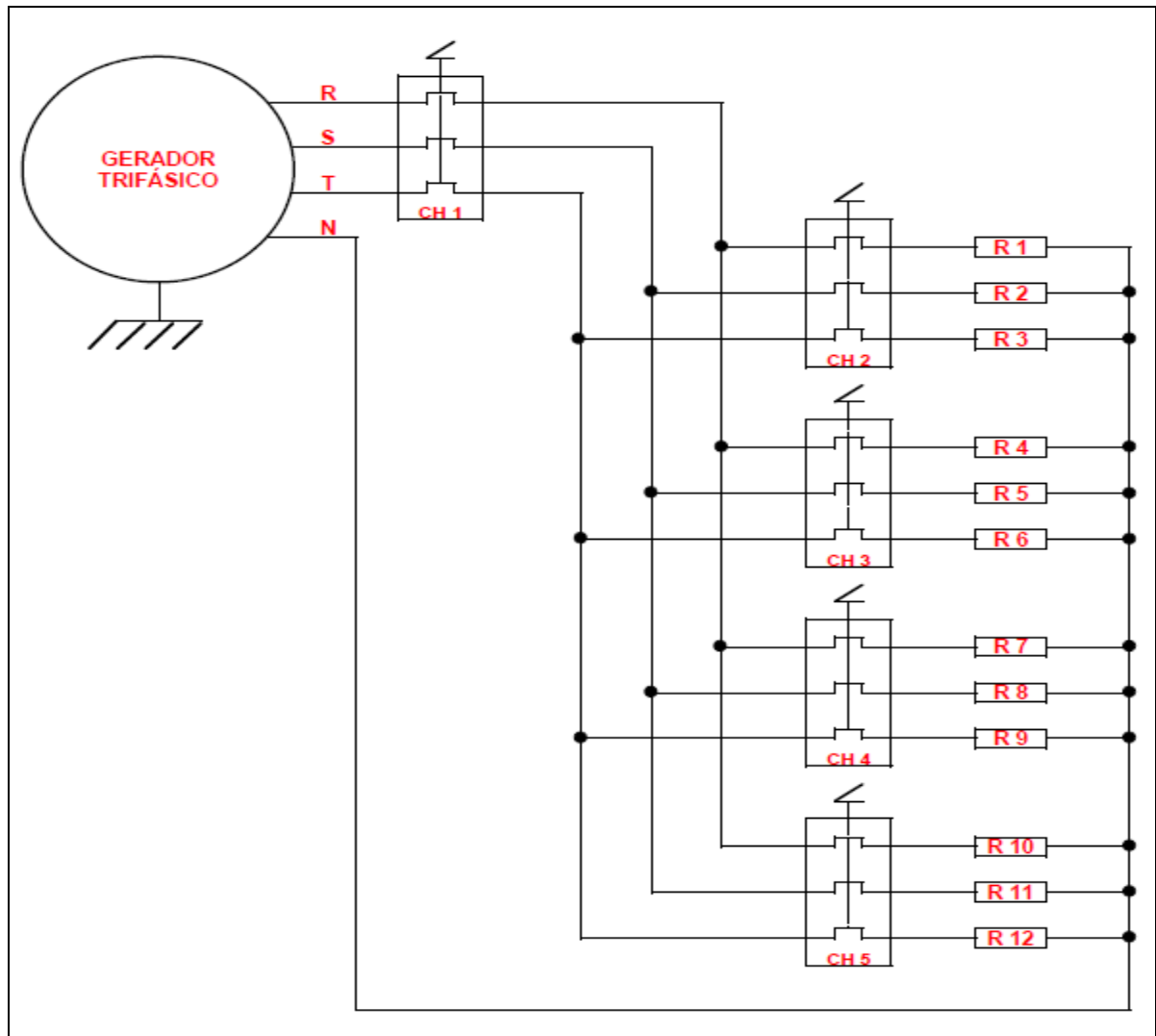


Figura 4.1. Diagrama elétrico do banco de cargas resistivas.

Fonte: Do autor (2018).

4.5. Aquisição dos Dados

Foram definidos os meios e equipamentos para a coleta dos dados assim como a viabilidade dessa aparelhagem, avaliando nesta fase a utilização de um sistema que efetuasse a medição, armazenasse e apresentasse os valores de forma contínua, permitindo melhor controle das variáveis. Para a aquisição de dados foi construído um sistema baseado no microcontrolador ATMEGA 2560 montado em uma placa denominada como Arduíno MEGA®, esta escolha se deu devido a facilidade de integração de sensores e sua respectiva programação em C++, uma linguagem orientada a objetos permitindo uma implementação mais rápida e fácil de periféricos, também justifica para evitar os custos decorrentes do projeto e a

fabricação de uma placa dedicada exclusivamente a esse projeto. O programa com a inicialização dos sensores, suas leituras e envio via USB se encontra no Anexo C e o seu fluxograma pode ser visto na Figura 4.2.

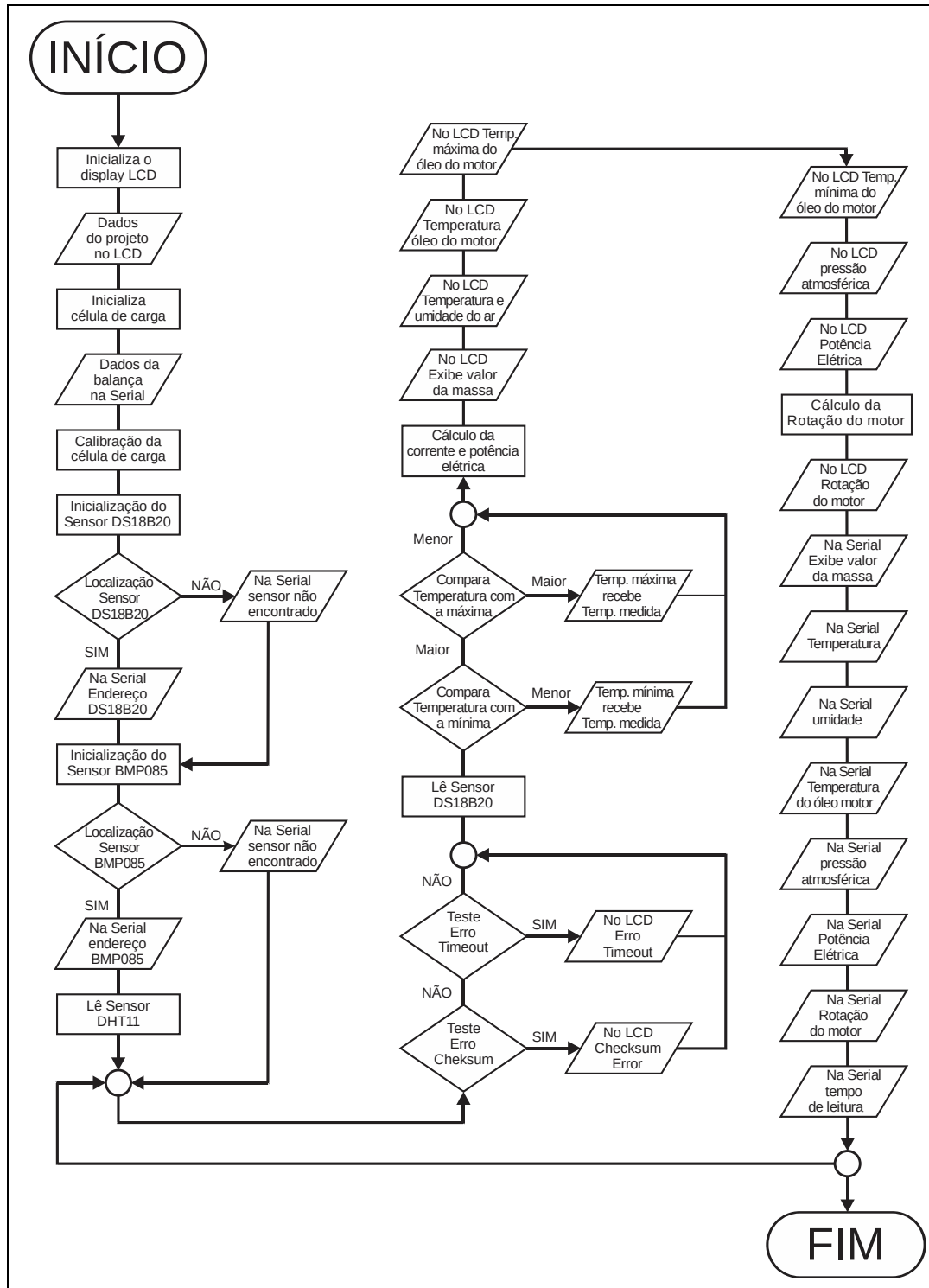


Figura 4.2. Fluxograma do programa.

Fonte: Do autor (2019).

A escolha recaiu sobre o ATMEGA 2560 pelo maior número de pinos de I/Os (Inputs/Outputs) e A/Ds (Analog/digital), permitindo caso fosse necessário um maior número de sensores e a sua memória ser de 256K.

O sistema não é um data logger pois não armazena dados, mas quando integrado a um computador o microcontrolador envia texto via porta USB contendo todas as informações requeridas com um separador adequado, sendo posteriormente convertido em tabela e tratado em planilha eletrônica como o Excel para posterior discussão dos dados.

Os dados monitorados, seus sensores e suas precisões extraídas das respectivas especificações do fabricante são os seguintes:

- Temperatura de óleo do motor, utilizando o sensor DS18B20, com faixa de medição de temperatura entre -55 e 125°C, precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ entre -10 e 85°C, fabricado pela Dallas Semiconductors.
- Temperatura ambiente e umidade relativa do ar, utilizando o sensor DHT22, com faixa de medição de temperatura entre -40 e 80°C, precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. A faixa de medição de umidade relativa é de 0 a 100%, com precisão de $\pm 2\%$, fabricado pela Aosong Electronics.
- Pressão atmosférica, utilizando o sensor BMP085, com faixa de medição entre 30 e 110 KPa, com precisão de $\pm 0,012\text{kPa}$ fabricado pela Bosch.
- Potência elétrica fornecida pelo gerador, utilizando o sensor de corrente SCT013 50A, com faixa de medição entre 0 e 50A, com precisão de corrente de $\pm 1\%$, fabricado pela YHDC.
- Consumo de combustível em massa, através do conjunto de uma célula de carga com fundo de escala de 20 Kg reaproveitada de uma balança da marca Micheletti, ligada ao amplificador de instrumentação HX-711 com precisão de 0,02%, fabricado pela Avia Semiconductor.
- Monitoramento da rotação do motor, utilizando um sensor de rotação indutivo PNP modelo I12-4dpc fabricado pela Metaltex, interligado a um conversor frequência/tensão, construído com o CI LM2917 com erro de linearidade na conversão em torno de 0,3% da National Semiconductor.

Os respectivos sensores e sua interligação com o microcontrolador podem ser vistos no diagrama de blocos na Figura 4.3.

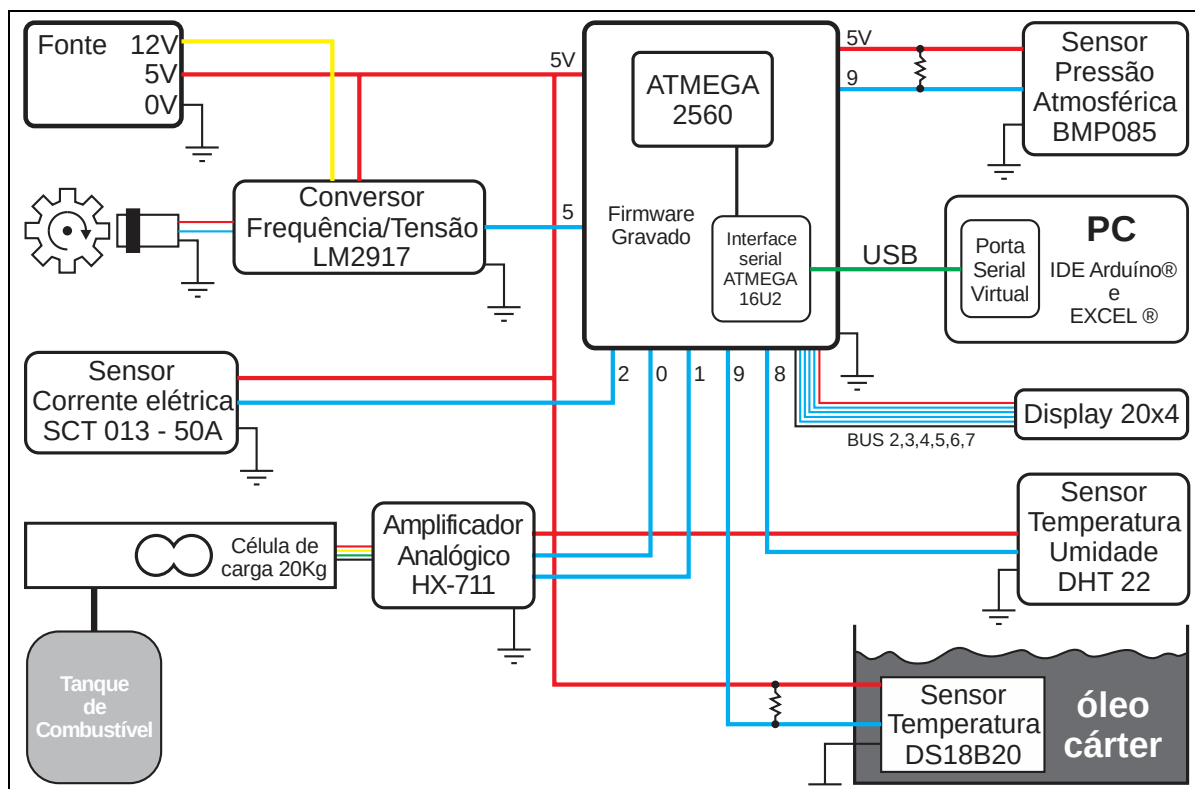


Figura 4.3. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

Fonte: Do autor (2019).

