Estudo sobre a utilização de óleos de origem vegetal em motores diesel não modificados

Rafael Lozano Espasandin

Tese de fim de curso do

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Realizada na

Universidade Técnica de Liberec

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBEREC

Orientador na FEUP: Professor Doutor José Manuel Ferreira Duarte

Orientador na TUL: Ph.D. Michal Vojtisek-Lom

Porto

Janeiro de 2011

Estudo sobre a utilização de óleos de origem vegetal em motores diesel

Tese de fim de curso de

Rafael Lozano Espasandin

Realizada sob a supervisão do Professor Doutor

José Manuel Ferreira Duarte

e do engenheiro Ph.D

Michal Vojtisek-Lom

Departamento de Engenharia Mecânica

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Aos meus pais e avó…

Resumo

Devido à crescente preocupação com a eminente escassez dos combustíveis fósseis e aos problemas ambientais provenientes da sua utilização, cada vez mais pesquisadores têm direcionado seus esforços na busca de fontes energéticas renováveis e que sejam menos nocivas ao meio ambiente. Neste cenário, os óleos de origem vegetal têm se mostrado promissores para serem utilizados em motores diesel. Entretanto, sua elevada viscosidade é um entrave para uma combustão eficiente, levando a perda de desempenho, aumento das emissões, avarias no motor, etc. As três formas conhecidas de se reduzir a viscosidade são: Transformação em biodiesel, aquecimento e mistura com combustíveis menos viscosos.

Este trabalho descreve os experimentos realizados em um motor Cummins ISBe4 185, 130 kW, 4,5 litros, sistema de injeção Bosch Common Rail, equipado com um sistema bi-combustível com aquecimento no tanque e no filtro de combustível, utilizando como combustíveis óleo de colza aquecido a diferentes temperaturas, mistura com 50% de diesel e 50% de óleo de colza aquecida, biodiesel e suas misturas B10, B30 e B50. Os resultados mostram uma perda desprezível de desempenho com a utilização das misturas B10 e 50% diesel-OC e uma redução moderada (cerca de 10%) para os demais combustíveis. Um aumento no consumo é visto para todos os combustíveis. Um ligeiro aumento nas emissões de NO_X, acompanhado de uma redução nas emissões de CO foi verificado para todos os regimes, exceto em vazio. Um aumento nas emissões totais de partículas também foi presenciado, principalmente devido as partículas de até aproximadamente 15 nm.

Ensaios adicionais foram realizados em um motor Zetor 1505, 90 kW, 4,2 litros, sistema de injeção totalmente mecânico, equipado com um sistema bi-combustível, objetivando o estudo da influência da temperatura do combustível sobre o torque máximo e a comparação com a mesma influência exercida em sistemas de injeção do tipo Common Rail (Cummins). Foi observado que apesar das diferenças, o aumento da temperatura de injeção do combustível causa uma diminuição no torque máximo em ambos os sistemas e que essa diminuição foi devida basicamente a mesma causa.

Palavras chave: Óleo vegetal, biodiesel, óleo diesel, Common Rail, combustíveis alternativos.

Abstract

Due to the growing concern about the imminent depletion of fossil fuel and environment problems arising from their use, researchers have increasingly focused their efforts on finding renewable and less harmful to the environment fuel sources. In this scenario, vegetable oil has shown promise for use in diesel engines. However, its high viscosity is an obstacle to efficient combustion, leading to loss of performance, increased emissions, engine damage, etc. The three known ways of reducing the viscosity are conversion in biodiesel, heating and blending with less viscous fuels.

This work reports on laboratory experiments carried on a 130-kW, 4,5-liter Cummins ISBe4 engine with a Bosch Common Rail injection system, fitted with an auxiliary heated secondary fueling system, and operated on fuel-grade rapeseed oil heated to different temperatures, 50% blend of RO-diesel also heated, biodiesel and its blends B10, B30 and B50. The results show almost no decrease in maximum torque for blends B10 and 50% blend of RO-diesel and only a moderate (around 10%) decrease in maximum torque for all the other fuels. An increase in fuel consumption is seen for all fuels. A slight increase in NO_x emissions, followed a decrease in CO emission was seen for all regimes, except for idle. An increase in total particulate emissions were also seen, mainly because particles of size approximately 15 nm.

Further experiments were carried on a tractor engine Zetor 1505, 90kW, 4,2-liter with a fully mechanic controlled injection system, equipped with a dual fuel system, which aimed the study of the fuel temperature influence on maximum torque and the comparison to the same influence exerted on a Common Rail injection system. It was observed that despite differences, the increase in fuel temperature caused a decrease in peak torque in both systems and this was due primarily to the same cause.

Keywords: Vegetable oil, biodiesel, diesel fuel, diesel engine, renewable fuel.

Agradecimentos

Embora este seja um trabalho individual, sem a ajuda de algumas pessoas que estiveram presentes ao longo dos últimos quatro anos, a sua realização jamais seria possível. Por esse motivo, gostaria de expressar a minha sincera gratidão:

Ao meu orientador na TUL, Eng. Ph.D Michal Vojtíšek-Lom, pela oportunidade ímpar que me foi concedida de fazer parte de sua equipe de pesquisas nesse novo e fascinante campo dos óleos vegetais combustíveis. Gostaria de agradecer também por toda paciência, disponibilidade e apoio na realização deste trabalho.

Ao meu orientador na FEUP, professor Doutor Eng. José Ferreira Duarte pela sua disposição, boa vontade e apoio a idéia da realização deste trabalho em uma instituição estrangeira. Queria agradecer também pela dedicação prestada e conhecimento transmitido ao longo da cadeira Sistemas de Propulsão e Suspensão Automóvel e, em especial, na fase de realização e apresentação da tese de fim de curso.

Aos meus professores e funcionários da FEUP pelo excelente serviço prestado, que fazem com que esta faculdade seja um exemplo de organização e qualidade; e propicie aos seus alunos uma sólida e conceituada formação.

A Suzi Lozano, minha mãe, por todo carinho, apoio e por nunca ter me deixado faltar nada ao longo desses quatro anos que vivi fora de casa para a realização desse curso.

Por fim, dedico este trabalho a duas pessoas que foram grandes entusiastas e incentivadores dessa carreira, mas que infelizmente, já não se fazem mais presentes nesse mundo. José Maria Espasandin Farina e Eny da Silva Lozano, onde quer que vocês estejam, podem ficar orgulhosos pelo fato que o vosso Rafael chega ao fim deste curso, momento tão aguardado por vocês... Estareis para sempre em minha memória e no meu coração.

O trabalho experimental foi financiado pela Fundação Tcheca de Ciências, projeto no. 101/08/1717: Otimização da combustão de óleos vegetais em motores diesel.

Acknowledgements

Although this is an individual work, without the help of some people who have been present over the past four years, its realization would never be possible. Therefore, I would like to thanks:

My advisor in TUL, Ph.D. Michal Vojtíšek-Lom for the unique opportunity given to me to be part of his research team, in this new and fascinating field of vegetable oil fuels. Also many thanks for all patience, availability and support in this work.

My supervisor in FEUP, Professor Dr. Eng José Ferreira Duarte for his willingness and support to the idea of this work be done in a foreign institution. I also want to thanks for the teachings in the subject Suspension and Motorized Systems and, in particular, for the help during the elaboration and presentation of this thesis.

My professors and the FEUP staff for their excellent services that make this college a model of organization and quality; and provide to its students a strong and reputable academic training.

Suzi Lozano, my mother, for the endearment and all support provided during this time I've been living away from home due to the Mechanical Engineering course.

Finally, I dedicate this work to two people who were the most enthusiastic of this career, but sadly, are no longer in this world. José Maria Espasandin Farina and Eny da Silva Lozano, wherever you are, you can be proud of the fact that your Rafael has achieved the end of this course, long awaited moment for you… You will be forever in my mind and in my heart.

The experimental work was funded by the Czech Foundation of Sciences, project no. 101/08/1717: Optimization of combustion of vegetable oils in diesel engines.

Índice

Resumo ..... **v**

Abstract ..... **vii**

Agradecimentos ..... **ix**

Acknowledgements ..... **xi**

Índice de figuras ..... **xvii**

Índice de tabelas ..... **xxi**

Abreviaturas e Símbolos ..... **xxiii**

Introdução **1**

1.1 Perspectiva histórica da utilização dos óleos vegetais 2

1.2 Benefícios da utilização de óleos vegetais 6

1.2.1 Questões ambientais 6

1.2.2 Eficiência 6

1.2.3 Emissões de CO_2 6

1.2.4 Questões econômicas 7

1.2.5 Questões geopolíticas 8

1.3 Contexto e objetivos 9

1.4 Estrutura da dissertação 10

Revisão bibliográfica **11**

2.1 Constituição molecular dos óleos 12

2.1.1 Similaridades entre os óleos vegetais, biodiesel e diesel mineral 13

2.2 Ácidos graxos e diferenças entre os óleos vegetais 14

2.2.1 Cadeia de carbono 14

2.2.2 Ligações duplas 14

2.3 Poder calorífico 16

2.3.1 Influência sobre o consumo e potência 16
2.4 Viscosidade 17
2.4.1 Problemas relacionados com a viscosidade 17
2.4.2 Formas de diminuir a viscosidade 18
2.4.3 Temperatura ideal 18
2.4.4 Convergência da viscosidade 19
2.5 Retardo de ignição 20
2.5.1 Efeitos do retardo de ignição 21
2.5.2 Retardo de ignição e insaturação 21
2.6 Densidade 22
2.7 Módulo de compressibilidade 22
2.7.1 Influências da temperatura e pressão no módulo de compressibilidade 23
2.8 Calor específico 23
2.9 Lubricidade 23
2.10 Solvência 24
2.11 Pontos de Névoa e de Fluidez 25
2.12 Ponto de fulgor 25
2.13 Ponto de auto-ignição 26
2.14 Razão estequiométrica ar/combustível 26
2.15 Processos de degradação dos óleos vegetais 26
2.15.1 Oxipolimerização 26
2.15.2 Hidrólise 29
2.15.3 Polimerização térmica 31
2.15.4 Água 31
2.16 Depósitos de carbono 32

Procedimento experimental 33
3.1 Motor 34
3.1.1 Cummins ISBe4 185 34
3.1.2 Zetor 1505 35
3.2 Sistemas bi-combustível 36
3.2.1 Cummins ISBe 4 185 36
3.2.2 Zetor 1505 37
3.3 Dinamômetro 39

3.4 Controle da célula 40
3.4.1 Posição e velocidade 40
3.4.2 Torque e velocidade 40
3.4.3 Software de controle 41
3.5 Ciclo de teste 42
3.5.1 ESC 42
3.5.2 WHSC 43
3.6 Medição de emissões 45
3.6.1 Analisador infravermelho não–dispersivo (NDIR) 45
3.6.2 Detector de quimiluminescência (CLD) 46
3.6.3 Detector de ionização de chama (FID) 46
3.6.4 Método gravimétrico 47
3.6.5 Analisador de partículas por mobilidade elétrica (EEPS) 47
3.7 Medição do consumo de combustível 48
3.8 Combustíveis 49

Resultados 51
4.1 Desempenho 52
4.1.1 Diesel, biodiesel puro e misturas de biodiesel e óleo diesel 52
4.1.2 Diesel e mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo de colza 53
4.1.3 Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas 55
4.1.4 Diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas 58
4.1.5 Comparação dos resultados 60
4.1.6 Efeito da temperatura do combustível sobre um sistema de injeção em linha 62
4.2 Consumo e eficiência 63
4.2.1 Diesel e mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo de colza 63
4.2.2 Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas 64
4.2.3 Diesel, biodiesel e óleo de colza 66
4.2.4 Comparação dos resultados 67
4.3 Emissões de partículas 68
4.3.1 Diesel e mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo de colza 68
4.3.2 Diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas 70
4.4 Emissões de gases 73
4.4.1 Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas 73

Discussão **75**

Conclusão **77**

Referências e Bibliografia **79**

Índice de figuras

Figura 1 – Produção dos principais tipos de óleos vegetais em 2009/10 3

Figura 2 – Crescimento da utilização de óleos vegetais para a produção de biocombustíveis 4

Figura 3 – Utilização de óleos vegetais para a produção de biocombustíveis por país produtor. 4

Figura 4 – Produção por hectare dos principais óleos vegetais. 5

Figura 5 – Representação do ciclo do carbono. 6

Figura 6 – Representação de um triglicerídeo e de seus elementos formadores (Glicerina e ácido graxo). 12

Figura 7 – Reagentes e produtos da reação de transesterificação. 13

Figura 8 – Similaridade molecular entre uma molécula de óleo diesel (Cetano) e um ácido graxo típico. 13

Figura 9 – Representação da disposição mais dispersa dos triglicerídeos nos óleos de oliva e mais compacta na manteiga/banha de porco. 15

Figura 10 – Influência da temperatura na viscosidade de diversos óleos vegetais. 19

Figura 11 – Relação entre o número de cetano e o índice de iodo de diferentes óleos vegetais baseados na Tabela 1. A tendência é quanto maior for o índice de iodo (Insaturação) menor seja o número de cetano (Maior atraso da ignição). 21

Figura 12 – Influência da temperatura e pressão no módulo de compressão dos óleos vegetais. 23

Figura 13 – Relação entre os pontos de névoa e fluidez e o índice de iodo de diferentes óleos vegetais baseados na Tabela 1. A tendência é que quanto maior for o índice de iodo (Insaturação) menor sejam os pontos de névoa e fluidez. 25

Figura 14 – Óleo lubrificante contaminado por um óleo vegetal polimerizado. 27

Figura 15 – Taxa da reação de oxipolimerização, formação de peróxidos e aumento da viscosidade. 29

Figura 16 – Reação de hidrólise e formação de di e monoglicerídeos e ácidos graxos livres. 30

Figura 17 – Decréscimo exponencial e convergência das viscosidades do óleo vegetal reciclado e fresco. 31

Figura 18 – Depósitos de carbono nos injetores e válvulas. 32

Figura 19 – Componentes da célula de ensaio do laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec. 33

Figura 20 – Foto do motor Cummins ISBe 185 utilizado nos experimentos feitos no laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec. 34

Figura 21 – Foto do motor Zetor 1505. Laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec. 35

Figura 22 – Diagrama do sistema bi-combustível instalado no motor Cummins ISBe4. 36

Figura 23 – Válvula elétrica 3 orifícios e duas posições Greasecar e bomba auxiliar Facet utilizadas no sistema bi-combustível do motor Zetor 1505. 37

Figura 24 – Diagrama do sistema bi-combustível instalado no motor Zetor 1505. 38

Figura 25 – Princípios de funcionamento de um dinamômetro hidráulico: (a) seção longitudinal do dinamômetro; (b) visão do rotor. 39

Figura 26 – Formas de controle da célula de ensaio. (a) Posição, velocidade (b) Torque, velocidade. 40

Figura 27 – Programa utilizado para o controle e aquisição de dados do motor Cummins ISBe4. . 41

Figura 28 – Método para o cálculo das velocidades e cargas do ciclo de teste ESC. 43

Figura 29 – Da esquerda para a direita: Banca com o NDIR, CLD e FID; EEPS; Banca para o ensaio gravimétrico com o lugar dos filtros em detalhe. Laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec. 45

Figura 30 – Esquema da medição de gases em um instrumento NDIR. 45

Figura 31 – Esquema de um detector FID. 46

Figura 32 – Esquema de funcionamento do EEPS modelo 3090 da TSI. 47

Figura 33 – Método utilizado para a medição da massa de combustível consumida. 48