Para a medição de rotação foi escolhida uma solução simples da indústria automotiva com o uso do conversor frequência-tensão LM2917, essa opção foi justificada pela baixa confiabilidade da base de tempo compartilhada entre os timers e contadores do ATMEGA 2560, que resulta em oscilação na leitura direta da frequência gerada do trem de pulsos gerado pelo do sensor indutivo. Para essa leitura foi montado o circuito sugerido pelo fabricante em seu datasheet.

4.6. Local da Realização dos Ensaios

Os ensaios práticos foram realizados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, campus Passo Fundo, onde foi destinado um ambiente apropriado para o desenvolvimento dos testes, sendo este afastado dos demais prédios de ensino, devido a questões de alto nível de ruído e segurança, pois durante os testes, as resistências elétricas chegam a altas temperaturas. Este ambiente foi denominado como Laboratório de Motores de Combustão Interna, sendo utilizado em disciplinas e projetos de pesquisas dos cursos Técnico em

Mecânica e Engenharia Mecânica do Instituto. Neste ambiente foi instalado o grupo motor-gerador com tubulação direcionando os gases da descarga do motor a combustão para fora da sala, um sistema de exaustão para manter qualidade e temperatura ambiente entre 10°C e 40°C, recomendada pela norma NBR ISO 1585, o equipamento para aquisição e armazenamento dos dados e o banco de resistências para aplicação controlada da carga ao gerador. Este banco de resistências foi construído de forma que permitisse ser deslocado para parte externa do laboratório, para que sua temperatura elevada não influenciasse no funcionamento do motor.

4.7. Metodologia dos Ensaios

Foi desenvolvida uma metodologia própria para realização dos ensaios, sendo esta baseada na norma NBR ISO 1585. Inicialmente foram realizados ensaios e manutenção para verificar as condições dos equipamentos, grupo motor-gerador e aquisição de dados. O grupo motor-gerador, quando adquirido pelo Instituto, tinha poucas horas de utilização (aproximadamente 10 horas), sendo o mesmo utilizado anteriormente em um projeto de pesquisa, utilizando misturas de combustível com até 100% biodiesel. Devido a esta utilização (100% biodiesel) foi realizado alguns procedimentos de manutenção preventiva, tais como substituição do reservatório de combustível, a remoção dos bicos injetores e submetidos a teste e limpeza em empresa especializada, que constatou estarem em perfeitas condições. Foram trocados os filtros de ar, combustível e óleo. Foram realizados testes para garantir a leitura dos sensores e adaptação do sistema de reservatório de combustível, que está acoplado diretamente a uma célula de carga para monitorar o consumo.

As medições das variações do motor foram coletadas mantendo a rotação do motor constante e variando a carga, os valores dessas variáveis foram armazenados no computador. Os testes consistiram em combinar as diferentes misturas de combustíveis a diferentes demandas controladas aplicadas ao gerador por 10 minutos, tempo este utilizado na metodologia de testes por Lempek (2016) e de Paulo (2019), reproduzindo uma condição real de funcionamento. As demandas foram definidas a partir da variação das cargas elétricas aplicadas no gerador, sendo 25%, 50% e 75% da potência nominal, desconsiderando a aplicação de 100% por uma questão de preservar a integridade do grupo-gerador, principalmente do

dispositivo eletrônico AVR, regulador automático e tensão, onde o mesmo foi danificado em testes preliminares com alto teor de etanol, devido e consecutivas queda e estabilização da rotação. A metodologia utilizada foi desenvolvida a partir de testes preliminares que indicaram aumento progressivo da temperatura relacionado com o aumento da potência. Este acompanhamento foi realizado a partir da análise da temperatura do óleo.

Para determinar o parâmetro potência, foi monitorado a corrente elétrica de saída do gerador, considerando constante o valor da tensão (220V). Isso torna possível determinar a potência com a medição da corrente através do produto entre a corrente e a tensão.

O parâmetro torque possui ligação direta com a rotação e com a potência. Ou seja, se considerar a potência medida na saída do gerador como a potência desenvolvida pelo motor, sem considerar as perdas, é possível encontrar o torque uma vez que a rotação é coletada.

Cada mistura foi ensaiada 3 vezes, esta tréplica foi realizada de forma sequencial, para uma mesma mistura, objetivando assim monitorar o grupo motor-gerador em condições idênticas de operação. Os ensaios seguiram os seguintes passo-a-passo para todas as misturas com diesel S10 e S500.

Etapas para realização dos testes:

1. Preparar misturas combustíveis (4 litros cada);
2. Verificar óleo / cabos / bateria do motor;
3. Abastecer reservatório de combustível;
4. Ligar motor / computador / aquisição de dados;
5. Aquecer motor em baixa rotação por 300 segundos (2000 rpm);
6. Estabilizar em rotação máxima (3600 rpm) até atingir a temperatura de óleo 30°C, temperatura esta escolhida a partir de testes de longa duração, onde foi possível identificar as temperaturas de estabilização térmica.
7. Zerar aquisição de dados;
8. Ensaios de 600 segundos com aplicação de 0% da carga elétrica nominal do gerador;
9. Ensaios de 600 segundos com aplicação de 25% da carga elétrica nominal do gerador (3000W);
10. Ensaios de 600 segundos com aplicação de 50% da carga elétrica nominal do gerador (6000W);

11. Ensaios de 600 segundos com aplicação de 75% da carga elétrica nominal do gerador (9000W);
12. Salvar os valores da aquisição de dados;
13. Baixar a rotação para 2000rpm permanecendo por 120 segundos e desligar motor;
14. Retirar combustível restante do reservatório;
15. Sangrar o sistema de alimentação de combustível (mangueira e filtro);
16. Esperar a temperatura do óleo baixar de 30°C.
17. Repetir a partir do passo 1.

A visão global dos equipamentos pode ser visualizada na Figura 4.4, onde é possível observar todos os equipamentos a partir do diagrama de blocos representativo da instalação do sistema de ensaios.

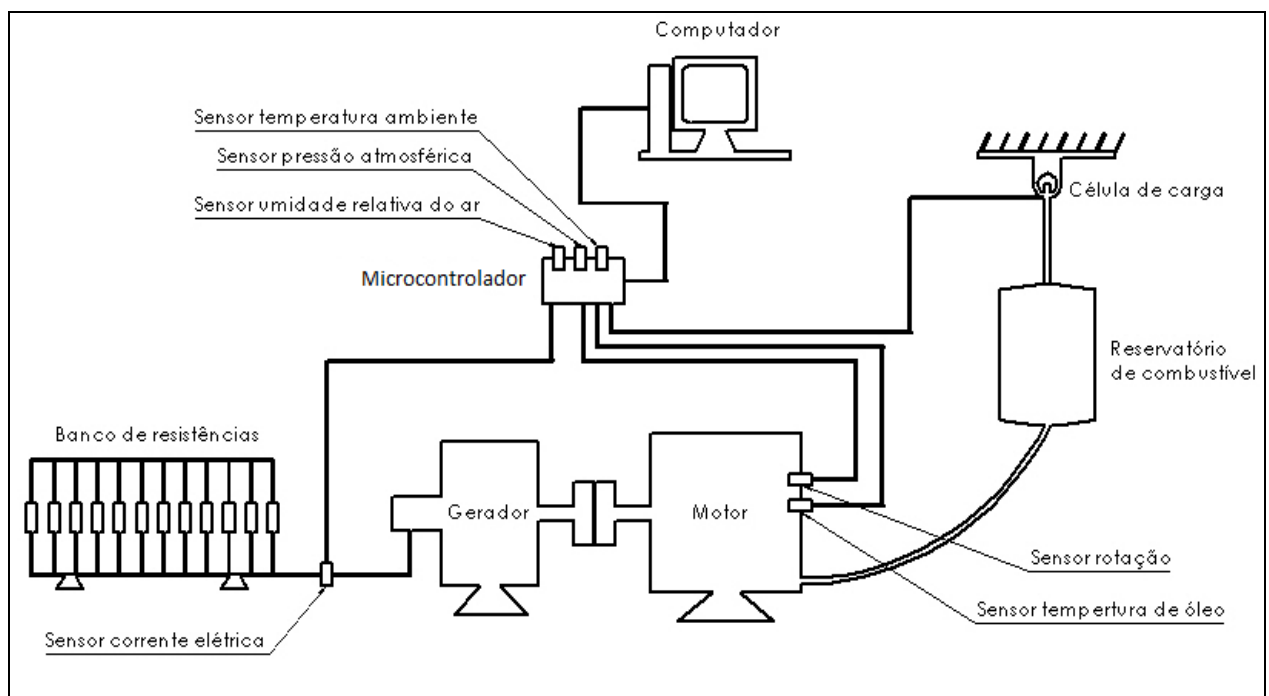


Figura 4.4. Diagrama esquemático do sistema de testes.

Fonte: Do autor (2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico estão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados para o cumprimento dos objetivos propostos inicialmente neste trabalho.

5.1. Ensaio de Longa Duração

Após o término das instalações, tanto predial, equipamento e instrumentação, por se tratar de uma máquina térmica, para realização da coleta dos dados, é importante que se conheça as variações da temperatura no sistema, fator este de influência direta no desempenho do motor. A necessidade da realização deste teste surgiu para adquirir maior conhecimento do comportamento térmico do conjunto, que como particularidade, utiliza arrefecimento a ar por meio de dois ventiladores, um em cada extremidade, captando ar ambiente e o direcionando para seu interior. O acompanhamento do comportamento das temperaturas foi realizado a partir da análise das temperaturas ambiente e do óleo do motor.

O ensaio teve duração de 2 horas e 30 minutos, permanecendo 30 minutos sem geração de energia e, posteriormente 30 minutos em 25%, 50%, 75% e 100% da potência nominal do gerador. Neste ensaio o motor foi abastecido com diesel S10, sendo as condições ambientais iniciais: temperatura ambiente 12,7°C, umidade 56,7%, pressão atmosférica 93,512 KPa.

Pode-se observar na Figura 5.1, o comportamento da temperatura do óleo nas diferentes potências que, devido ao arrefecimento possuir fluxo constante de ar e à rotação ser também mantida constante, as estabilidades térmicas, em cada faixa de potência, tendem a serem atingidas com diferentes temperaturas, variando progressivamente com o aumento da potência. Na condição sem gerar energia (0W), a temperatura do óleo estabilizou-se com aproximadamente 1500 segundos em 32°C. Aplicando-se 25% de carga ao gerador, 3000W, a temperatura do óleo

estabilizou-se em 35°C em torno de 3600 segundos. Aplicando-se 50% de carga, 6000W, a temperatura do óleo estabilizou-se em 38°C com 5000 segundos. Aplicando-se 75% de carga, 9000W, a temperatura do óleo estabilizou-se em 42°C com 7000 segundos. Aplicando-se 100% de carga, 1200W, a temperatura do óleo estabilizou-se em 45°C em 8600 segundos. A Figura 5.1, apresenta a relação da variação na temperatura do óleo com as diferentes cargas aplicadas.

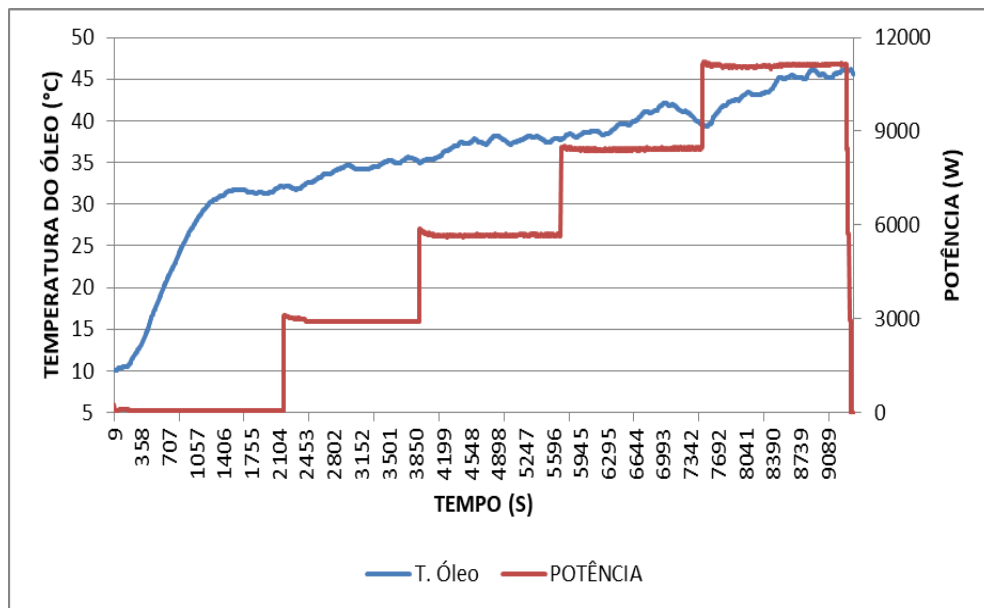


Figura 5.1. Relação temperatura x potência.