Figura 34 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle) em ensaios realizados utilizando óleo diesel, biodiesel puro e diferentes misturas entre esses dois combustíveis. 53

Figura 35 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle) em ensaios realizados com óleo diesel e mistura de 50% diesel e 50% de óleo de colza. ... 54

Figura 36 – Influência da temperatura sobre o torque máximo obtido com óleo de colza e mistura de 50% óleo de colza – 50% óleo diesel em um sistema de injeção do tipo Common Rail. 55

Figura 37 – Torque, rpm e temperatura. Ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle). 56

Figura 38 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste WHSC (World Harmonized Sationary Cycle) em ensaios realizados utilizando óleo diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas. 57

Figura 39 – Influência da temperatura sobre o torque máximo obtido com óleo de colza em um sistema de injeção do tipo Common Rail. 58

Figura 40 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle) em ensaios realizados utilizando óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas. 60

Figura 41 – Comparação dos resultados obtidos em todos os ciclos de teste. 61

Figura 42 – Influência da temperatura sobre o torque máximo obtido com óleo de colza em um sistema de injeção mecânico em linha. 62

Figura 43 – Consumo acumulado e instantâneo verificado para o diesel e 50% Diesel-OC (Ciclo de teste ESC). 63

Figura 44 – Consumo instantâneo e pressão no CR verificados para o diesel e OC a diferentes temp (Ciclo WHSC). 64

Figura 45 – Consumo instantâneo e acumulado verificados para o diesel e OC a diferentes temp (Ciclo ESC). 65

Figura 46 – Consumo acumulado e instantâneo verificado para o diesel, biodiesel e OC (Ciclo de teste ESC). 66

Figura 47 – Comparação dos resultados de consumo específico e eficiência com a utilização de diversos combustíveis em um motor Common Rail a diesel. 67

Figura 48 – Emissões totais de partículas. Diesel e mistura 50% diesel – 50% óleo de colza. Ciclo ESC. 68

Figura 49 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel e mistura 50% diesel – 50% óleo de colza. Regime de rotações em vazio. 69

Figura 50 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 165 N.m. 69

Figura 51 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 330 N.m. 69

Figura 52 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 495 N.m. 69

Figura 53 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, carga máxima. 70

Figura 54 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, carga máxima. 70

Figura 55 - Emissões totais de partículas. Diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas. Ciclo ESC. 71

Figura 56 – Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. Regime de rotações em vazio. 71

Figura 57 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 165 N.m. 71

Figura 58 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 330 N.m. 72

Figura 59 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 495 N.m. 72

Figura 60 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, carga máxima. 72

Figura 61 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1500 rpm, carga máxima. 72

Figura 62 – Efeito do óleo de colza nas emissões de THC em vários regimes de funcionamento (relativo ao diesel). 73

Figura 63 – Efeito da temperatura do óleo de colza nas emissões de THC em vários regimes de funcionamento (relativo ao óleo de colza a temp. mais baixa). 73

Figura 64 - Efeito do óleo de colza nas emissões de CO em vários regimes de funcionamento (relativo ao diesel). 74

Figura 65 - Efeito da temperatura do óleo de colza nas emissões de CO em vários regimes de funcionamento (relativo ao óleo de colza a temp. mais baixa). 74

Figura 66 - Efeito do óleo de colza nas emissões de NO_X em vários regimes de funcionamento (relativo ao diesel). 74

Figura 67 - Efeito da temperatura do óleo de colza nas emissões de NO_X em vários regimes de funcionamento (relativo ao óleo de colza a temp. mais baixa). 74

Índice de tabelas

Tabela 1 – Índice de iodo, número de cetano, ponto de névoa e fluidez dos óleos vegetais..... 15

Tabela 2 – Compatibilidade de diversos materiais com os óleos vegetais, diesel e biodiesel. 24

Tabela 3 – Concentração de metais necessária para reduzir a estabilidade do óleo pela metade..... 28

Tabela 4 – Parâmetros do motor Cummins ISBe 185 34

Tabela 5 – Parâmetros do motor Zetor 1505. 35

Tabela 6 – Modos do ciclo de teste europeu ESC 42

Tabela 7 – Modos do ciclo de teste WHSC..... 44

Tabela 8 – Propriedades dos combustíveis..... 49

Tabela 9 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel, biodiesel e misturas de biodiesel e óleo diesel)..... 52

Tabela 10 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel e mistura 50% diesel – 50% óleo de colza)..... 53

Tabela 11 – Potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas). T2 = Maior temperatura, T1 = Menor temperatura. 56

Tabela 12 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime utilizando o ciclo de teste WHSC (Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas). T2 = Maior temperatura, T1 = Menor temperatura. 57

Tabela 13 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel).... 58

Tabela 14 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Biodiesel). 59

Tabela 15 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Óleo de colza a diferentes temperaturas). 59

Tabela 16 – Temperatura do óleo de colza em cada ensaio. 59

Tabela 17 – Valores absolutos de consumo acumulado, específico e eficiência (Diesel e mistura 50% diesel-OC). 63

Tabela 18 - Valores absolutos de consumo e eficiência para o Diesel e OC a diferentes temp (Ciclo WHSC). 64

Tabela 19 - Valores absolutos de consumo e eficiência para o Diesel e OC a diferentes temp (Ciclo ESC). 65

Tabela 20 - Valores absolutos de consumo acumulado, específico e eficiência (Diesel, biodiesel e OC). 66

Abreviaturas e Símbolos

c – Velocidade do som
K – Módulo de compressibilidade
ρ – Densidade
c.e – Consumo específico
η – Eficiência

$diesel - Preço do litro de óleo diesel
$OV – Preço do litro de óleo vegetal
PCI – Poder calorífico inferior
ESC – European Stationary Cycle
WHSC – World Harmonized Sationary Cycle
OV – Óleo vegetal
OC – Óleo de colza
CR – Common Rail
rpm – rotações por minuto

Capítulo 1

Introdução

Diversas questões têm levado ao desenvolvimento de fontes de energia alternativas. A primeira delas é a demanda energética de uma população em constante crescimento. Estima-se que a população mundial dobre a cada trinta e cinco anos, entretanto, o consumo de energia demora menos da metade desse tempo, dobrando a cada quatorze anos [1].

Neste cenário, destaca-se o setor dos transportes, responsável por mais da metade do consumo mundial de petróleo [2] e quase trinta por cento do consumo de toda a energia produzida [3]. O consumo desse setor cresce cada vez mais, impulsionado pelo aumento da quantidade de veículos em circulação nas ruas. Atualmente, a frota mundial conta com mais de um bilhão de veículos. Embora esse número possa parecer elevado, o crescimento continuará nos próximos anos. Em países como China e Índia, o aumento da riqueza pessoal aliado a queda nos preços dos automóveis tem levando cada vez mais pessoas a adquirirem seu próprio veículo. Esses países são atualmente os líderes em crescimento, com uma taxa de oito por cento ao ano contra um por cento na Europa e três por centro a nível mundial [2].

Face essa crescente demanda e ao fato da maior parte da energia utilizada ser proveniente de fontes não-renováveis, é essencial encontrar fontes alternativas que possam substituir as atuais.

A segunda questão, e a mais preocupante atualmente, é o efeito nocivo causado pela emissão de gases na atmosfera. Os gases mais comuns são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), os clorofluorcarbonos (CFCs) e o óxido nitroso (N_2O). O primeiro destes, principal responsável pelo efeito estufa, é conseqüência direta da utilização da energia. É produzido principalmente pela utilização de combustíveis fósseis nos transportes, indústrias e geração de energia [4].

Finalmente, questões econômicas, geopolíticas e até mesmo tecnológicas estimulam a busca por fontes de energia alternativas. Dentre essas fontes, os óleos vegetais tem-se mostrado promissores como combustíveis para motores diesel e serão o tema deste trabalho.

Neste primeiro capítulo serão abordados assuntos como a evolução histórica da utilização de óleos vegetais, os benefícios que a utilização desses óleos pode trazer, além de serem apresentados o contexto e os objetivos da realização deste trabalho, assim como o trabalho em si, capítulo a capítulo e globalmente.

1.1 Perspectiva histórica da utilização dos óleos vegetais

É comum encontrar na literatura a afirmação de que Rudolf Diesel concebeu o motor que leva seu nome para funcionar a base de óleos vegetais. Tal fato se deve a demonstração realizada na exibição de Paris de 1900, na qual um motor diesel utilizou óleo de amendoim como combustível. Entretanto, uma extensa revisão literária feita por Knothe [5] revela que a demonstração foi conduzida em um motor construído para utilização de diesel e que não havia sofrido qualquer tipo de modificação para a utilização de óleo de amendoim. A idéia de utilizar esse óleo partiu do governo francês, que via nos óleos vegetais um enorme potencial para que suas colônias pudessem se tornar auto-suficientes em combustível. Nem mesmo a demonstração foi realizada por Diesel, e sim por uma companhia francesa chamada Otto Company.

Testes posteriores realizados com outros tipos de óleos vegetais confirmaram a potencialidade desses combustíveis e levaram Rudolph Diesel a declarar: "... o uso de óleos vegetais como combustível para motores pode parecer insignificante atualmente, porém, tais óleos podem se tornar, com o passar do tempo, tão importantes quanto os derivados do petróleo e carvão mineral são hoje em dia..." [5]. No entanto, devido ao baixo custo e a grande disponibilidade apresentados naquela época, o petróleo acabou se tornando a fonte de energia dominante e o diesel o principal combustível para esse tipo de motor.

Com o passar do tempo, o petróleo e seus derivados periodicamente passaram por quedas de produção e fornecimento, o que estimulou a busca por fontes alternativas. Há relatos da utilização de óleos vegetais durante a Segunda Guerra Mundial como combustível de emergência e para outros fins. Por exemplo, no Brasil a exportação de óleo de algodão foi proibida para que houvesse queda no preço, de forma a favorecer seu uso como combustível em trens [6]. Reduções nas importações de combustíveis líquidos também foram relatadas na Argentina, implicando na exploração comercial dos óleos vegetais. A China produziu óleo diesel, óleos lubrificantes, "gasolina" e "querosene", os dois últimos por um processo de craqueamento, a partir de óleo de tungue e outros óleos vegetais. Investigadores na Índia, impulsionados pelos acontecimentos da Segunda Guerra Mundial, estenderam suas investigações sobre dez óleos vegetais para o desenvolvimento como combustível doméstico. Tais investigações deixaram de acontecer quando os combustíveis derivados do petróleo voltaram a estar fartamente disponíveis a baixo custo [5].

As preocupações com o aumento do uso e a possibilidade de escassez de combustíveis derivados do petróleo tiveram um papel inspirador no projeto bi-combustível, da Universidade Estadual de Ohio (Columbus, EUA) nos anos pós-guerra, durante o qual, óleo de algodão, óleo de milho e misturas dos mesmos com óleo diesel convencional foram investigados [5].

As crises do petróleo nas décadas de 70 e 90, que elevaram drasticamente seu preço, bem como a crescente preocupação com questões ambientais, renovaram o entusiasmo pela busca de combustíveis alternativos [6].

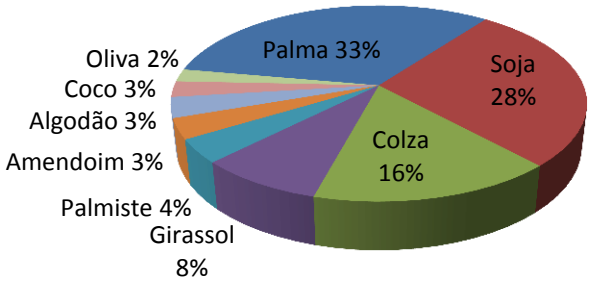
Em 1982 ocorreu uma importante conferência intitulada "Óleos Vegetais Combustíveis", realizada pela Sociedade Americana de Engenheiros Agrônomos (ASAE), que documentou os estudos realizados durante a década de 70. Contribuições foram feitas por pesquisadores de todo o

mundo. Embora naquela época a maioria dos papéis relatasse o potencial da utilização de óleos brutos como combustível, vários trabalhos discutiram a produção de ésteres e o uso destes, os quais se mostravam mais promissores do que a matéria-prima bruta. Cientistas do Brasil, África do Sul e de universidades americanas fizeram apresentações sobre a conversão de óleo vegetal, principalmente óleo de girassol, em ésteres metílicos [7]. O tema geral e os resultados dessa conferência foram que os óleos vegetais brutos, enquanto mostravam-se promissores, tinham tendência em causar depósitos de carbono no injetor, polimerização e aumento da viscosidade do óleo lubrificante, o que causava falha repentina e catastrófica dos rolamentos da biela e/ou cambota.

Em 1983, o processo de produção de biodiesel foi completado e publicado internacionalmente [7]. Em novembro de 1987 foi construída a primeira planta piloto de biodiesel pela empresa austríaca Gaskoks. Dois anos depois foi construída a primeira usina de produção de biodiesel, com capacidade de processamento de 30.000 toneladas de óleo de colza por ano. Na década de 90, usinas foram abertas em muitos países europeus, incluindo República Checa, França, Alemanha e Suécia. Ao mesmo tempo, nações em outras partes do mundo também iniciaram produções de biodiesel em menor escala e em 1998, o instituto austríaco de biocombustíveis identificou 21 países com projetos comerciais de biodiesel [7].

Atualmente o biodiesel pode ser produzido a partir de diferentes fontes como óleos vegetais, gorduras animais e óleos vegetais reciclados. Geralmente, fatores como geografia, clima e economia determinam qual óleo vegetal é de maior interesse para o uso como combustível (Direto ou como biodiesel).

Os óleos mais produzidos atualmente são os óleos de Palma, Soja e Colza. O primeiro é produzido basicamente por Tailândia e Malásia que detém mais de 85% da produção mundial. O segundo apresenta grande produção em países como China, EUA, Argentina e Brasil. Esses quatro países juntos são responsáveis por 80% da produção total. Óleo de Colza tem a EU–27[1] como sua maior produtora com um total de 9,4 milhões de toneladas produzidas em 2009/10. A China aparece a seguir com um total de 5,2 milhões de toneladas [8]. A Figura 1 mostra a produção mundial de óleos vegetais em 2009/10.



	Milhões de toneladas
Palma	45,00
Soja	38,67
Colza	22,32
Girassol	11,46
Palmiste	5,36
Amendoim	4,66
Algodão	4,66
Coco	3,62
Oliva	2,91
Total	**138,66**

Figura 1 – Produção dos principais tipos de óleos vegetais em 2009/10. Fonte: USDA [8].

[1]EU–27 inclui Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Chipre, Republica Tcheca, Dinamarca, Eslováquia Eslovênia, Espanha, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Itália, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Polônia, Portugal, Reino Unido, Romênia e Suécia.

Nos últimos anos, tem-se presenciado um grande crescimento na produção e consumo de óleos vegetais. A produção mundial quase que duplicou ao longo dos últimos 12 anos e atingiu a marca de quase 140 milhões de toneladas em 2009/10 [8]. Entretanto, o maior responsável por esse crescimento não é o setor dos biocombustíveis e sim a indústria de alimentos e a utilização doméstica [9]. Ainda assim, a utilização desses óleos para a produção de biocombustíveis aumentou mais de nove vezes nos últimos seis anos (Figura 2).

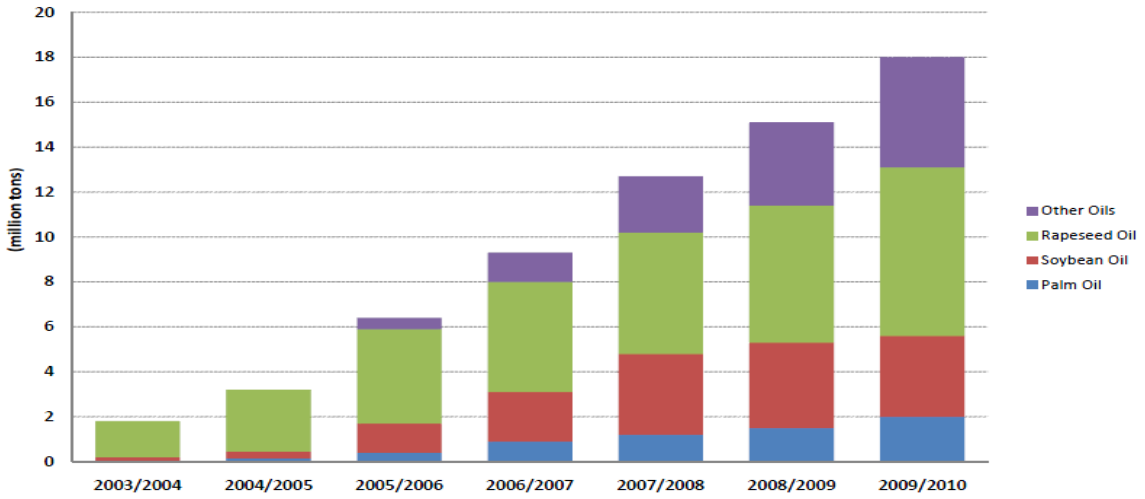


Figura 2 – Crescimento da utilização de óleos vegetais para a produção de biocombustíveis. Fonte: [9].

A utilização de óleos vegetais para a produção de biocombustíveis alcançou 13% do total no último ano. Neste cenário, destaca-se a EU-27 como a maior consumidora de óleos vegetais para este fim. Espera-se que nos próximos anos haja um crescimento ainda maior neste percentual devido à consolidação da tecnologia para a utilização de óleos vegetais em motores diesel (Diretamente ou como biodiesel).

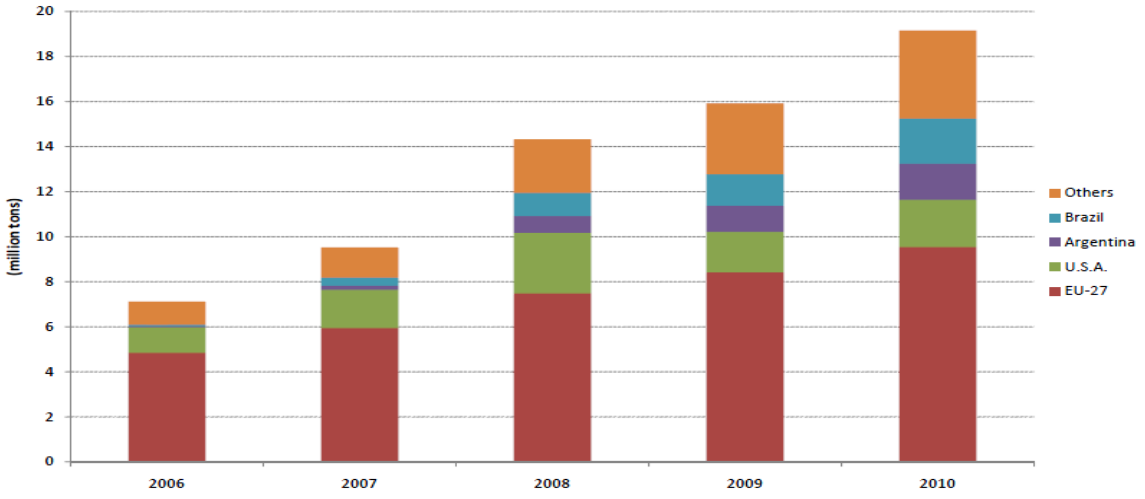


Figura 3 – Utilização de óleos vegetais para a produção de biocombustíveis por país produtor. Fonte: [9].

A utilização de óleos vegetais como combustível tem gerando grande polêmica. O aumento no preço dos óleos consequente do aumento da demanda afetará principalmente os países pobres. Há aqueles que dizem que a utilização de óleos vegetais como combustível criará uma competição entre alimentos em países pobres e combustíveis em países ricos.

Nesse contexto, um fato merece destaque: A relação entre área plantada e quantidade de óleo produzida. Os óleos de palma e palmiste juntos têm um rendimento superior a seis vezes o rendimento do óleo de colza. Esta característica é extremamente importante para superar o problema da crescente demanda sem a necessidade da utilização de áreas destinadas a agricultura de outros produtos.

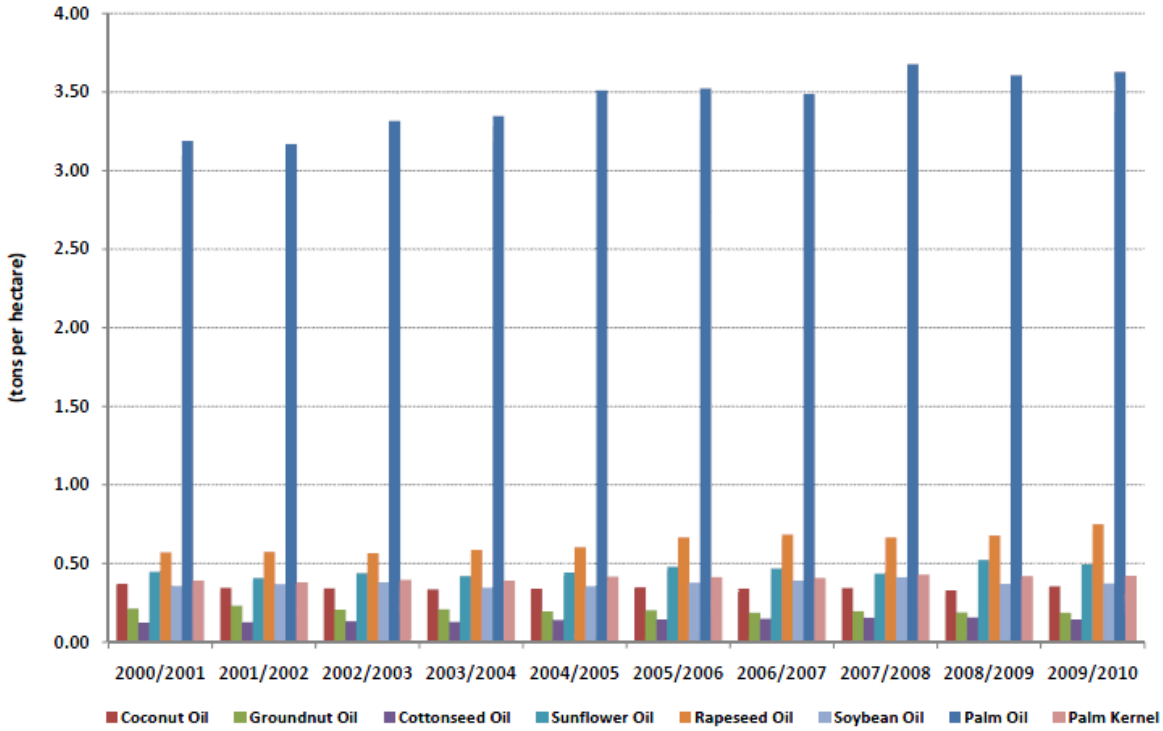


Figura 4 – Produção por hectare dos principais óleos vegetais. Fonte: [9]

1.2 Benefícios da utilização de óleos vegetais

1.2.1 Questões ambientais

Diferentemente do óleo diesel, a utilização de óleos vegetais permite o estabelecimento de um ciclo de carbono. O CO_2 é absorvido pela planta para a realização da fotossíntese, mecanismo pelo qual ela produz energia. O excesso de energia é armazenado sob a forma de óleo, seja em suas folhas ou nas sementes. O óleo é extraído, processado e preparado e após a sua utilização como combustível, o CO_2 é produzido e volta novamente para a atmosfera (Figura 5).

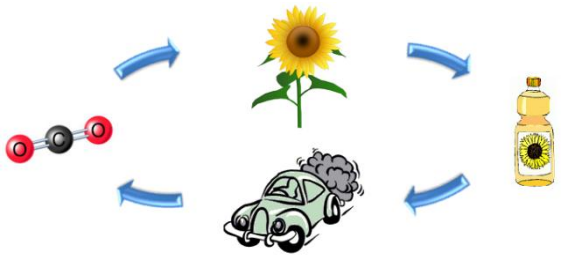


Figura 5 – Representação do ciclo do carbono.

1.2.2 Eficiência

Ainda não existe um estudo sobre o consumo energético e as emissões geradas pela utilização de óleos vegetais como combustível, entretanto, é possível fazer uma extrapolação a partir dos trabalhos realizados sobre o biodiesel. Em 1998, um estudo realizado pelo laboratório nacional de energias renováveis dos EUA analisou a quantidade de energia despendida em cada etapa do processo de produção e transporte do biodiesel até o consumidor final, incluindo a quantidade de energia requerida para o cultivo da plantação, transporte das sementes, extração do óleo, transporte do óleo, conversão do óleo vegetal em biodiesel e transporte do biodiesel [10]. Constatou-se que cada megajoule (MJ) disponível para o consumidor final requereu o consumo de 0,311 MJ de energia. Isso resulta em uma eficiência de 3,215. Em outras palavras, com a produção de biodiesel transforma-se 1 MJ de energia fóssil em 3,215 MJ de energia renovável.

A eficiência dos óleos vegetais é ainda maior, uma vez que ao contrário do biodiesel o processo não demanda a utilização de combustíveis fósseis como matéria-prima, nem exige uma transformação química dispendiosa do ponto de vista energético. Desconsiderando estas duas etapas, chega-se a uma estimativa de 6,4 para a eficiência da utilização desses óleos.[2]

1.2.3 Emissões de CO_2

De acordo com o mesmo estudo, a substituição do diesel pelo biodiesel reduz as emissões totais de dióxido de carbono (Ciclo de vida) em 78 por cento. Essa redução não acontece durante a combustão no veículo, onde ambos os combustíveis liberam aproximadamente a mesma quantidade

[2] Óleos vegetais e biodiesel possuem quantidades de energia similares.

de CO_2. Ela acontece porque a maior parte do carbono contido no biodiesel e liberado durante a sua produção foi retirada da atmosfera durante o cultivo da matéria-prima, ao contrário do que acontece com o óleo diesel. A quantidade total de dióxido de carbono liberada na produção, transporte e queima do biodiesel é de 253,22 gramas por MJ. Desse total, 202,4 g foram absorvidos pela planta para produção do óleo. Portanto, a emissão de dióxido de carbono resultante lançada na atmosfera é de 50,79 g por MJ.

Novamente, a utilização de óleos vegetais reduz ainda mais as emissões de CO_2, uma vez que não exige uma transformação química que consome metanol e de grande quantidade de energia, como acontece com o biodiesel. A grande maioria do metanol é produzida a partir de gás natural em refinarias. O estudo diz que a conversão de óleo vegetal em biodiesel é responsável por cerca de um terço da emissão total de dióxido de carbono. Ao deixar de fora esta etapa, chega-se a uma estimativa de uma redução nas emissões de 85 por cento.

As emissões de CO_2 só podem ser completamente eliminadas se em todas as etapas do processo de produção também forem utilizados biocombustíveis, incluindo a utilização de biometanol no caso do biodiesel. Outro benefício dos óleos vegetais é a não emissão de SO_2.

1.2.4 Questões econômicas

A utilização de óleos vegetais pode gerar grande economia, dependendo dos seguintes fatores: Hábitos de condução (Quantidade de quilômetros percorridos e porcentagem desses quilômetros utilizando óleo vegetal), consumo do veículo, preço do diesel, preço do óleo vegetal e custo inicial da conversão. Essas variáveis podem ser equacionadas na seguinte fórmula:

$$Economia = \frac{km\ x\ \%\ utilizando\ OV\ x\ (\$diesel - \$OV)}{Consumo\ do\ veículo} - Custo\ inicial\ da\ conversão \quad (1)$$

Pela fórmula acima é possível concluir que a economia depende de vários fatores que não estão relacionados com o combustível propriamente dito. Por exemplo, um condutor que possua um veículo extremamente eficiente e que o utilize por menos de 10.000 km por ano, principalmente em trajetos curtos onde o motor utiliza óleo vegetal somente durante uma pequena parte do percurso, pode jamais recuperar o investimento gasto na conversão do veículo. Por outro lado, um condutor que utilize seu veículo em média 30.000 km por ano em trajetos de média e longa duração, em que o motor utilize óleo vegetal a maior parte do tempo, provavelmente recuperará o investimento em um ou dois anos.

Tão importante quanto a economia de combustível e os hábitos de condução é o custo dos óleos vegetais utilizados como combustível. Nesse aspecto, a utilização de óleos novos não é tão vantajosa, uma vez que atualmente estes possuem preços próximos ao do diesel. A grande vantagem se encontra na utilização de óleos residuais, ou seja, aqueles que foram usados previamente na preparação de alimentos. Entretanto, não é fácil descobrir o custo real desses óleos. Para fazer esse cálculo, devem ser incluídos os custos de eletricidade, filtros descartáveis e dos demais materiais utilizados na coleta e filtragem do óleo. Talvez menos óbvio, mas que

também deve ser considerado é o custo das horas de trabalho necessárias para recolhimento e processamento de cada litro de óleo utilizado. A maioria das pessoas gasta cerca de uma hora ou mais por cada 100 litros de óleo. Assim, cada litro de óleo custará 0,10 € em mão-de-obra considerando uma pessoa cuja hora de trabalho vale 10 €. Para uma pessoa que valore seu tempo em 80 €/h, esse custo será de 0,80 €/litro.

O retorno do investimento na compra e instalação de um kit de conversão para a utilização de óleos vegetais gira em torno de dois anos. Este prazo é extremamente favorável quando comparado com outras fontes de energia alternativas disponíveis no mercado. Por exemplo, o retorno de um sistema de aquecimento de água através da energia solar, utilizado em residências é de cinco a oito anos. O retorno de um sistema de células fotovoltaicas é de sete a quinze anos.

1.2.5 Questões geopolíticas

Os óleos vegetais podem ser produzidos praticamente em todas as regiões do globo, em grande ou pequena escala. Essa descentralização significa o fim da submissão as regras impostas pelos países produtores de petróleo. Além disso, a produção não é limitada a capacidade de uma fonte, dessa forma ela pode se adequar a demanda, impedindo grandes oscilações nos preços.

1.3 Contexto e objetivos

A motivação deste trabalho é estabelecer recomendações práticas para a utilização de óleos de origem vegetal em motores diesel. Tendo em conta a longa durabilidade desses motores, prevê-se a utilização desses óleos em máquinas já existentes, sem que estas tenham que sofrer grandes modificações, sem que haja perda de desempenho com a utilização do combustível original (óleo diesel), sem que haja perda de durabilidade, tanto do motor quanto de seus componentes e que as emissões atendam as normas aplicáveis.

A viscosidade dos óleos vegetais é cerca de 10 vezes maior que a do óleo diesel convencional. Essa propriedade faz com que o óleo seja injetado em um spray de baixa qualidade e inadequadamente atomizado, levando a uma combustão desigual e ineficiente. É conhecido que o aumento da temperatura provoca a redução da viscosidade e, consequentemente, melhora a eficiência da combustão. Entretanto, deseja-se conhecer o efeito sobre o desempenho causado pela alteração das outras propriedades devido ao aumento da temperatura. Para isso, foram realizados ensaios com a temperatura do óleo (de colza) variando a entrada da bomba de alta pressão.