A partir da análise dos dados de rotação em rpm, pode-se apontar uma pequena redução do rpm com a elevação da carga. O rpm médio na carga de 25% foi 3649, com desvio padrão de ± 70 rpm, o maior desvio padrão em relação a média das rotações em comparado as demais cargas, em 50% de 3637 ± 11 rpm, em 75% de 3605 ± 11 rpm e quando aplicado carga máxima 100% foi de 3569 ± 23 rpm. A média da rotação sem carga não foi considerada, pois foi nesta faixa onde ocorreu o ajuste no acelerador, para o motor iniciar a operação em aproximadamente 3600 rpm. Os dados das condições ambientais coletados estão apresentados na Figura 5.2, onde apresenta uma redução da umidade relativa com o aumento da temperatura ambiente.

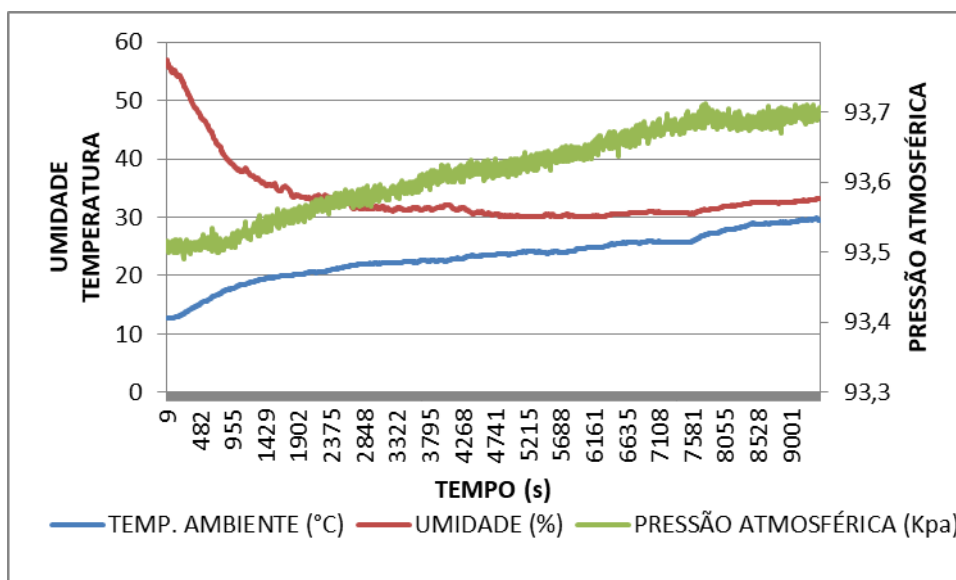


Figura 5.2. Relação entre: temperatura ambiente, umidade, pressão atmosférica.

5.2. Ensaios de Adição Máxima de Etanol

Com a finalidade de se obter desempenho e comportamento semelhante a quando o grupo motor-gerador é abastecido com diesel comercial, foram realizados ensaios para identificar o percentual máximo de adição de etanol no diesel comercial S10 e S500. Os percentuais testados foram: 11, 8, 5, 4, 3 e 2%, sendo que apenas com 2% apresentou comportamento regular, sem variação na rotação e excesso de fumaça.

A descrição do ensaio com adição de 5% de etanol anidro em volume será apresentado considerando o procedimento e resultado semelhante as demais adições de etanol, com exceção de 2%. O motor apresentou comportamento instável mesmo sem aplicação de carga, havendo constantes quedas na rotação e consequente aumento de fumaça, está de coloração branca. Ao passar para 25% da potência nominal do gerador (3000W), o motor não manteve a rotação, caindo até próximo de apagar, quando se retirou a carga e o motor retornou para rotação normal, como pode ser visto na Figura 5.3.

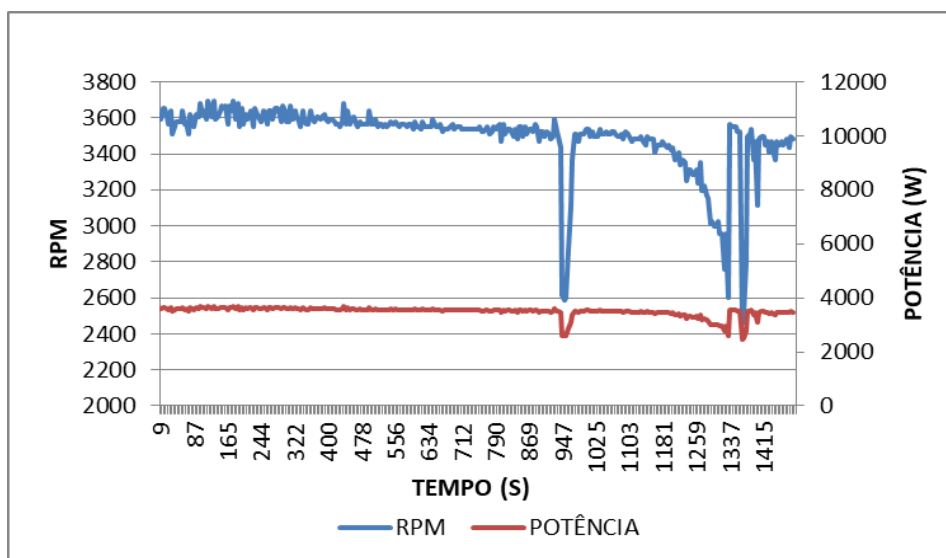


Figura 5.3. RPM instável com adição de 5% de etanol.

Com este ensaio foi possível identificar que a adição de 5% de etanol, se torna inaplicável em 25% da sua capacidade de geração de energia neste grupo motor-gerador, utilizando as configurações originais de fábrica, configurações estas apresentadas no Manual de Serviço do produto, que indica o ponto de injeção de combustível, altura dos bicos e pressão de abertura dos bicos.

Devido a esta limitação na utilização de porcentagens maiores que 2% de etanol, com a finalidade de identificar possível alteração na regulação original do fabricante, foram realizados testes de alteração no ponto de injeção, alterando a altura da bomba injetora em relação ao eixo excêntrico que comprime o combustível, tanto o adiantamento, reduzindo a distância a partir da retirada de calços sob a bomba, como o retardo, aumentando esta distância, porém em ambas as situações não foram verificadas mudanças no funcionamento.

5.3. Análise da Temperatura do Óleo

A temperatura do óleo lubrificante foi um parâmetro do funcionamento do GMG monitorado, esse estudo buscou avaliar o comportamento dos processos de combustão das misturas ensaiadas através da influência do calor gerado pela queima de combustível na temperatura do óleo do motor.

De acordo com Brunetti (2012), o sistema de arrefecimento do motor é responsável pela manutenção das temperaturas internas em um nível não prejudicial

aos componentes do motor. Ou seja, ocorre a transferência do calor gerado pelo processo de combustão das partes internas para o meio arrefecedor, que geralmente é água, ar ou óleo. Isso acontece conforme a queima dos combustíveis e as condições de funcionamento do motor. Neste GMG, o óleo lubrificante se desloca de forma pressurizada através das galerias, tendo como funções: a lubrificação e o arrefecimento interno, onde entra em contato com as partes aquecidas, absorve calor e transfere para o meio ambiente, já em motores com arrefecimento à água, a temperatura é controlada em todos os regimes de trabalho pela ação da válvula termostática e ventoinha.

O sistema de arrefecimento de geradores é de grande importância na fase de projeto, pois o mesmo permanece em funcionamento por longos períodos, muitas vezes em ambiente com pouca ventilação e em carga próxima da nominal máxima.

A eficiência deste sistema de arrefecimento a ar, se dá por meio de 2 ventiladores, que direcionam e forçam uma corrente paralela de ar entre o meio ambiente e o motor, um acoplado na extremidade do eixo do motor e outro na do gerador, dimensionados para trabalhar com rotação constante (3600 rpm), as temperaturas do motor variam progressivamente com as cargas, não existindo dispositivo para controle. A posição do sensor durante a tomada de medidas de temperatura do óleo permaneceu fixa para que fosse avaliado sempre as mesmas condições, independentemente da mistura ensaiada.

As condições iniciais da temperatura do óleo do motor foram as mesmas, uma vez que a variação dessa grandeza no início dos testes foi praticamente nula, diferença menor de 1°C. Após o início dos ensaios, com o passar do tempo, ocorre o aumento na temperatura do óleo do motor para todas as misturas. Esse incremento é natural da transferência do calor gerado pela queima dos combustíveis para o fluido de arrefecimento do motor, óleo.

O modelo comportamental da variação da temperatura do óleo para as misturas ensaiadas não é definido. Não é possível encontrar uma relação válida para todas elas, exceto o padrão de crescimento delas se comparado com o aumento de potência.

Com exceção da mistura S500E2, as misturas com ausência de etanol, S10 e S500, atingiram as maiores temperaturas de óleo. As misturas com maior teor de biodiesel apresentaram aumento progressivo nos valores da temperatura do óleo do motor se comparadas com os outros tratamentos, principalmente em cargas mais

elevadas. Essas misturas apresentam número de cetano mais elevado que o diesel (BARABÁS et al., 2010), essa propriedade está relacionada com a qualidade de queima do combustível, ou seja, quanto maior o valor dela mais rápido acontece o processo de combustão e menor é o atraso de ignição (SHAHIR et al., 2014). Como o motor está ajustado para trabalhar com combustíveis com maior atraso de ignição, a combustão acontece antes do ideal e isso faz com que o calor gerado seja transferido para o óleo e componentes do motor. O elevado calor latente de vaporização do etanol (KUMAR et al., 2006) e o menor número de cetano (SHAHIR et al., 2014) contribuem para as temperaturas de queima mais baixas das misturas ternárias se comparado as misturas binárias diesel-biodiesel. Ocorre um equilíbrio das propriedades do biodiesel e do etanol de forma que o processo de combustão seja similar ao do diesel sofrendo menores influências da regulação da injeção de combustível do motor.

Para a avaliação mais aprofundada do comportamento da temperatura do óleo do motor para cada carga testada plotou-se dois gráficos, Figura 5.4 com diesel S10 e Figura 5.5 com diesel S500, ambos com as médias das temperaturas apresentadas por cada tratamento.

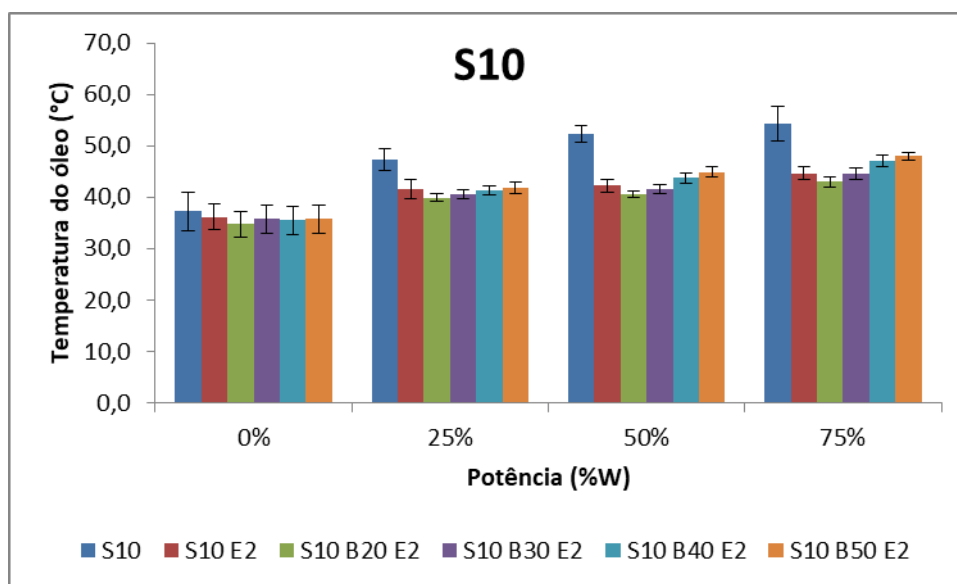


Figura 5.4. Comparação entre as médias das temperaturas do óleo por potência das misturas com S10.

Na Figura 5.4, é notória, em todas as potências estudadas, o aumento das temperaturas com o aumento do percentual de biodiesel, apresentando um padrão de crescimento.

Pode-se observar na mistura S500E2 um comportamento diferenciado com relação as demais temperaturas, sendo que esta apresenta as maiores médias e desvio padrão em todas as potências. Quando este comportamento é comparado com os de consumo desta mistura, o qual é geralmente maior, fica perceptível que com o aumento do teor de biodiesel as misturas utilizando etanol ficam mais equilibradas, conforme pode ser observado na Figura 5.5.