Outra técnica utilizada para reduzir a viscosidade dos óleos também foi investigada: Mistura destes com combustíveis menos viscosos. Para tal, foram testadas misturas de óleo de colza com óleo diesel (50%-50%).

A transesterificação de óleos vegetais, que resulta em um produto conhecido como biodiesel, é uma técnica amplamente utilizada para a redução da viscosidade desses óleos. Para avaliar o seu potencial, foram realizados testes com biodiesel puro e misturas com óleo diesel.

Por fim, com dados obtidos a partir de ensaios em um motor Zetor 1505, motor de médio porte utilizado na propulsão de tratores e dimensionalmente comparável ao Cummins ISBe4, pretende-se comparar o efeito da temperatura dos óleos vegetais em diferentes sistemas de injeção. O primeiro utiliza um sistema de injeção mecânico do tipo “in–line” e o segundo um sistema eletrônico do tipo “Common Rail”.

Os testes foram realizados sob diferentes condições operacionais de torque e rpm seguindo ciclos de teste padrão. A influência no desempenho, eficiência e emissões devido a utilização desses combustíveis foi estudada com a obtenção de dados de torque, rpm, consumo de combustível, temperatura em diferente pontos do sistema de injeção, emissões de partículas e gases em cada um desses modos.

1.4 Estrutura da dissertação

Uma breve revisão bibliográfica será feita no capítulo 2, apresentando as propriedades mais relevantes dos óleos vegetais que determinam a qualidade e rapidez com que ocorre a combustão em motores diesel. Essas propriedades estão relacionadas com as características de atomização, vaporização e mistura com o ar. Essas características são de extrema importância, uma vez que são as grandes responsáveis pela qualidade da combustão. As propriedades serão sempre comparadas as do diesel e as do biodiesel de forma a obter um ponto de comparação. Ênfase será dada a viscosidade, uma vez que esta é principal responsável pelos problemas enfrentados na utilização dos óleos vegetais.

O capítulo 3 descreverá o procedimento experimental adotado. Serão apresentados os motores utilizados, dinamômetro, métodos de medição de gases e de consumo de combustível. Todos estes dispositivos terão seu princípio de funcionamento explicado. Um esquema dos sistemas bi-combustível utilizados será mostrado, assim como as vantagens de cada configuração. Será apresentado o método de controlo da célula (Motor e dinamômetro). Por fim, serão apresentados os ciclos de teste utilizados e suas aplicações.

A apresentação dos diversos dados obtidos com os experimentos será feita no capítulo 4, de forma escrita e através de gráficos para uma melhor visualização. Comentários serão feitos nos pontos de maior interesse.

A discussão será feita no capítulo 5. Nessa parte, os resultados experimentais serão comentados, identificando os pontos de interesse e procurando elucidar as questões levantadas pela realização deste trabalho.

No capítulo 6 será feita a conclusão do trabalho, resumindo todo o conhecimento adquirido com a realização do mesmo e apontado possíveis lacunas a serem preenchidas em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

As propriedades do combustível têm vital importância na sua combustão. Em motores diesel, a combustão ocorre em duas fases: Pré-misturada e difusa. Na fase pré-misturada, o retardo de ignição determina o tempo que transcorrerá entre o início da injeção e o início da combustão. Na difusa, a velocidade da queima é controlada pela velocidade com que o combustível vaporiza e mistura com ar. Estas duas etapas são facilitadas pela injeção de um combustível finamente atomizado, ou seja, em pequenas gotas, o que representará uma maior razão superfície/volume. Além da pressão de injeção, a viscosidade desempenha papel fundamental na capacidade de atomização de um combustível. Os calores específicos, sensível e latente, influenciam a taxa de vaporização.

Além das propriedades vitais para a combustão, outras têm grande importância na trajetória do combustível ao longo do sistema de injeção. A densidade e o módulo de compressibilidade determinam a velocidade de propagação da onda de pressão ao longo do sistema de injeção e são responsáveis pelo início da injeção em sistemas em linha. Dois efeitos indesejáveis como injeção secundária e o "nozzle dribbling" têm relação com essas propriedades. O módulo de compressibilidade também é responsável pela pressão de injeção.

O poder calorífico determina a quantidade máxima de energia que o combustível pode fornecer com a sua combustão completa. Essa propriedade tem grande importância nas diferenças de potência máxima, torque máximo e velocidade em vazio. As propriedades ponto de auto-ignição, ponto de fulgor, pontos de névoa e fluidez, razão estequiométrica ar/combustível, lubricidade e solvência também serão revistas devido a importância em outros aspectos.

Além das propriedades dos combustíveis, outros fatores definem como ocorrerá a queima. Dentre eles, os principais são: Design da câmara de combustão, design do sistema de admissão, design do sistema de injeção e regime de funcionamento. Como o interesse desse trabalho é estudar a influência das propriedades sobre o desempenho, eficiência e emissões, fatores relacionados ao design do motor não serão considerados.

Neste capítulo serão apresentadas diversas propriedades dos óleos vegetais com ênfase na viscosidade. Sempre que possível serão feitas comparações com as propriedades do óleo diesel.

2.1 Constituição molecular dos óleos

Os óleos vegetais são compostos por moléculas chamadas triglicerídeos, costumam ser líquidos à temperatura ambiente e são derivados de plantas. Os triglicerídeos são moléculas formadas por três ácidos graxos unidos a uma estrutura principal chamada glicerol ou glicerina (Figura 6). Gorduras sólidas, provenientes de animais ou plantas, também são triglicerídeos e podem ser usadas como combustível para motores diesel, embora sua natureza não-líquida acrescente complicações.

As plantas produzem triglicerídeos como uma forma eficiente de armazenar energia. Em volume, o óleo vegetal contém mais de três vezes a energia contida no açúcar ou amido. A energia é armazenada nas numerosas ligações carbono-carbono e carbono-hidrogênio dos ácidos graxos.

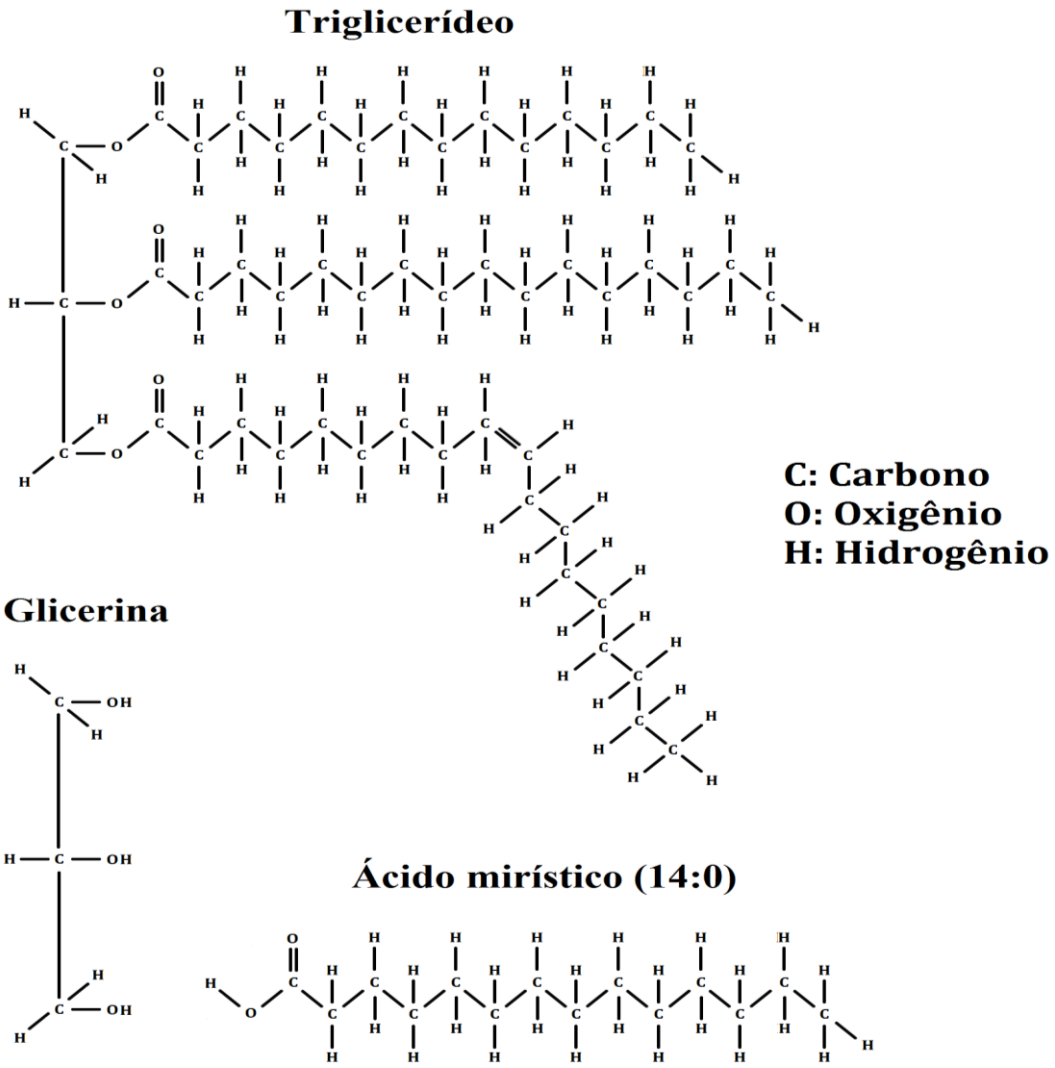


Figura 6 – Representação de um triglicerídeo e de seus elementos formadores (Glicerina e ácido graxo).

2.1.1 Similaridades entre os óleos vegetais, biodiesel e diesel mineral

O biodiesel é um óleo vegetal que foi quimicamente alterado para formar um produto muito menos viscoso, embora ainda compartilhe características comuns com os óleos vegetais. Basicamente, ele é produzido desconectando os ácidos graxos do glicerol, o que reduz o tamanho médio da molécula resultante a um terço do tamanho do triglicerídeo original. Essa redução de tamanho reduz a sua viscosidade a níveis comparáveis ao do diesel.

Como mencionado anteriormente, um triglicerídeo é composto por três ácidos graxos conectados a uma estrutura principal chamada glicerol. O glicerol é um álcool e as ligações que o conectam aos ácidos graxos são chamadas de ligações éster. Esta é a forma típica que alcoóis e ácidos se conectam. A reação que produz o biodiesel é apenas uma substituição do álcool da ligação éster por um álcool mais simples, usualmente metanol, na presença de um catalisador. Essa reação é chamada de transesterificação. O resultado é a formação de três ésteres (Metílico, etílico, etc.) e um glicerol livre (Figura 7).

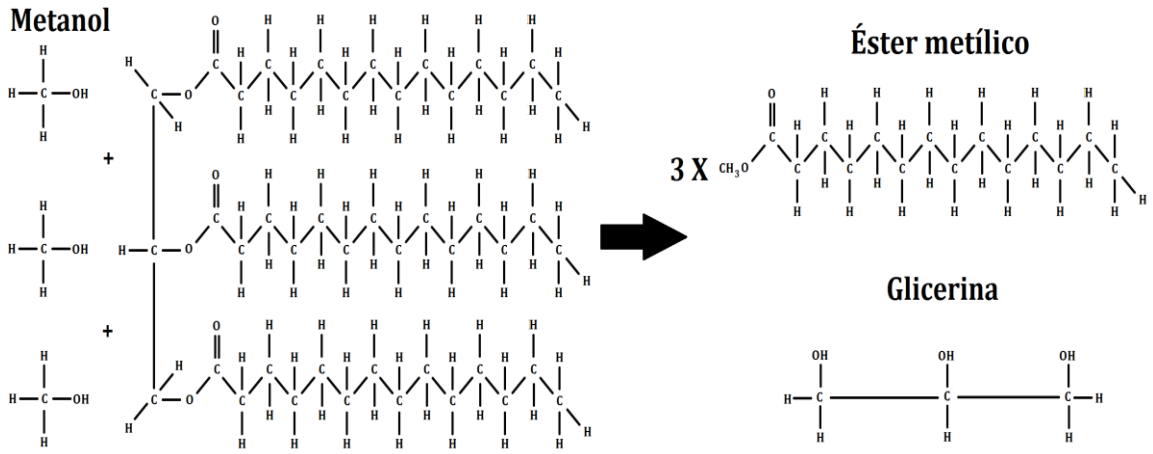


Figura 7 – Reagentes e produtos da reação de transesterificação.

O óleo diesel convencional é composto principalmente por hidrocarbonetos (Exemplo: n–hexadecano). Uma molécula de diesel e um ácido graxo típico contêm uma quantidade próxima de ligações carbono-carbono e carbono-hidrogênio dispostas aproximadamente na mesma forma (Figura 8).

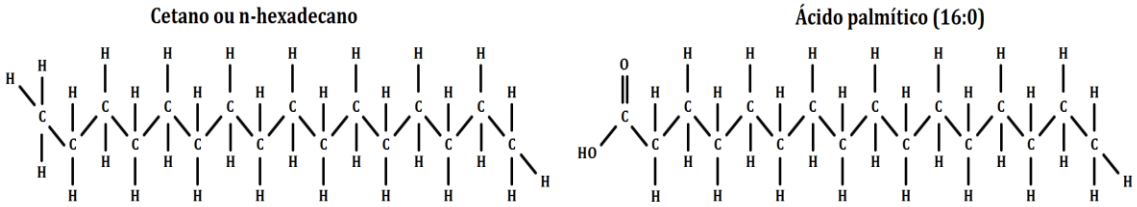


Figura 8 – Similaridade molecular entre uma molécula de óleo diesel (Cetano) e um ácido graxo típico.

2.2 Ácidos graxos e diferenças entre os óleos vegetais

O óleo vegetal produzido a partir de um tipo de planta pode ser radicalmente diferente do óleo produzido a partir de plantas de espécies diferentes. Por exemplo, o óleo de coco é semi-sólido a temperatura ambiente e possui grande resistência aos processos naturais de degradação, enquanto o óleo de linhaça é líquido a essa temperatura, porém, pode se tonar inutilizável após um período de poucos dias de exposição ao ar. A diferença entre esses óleos se encontra nos ácidos graxos que os compõem.

Plantas podem gerar cerca de doze tipos diferentes de ácidos graxos. Tais ácidos se diferenciam pelo comprimento da cadeia de carbono e também pelo número de ligações duplas carbono-carbono existentes nessa cadeia. Cada espécie de planta possui determinados tipos de ácidos graxos na composição de seus triglicerídeos. Esses ácidos determinam características como: Viscosidade, temperatura de fusão, estabilidade química, etc.

2.2.1 Cadeia de carbono

Um ácido graxo pode conter de 14 a 24 átomos de Carbono. Em geral, óleos que contêm ácidos com cadeias de carbono mais longas possuem temperatura de fusão mais elevada, são mais viscosos, e contêm maior quantidade de energia por unidade volume.

O índice de saponificação é um indicador do comprimento médio da cadeia de carbono. Quanto maior o índice de saponificação menor será o comprimento da cadeia.