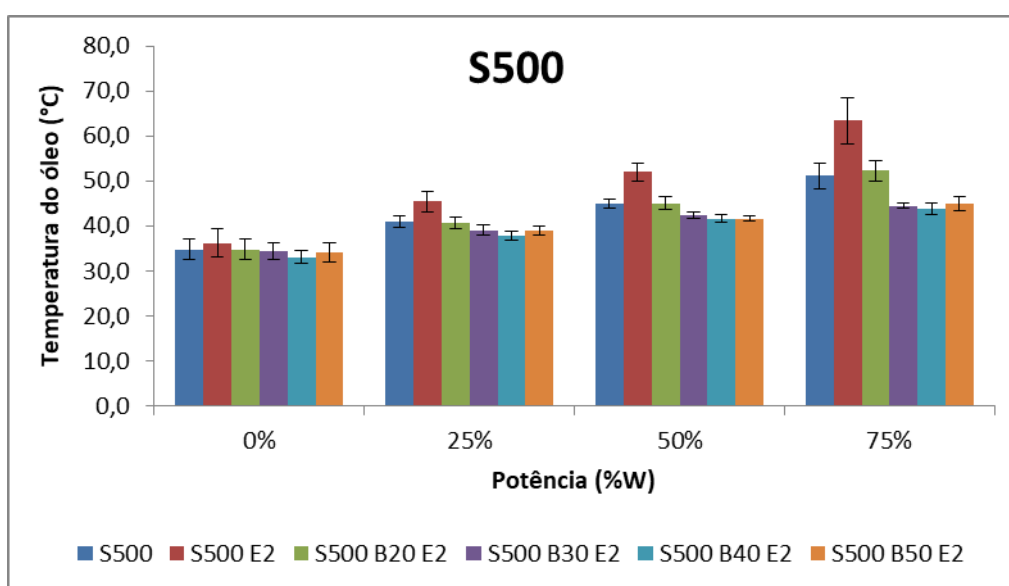


Figura 5.5. Comparação entre as médias das temperaturas do óleo por potência das misturas com S500.

De modo geral, a semelhança de comportamento dos diesel S10 e S500 com as demais misturas é visível, ocorrem pequenas variações nos modelos de incremento da temperatura para todas as condições. Além disso, as temperaturas apresentadas por esses tratamentos são próximas as misturas comerciais, devido ao equilíbrio de propriedades discutidas nos parágrafos anteriores.

5.4. Análise das Rotações

O controle da rotação do motor foi realizado para embasar os resultados de desempenho do motor. Essa variável influencia diretamente nos valores obtidos de temperatura do óleo, potência, torque e consumo de combustível. Além disso, esse

monitoramento permite avaliar melhor as características de combustão das misturas ensaiadas.

Para manter a frequência de saída da energia elétrica gerada pelo gerador em 60Hz, faixa comum de uso, é necessário que a rotação fique próxima dos 3600rpm. Este controle é feito por um dispositivo chamado Regulador Automático de Rotação (RAR). De acordo com Dartora (2005), esse dispositivo do sistema de alimentação ajusta os componentes do motor responsáveis pela injeção de combustível a fim de regular a quantidade injetada de acordo com a potência imposta, ou seja, quando ocorre um aumento de rotação devido a diminuição da potência, esse sistema faz com que seja introduzido menos combustível na câmara de combustão, reduzindo a rotação. Por outro lado, quando a potência aumenta e, conseqüentemente, a rotação diminui ocorre o incremento na injeção de combustível a fim de estabilizar a rotação ideal para o gerador.

O comportamento da rotação do combustível S10 pode ser visto na Figura 5.6, onde este apresentou resultados divergentes do apresentado pelas misturas com S10. As rotações em baixa potência permaneceram próximas de 3600rpm apresentando pequenas compensações na injeção de combustível. Esse fenômeno acontece de forma similar para as outras potências, com a diferença de que ocorre quedas de rotação conforme o aumento da carga. Apesar disso, não foi verificado falhas no funcionamento do motor.

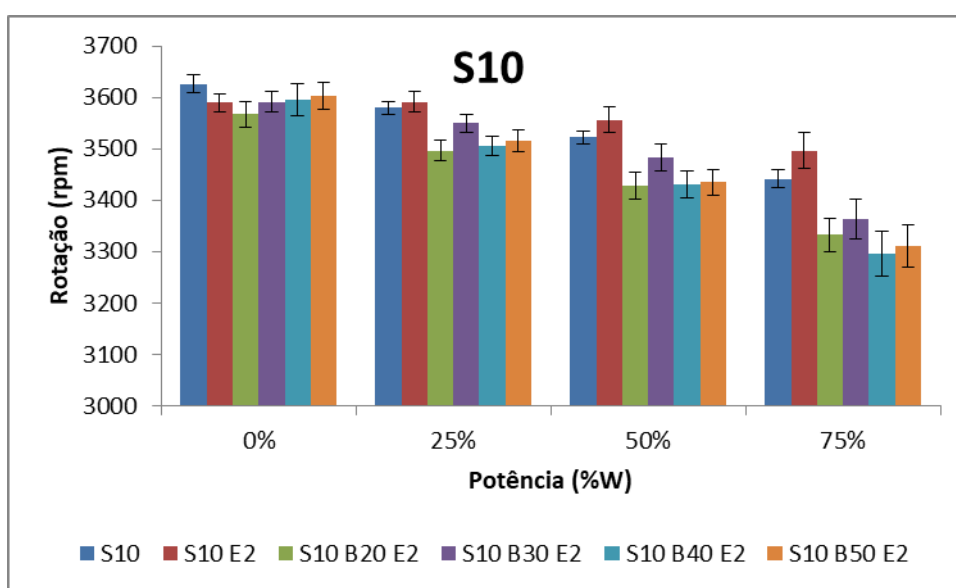


Figura 5.6. Comparação entre os valores médios das rotações por potência das misturas com S10.

A rotação da mistura S10E2 foi similar da apresentada pelo combustível S10, porém apresentou menor queda com o incremento de potência. A compensação na injeção de combustível, mantenedor da rotação, foi similar apresentada pelas misturas S10B40E2 e S10B50E2, em todas as potências.

O comportamento da rotação para a mistura S500B20E2 foi similar ao apresentado pelo tratamento S500, conforme Figura 5.7. Para 0 e 25% da potência a rotação permaneceu com valores próximos de 3600rpm.

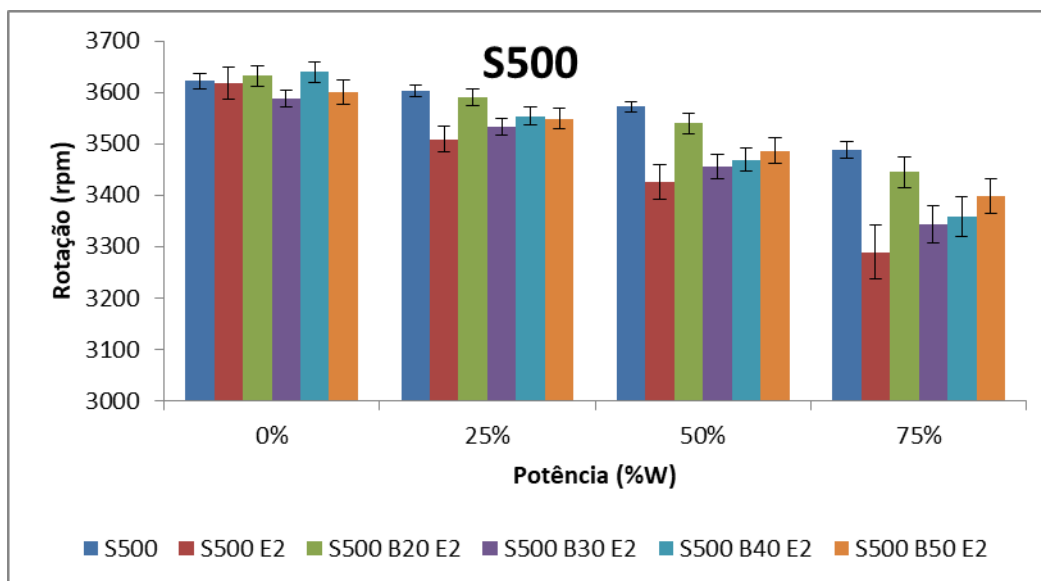


Figura 5.7. Comparação entre os valores médios das rotações por potência das misturas com S500.

A rotação da mistura S10E2 mostrou um comportamento extremamente contrário do apresentado pela mistura S500E2. A rotação da mistura S10E2 teve uma tendência de valores acima das demais que utilizaram S10 nas misturas. Isso indica uma alta compensação na injeção de combustível, que é resultado do empobrecimento da mistura devido ao baixo poder calorífico dos combustíveis renováveis (Barabás; Todorut; Baldean, 2010). Isso pôde ser percebido durante os ensaios através do aumento na fumaça e elevado consumo.

As variações das rotações acentuam-se progressivamente com o aumento da potência. Apesar disso, percebe-se que houve um aumento na compensação das rotações como consequência da maior quantidade de biodiesel na mistura, que atua como co-solvente melhorando as propriedades dela (Fernando; Hanna, 2004; Kwanchareon; Luengnaruemitchai; Jai-in, 2007; Shahir et al., 2014; Iacono, 2017), sendo mais visível nas maiores potências.

Como foi apresentado nos gráficos, o comportamento das rotações apresentadas pelas misturas ternárias foi diferente do resultado dos combustíveis comerciais, independentemente da carga analisada.

A mistura S500E2 apresentou uma redução progressiva na rotação com o aumento da carga, isso acontece de forma mais acentuada quando comparado com os outros tratamentos. A rotação média deste ensaio com 0% de potência gerada foi de 3618rpm, 75% da potência apresentou 3289rpm, sendo esta a menor média de rotação e maior desvio padrão entre todas as misturas estudadas.

As misturas estudadas não apresentaram uma relação de rotação entre elas, apenas uma tendência de redução na média das rotações com o aumento da potência. A mistura S10E2 apresentou resultados mais próximos do S10, enquanto a mistura S500B20E2 foi a que mais se assemelhou com o diesel S500. Quando se compara o diesel S10 com o S500, apresentam o mesmo padrão nas médias das rotações.

5.5. Análise da Potência

O grupo motor-gerador transforma a energia química do processo de combustão em energia mecânica, empurrando o pistão, girando o virabrequim, que, por sua vez, é transmitido para os componentes do gerador e transformado em energia elétrica. Ou seja, quando a demanda de energia elétrica para o gerador aumenta, por consequência, maior deve ser a potência gerada no motor. O GMG estudado possui um dispositivo chamado AVR (Regulador Automático de Tensão), que trata de um Sistema Eletrônico com finalidade de compensar automaticamente as variações de tensão de saída do gerador quando houver alteração de carga (rpm), sendo de extrema importância para seu funcionamento adequado. Com isso, é possível analisar o desempenho do motor pela grandeza de saída do gerador, uma vez que as cargas aplicadas com o uso das resistências elétricas simulam uma condição real de funcionamento.

As resistências elétricas possuem valor constante de sua propriedade resistiva. Isso torna possível determinar a potência com a medição da corrente de saída do gerador e através de relações matemáticas converter esse valor para encontrar a potência de saída do gerador.

A potência gerada tem o mesmo comportamento para todos os tratamentos independentemente das condições ambientes, da adição de etanol ou quantidade de biodiesel presente nas misturas. Isso era esperado uma vez que o motor possui o AVR que regula a tensão da energia elétrica gerada no gerador independentemente dos picos de carga que o motor sofre. Com isso, como as resistências elétricas do circuito elétrico são constantes, a corrente de saída que é transformada em potência também permanece constante.

O comportamento da potência encontrado nos ensaios é diferente dos resultados encontrados no estado da arte, principalmente devido a metodologia utilizada, uma vez que o equipamento utilizado, GMG, tem como princípio manter constante esta variável, como demonstrado na Figura 5.8 e Figura 5.9, onde apresentam esta constância nos valores e reprodutibilidade dos ensaios.

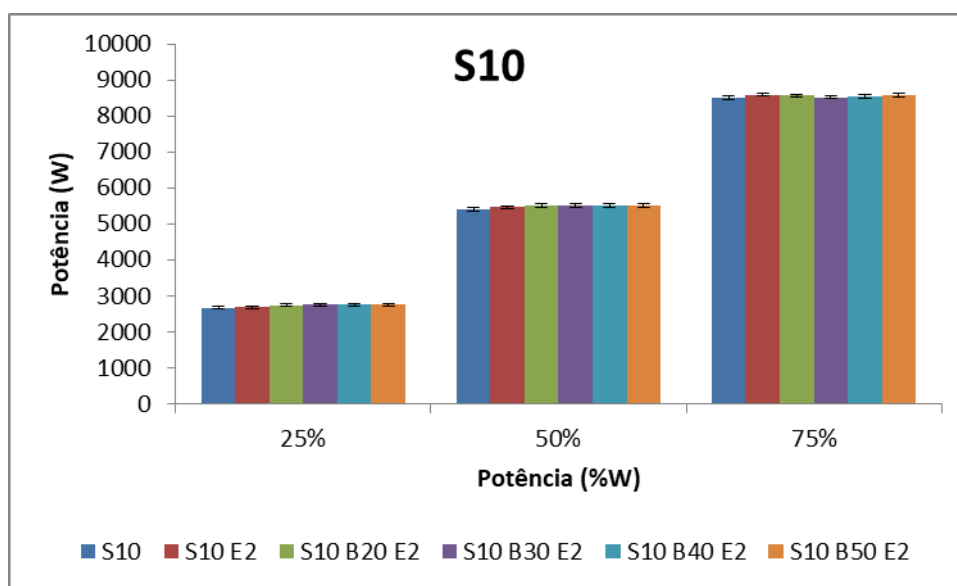


Figura 5.8. Potência média das misturas por potência das misturas com S10.