2.2.2 Ligações duplas

Os ácidos graxos também variam no número de ligações duplas existentes entre os átomos de carbono. Eles podem conter zero, uma, duas ou três ligações desse tipo. O número de ligações duplas carbono-carbono também é chamado de grau de insaturação. Isso porque quando possui uma ligação dupla, o átomo de carbono necessita de uma ligação a menos com o átomo de hidrogênio, do que necessitaria se tivesse conectado a outro átomo de carbono por uma ligação simples. Em outras palavras, ele não está saturado de hidrogênio. Portanto, quanto maior o número dessas ligações, menos átomos de hidrogênio a molécula possuirá e maior será o grau de insaturação.

Quando ocorrem naturalmente, essas ligações impõem uma espécie de dobra na cadeia predominantemente reta dos ácidos saturados, tornando-as mais rígidas, como pode ser visto na Figura 6.

Um alto grau de insaturação explica, por exemplo, porque os óleos vegetais são líquidos a temperatura ambiente e a manteiga é sólida. Os triglicerídeos da manteiga contêm principalmente cadeias retas de ácidos graxos saturados, o que permite uma união de forma mais compacta e a formação de ligações intermoleculares mais fortes do que as ligações formadas entre os ácidos insaturados presentes nos óleos vegetais (Figura 9).

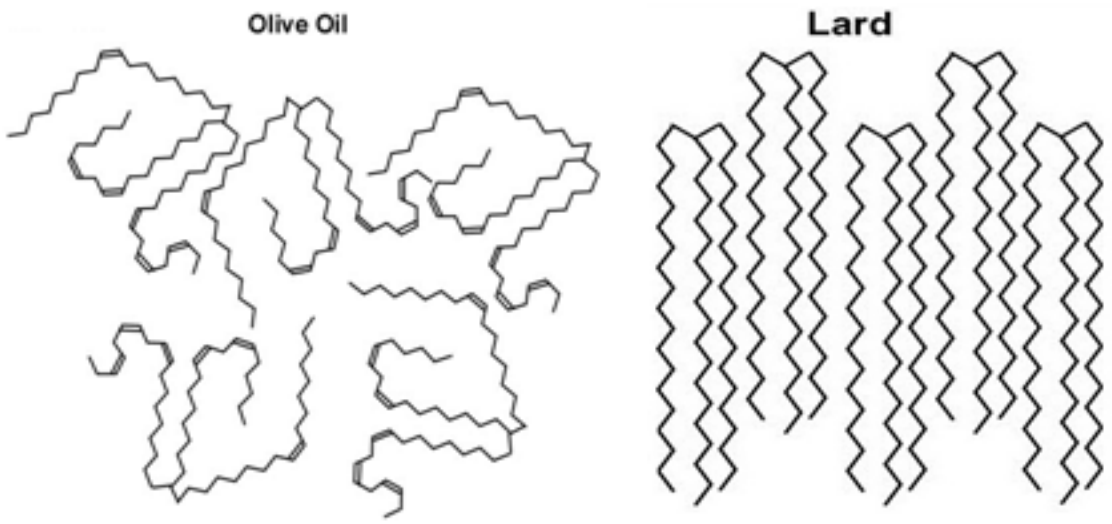


Figura 9 – Representação da disposição mais dispersa dos triglicerídeos nos óleos de oliva e mais compacta na manteiga/banha de porco. Fonte: [11].

Entre os óleos vegetais, quanto maior for o grau de insaturação, menor será a temperatura de fusão, a viscosidade e a estabilidade química. O índice de iodo é um indicador da insaturação. Quanto maior o valor deste índice, mais insaturado será o óleo.

Tabela 1 – Índice de iodo, número de cetano, ponto de névoa e fluidez dos óleos vegetais.

Óleo	**Índice de iodo**	**Número de cetano**	**Ponto de névoa (ºC)**	**Ponto de fluidez (ºC)**
Palma	35–61	-	31	
Soja	69,82	38,1	– 4	– 12
Castor	88,72	42,3		
Gergelim	91,76	40,4	– 4	– 9
Avelã	98,62	52,9		
Oliva	100,16	49,3		
Amêndoa	102,35	34,5		
Colza	108,05	37,5	– 4	– 32
Algodão	113,20	33,7	2	–15
Papoula	116,83	36,7		
Milho	119,41	37,5	– 1	– 40
Amendoim	119,55	34,6	13	– 7
Trigo	120,96	35,2		
Girassol	132,32	36,7	7	–15
Noz	135,24	33,6		
Cártamo	139,83	42,0	– 12	– 21
Linhaça	156,74	27,6	2	– 15
Fonte: [12], [13] e [14]				

2.3 Poder calorífico

O poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases) libertada na oxidação de um determinado combustível. Geralmente utiliza-se o poder calorífico inferior (PCI), que não leva em consideração a energia libera pela posterior condensação do vapor d'água contido nos gases de escape.

Os óleos vegetais possuem entre 89 e 98% da energia por unidade volume contida no diesel. O biodiesel, por sua vez, possui entre 91 e 93% da energia do diesel [15]. Essas pequenas diferenças se refletem em um consumo um pouco maior, pequena diminuição no torque máximo e menor velocidade em vazio.

O PCI do óleo diesel vale, aproximadamente, 36 MJ/litro. O PCI dos óleos vegetais mais comuns costuma estar entre 32 e 35 MJ/litro [13]. Os óleos vegetais reciclados se encontram na parte inferior desse intervalo devido ao combustível já ter sido parcialmente oxidado. O PCI do biodiesel vale entre 32,7 e 33,5 MJ/litro.

Quando comparado com outros combustíveis alternativos, os óleos vegetais esterificados e não esterificados são extremamente similares ao diesel em termos energéticos. Combustíveis como o etanol (E85), gás natural e GLP contêm apenas cerca de 68%, 63% e 72% do poder calorífico do diesel, respectivamente [15]. Tal proximidade surge da profunda similaridade molecular entre os óleos vegetais e o diesel (Figura 8).

2.3.1 Influência sobre o consumo e potência

Sendo todas as demais propriedades iguais e sabendo-se a diferença entre o PCI dos óleos vegetais, do biodiesel e do diesel, é possível estimar o aumento no consumo e a redução na potência máxima (Admitindo a mesma eficiência da combustão para ambos os combustíveis). Por exemplo, se um carro movido a diesel consegue andar 10 km com um litro de combustível, ao passar a utilizar óleo vegetal este mesmo carro será capaz de andar entre 8,9 e 9,8 km por litro de combustível e entre 9,1 e 9,3 km com biodiesel.

Similarmente, se a potência máxima é limitada pelo volume máximo de combustível que o sistema de injeção é capaz de fornecer, espera-se uma redução de 2 a 11 por cento nessa potência com a utilização de óleos vegetais e uma redução de 7 a 9 por cento com a utilização de biodiesel. Em uma condição normal de condução, o motorista não notaria essa perda porque inconscientemente a compensaria acelerando mais o carro.

Finalmente, em motores onde a velocidade em vazio é definida pela quantidade de combustível injetada, o motor funcionará a rotações mais baixas em vazio devido à menor densidade de energia dos óleos vegetais e biodiesel.

2.4 Viscosidade

Viscosidade é a resistência a deformação (movimento) apresentada por um fluido. Essa resistência é provocada pela atração existente entre as moléculas do fluido. Um triglicerídeo é uma molécula apolar, o que significa que não há regiões permanentemente carregadas positiva ou negativamente. Essas moléculas se unem através de outro tipo de ligação conhecida como Van der Waals. Essas forças aumentam com o aumento do tamanho da molécula e consequentemente há o aumento da viscosidade. Por esse motivo os óleos vegetais são mais viscosos que o óleo diesel e o biodiesel, pois sua molécula é, em média, três vezes maior. Entre os óleos vegetais, sendo as demais propriedades iguais, aqueles que apresentam ácidos graxos com cadeias de carbono mais longas serão mais viscosos.

Essa é a maior diferença em relação ao diesel e o principal problema dos óleos vegetais. Esses óleos podem ser até 10 vezes mais viscosos que o diesel. A utilização direta desses óleos, ou seja, sem serem antes submetidos a nenhum procedimento para que sua viscosidade seja reduzida (Aquecimento, transesterificação, mistura com diesel), tem-se mostrado inaceitável, causando significativa perda de desempenho e levando a danos no motor devido a formação de depósitos de carbono e a contaminação do óleo lubrificante.

A viscosidade do diesel, tipicamente medida a 40º C, se encontra entre 1,9 e 4,1 centistokes [16] e a do biodiesel entre 1,9 e 6,0 [17]. Óleos vegetais comuns têm viscosidade entre 30 e 40 centistokes.

2.4.1 Problemas relacionados com a viscosidade

Bombas, filtros e linhas de combustível

Quanto maior a viscosidade, maior deverá ser a potência da bomba para mover uma determinada quantidade de óleo ao longo das linhas que levam o combustível ao motor. Se o óleo for muito viscoso, a potência fornecida pela bomba pode não ser suficiente para levar a quantidade de combustível requerida ao motor. Mesmo com uma bomba suficientemente potente para mover um óleo de grande viscosidade, as grandes pressões ou vácuos gerados podem causar problemas. Sob grandes pressões, poderá haver vazamentos nas ligações entre os tubos e filtros podem romper. Sob vácuo, um problema muito comum é a entrada de ar nas linhas de combustível, fazendo com que o motor passe a receber uma quantidade insuficiente de combustível, o que pode levar a combustão incompleta e fumaça nos gases de escape.

Atomização

A alta viscosidade de um combustível dificulta a sua atomização, gerando um spray de baixa qualidade, que evaporará lenta e desigualmente. Por sua vez, a baixa qualidade do spray resulta em uma combustão incompleta e óleo liquido atingindo as paredes do cilindro. Ambos levarão a carbonização dos injetores, dificultando a sua abertura, carbonização das válvulas de admissão e escape, carbonização da haste da válvula de escape, depósitos de carbono nos anéis do pistão e combustível líquido atravessando os anéis de vedação e contaminando o óleo de lubrificação do motor [13].

2.4.2 Formas de diminuir a viscosidade

Para que a utilização de óleos vegetais em motores diesel não modificados seja possível, é necessário que a viscosidade do óleo seja reduzida. Isso pode ser conseguido através de três métodos:

– Alterando quimicamente o combustível e produzindo ésteres metílicos (biodiesel). É atualmente a estratégia mais popular.

– Aquecendo o óleo. A temperatura tem um enorme impacto na viscosidade dos óleos vegetais, havendo um decréscimo exponencial com o aumento da temperatura.

– Misturando os óleos vegetais com outros combustíveis menos viscosos. Essa estratégia tem sido geralmente mal sucedida. A maior parte da literatura relata que misturas compostas por mais de 20 por cento de óleo vegetal resultaram em falhas do motor [13]. Misturas com menos de 20 por cento de óleo vegtal se mostraram possíveis em testes de curto prazo, no entanto, o efeito a longo prazo da utilização dessas mituras é desconhecido.

2.4.3 Temperatura ideal

Os óleos vegetais só atingem 4,1 centistokes, a maior viscosidade permitida para o óleo diesel (No. 2 ASTM D975), a cerca de 140 ºC. Alguns pesquisadores sugerem que essa é a temperatura mínima que os óleos vegetais devem ser aquecidos, entretanto, como é difícil chegar a essa temperatura em aplicações reais, o aquecimento a 70 ºC é considerado aceitável pela literatura.

Em um programa de pesquisas patrocinado pelo departamento de agricultura dos EUA (USDA), a fim de desenvolver especificações para a utilização de óleos vegetais como combustível, Ryan, Dodge e Callahan recomendaram o aquecimento dos óleos a 140 ºC antes de serem injetados na câmara de combustão. Eles se basearam no fato de que os óleos, quando aquecidos a esta temperatura, possuíam viscosidade de aproximadamente 4 centistokes e apresentavam características de injeção e atomização equivalentes as do diesel a 40 ºC com viscosidade de 2,4 centistokes [18]. Os pesquisadores demonstraram que os óleos aquecidos a temperatura recomendada apresentavam uma combustão muito mais eficiente e completa que a apresentada pelos óleos quando não aquecidos. Entretanto, eles não compararam o desempenho e emissões do motor utilizando óleos aquecidos a temperaturas mais baixas que 140 ºC.

Pugazhvadivu e Jeyachandran realizaram estudos com óleo de girassol aquecido a 70 ºC e relataram melhorias acentuadas em relação ao óleo não aquecido (30 ºC) em termos de eficiência térmica, produção de monóxido de carbono, consumo de combustível, densidade de partículas; aumento nas emissões de NO_X e temperatura dos gases de escape, todos indicativos de um maior rendimento da combustão. O posterior aquecimento a 135 °C produziu apenas pequenas melhorias, particularmente em uma maior eficiência térmica e menores emissões de monóxido de carbono [19].

Labeckas e Bari realizaram estudos com óleo de palma aquecido a 60 °C e relataram bons resultados iniciais. Entretanto, ao realizarem estudos de longo prazo, eles verificaram que o aquecimento a esta temperatura era inadequado, levando a depósitos de carbono na câmara de

combustão; desgaste dos anéis de pistão, camisas dos cilindros, pistões e válvulas da bomba injetora e a injeção de um spray de baixa qualidade, todos problemas associados a um combustível excessivamente viscoso [20].

Até que se realizem testes destrutivos de longa duração, a questão da temperatura adequada que os óleos vegetais devem ser injetados permanecerá aberta. No entanto, grande parte dos artigos publicados sugere que cerca de 70 ºC é a temperatura mínima, e, correspondentemente, entre 13 e 15 centisstokes é a viscosidade máxima.

2.4.4 Convergência da viscosidade

Com o aumento da temperatura, as viscosidades dos óleos vegetais não só diminuem, como também tendem a convergir (Figura 10). Este fato permite o estabelecimento de uma temperatura mínima de injeção para todos os óleos, em vez de ter que especificar uma temperatura diferente para cada um. É por isso que, num sistema com o aquecimento adequado, a viscosidade do combustível à temperatura ambiente não importa. Em um sistema que aqueça o óleo a 70 °C, ele será injetado com uma viscosidade suficiente para queimar de forma eficiente, mesmo que se apresente como manteiga a temperatura ambiente.