No trabalho de Iacono (2017), as misturas binárias diesel-biodiesel apresentam um aumento na potência entregue conforme o aumento da fração de biodiesel. Enquanto isso, as misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol tiveram reduções com o incremento da fração dos combustíveis renováveis. Esse resultado concorda com o encontrado por Cheenkachorn e Fungtammasan (2009). Eles encontraram em seus estudos redução na potência de saída de aproximadamente 4,4% a 8,7% utilizando misturas diesel-biodiesel-etanol, que, segundo eles, é explicado pelo menor valor calorífico do biodiesel e, principalmente, do etanol.

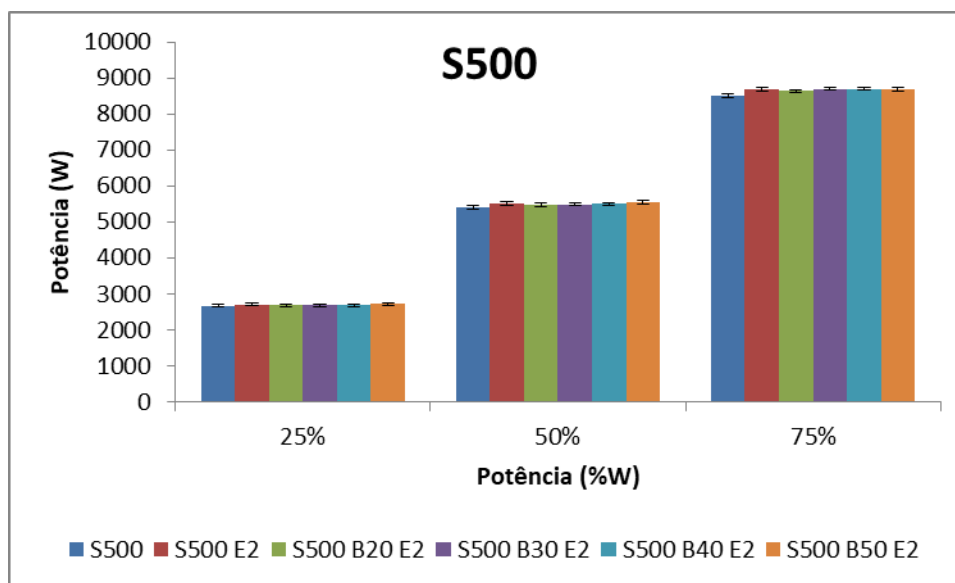


Figura 5.9. Potência média das misturas por potência das misturas com S500.

5.6. Análise do Torque

O torque é uma propriedade de desempenho do motor que demonstra a força entregue pelo motor. Ele possui relação direta com a rotação e com a potência, ou seja, se considerar a potência medida na saída do gerador como a potência desenvolvida pelo motor, sem considerar as perdas, é possível encontrar o torque uma vez que a rotação é coincidentemente coletada.

O comportamento do torque do motor é um parâmetro que reflete a eficiência da queima do combustível, sendo este um parâmetro imposto às condições experimentais utilizadas para avaliar o desempenho do motor.

A tendência do comportamento do torque é levemente diferente do apresentado pela potência uma vez que ele é influenciado pelos valores da rotação, ou seja, essa propriedade sofre influências da atuação do AVR e do RAR.

Ferreira (2013) encontrou uma redução gradativa no torque com o aumento do percentual de etanol e biodiesel. Contudo, ele afirma que para pequenos percentuais a diminuição dessa grandeza é discreta.

Iacono (2017) encontrou um comportamento regular para misturas ternárias com adição de etanol em porcentagens de 3% e 5%, independentemente da quantidade de biodiesel presente na mistura (7%, 10%, 15% ou 20%). Contudo, as misturas com 1% de etanol apresentaram um crescimento nos resultados de torque com o aumento da porcentagem de biodiesel na mistura, fato este também

observado de forma sutil. Esses resultados concordam com os encontrados nos ensaios realizados nesse estudo. Isso pode ser visto na Figura 5.10 e Figura 5.11, que retrata as médias de torque por potência para cada tratamento.

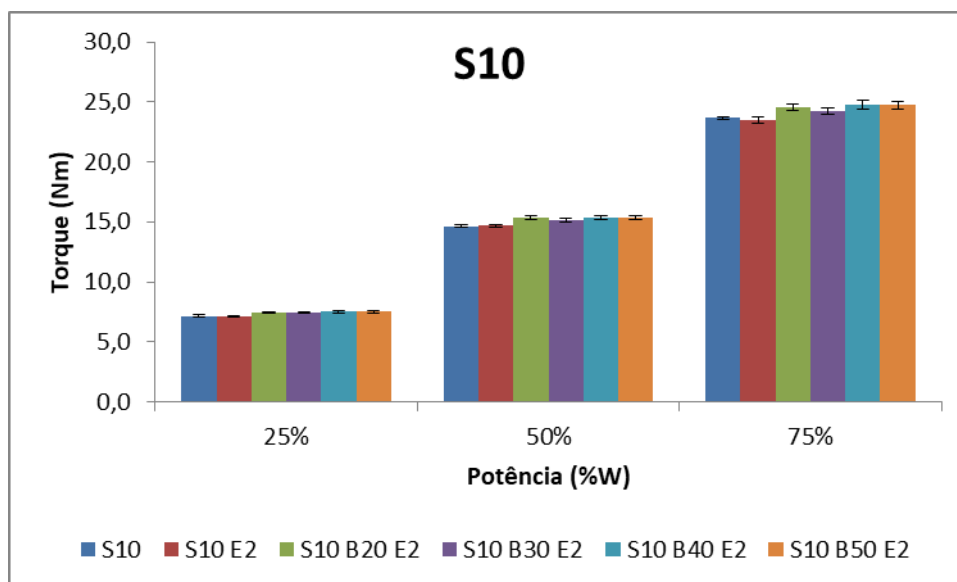


Figura 5.10. Torque médio das misturas por potência das misturas com S10.

Os maiores valores apresentados pela mistura S500E2 surgiram devido à esta mistura trabalhar com as menores médias de rotações entre as estudadas.

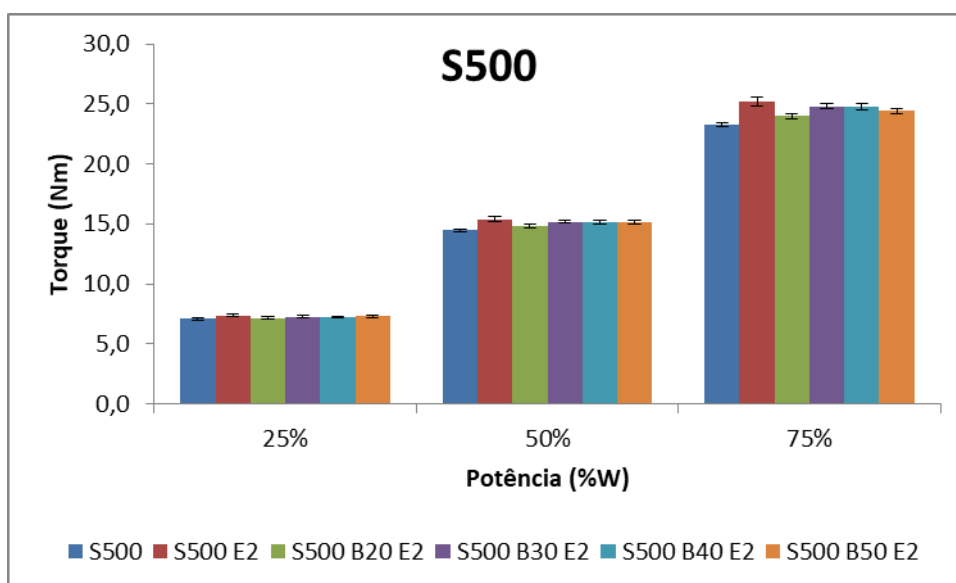


Figura 5.11. Torque médio das misturas por potência das misturas com S500.

As misturas apresentaram torques semelhantes ao diesel comercial S10 e S500 quando submetidas a 25% da potência. Para 50% da potência, as misturas

com maior teor de biodiesel tiveram resultados de torque superiores aos diesel comerciais de até 4,8%.

A potência de 75% foi a que apresentou mais desconformidades nos valores. As misturas com 20%, 30%, 40% e 50% de biodiesel tiveram torques superiores aos dieséis comerciais, sendo que as misturas S10B40E2 e S10B50E2 foram 4,6% maior que a S10. A maior discrepância foi de 6,4% para a mistura S500B30E2 comparada com a S500.

5.7. Análise do Consumo

O consumo de combustível permite uma boa percepção acerca de como o combustível está sendo aproveitado pelo motor para a geração de trabalho, sendo diretamente proporcional ao rendimento do motor em função das condições de operação e dos combustíveis que estão sendo testados.

A análise da quantidade de combustível utilizada pelo motor para cada mistura foi através do consumo mássico e do consumo específico. Observa-se a tendência de crescimento linear do consumo para todos os tratamentos em cada condição estudada. Esse aumento gradativo na quantidade consumida de combustível com o incremento das potências é consequência da maior demanda de transformação de energia química em energia de saída do motor, conforme visto nos resultados de torque e de potência.

Os comportamentos do consumo para as misturas são semelhantes uma vez que as curvas possuem os mesmos padrões de crescimento em todas as potências aplicadas no motor.

O grande desvio padrão apresentado é devido à sensibilidade da célula de carga, onde em um determinado intervalo de medição não variou a massa e no intervalo posterior ocorre uma grande variação.

A taxa de crescimento do consumo mássico das misturas representa o consumo horário dos combustíveis na respectiva potência aplicada. Os valores estão representados na Figura 5.12 e Figura 5.13.

A mistura S10E2 apresenta valor de consumo de combustível consideravelmente maior do que os demais. Esse elevado acréscimo é justificado pela grande compensação na injeção de combustível verificada nos resultados de

rotação dessas misturas, no qual foram altos. A mistura S10E2 consumiu em média 19,3% a mais do que a mistura S10 nos ensaios.

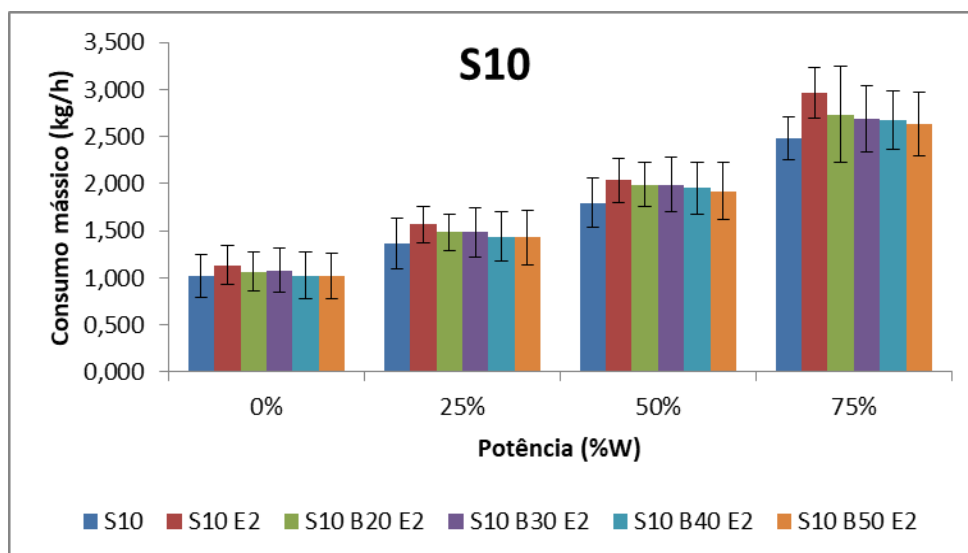


Figura 5.12. Consumo horário das misturas por potência das misturas com S10.

Observa-se que as misturas apresentam, para 0% de potência, uma pequena variação no consumo mássico. Contudo, com 25% de potência, os resultados para a mistura S500B30E2 é 3,8% menor que o valor do diesel comercial S500, para 50% da potência, os menores consumos foram respectivamente do diesel S10 e S500. Quando analisado o consumo em 75% de potência, os resultados de consumo apresentaram tendência a reduzir com o aumento da porcentagem de biodiesel presente nas misturas manipuladas com S10, caso que não ocorreu nas misturas com S500.

O consumo horário das misturas ternárias para 50% e 75% de potência foram superiores aos valores dos diesel comerciais.

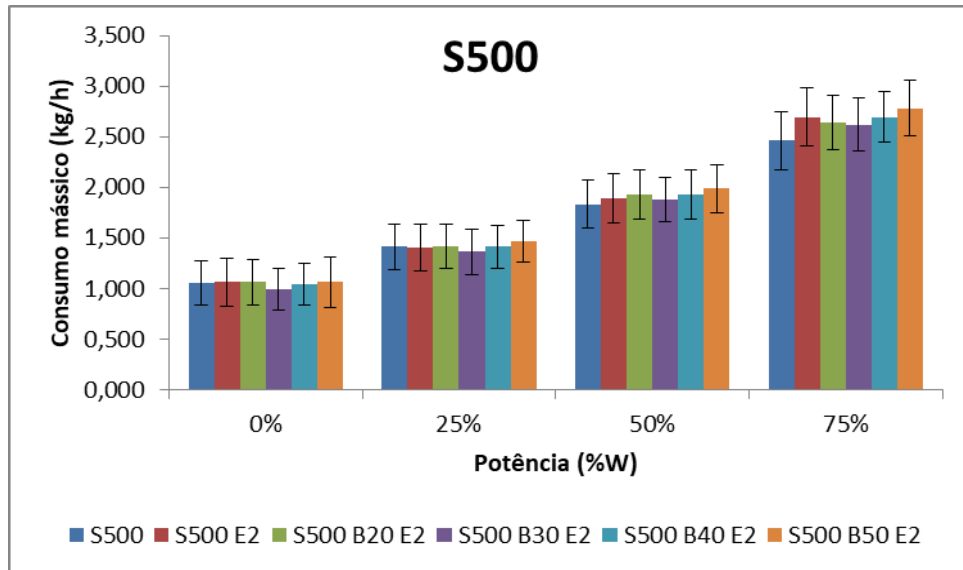


Figura 5.13. Consumo horário das misturas por potência das misturas com S500.

Os valores de consumo horário juntamente com a potência gerada por cada mistura combustível permitem encontrar o consumo específico (CE) de cada uma delas. Conforme Guedes (2017), essa propriedade está associada com o desempenho da conversão energética da combustão. Ela demonstra a massa necessária de determinado combustível para o fornecimento de uma unidade de trabalho do motor. Os resultados obtidos nos testes para essa grandeza podem ser vistos na Figura 5.14 e Figura 5.15.

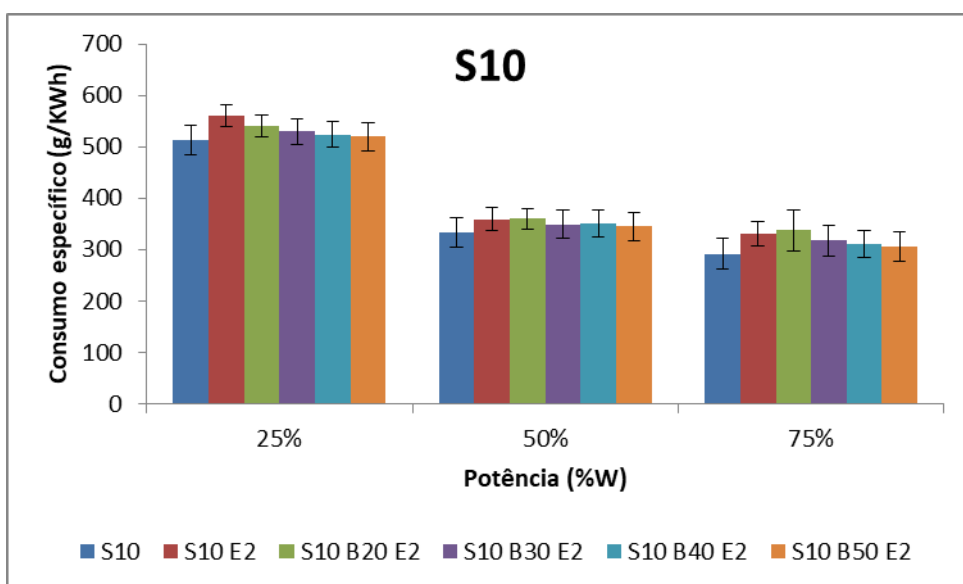


Figura 5.14. Consumo específico das misturas por potência das misturas com S10.

Os valores encontrados para consumo específico são semelhantes aos obtidos para o consumo horário para todas as condições, uma vez que a variação nos valores de potência é pequena. Com isso se justifica a avaliação da quantidade de combustível consumida por um grupo motor-gerador através dessas duas maneiras.

Klajn (2016) verificou que a adição de 1% de etanol não influenciou nos resultados de consumo específico das misturas quando comparadas com o diesel, contudo quando o volume adicionado foi 5% o consumo aumentou.

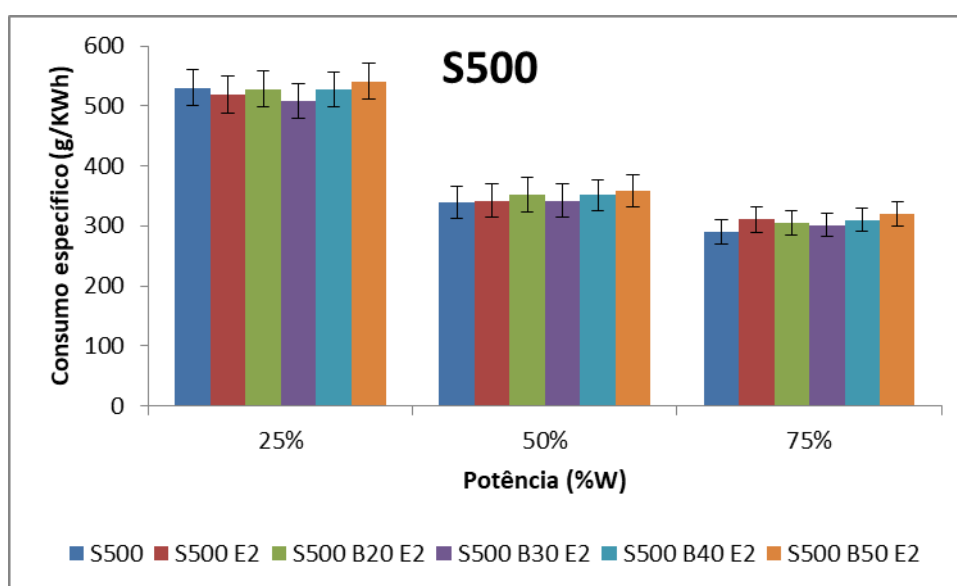


Figura 5.15. Consumo específico das misturas por potência das misturas com S500.

Os maiores valores de consumo específicos para as misturas ternárias também foram observados por outros pesquisadores (HULWAN; JOSHI, 2011; BARABÁS; TODORUT, 2011). Eles afirmam que o aumento da quantidade de etanol e de biodiesel na mistura é o fator responsável por incrementar o valor dessa propriedade uma vez que esses combustíveis apresentam menores valores caloríficos que o diesel. O poder calorífico se torna importante, pois ao comparar combustíveis que apresentam valores distintos, quanto menor o poder calorífero maior será o consumo de combustível para entregar a mesma potência. O poder calorífico do biodiesel é menor que o do diesel fóssil, e isso resulta em aumento de consumo quando operado com percentuais elevados de biodiesel (SHAHIR et al., 2015).

Todavia, os resultados dos tratamentos ternários com diesel S10 não concordam plenamente com essa afirmação, uma vez que a mistura S10B50E2 apresentou menor consumo específico quando comparada com as demais ternárias, mesmo possuindo maior teor de combustível renovável.

Os valores menores de consumo específicos encontrados para as misturas ternárias com S10, em comparação as binárias, principalmente para baixa potência, diferem dos resultados encontrados na bibliografia. Isso porque, em geral, conforme o incremento da fração de biodiesel ocorre o incremento do consumo específico devido ao menor poder calorífico do biodiesel (LAPUERTA; ARMAS; GARCIA-CONTRERAS, 2007; BUYUKKAYA, 2010). Por outro lado, os resultados foram de encontro com os apresentados por Castellanelli et al. (2008). Eles encontraram menores consumos específicos para a mistura binária com 20% de biodiesel do que o combustível com apenas 10%, que é correspondente ao diesel comercial atualmente.

5.8. Correlação das Características

A variação da composição do combustível, adição de etanol e diferente percentual de biodiesel, possui influência no comportamento do funcionamento do motor, que pode ser verificada a partir da análise de correlação das mesmas. Diz-se que existe correlação direta entre dois fenômenos quando aumentando um deles, o outro tem um acréscimo determinado. Quando, pelo aumento de um dos fenômenos, ocorre a diminuição do outro, dizemos que há correlação inversa. A intensidade da ligação existente entre dois fenômenos é medida pelo coeficiente de correlação, habitualmente designado pela letra “r” e pode variar entre ± 1 . Onde +1 caracteriza forte correlação direta, 0 correlação nula e -1 forte correlação inversa, (MONTGOMERY; RUNGER, 2016).

O consumo específico de combustível foi utilizado para realizar a correlação entre as misturas, pois resume o comportamento do GMG, foi adotado como um indicador da eficiência energética do sistema, ou seja, a mistura com menor consumo é o combustível mais eficiente do ponto de vista de combustão, favorecendo a comparação entre os combustíveis S10, S500 e misturas nas diferentes potências.

Nas Tabelas 5.1 e 5.2, estão apresentados os consumos específicos das famílias de misturas com diesel S10 e S500.

Tabela 5.1 – Consumo específico família S10.

C.E.	S10	S10E2	S10B20E2	S10B30E2	S10B40E2	S10B50E2
25%	512	561	540	530	524	520
50%	333	359	360	349	350	345
75%	291	330	338	318	311	306

Tabela 5.2 – Consumo específico família S500.

C.E.	S500	S500E2	S500B20E2	S500B30E2	S500B40E2	S500B50E2
25%	530	519	529	508	528	541
50%	340	342	352	342	352	358
75%	290	310	306	301	310	320

Ao correlacionar a família de misturas do diesel S10 com a família S500, separando por potência aplicada, observa-se que quando o GMG está submetido a 25% da potência, a correlação apresentada possui um coeficiente de $r=-0,44$, uma correlação inversa, indicando que, predominantemente, com o aumento da parte renovável na mistura em uma família o consumo específico aumenta e na outra diminui, família S10 e S500 respectivamente. O GMG quando trabalha nesta potência, demonstra, na família S10, um maior consumo nas misturas com adição de etanol se comparado com o combustível S10. Porém na família S500, ocorre redução deste consumo com exceção da mistura S500B50E2.

Quando se utiliza 50% da potência do gerador, o coeficiente de correlação é $r=+0,20$, uma correlação direta, porém de baixa intensidade, representando pouca linearidade no comportamento a medida que ocorre o aumento de biocombustível na mistura.

Com potência de 75%, $r=+0,34$ foi o coeficiente de correlação encontrado, correlação direta, apresentando maior linearidade compara a aplicação de 50%.

Considerando o valor de coeficiente 1 como de forte correlação, os coeficientes encontrados neste estudo dos consumos específicos podem ser classificados como fracos, demonstrando que para 50 e 75% existe um aumento deste consumo com o aumento da porção renovável na mistura, mas este aumento comparado entre as duas famílias possui baixa linearidade. Não fica nítida a

diferença entre os dois diesel utilizados, mas perceptível a variação com as diferentes composições de biocombustíveis.

Como já apresentado no referencial bibliográfico, as misturas ternárias diesel-biodiesel-etanol possuem melhores propriedades físico-químicas como a estabilidade e o número de cetano, se comparada com as misturas de diesel-biodiesel ou diesel-etanol, e como esperado neste estudo, ocorreu um deslocamento do menor consumo da mistura com 20% de biodiesel para 30% com 2% de etanol, tendo como benefício o aumentando do percentual de combustível renovável em 12%.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram as seguintes conclusões:

- O percentual máximo de adição de etanol anidro na mistura foi de 2%, com este percentual o GMG estudado apresenta comportamento semelhante a quando abastecido com diesel comerciais, S10 e S500.
- As temperaturas do óleo permaneceram semelhantes às dos diesel comerciais, não apresentando alterações que possam comprometer a integridade das partes internas do motor.
- As maiores variações nas médias das rotações surgiram quando o motor foi submetido a 75% da potência nominal do gerador, sendo estas de 6%, tanto na família S10 como na S500, demonstrando a capacidade do RAR em compensar as diferentes características de composição das misturas estudadas.
- Todas as misturas apresentaram reduções na rotação com o aumento da potência, demonstrando a incapacidade do RAR em manter a rotação constante nas faixas de potência estudadas.
- As potências apresentadas pelas misturas tiveram valores similares para todas as misturas devido a atuação do AVR.
- As misturas ternárias apresentaram torques superiores aos dos diesel comerciais, com exceção da S10E2, em alta potência, 75%.
- Após a compilação dos registros, não é possível verificar a existência de um padrão no consumo de combustível, uma vez que este teve tendência a reduzir com o aumento de biodiesel nas misturas com S10, enquanto que nas S500 ocorreu crescimento.
- As proporções de 30% de biodiesel e 2% de etanol anidro para comporem a mistura com diesel S10 ou S500 apresentam o maior equilíbrio e semelhança quando comparadas com os combustíveis comerciais, submetida a 75% da potência

nominal do gerador. Esta conclusão está baseada nos consumos de combustível, ressaltando a escolha do diesel S10 por conter menor teor de enxofre.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Identificar e propor solução para a limitação de porcentagem adicional de etanol ao diesel no Gerador Branco GD15000E3 G2.

Analisar os gases de combustão gerados durante a queima de misturas com adição de biodiesel e etanol nos diesel S10 e S500.

Realizar o controle de propriedades físicas (densidade e viscosidade) e propriedades de combustão (poder calorífico e número de cetano) em misturas com adição de biodiesel e etanol nos diesel S10 e S500.

Desenvolver instrumentação mais detalhada para monitoramento dos ensaios no grupo motor-gerador em relação aos parâmetros operacionais do motor.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 1585:1996. **Veículo Rodoviário – Código de Ensaio de Motores – Potência Líquida Efetiva**. 1996.