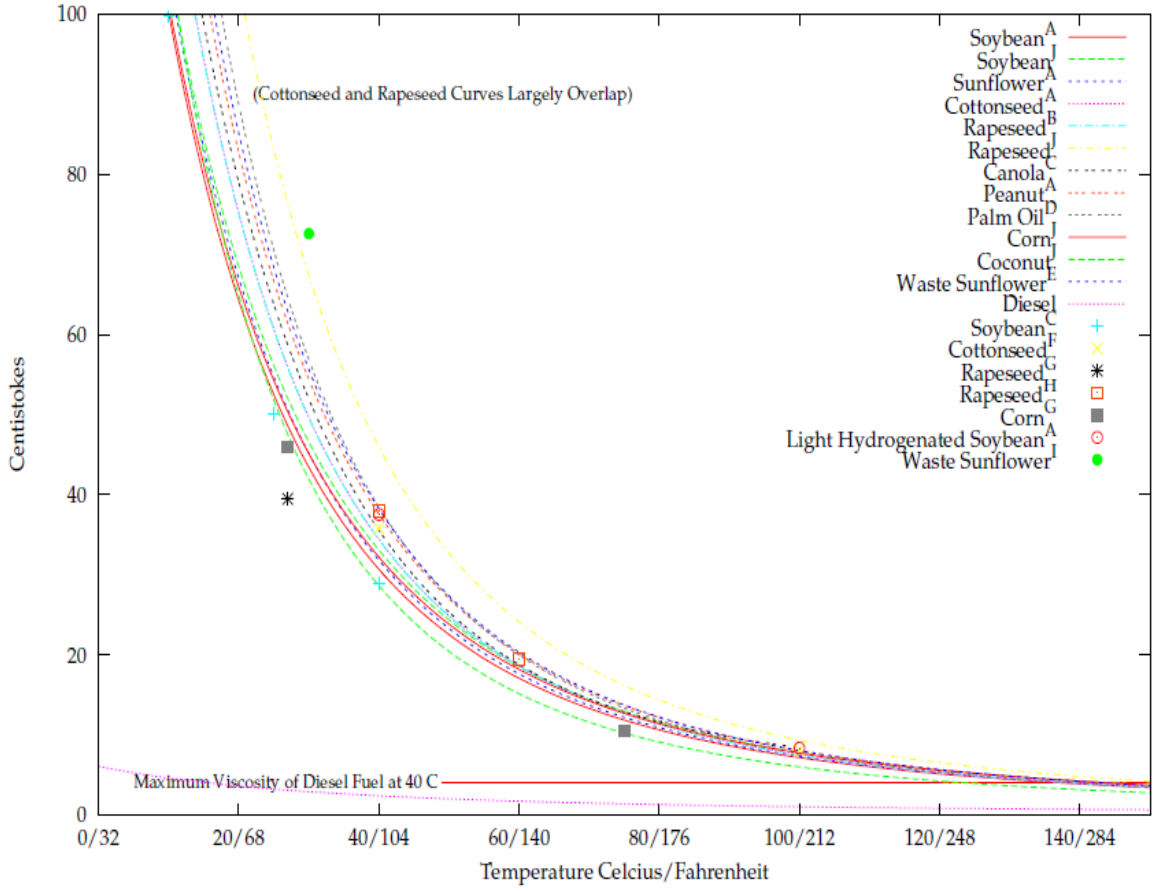


Figura 10 – Influência da temperatura na viscosidade de diversos óleos vegetais. Fonte: [21]

2.5 Retardo de ignição

O retardo de ignição do combustível, isto é, o período de tempo entre o início da injeção e o início da ignição do mesmo, é medido pelo número de cetano. Quanto maior for o número de cetano, menor será o retardo de ignição e melhor será a qualidade do combustível. O retardo de ignição afeta diversas características do motor como "knock", ruído, potência, eficiência da combustão e emissões.

Os motores a diesel funcionam bem com combustíveis que tenham números de cetano entre 40 e 55. Combustíveis com números mais elevados, e que possuam por isso, atrasos de ignição mais reduzidos, dão mais tempo ao motor para que este complete a combustão. É por isso que motores a diesel de alta velocidade operam de forma mais eficiente com combustíveis que possuam números de cetano elevados. Não há qualquer vantagem em termos de desempenho ou de redução de emissões acima de 55, valor após o qual o desempenho do combustível atinge um limite.

O padrão para o óleo diesel comercializado na União Européia e na maior parte dos restantes países europeus é o EN 590, com um número de cetano mínimo de 51 [22]. Já o diesel de tipo premium pode ter um número de cetano próximo de 60. O número de cetano dos óleos vegetais varia entre 30 e 50, tendo os óleos mais comuns valores sempre abaixo de 40, o que indica que esses óleos têm um retardo de ignição maior que o do diesel, tornando–os inaceitáveis como substitutos (Tabela 1).

Entretanto, o número de cetano não é um bom indicador para o real retardo de ignição dos óleos vegetais quando estes são aquecidos antes de entrarem na câmara de combustão. Para que este número seja válido, os ensaios devem ser realizados seguindo um rígido protocolo, o qual define, entre outras coisas, que o combustível seja injetado a uma temperatura entre 18 e 32 ºC[3]. No entanto, sabe-se que a estas temperaturas o óleo vegetal apresenta grande viscosidade, levando uma atomização inadequada e a um spray de baixa qualidade, que por sua vez levará a um maior retardo de ignição do que o apresentado pelo óleo aquecido. Caso o óleo seja aquecido, a fim de retratar as reais condições de uso, o ensaio deixará de seguir o protocolo e o valor encontrado para o retardo de ignição, embora muito útil, não cumprirá a definição de número de cetano e não poderá ser definido como tal.

Estudos realizados confirmaram que os óleos vegetais aquecidos apresentaram um retardo de ignição menor que o indicado pelo número de cetano, e consequentemente, um atraso menor do que o do diesel.

Infelizmente, não existe outra medida aceitável além do número de cetano que permita comparar quantitativamente o retardo de ignição dos óleos vegetais aquecidos com o do diesel. O melhor que se pode fazer é ressaltar que os óleos, quando aquecidos acima de 70 °C, apresentam retardos de ignição relativamente curtos que os tornam aceitáveis para serem substitutos do diesel.

[3]Padrão ASTM D613 nos Estados Unidos e EN ISO 5165 na Europa

2.5.1 Efeitos do retardo de ignição

O retardo de ignição é extremamente importante porque determina o quão explosiva será a combustão. Um combustível com longo retardo de ignição terá a maior parte ou mesmo todo o combustível injetado na câmara de combustão e misturado com ar antes da ignição iniciar e, uma vez iniciada, todo o combustível queimará de uma só vez produzindo picos de pressão e temperatura muito mais elevados. Com um retardo de ignição curto, a combustão começa enquanto existe relativamente pouco combustível na câmara e continua por mais tempo com menor intensidade.

Pode parecer que uma explosão mais intensa seria desejável uma vez que é a força da explosão que impulsiona o pistão no motor de combustão interna, porém, é mecanicamente mais eficiente ter uma pressão menos intensa impulsionando o pistão por mais tempo do que uma pressão mais intensa impulsionando o pistão por menos tempo. Adiciona-se a isso o fato de uma combustão mais longa produzir uma queima mais eficiente, o que significa menos produtos de uma combustão incompleta sendo lançados na atmosfera. O fator limitante para que não se tenha uma combustão tão longa quanto possível é a emissão de NO_X. Estes gases são produzidos pelas altas temperaturas da combustão e um atraso de ignição curto significa um período de tempo mais longo com as condições necessárias para a formação de NO_X.

2.5.2 Retardo de ignição e insaturação

Óleos vegetais mais insaturados tendem a ter retardos de ignição mais longos. Embora o número de cetano não seja um indicador preciso do retardo de ignição dos óleos aquecidos, a diferença entre o número de cetano de diferentes óleos vegetais reflete a diferença no retardo de ignição desses óleos.

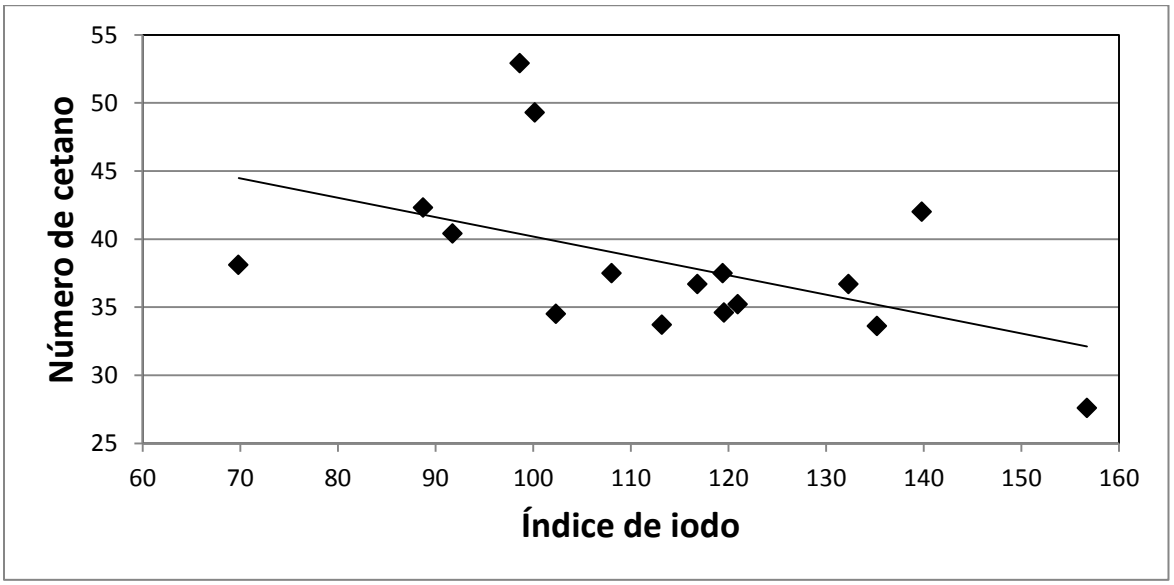


Figura 11 – Relação entre o número de cetano e o índice de iodo de diferentes óleos vegetais baseados na Tabela 1. A tendência é quanto maior for o índice de iodo (Insaturação) menor seja o número de cetano (Maior atraso da ignição).

2.6 Densidade

A 20 °C a densidade do óleo diesel é de 820 kg/m^3. Os óleos vegetais são mais densos, com densidades variando entre 900 e 910 kg/m^3 a 20 °C. A água tem densidade de 960 kg/m^3 a 20 °C. Ambos os óleos diesel e vegetal flutuam sobre a água, mas a menor diferença entre a densidade do óleo vegetal e da água em comparação com a diferença entre diesel e água, explica, em parte, por que separadores de água projetados para o diesel não funcionam tão eficazmente com óleo vegetal.

2.7 Módulo de compressibilidade

O módulo de compressibilidade de um material mede a sua resistência a compressão uniforme e, por tanto, representa a razão entre a pressão exercida sobre um corpo e a percentagem da diminuição do seu volume. O óleo vegetal é menos compressível do que o diesel, apresentando um módulo de compressibilidade de aproximadamente 2,1 MPa contra 1,7 MPa do diesel a 25 °C e 50 MPa [23]. Essa propriedade é importante porque, juntamente com a densidade, determina a velocidade com que a onda de pressão (Velocidade do som) se propagará através do fluido, de acordo com equação abaixo:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \tag{2}$$

Resolvendo esta equação, verifica-se que a onda de pressão se propaga mais rapidamente através dos óleos vegetais do que no diesel. Isso significa que quando óleo vegetal é utilizado, a onda de pressão criada pela bomba irá mover-se mais rapidamente através das linhas de alta pressão, ocasionando o avanço da injeção.

Além da velocidade de propagação da onda de pressão, o módulo de compressibilidade determina outro fator crítico para os motores diesel: A pressão de injeção. Quanto maior for o módulo de compressibilidade, maior será a pressão de injeção do combustível na câmara de combustão. Esse fator também influenciará o início e o fim da injeção.

Uma consequência indesejável do aumento da pressão de injeção é que as ondas de pressão, assim como todas as ondas, refletem e refratam quando atingem superfícies e interagem entre si. Após o fim da injeção, ainda haverá ondas deslocando-se através das linhas de alta pressão, podendo causar a abertura do injetor, fenômeno conhecido como injeção secundária, ou impedi-lo de fechar apropriadamente, conhecido como “nozzle dribling” [4].

A ocorrência de qualquer uma das duas situações descritas acima levará a sérios danos no motor. O combustível injetado após o fim da primeira injeção entrará em uma câmara de combustão que já não estará a uma temperatura suficiente para que haja uma queima rápida e

[4] Em sistemas de injeção controlados mecanicamente.

eficiente, além de não conseguir se dispersar adequadamente pela câmara, havendo zonas nas quais não haverá oxigênio suficiente para que ocorra a combustão. Um cenário ideal para a formação de depósitos de carbono.

2.7.1 Influências da temperatura e pressão no módulo de compressibilidade

Felizmente, o módulo de compressibilidade dos óleos vegetais diminui com o aumento da temperatura, como pode ser visto na

Figura 12. Outro fator que influencia o valor do módulo de compressão é a pressão [23].

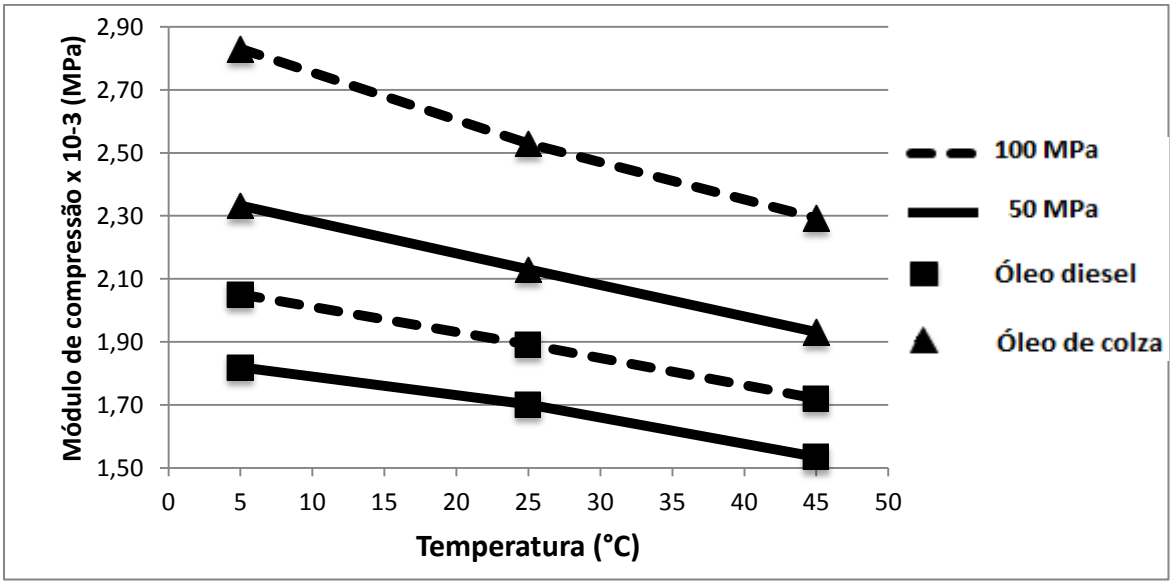


Figura 12 – Influência da temperatura e pressão no módulo de compressão dos óleos vegetais. Fonte: [23]

2.8 Calor específico

O Calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. O calor específico dos óleos vegetais é menos da metade do calor específico da água. Essa grandeza tem importância fundamental no design de sistemas para o aquecimento do óleo vegetal. A 20 °C, o calor específico dos óleos vegetais varia entre 1,83 e 2,20 J/(kg.°C) e o da água é 4,18 J/(kg.°C).

2.9 Lubricidade

Os óleos vegetais são excelentes lubrificantes, muito melhores que o diesel. Lubricidade é geralmente relacionada apenas a viscosidade, com fluidos mais viscosos sendo melhores lubrificantes. Entretanto, no caso dos óleos vegetais, enquanto que a viscosidade afeta sua lubricidade, ela por si só não a explica. Em outras palavras, a lubricidade é determinada por uma

série de atributos físicos e químicos dos óleos que não são bem compreendidos [18]. O aquecimento do diesel deve ser evitado, uma vez que diminui ainda mais a sua lubricidade. Esta preocupação não existe com os óleos vegetais.

2.10 Solvência

O uso de certos tipos de biocombustíveis em carros antigos pode causar sérios danos ao sistema de alimentação de combustível devido ao fato de possuírem um elevado poder de solvência em materiais orgânicos. O biodiesel, por exemplo, pode amolecer ou até mesmo dissolver determinados materiais como borrachas naturais (presente em veículos mais antigos na forma de mangueiras e circuitos de combustíveis) ou espumas de poliuretano. Esses materiais podem ser utilizados nas linhas de combustível, podendo ser substituídos sem grandes custos por materiais plásticos compatíveis, como o teflon, por exemplo.