AJAV, E. A.; AKINGBEHIN. O. A. “A Study of some Fuel Properties of Local Ethanol Blended with Diesel Fuel”. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development**, vol. IV, p. 1-9, 2002.

ALPTEKIN, E; CANAKCI, M. Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. **Fuel**, vol. 88, p. 75–80, 2009.

ALPTEKIN, E., et al. Using waste animal fat biodiesels-bioethanol-diesel fuel blends in a DI diesel engine. **Fuel**, vol. 157, p. 245-254. 2015.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, **Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis 2018** (Ano-Base 2017). Rio de Janeiro: ANP, 2018b.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2017**. Rio de Janeiro: ANP, 2017b.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, **Boletim do etanol nº 09/2017**. Rio de Janeiro: ANP, 2017a.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 10 de maio de 2018a.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 50, de 23 de dezembro de 2013.** Regulamenta as especificações do óleo diesel de uso rodoviário contidas no Regulamento Técnico ANP nº 4/2013. Rio de Janeiro: ANP, 2013.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Etanol.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 03 de julho de 2018d.

BARABÁS, I., TODORUȚ, A., BĂLDEAN, D. Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends. **Fuel**, vol. 89, p. 3827–32, 2010.

BARABÁS, I; TODORUȚ, I. A. **Utilization of biodiesel-diesel-ethanol blends in CI engine.** InTech; 2011, p.215–34. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/Biodiesel-quality-emissions-and-by-products/utilization-of-biodiesel-diesel-ethanol-blends-in-ci-engine>>. Acesso em: 06 de agosto de 2018.

BIODIESELBR. **Revista Referência Mundial Sobre Biodiesel.** Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

BP. **Statistical Review of World Energy.** Disponível em: <<https://www.bp.com/>>. Acesso em: 10 de maio de 2018.

BRANCO. **Manual de Instruções geradores.** Disponível em: <https://www.branco.com.br/la/pt_br/suporte/manuais.html>. Acesso em: 25 de maio de 2018.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 13.263, de 23 de março de 2016. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, que dispõe sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei Nº 13.033, de 24 de setembro de 2014. Dispõe sobre a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 8.723, de 28 de outubro de 1993; revoga dispositivos da Lei no 11.097, de 13 de janeiro de 2005; e dá outras providências. Brasília, DF, 2014.

BRASIL. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA). Portaria Nº 75 de 5 de março de 2015. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, março 2015. Seção 1, p. 17.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Resolução CONAMA Nº 18, de 6 de maio de 1986. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html>. Acesso em 06 jul. 2018.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna: volume 1**. São Paulo: Blucher, 2012.

CANDEIA, R. A.; SILVA, M. C. D.; CARVALHO FILHO, J. R.; BRASILINO, M. G. A.; BICUDO, T. C.; SANTOS, I. M. G.; SOUZA, A. G. Influence of soybean biodiesel content on basic properties of biodiesel–diesel blends. **Fuel**, vol. 88, p. 738-743, 2009.

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

CHEENKACHORN, K., FUNGTAMMASAN, B. Biodiesel as an additive for diesel. **International Journal of Green Energy**, vol. 6, p. 57–72, 2009.

D'AGOSTO, M. A., et al. Evaluating the Potential of the Use of Biodiesel for Power Generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 43, p. 807-817, 2015.

DARTORA, F. L. **Desenvolvimento de reguladores mecânicos de rotação centrífugos para aplicação em motores diesel equipados com bombas injetoras unitárias.** Tese de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil, 2005.

DE PAULO, ANDERSON ANTUNES. **Análise das Emissões de Gases e Consumo Específico de um Grupo Motor-Gerador Abastecido com Misturas Diesel, Biodiesel e Etanol.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre. 2019.

DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management**, vol. 50, p. 14–34, 2009.

DI, Y.; CHEUNG, C.S.; HUANG, Z. Experimental Investigation on Regulated and Unregulated Emissions of a Diesel Engine Fueled With Ultra-Low Sulfur Diesel Fuel Blended With Biodiesel From Waste Cooking Oil. **Science of the Total Environment**, vol. 407, p. 835-846, 2009.

DUNN, RO. Fuel Properties of Biodiesel/Ultra-Low Sulfur Diesel (ULSD) blends. **Journal Am Oil Chem Soc**, vol. 88, p. 1977-87, 2011.

DUTTA, K. DAVEREY, A. LING. **Evolução retrospectiva de combustíveis alternativos: primeiro a quarta geração.** (2014).

EGÚSQUIZA, J. C. C. **Avaliação Experimental de um Motor Ciclo Diesel Operando no Modo Biocombustível: Diesel/Etanol e Diesel/Gás.** Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

EIA. US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - **International Energy Outlook (IEO), 2017.** Disponível em: < <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>>. Acesso em: 06/05/2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil) (EPE). **Balanço energético nacional 2017: Ano base 2016**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2017a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil) (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil) (EPE). **RenovaBio: Biocombustíveis 2030**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017c.

FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. **Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences, 3rd Edition**. ISBN: 978-1-118-53331-4. Jul 2015. 474p.

FERNANDO, S., HANNA, M. Phase behavior of the ethanol–biodiesel–diesel micro-emulsion system. **ASABE**; vol. 8, p. 903–908, 2004.

FERREIRA, V. P. **Uso de misturas de diesel e biodiesel em motores de ignição por compressão suportado por aditivação de etanol**. 2013. 186p. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

GUEDES, A. D. M. **Estudo experimental sobre o impacto do etanol em misturas diesel-biodiesel-etanol nos motores de ignição por compressão**. Tese de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

HANSEN, A. C., ZHANG, Q., LYNE, P. W. L. Ethanol–diesel fuel blends – a review. **Bioresources Technology**, vol. 96, p. 277–85, 2005.

HASAN, M. M., RAHMAN, M.M. Performance and emission characteristics of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. **Renewable Sustainability Energy Reviews**, vol. 74, p. 938–948, 2017.

HEBBAL, O. D.; REDDY, K. V.; RAJAGOPAL, K. Performance characteristics of a diesel engine with deccan hemp oil. **Fuel**, vol. 85, p. 2187-2194, 2006.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill Book Company, 1988, v 01, p.1-915.

HULWAN, D. B.; JOSHI, S. V. Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel-ethanol-biodiesel blends of high ethanol content. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 5042–5055, 2011.

IACONO, G. E. P. **Desempenho do motor de um trator agrícola utilizando misturas diesel- biodiesel-etanol**. Tese de mestrado. Universidade estadual do oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel, Brasil, 2017.

JOHNSON, F. SILVEIRA, S. **Países pioneiros na transição para a alternativa de combustíveis para transportes: comparação de etanol, programas e políticas no Brasil, Malawi e Suécia**. (2014).

KLAJN, F. F. **Avaliação comparativa de diferentes proporções da mistura diesel-biodiesel-etanol e diesel-biodiesel frente ao diesel tipo “a”: análises físico-químicas e de desempenho de um conjunto motor-gerador**. Tese de mestrado. Universidade estadual do oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel, Brasil, 2016.

KNOTHE, Gerhard. Biodiesel and its properties. **Industrial Oil Crops**, p. 15-42, 2016.

KUMAR, M.S. et al. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel-Part 2: Engine test analysis. **Fuel**, vol. 85, p. 2646-2652, 2006.

KUSS, Vivian. et. al. **Potencial de produção de biodiesel a partir de óleo de palma na Amazônia brasileira.** (2015).

KWANCHAREON, P.; LUENGNARUEMITCHAI, A.; JAI-IN, S. Solubility of a diesel biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. **Fuel**, vol. 86, n. 7–8, p. 1053–1061, 2007.

LAPUERTA, M., ARMAS, O., GARCIA-CONTRERAS, R. Stability of diesel–bioethanol blends. For use in diesel engines. **Fuel**, vol. 86, p. 1351–7, 2007.

LEMPEK, J. R. O. **comparativo entre biodieseis produzidos a partir de diferentes matérias-primas e rotas de produção e utilizados em motor estacionário.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), Rio Grande do Sul, Brasil, 2016.

LIN, Y.; GREG WU, Y.; CHANG, C. T. Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends. **Fuel**, vol. 86, p. 1772-1780, 2007.

LU X. C, HUANG Z, ZHANG W. G. The influence of ethanol additives on the performance and combustion characteristics of diesel engines. **Combustion Science and Technology**, vol 176, p. 1309–1329, 2004.

MARTINS, J. Motores de combustão interna. Publindústria, Porto, Portugal, 2006.

MASSON, Igor. **Produção de bioetanol a partir da fermentação de caldo de sorgo sacarino e cana-de-açúcar.** (2013). Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/99635/000737257.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15/07/2015.

MECHSTUFF, **How does a 4 stroke engine work?**. Disponível em: <http://mechstuff.com/how-does-a-4-stroke-engine-work/>. Acesso em: 13 jun. 2018.

MEDEIROS M. A. **Álcool.** 27 de junho de 2004. Disponível em: <http://www.quiprocurea.net/alcool.htm>. Acesso em: 15 de julho 2017.

MENEZES, W. E., **Produção de trabalho, geração de contaminantes e tratamento pós combustão em motores ciclo diesel**. Tese de doutorado. Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. 6ª ed. LTC. 2016. 652p.

MOREIRA, S. M. dos S. R. **Influência do Biodiesel nas emissões poluentes de um motor turbo diesel**. 2008. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2008.

MORETTI, R. R., **Mistura diesel, biodiesel e etanol anidro: uma possibilidade para reduzir o custo de produção da cadeia da cana-de-açúcar**. 2013. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.

MURCAK, A., et al. Effect of injection timing to performance of a diesel engine fueled with different diesel-ethanol mixtures. **Fuel**, vol.153, p. 569-577, 2015.

NOVACANA. **Processos de fabricação do etanol**. Disponível em <<https://www.novacana.com/etanol/fabricacao/#fermentacao>>. Acessado em 03/07/2018.

NURUN, N.; AKHTER, S.; MHIA; ZAGLUL, S. Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends. **Bioresource Technology**, vol. 97, p. 372-378, 2006.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza, Ceará: Tecbios, 2003. 66 p.

PARK, S. H.; YOUN, I. M.; LEE, C. S. Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emission characteristics of a four- cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings. **Fuel**, vol. 90, p. 748-755, 2011.

PEDDIREDDY, S. LONGHURST, P. WAGLAND, S. **Caracterização da composição de combustíveis derivados de resíduos, utilizando uma nova ferramenta de análise de imagem.** (2015).

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Óleo Diesel.** Disponível em < <http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-industrias/oleo-diesel-industria>>. Acesso em: 27 de junho de 2018a.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. **Óleo Diesel.** Disponível em < <http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/oleo-diesel/>>. Acesso em: 27 de junho de 2018b.

PIDOL L. et al. Ethanol–biodiesel–diesel fuel blends: performances and emissions in conventional diesel and advanced low temperature combustions. **Fuel**, vol. 93, p.329–38, 2012.

POUSA, G. P. A. G, SANTOS, A. L. F., SUAREZ, P. A. Z. History and Policy of Biodiesel in Brazil. **Energy Policy**, vol.35, p. 5393–5398, 2007.

PRAMOD, B. RAO, R. KALE, A. **Avaliação de combustíveis alternativos para o transporte usando um gráfico híbrido teórico e método de análise hierárquica.** (2015).

PROMMES, K.; APANEE, L.; SAMAI, J. Solubility of a diesel–biodiesel–ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. **Fuel**, vol. 86, p.1053-1061, 2007.

RAELE, R., et al. Scenarios for the second generation ethanol in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, vol. 87, p. 205-233, 2014.

RAKOPOULOS, C. D.; ANTONOPOULOS, K. A.; RAKOPOULOS, D. C.; HOUNTALAS, D. T.; GIAKOUMIS, E. G. Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or biodiesels of various origins. **Energy Conversion and Management**, vol. 47, p. 3272- 3287, 2006.

RAKOPOULOS, C. D.; RAKOPOULOS, D. C.; HOUNTALAS, D. T.; GIAKOUMIS, E.G.; ANDRITSAKIS, E. C. Performance and emissions of bus engine using blends of diesel fuel with bio-diesel of sunflower or cottonseed oils derived from Greek feedstock. **Fuel**, vol. 87, pp. 147-157, 2008.

RAKOPOULOS, D.C. et al. Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine. **Fuel**, vol. 90, p. 1855–67, 2011.

ROMANO, S. D.; SORICHETTI, P. A. Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization. **Green Energy and Technology**. Springer-Verlag London Limited, 2011. 101 p.

SANTOS, A. N.; DODD, W. G.; LENA, J.C. **Diagramas de fases de misturas etanol diesel**. In: I SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA. Anais. Brasília, STI, 1983.

SAYIN, C. Engine performance and exhaust gas emissions of metanol and etanol-diesel blends. **Fuel**, vol. 89, p. 3410–5, 2010.

SHAHIR, S. A. et al. Feasibility of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: an assessment of properties, material compatibility, safety and combustion. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, vol. 32, p.379–95, 2014.

SHAHIR, S. A. A. et al. Performance and emission assessment of diesel-biodiesel-ethanol / bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 48, p. 62–78, 2015.

TSE, H. et al. Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. **Energy**, vol. 83, C, p. 343-350, 2015.

XU, Y. et. al. **Avaliação de combustível e de trânsito de trens de força, opções de ônibus alternativos usando dados de operações do mundo real: combustível de ciclo de vida e modelagem de emissões.** (2015).