O poder solvente dos óleos vegetais é muito menor que o do biodiesel e mesmo que o do diesel e, portanto, sua utilização não leva aos problemas relatados associados à utilização desses combustíveis. Na Tabela 2, encontram-se as compatibilidades de diversos materiais com o óleo vegetal, biodiesel e diesel convencional[5].

Tabela 2 – Compatibilidade de diversos materiais com os óleos vegetais, diesel e biodiesel.

Material	**Óleo vegetal**	**Diesel**	**Biodiesel**
PVC	A	B	A
Tygon	B	A	D
Nylon	A	A	B
Polietileno alta densidade	A	B	B
Polietileno PEX	B	D	B
Polipropileno	A	A	D
Poliuretano	B	C	B
Silicone	A	D	B
Neopreno	C	B	D
Nitrila	A	A	D
Viton	A	A	B
Borracha natural	D	D	D
Fluorocarbono	A	A	A
Teflon	A	A	A
A: Excelente, B: Boa, C: Razoável, D: Inaceitável			

[5] O comportamento desses materiais pode variar significantemente dependendo da variedade do material, condições de pressão e temperatura.

2.11 Pontos de Névoa e de Fluidez

O ponto de névoa é a temperatura em que o líquido, por refrigeração, começa a ficar turvo, e o ponto de fluidez é a temperatura em que o líquido não mais escoa livremente ao longo das linhas e filtros. Estas propriedades são consideradas importantes no que diz respeito à temperatura ambientes onde o combustível deva ser armazenado e utilizado.

O óleo diesel não tem pontos de névoa e de fluidez especificados. Em vez disso, as refinarias são obrigadas a fazer misturas de combustível adaptadas para diferentes áreas geográficas e épocas do ano. Essa estratégia geralmente funciona bem, exceto na presença de frentes frias.

Tanto o ponto de fluidez como o ponto de névoa do biodiesel variam segundo a matéria-prima que lhe deu origem, e ainda, o álcool utilizado na reação. Da mesma forma, essas propriedades não são constantes nos óleos vegetais e dependem do perfil de ácidos graxos presentes em cada espécie de óleo (Tabela 1). Geralmente, óleos mais saturados têm pontos de névoa e fluidez mais elevados do que óleos insaturados (Figura 13). Depois de utilizados na preparação de alimentos, os óleo vegetais apresentam pontos de névoa e fluidez mais elevados do que o óleo fresco.

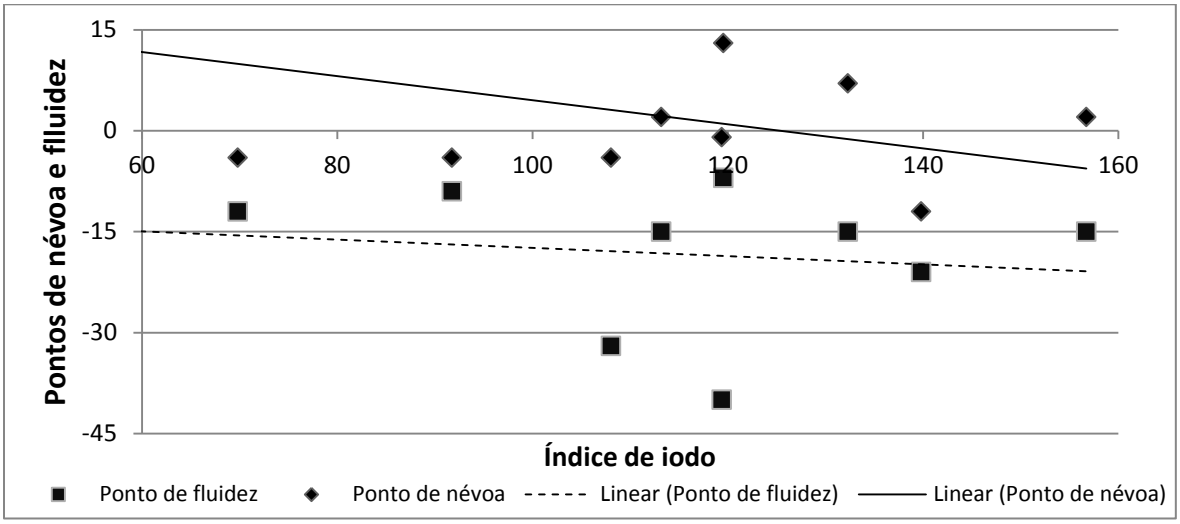


Figura 13 – Relação entre os pontos de névoa e fluidez e o índice de iodo de diferentes óleos vegetais baseados na Tabela 1. A tendência é que quanto maior for o índice de iodo (Insaturação) menor sejam os pontos de névoa e fluidez.

2.12 Ponto de fulgor

Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um combustível liberta vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável por uma fonte externa de calor. O ponto de fulgor não é suficiente para que a combustão seja mantida. Ao retirar-se a fonte de calor (faísca), a combustão da mistura se extinguirá. Óleos vegetais comuns têm pontos de fulgor entre 160 e 320 °C [27]. O óleo diesel tem ponto de fulgor entre 37 °C e 54 °C [27].

Trata-se de um dado importante em especial no que se refere à segurança, aos riscos de transporte, armazenagem e manuseamento. Seu uso é limitado no que se refere ao comportamento do óleo as altas temperaturas e pressões da câmara de combustão.

2.13 Ponto de auto-ignição

O ponto (temperatura) de auto-ignição é a temperatura mínima em que ocorre a combustão, independente de uma fonte de ignição, como uma chama ou faísca, quando o simples contato do combustível (em vapor, por exemplo), em contato com o comburente já é o suficiente para estabelecer a reação. Os óleos vegetais comuns possuem ponto de auto-ignição entre 300 e 450 °C [27]. O do diesel está entre 250 e 285 °C [28].

2.14 Razão estequiométrica ar/combustível

A razão estequiométrica ar/combustível é a razão entre a massa de ar e a massa de combustível onde, no final da combustão, não haverá oxigênio nem elementos da combustão incompleta presentes nos gases de escape. A razão estequiométrica do óleo diesel vale aproximadamente 15:1, para os óleos vegetais essa razão vale 13:1 [29].

Em condições normais, os motores diesel utilizam uma mistura pobre, o que significa que há mais ar na câmara de combustão do que o necessário para a combustão completa. Fumaça preta na aceleração é geralmente sinal da combustão incompleta do combustível, resultado da injeção de mais combustível do que o estabelecido pela relação estequiométrica.

2.15 Processos de degradação dos óleos vegetais

2.15.1 Oxipolimerização

Quando comparado ao diesel, o óleo vegetal é um combustível relativamente instável. Se exposto ao ar, luz solar, o calor elevado, umidade, ou enzimas, o óleo deteriorar-se-á e se tornando inutilizável como combustível. Quando excessivamente deteriorado, os óleos vegetais podem causar diversos problemas como encurtar a vida dos filtros de combustível, depósitos no tanque e no sistema de injeção de combustível, falhas da bomba de injeção e injetores, e se houver contaminação do óleo de lubrificação do motor, este rapidamente se transformará em uma substancia com aspecto de maionese (Figura 14), levando a falha catastrófica do mesmo.

Os óleos vegetais sofrem um complexo processo de cura na presença de oxigênio denominado oxipolimerização ou “oxi-secagem”. Esta cura, de grande importância para a indústria de revestimentos, conduz à formação de um filme sólido e depende, fundamentalmente, do tipo e do teor de insaturações presentes no sistema. A secagem será tanto mais rápida quanto maior for o número de insaturações presentes no óleo.

A dimensão dos problemas causados pela oxipolimerização dependerá de uma série de fatores como: Grau de insaturação do óleo, presença de metais catalisadores, temperatura, exposição ao ar e a luz, antioxidantes e tempo.

Figura 14 – Óleo lubrificante contaminado por um óleo vegetal polimerizado. Fonte: [30]

Fatores que influenciam na taxa de oxidação

Insaturação – Linhaça, cártamo, papoula e o óleo de noz formam boas bases para tinta a óleo porque são altamente insaturados, ou seja, possuem um elevado número de ligações carbono-carbono (Ligações insaturadas). Essas ligações são os pontos reativos da oxipolimerização e quanto maior for seu número, mais rapidamente o óleo se deteriorará. Como resultado, esses óleos irão "secar" rapidamente a temperatura ambiente.

Uma vez que a insaturação leva a instabilidade química, pode parecer uma boa idéia usar óleos saturados ou óleos com muito poucas ligações duplas. Infelizmente, é a insaturação que faz com que os óleos vegetais sejam líquidos a temperatura ambiente. Óleos altamente saturados deixam de ser óleos, tornando-se gorduras, manteigas, banha ou sebo, sólidos ou semi-sólidos a temperatura ambiente.

Os óleos vegetais comumente utilizados são insaturados o bastante para serem líquidos a temperatura ambiente, porém, não tão insaturados a ponto de oxidarem rapidamente. O óleo ideal é aquele no qual todos os ácidos graxos insaturados contêm apenas uma ligação dupla. Infelizmente, o único óleo que se aproxima desse perfil é o óleo de oliva, no entanto, seu preço é um fator que o torna não muito atraente para utilização como combustível.

Metais – Quando presentes, mesmo que em pequenas quantidades, irão acelerar a polimerização do óleo. Em particular, o cobre, o ferro (Na forma de aço) e o latão são materiais comuns que devem

ser evitados. Alumínio é o metal menos reativo. A Tabela 3 mostra a concentração de vários metais necessária para reduzir a estabilidade do óleo pela metade.

Tabela 3 – Concentração de metais necessária para reduzir a estabilidade do óleo pela metade.

Metal	Cu	Fe	Mn	Cr	Ni	V	Zn	Al
Concentração (mg/kg)	0,5	0,6	0,6	1,2	2,2	3,0	19,6	50,0
Fonte: [31]								

Temperatura – Os óleos vegetais oxidarão lentamente abaixo de 20 °C, entretanto, essa reação ocorrerá rapidamente a temperaturas iguais ou superiores a 38 °C. A velocidade de oxidação dobra a cada aumento de aproximadamente 30 °C. [32]

Armazenamento – Os óleos vegetais podem durar por anos se armazenados corretamente em reservatórios fechados, opacos e a temperaturas iguais ou inferiores a ambiente. Não havendo o fornecimento de oxigênio a polimerização oxidativa não pode ocorrer. A luz do sol ou qualquer outra fonte de luz ultravioleta irá rapidamente degradar o óleo e deve ser evitada. Recipientes plásticos comuns geralmente são permeáveis ao oxigênio e por isso devem ser evitados para armazenamentos longos.

Antioxidantes – Existe um grande número de aditivos químicos no mercado desenvolvidos para retardar a oxipolimerização. Exemplos comuns são o THBQ e o BHT, comumente adicionados aos óleos vegetais para prolongar sua validade. Entretanto, estes e outros produtos químicos comuns não são suficientemente potentes para oferecer uma proteção real ou econômica para os óleos vegetais.

Tempo – Como qualquer outra reação, a oxipolimerização leva tempo para ocorrer. Quanto tempo, é muito difícil dizer, uma vez que depende de vários fatores como tipo de óleo, história do óleo, como o óleo foi armazenado, entre outras…

Química da reação

A oxipolimerização é um processo de duas etapas. Primeiramente vem a oxidação que significa simplesmente a adição de oxigênio a uma substância. Como mencionado anteriormente, a maioria das moléculas dos óleos vegetais contêm pelo menos uma ligação dupla carbono-carbono em um ácido graxo. Estas ligações duplas ou insaturadas são as responsáveis por deixarem o óleo vegetal suscetível à oxidação.

As ligações insaturadas não estão diretamente envolvidas nas reações químicas. Em vez disso, elas fazem com que as ligações entre os átomos de carbono e hidrogênio adjacentes se tornem mais fracas. Com o passar do tempo, essas ligações se romperão, liberando um átomo de hidrogênio. Após perder o hidrogênio, o carbono se torna um radical muito reativo, e tentará de todas as formas ligar-se a um átomo de hidrogênio de outra molécula de triglicerídeo.

No caso de um radical carbono reatar com um átomo de hidrogênio, a molécula original é restabelecida. Entretanto, se o radical carbono entrar em contato com uma molécula de oxigênio (O_2), será formado um radical peróxido. Um peróxido ocorre quando dois átomos de oxigênio estão juntos por uma ligação simples e é chamado de radical porque esses átomos não estão em sua forma estável. O radical peróxido, por sua vez, roubará um átomo de hidrogênio de outra molécula insaturada ocorrendo então uma reação em cadeia: A molécula de triglicerídeo perde um átomo de hidrogênio, deixando um radical carbono livre. O radical carbono combina-se com uma molécula de O_2, formando um radical peróxido, que por sua vez, rouba um hidrogênio de outra molécula insaturada, formando outro radical de carbono, que então se combina com um O_2 para formar um peróxido, e assim por diante.

Os peróxidos são instáveis e eventualmente se dividirão em dois radicais, que, por sua vez, roubarão átomos de hidrogênio de outras moléculas do óleo vegetal, iniciando o processo novamente. Assim, devido a instabilidade dos peróxidos, a oxidação das moléculas do óleo vegetal pode produzir três radicais que roubarão átomos de hidrogênios de outras moléculas do óleo vegetal (o peróxido original e os dois radicais formados pela quebra do peróxido). A taxa da reação tende, então, a crescer exponencialmente (Figura 15).

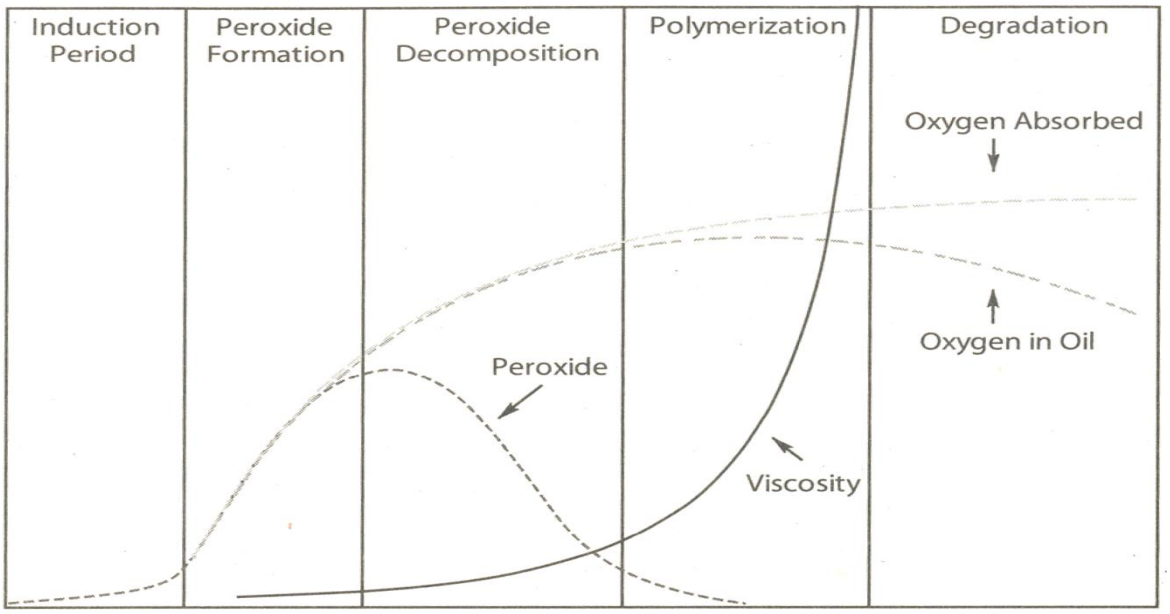


Figura 15 – Taxa da reação de oxipolimerização, formação de peróxidos e aumento da viscosidade. Fonte: [13].