ZHIQIANG, G.; TIANRUI, L.; JINLONG D.; RONGRONG, C.; PEIJUN, X.;XUEHONG, W. Combustion and emission characteristics of blends of diesel fuel and methanol-to-diesel. **Fuel**, vol. 90, p. 1305-1308, 2011.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE BIODIESEL UTILIZADO


BSBIOS
ENERGIA RENOVÁVEL

BSBIOS INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE BIODIESEL SUL BRASIL S/A
 BR 285, km 294, s/nº - Distrito Industrial - Passo Fundo - Rio Grande do Sul
 Fone: (54) 2103-7179 - www.bsbios.com

CERTIFICADO DA QUALIDADE
147/2018

Data de Emissão: 31/08/2018
 Nome: **BSBIOS Indústria e Comércio de Biodiesel Sul Brasil S/A**
 Endereço: BR 285, km 294 - Distrito Industrial
 Cidade: Passo Fundo
 UF: RS

RQ-CQ-159/12
PRODUTOR

AMOSTRA

Identificação: **Biodiesel B100**
 Responsável pela Coleta: Douglas
 Tanque: BD-03
 Data da Produção: 29/08/2018 à 31/08/18
 Composição: Metanol +76,0%Óleo de Soja +3,4%Gordura de Frango +8,4%Gordura Bovina +12,2%Gordura de Porco
 Aditivo: Antioxidante com base TBHQ e ácido cítrico
 Lacres Amostra Testemunha: 0405059-0405127

Data da Coleta: 31/08/2018
 Volume: 1.520.000 Litros
 Lote: 147/2018

Ensaio	Resultado	Unidade	Especificação ⁽¹⁾	Norma de Referência
Aspecto 20,0 °C ⁽²⁾	LII	-	Limpo e isento de impurezas	MA-CQ-018/07
Massa Específica a 20°C ⁽²⁾	879,7	kg/m³	850 - 900	ASTM D 4052/2018
Viscosidade Cinemática a 40 °C ⁽²⁾	4,389	mm²/s	3,0 - 6,0	ASTM D 445/2017a
Teor de água ⁽²⁾	186	mg/kg	Máximo 200	ASTM D 6304/2016 ^{E1}
Contaminação Total ⁽²⁾	7,4	mg/kg	Máximo 24	EN 12662/2008
Ponto de Fulgor (Procedimento C) ^{(2) (5)}	150,0	°C	Mínimo 100,0	ASTM D 93/2016a
Teor de Éster ⁽²⁾	99,9	% massa	Mínimo 96,5	EN 14103/2011
Cinzas Sulfatadas ⁽²⁾	<0,005	% massa	Máximo 0,020	ASTM D 874/2013a
Enxofre Total ⁽²⁾	3,6	mg/kg	Máximo 10	ASTM D 5453/2016 ^{E1}
Sódio + Potássio ⁽²⁾	<1,0	mg/kg	Máximo 5	NBR 15553/2015
Cálcio + Magnésio ⁽²⁾	<1,0	mg/kg	Máximo 5	NBR 15553/2015
Fósforo ⁽²⁾	<1,0	mg/kg	Máximo 10	NBR 15553/2015
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50 °C ⁽³⁾	1b	-	Máximo 1	ASTM D 130/2018
Ponto de Entupimento de Filtro a Frio ⁽²⁾	2	°C	Máximo 5	ASTM D 6371/2017a
Índice de Acidez ⁽²⁾	0,42	mg/g	Máximo 0,50	EN 14104/2003
Glicerina Livre ⁽²⁾	0,014	% massa	Máximo 0,02	ASTM D 6584/2017
Glicerina Total ⁽²⁾	0,207	% massa	Máximo 0,25	ASTM D 6584/2017
Monoglicerídeos ⁽²⁾	0,618	% massa	Máximo 0,70	ASTM D 6584/2017
Diglicerídeos ⁽²⁾	0,167	% massa	Máximo 0,20	ASTM D 6584/2017
Triglicerídeos ⁽²⁾	0,081	% massa	Máximo 0,20	ASTM D 6584/2017
Índice de Iodo ⁽²⁾	115	g/100 g	Anotar	EN 14111/2003
Estabilidade à Oxidação a 110 °C ⁽²⁾	14,3	horas	Mínimo 8	EN 14112/2016
Número de Cetano ⁽⁴⁾	45,3	-	Anotar	ASTM D 6890-16 ^{E1}

Os resultados apresentados valem única e exclusivamente para a amostra ensaiada.

(1) Especificação de acordo com o Regulamento Técnico ANP Nº 3/2014.

(2) Ensaio realizado pelo Laboratório BSBIOS, cadastro ANP Nº 007. Relatório de Ensaio: 284/2018.

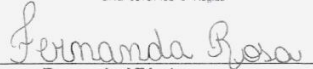
(3) Ensaio realizado trimestralmente, conforme Nota 6 do Regulamento Técnico ANP Nº 3/2014. Ensaio realizado pelo Laboratório BSBIOS, cadastro ANP Nº 007. Relatório de Ensaio: 212/2018.

(4) Ensaio realizado trimestralmente, conforme Nota 6 do Regulamento Técnico ANP Nº 3/2014. Ensaio realizado pelo Laboratório Lacaut cadastrado na ANP Nº 022. Certificado de Análise: 7364/18.

(5) Ponto de fulgor acima de 130 °C fica dispensada a análise de teor de metanol, conforme Nota 4 do Regulamento Técnico ANP Nº 3/2014.

Fernanda Pereira Rosa
Coordenadora
Controle de Qualidade
CRO 05101482- 5ª Região

A unidade % massa expressa neste relatório equivale a unidade g/100 g do SI.


Responsável Técnico

BSBIOS INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE BIODIESEL SUL BRASIL S/A
Este documento só pode ser reproduzido por inteiro. Reprodução de partes requer aprovação escrita do laboratório

Pág. 1 de 1

ANEXO B

CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE ETANOL ANIDRO UTILIZADO

zilor.

CERTIFICADO DA QUALIDADE

Produto: ETANOL ETILICO ANIDRO COMBUSTIVEL (AEAC)		Ref.: 000793/2018	
Tanque de Origem.: TQ08	Contra-Prova Nº.: 0938535/0938545	Hora da amostragem.: 14:00:00	
Data.: 08/05/2018	Nota Fiscal.: 0000053591/2	Pesagem.: 168341	

Ensaio	Unidades	Limite de Especificação	Método	Resultados	Laboratório Responsável	Boletim de Análise
Aspecto	-	LII	Visual	LII	Próprio	09/2018
Cor	-	Incolor	Visual	Incolor	Próprio	09/2018
Acidez Total - (c/ Ácido Acético)	mg/L	Máximo 30	NBR 9866 NBR 16047	8,2	Próprio	09/2018
Condutividade Elétrica a 25°C	µS/m	Máximo 300	NBR 10547	44	Próprio	09/2018
Massa Específica (20 °C)	Kg / m³	Máximo 791,5	NBR 15639	791,2	Próprio	09/2018
Teor Alcoólico	INPM(%m/m)	Mínimo 99,3	NBR 15639	99,4	Próprio	09/2018
Teor Alcoólico	°GL (%v/v)	Mínimo: 99,60	NBR 15639	99,6	Próprio	09/2018
Teor de Metanol	%	Máximo 0,5	NBR 16041	0.0099	Próprio	09/2018

Observações complementares

LII - Limpido e Isento de Impurezas

OBS. Adição de corante no carregamento - Cor álcool (AEAC) Laranja.

Assinatura

Notas:	- Reclamações de clientes:	Cássia Ugucione Química Responsável CRQ n.: 04250052 4ª Região
	Rogério Teixeira Dias (11) 2618-8346 E-mail RTDias@copersucar.com.br	

ZILOR - AÇUCAREIRA QUATÁ S.A.

Fábrica.: Açucareira Quatá - Quatá - SP - CEP 19780-000 Fone (55)(0xx18) 3366-9800 - (0xx14) 3269-9624 (Horário Comercial)
Escritório Central: R. 15 de Novembro, 865 - Lencóis Paulista - SP - CEP 18680-000 - Fone(55) (0xx14) 3269-9000

17/05/2018 12:01:58

ANEXO C

Programa ATMEGA 2560

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include "HX711.h"
#include "dht.h"
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <EmonLib.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
EnergyMonitor emon1;
int rede = 220.0;
int pino_sct = 2;
int rpmPin = 5; //seleciona o pino de entrada do sensor
int adRPM = 0; //inicializa a variavel para guardar o valor lido
float rotacao = 0; //inicializa a variavel mca para guardar o valor lido na rotação
#define DOUT A1
#define CLK A0
#define DHT22_PIN 8
#define ONE_WIRE_BUS 9
LiquidCrystal lcd(2, 3, 4, 5, 6, 7);
HX711 balanca(DOUT, CLK);
dht DHT;
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
Adafruit_BMP085 bmp;
float tempMin = 999;
float tempMax = 0;
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```



```

int cont=0;
DeviceAddress sensor1;
void setup()
{ // Inicializa o display 20x4:
  lcd.begin(20,4);
  delay(1000);
  lcd.clear();
  emon1.current(pino_sct, 26); //29 potencia 1 bancada 3574 25 potencia 2884
  lcd.print("System Lab. Motores ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(" IFSul-Passo Fundo ");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("Rodrigo O. Oliveira");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print(" Agosto 2017 ");
  delay(3000);
  lcd.write(1); //escreve o max
  lcd.write(2); //escreve o min
  lcd.clear();
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Leitura do valor do ADC:t");
  Serial.println(balanca.read());
  Serial.println("Nao ponha nenhum objeto sobre a balanca");
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Nao ponha peso! ");
  Serial.println("Fazendo Tara! ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Fazendo Tara! ");
  Serial.println("...");
  delay(1000);
  lcd.clear();
  balanca.set_scale(222422.38);
  balanca.tare(20); //O peso atual eh considerado Tara.
  sensors.begin();
  Serial.println("Localizando sensores DS18B20...");

```

```

Serial.print("Foram encontrados ");
Serial.print(sensors.getDeviceCount(), DEC);
Serial.println(" sensores.");
if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
    Serial.println("Sensores nao encontrados !");
Serial.print("Endereco sensor: ");
mostra_endereco_sensor(sensor1);
Serial.println();
Serial.println();
lcd.clear();
if (!bmp.begin()) {
    Serial.println("Sensor BMP085 nao encontrado, verifique as conexoes !");
}
}
void loop()
{
    unsigned int rotacao = 0;
    int chk = DHT.read22(DHT22_PIN);
    switch (chk)
    {
        case DHTLIB_ERROR_CHECKSUM:
            lcd.print("Checksum error,\t");
            break;
        case DHTLIB_ERROR_TIMEOUT:
            lcd.print("Time out error,\t");
            break;
        default:
            break;
    }
    sensors.requestTemperatures();
    float tempC = sensors.getTempC(sensor1);
    if (tempC < tempMin)
    {
        tempMin = tempC;
    }
}

```

```

if (tempC > tempMax)
{
    tempMax = tempC;
}
double Irms = emon1.calcIrms(1480);
double Pot = ((Irms*rede)*1,73);
if (Irms<=0.05)
{
    lcd.home();
    Irms=0;
    Pot=0;
}
lcd.setCursor(5,3);
lcd.print(" Kg");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print(balanca.get_units(20),3);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.println(DHT.temperature);
lcd.setCursor(5,0);
lcd.write(223); //escreve o grau
lcd.setCursor(6,0);
lcd.print("C ");
lcd.setCursor(14,0);
lcd.print("%");
lcd.setCursor(9,0);
lcd.print(DHT.humidity);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(tempC);
lcd.setCursor(5,1);
lcd.write(223); //escreve o simbolo do grau
lcd.setCursor(6,1);
lcd.print("C ");
lcd.setCursor(9,1);
lcd.print(tempMax,1);
lcd.setCursor(13,1);

```

```

lcd.print("M/");    //M para maximo
lcd.setCursor(15,1);
lcd.print(tempMin,1);
lcd.setCursor(19,1);
lcd.write("m");    //m para minimo
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print(bmp.readPressure());
lcd.setCursor(5,2);
lcd.print(" Pa");
Pot=(Pot*4);
lcd.setCursor(9,2);
lcd.print(Pot);
lcd.setCursor(15,2);
lcd.print(" W ");
adRPM = analogRead(rpmPin); // ler o valor do ad da porta A2 ligado ao LM331
rotacao = ((0.94650000 * adRPM)*15);
if (rotacao < 100)
{
rotacao=0;
}
lcd.setCursor(9,3);
lcd.print(rotacao);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(13,3);
lcd.print(" RPM ");
cont = (millis()/1000);
Serial.print(balanca.get_units(20),3); //Massa de combustivel
Serial.print(";");
Serial.print(DHT.temperature); //Temperatura no painel
Serial.print(";");
Serial.print(DHT.humidity); //Umidade no painel
Serial.print(";");
Serial.print(tempC); //Temperatura do oleo
Serial.print(";");
Serial.print(bmp.readPressure()); //Pressao atmosferica

```

```
Serial.print(";");
Serial.print(Pot); //Potencia Eletrica
Serial.print(";");
Serial.print(rotacao); //Rotacao
Serial.print(";");
Serial.print(cont);
Serial.print(";");
Serial.println();
}
void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress)
{
  for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
  {
    if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
    Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
  }
}
```



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br