2.15.2 Hidrólise

Hidrólise é uma reação em que uma molécula de vapor reage com um triglicerídeo, rompendo suas ligações éster e resultando em um ácido graxo livre e um diglicerídeo (uma molécula de glicerol com apenas duas cadeias de ácidos graxos).

Os diglicerídeos também podem sofrer hidrólise, liberando outro ácido graxo e formando um monoglicerídeo (Um único ácido graxo ligado ao glicerol).

Essa reação requer grande quantidade de energia e por isso geralmente só ocorre acima de 100 °C [58]. A hidrólise também pode ocorrer por ação enzimática quando o óleo é armazenado em condições que promovam crescimento biológico.

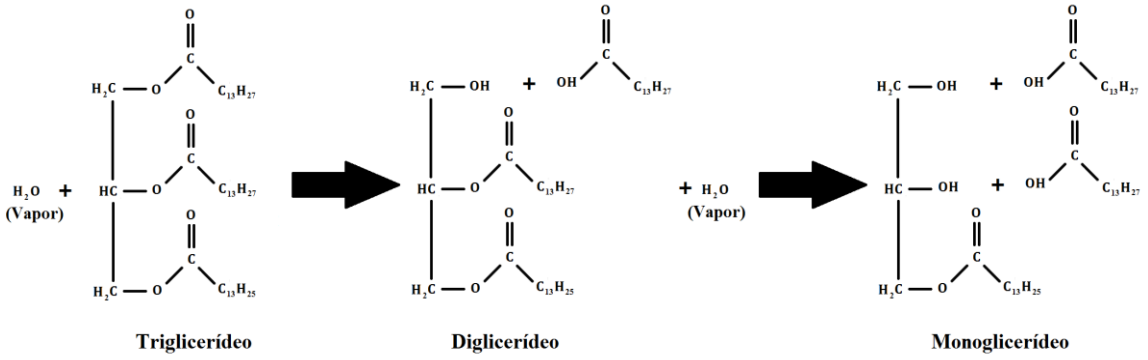


Figura 16 – Reação de hidrólise e formação de di e monoglicerídeos e ácidos graxos livres.

Óleos vegetais reciclados normalmente têm níveis aceitáveis de ácidos graxos livres e mono e diglicerídeos. Mesmo em pequenas concentrações, esses ácidos transmitem odor e gosto desagradável ao óleo e consequentemente aos alimentos. Em restaurantes, por exemplo, sua utilização é imediatamente interrompida ao se atingir esse ponto. Embora inutilizável para a preparação de alimentos, o óleo continuará aceitável para a utilização como combustível. Valores típicos de ácidos graxos livres em óleos vegetais reciclados, estão entre 1 e 2 por cento.

Na presença de bases e metais, os ácidos graxos livres podem formar sabões. Alguns sabões são excelentes em ligar óleo e água, propriedade que é muito útil para lavar panelas e frigideiras oleosas, mas menos atraente para o combustível. Uma forma de reduzir os ácidos graxos livres na preparação de combustível é através da adição de cálcio sob a forma de cal para formar sabões insolúveis que irão precipitar e serão mais facilmente removíveis.

Os ácidos graxos livres são também pró-oxidantes, o que significa que podem acelerar o processo de polimerização oxidativa.

Os outros produtos da hidrólise, mono e diglicerídeos, também são extremamente eficazes na ligação de água ao óleo vegetal. De fato, estes produtos são produzidos industrialmente com esta finalidade, são ingredientes comuns em alimentos processados e cremes cosméticos, e amplamente utilizados na indústria do petróleo. Monoglicerídeos e diglicerídeos são pouco reativos e não há nenhuma maneira prática de separá-los do óleo vegetal.

Os ácidos graxos livres nos óleos vegetais podem ser determinados através de testes que medem o nível de acidez do óleo e resultam em um número ou valor de acidez.

2.15.3 Polimerização térmica

A altas temperaturas (Acima de 150 °C), os óleos vegetais podem sofrer um processo de polimerização que não requere oxigênio. Esse processo é conhecido como polimerização térmica. Durante o aquecimento do óleo no processo de fritura, uma complexa série de reações produz numerosos compostos consequentes da degradação do óleo. Os compostos mais leves evaporam e são os responsáveis pelo "cheiro de fritura". Assim, quando o óleo é arrefecido, restam moléculas que não foram afetadas e polímeros, que fazem com que o óleo residual possua viscosidade mais elevada que o óleo fresco. Entretanto, esse não é um motivo de grande preocupação, uma vez que a viscosidade do óleo residual também convergirá a um determinado valor quando aquecido assim como os demais óleos vegetais (Figura 17).

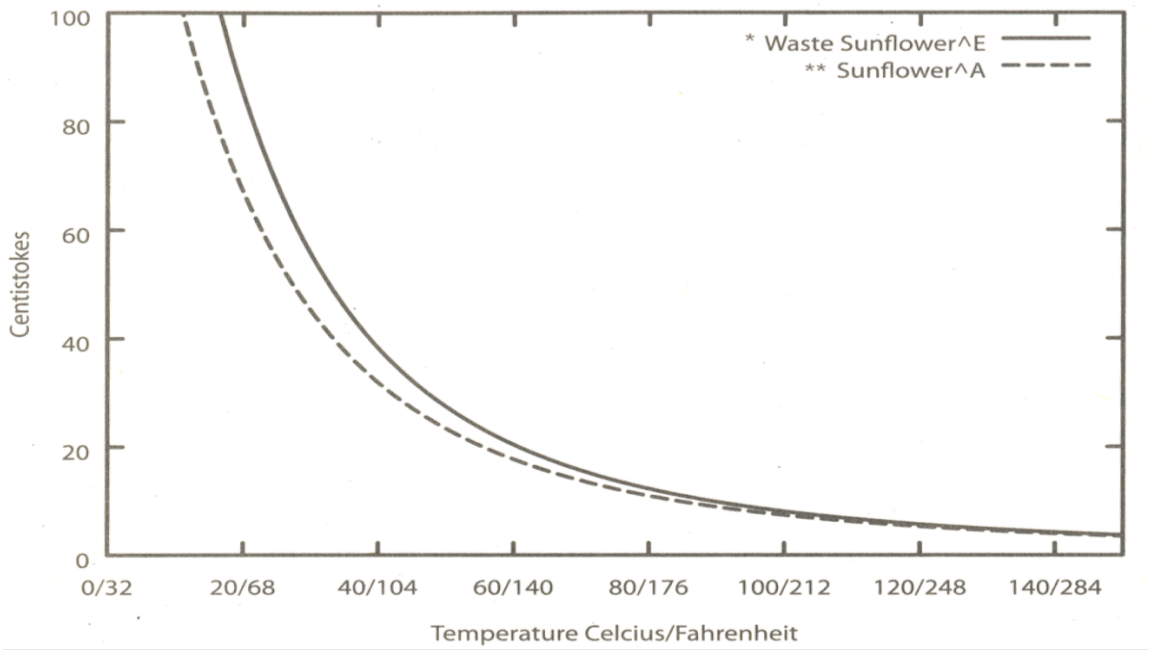


Figura 17 – Decréscimo exponencial e convergência das viscosidades do óleo vegetal reciclado e fresco. Fonte: [13].

2.15.4 Água

A presença de água é comum tanto no óleo diesel quanto no vegetal. Esse contaminante é indesejável, uma vez que permite o crescimento biológico, promove a corrosão química de componentes metálicos do sistema de injeção de combustível, causa desgaste prematuro das bombas de alta pressão e injetores devido a perda de lubricidade do combustível e também o fenômeno de cavitação. A quantidade máxima de água presente não pode ultrapassar 0,07 por cento em volume.

A água pode estar presente no óleo em quatro formas diferentes: livre, suspensa, emulsionada, e dissolvida. A "água livre" é aquela que quando presente forma uma camada mais densa situada abaixo da camada de óleo. Quando presente desta forma causa a maioria dos problemas, porém, é a

forma mais fácil de ser removida. Se a "água livre" for misturada ao óleo e agitada, formando gotículas muito pequenas, diz-se que a água está suspensa em óleo. Se as gotículas de água suspensas forem revestidas por moléculas chamadas emulsificantes, elas deixarão de ser atraídas umas pelas outras e poderão jamais fundir-se para formar uma camada mais densa e estabelecer-se abaixo do óleo. Quando presente desta forma, diz-se que a água está emulsionada e essa mistura estabilizada de óleo e água é chamada de emulsão. A maionese é o exemplo clássico de emulsão. A temperatura ambiente, a água pode dissolver-se em óleo vegetal a proporção de 0,8 partes por milhão. Essa quantidade não é suficiente para causar problemas no sistema de injeção de combustível e, portanto, água presente na forma dissolvida não representa um grande problema.

2.16 Depósitos de carbono

Quando não ocorre a combustão completa, a parte do combustível que não foi queimada ou deixará o cilindro nos gases de escape, ou permanecerá na forma de depósitos de carbono. Uma determinada quantidade de depósitos é inevitável, e mesmo aceitável, mas a medida que essa quantidade cresce, ela causará problemas na abertura das válvulas, abertura do injetor e travamento dos pistões. Esse problema é acentuado com a utilização de óleos vegetais.

A formação de depósitos só irá ocorrer em superfícies frias o suficiente para permitir que o combustível se estabeleça nelas, e quente o bastante para evaporar as frações mais leves do combustível ou causar os fenômenos de craking ou polimerização.

Figura 18 – Depósitos de carbono nos injetores e válvulas. Fonte: [30].

Capítulo 3

Procedimento experimental

Neste capítulo serão apresentados todos os equipamentos e componentes utilizados na realização dos testes. Os mesmos equipamentos de medição de emissões e consumo de combustível foram utilizados em todos os ensaios. Os dois motores utilizados possuem grande semelhança, tanto em relação ao tamanho e potência quanto em relação aos equipamentos auxiliares. A configuração de ambas as células está esquematizada na figura abaixo, as diferenças serão apontadas ao longo do capítulo.

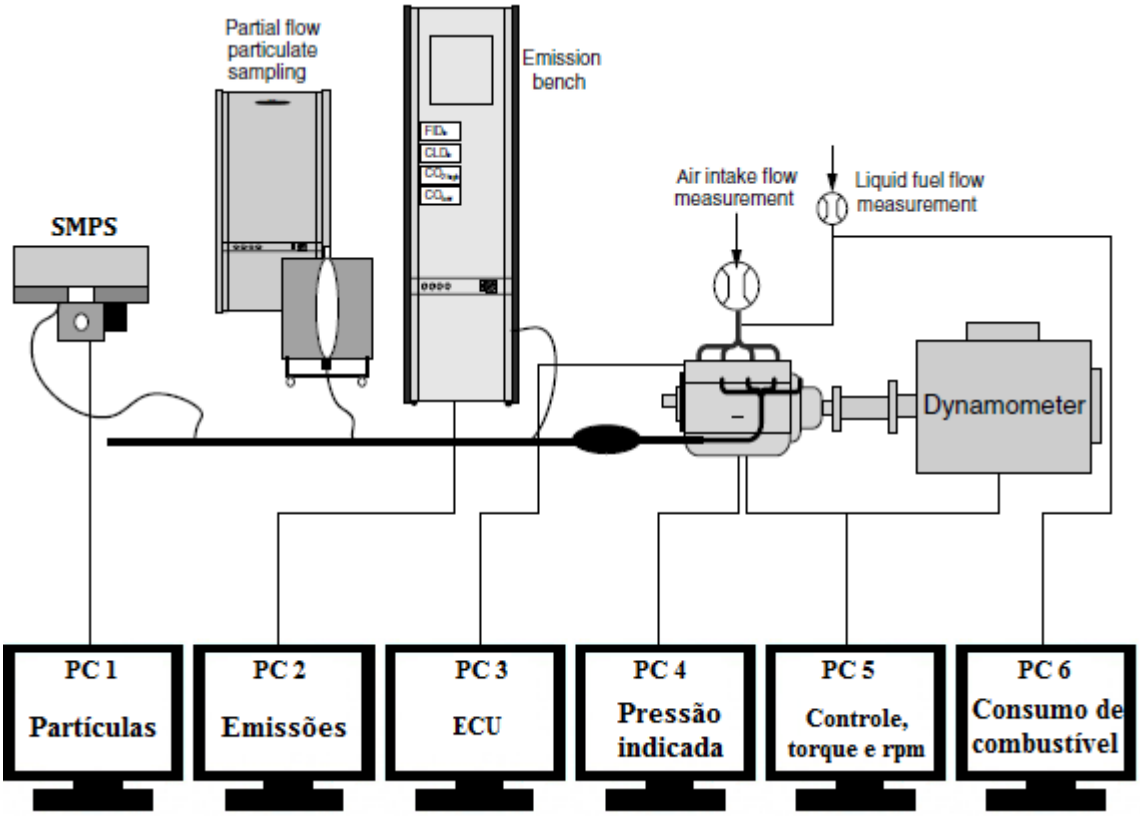


Figura 19 – Componentes da célula de ensaio do laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec.

3.1 Motor

3.1.1 Cummins ISBe4 185

Os primeiros testes foram realizados em um motor Cummins ISBe 185 (Cummins, Columbus, EUA), a diesel, 4 tempos, quatro cilindros em linha, injeção direta, turbocompressor e intercooler. Na tabela baixo encontram-se as características do motor:

Tabela 4 – Parâmetros do motor Cummins ISBe 185. Fonte: [33].

Características	Motor Cummins ISBe 185
Número de cilindros	4, em linha
Cilindrada	4,5 dm^3
Número de válvulas	16
Potência máxima	138 kW a 2.500 rpm
Torque máximo	700 Nm a 1.200 – 1.600 rpm
BMEP	1.954 kPa
Velocidade em vazio	700 – 800 rpm
Peso	374 kg
Emissões	EURO IV

Esse motor utiliza um sistema de injeção do tipo “Common Rail” controlado eletronicamente, com uma pressão de injeção máxima de 160 MPa. A pressão e o tempo de injeção são definidos pela Unidade de Controlo do Motor (ECU) de acordo com os mapas de funcionamento do mesmo e variam segundos as condições de carga, rpm, dentre outros fatores.

Não foi utilizado nenhum tipo de equipamento para o tratamento dos gases de escape. Esse motor cumpre com o padrão europeu de emissões EURO IV, aplicado a motores diesel de veículos pesados (CO 1,5 g/kWh; HC 0,46 g/kWh; NO_X 3,5 g/kWh; partículas 0,02 g/kWh) [34].

Figura 20 – Foto do motor Cummins ISBe 185 utilizado nos experimentos feitos no laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec.

3.1.2 Zetor 1505

Nos testes realizados para o estudo da influência da temperatura sobre a combustão dos óleos vegetais, utilizou-se um motor Zetor 1505 (Zetor, Brno, Republica Tcheca), a diesel, quatro tempos, quatro cilindros em linha, injeção direta, turbo-compressor e intercooler (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros do motor Zetor 1505.

Características	Motor Zetor 1505
Número de cilindros	4, em linha
Cilindrada	4,156 cm^3
Número de válvulas	16
Diâmetro e curso do pistão	105 mm/120 mm
Potência máxima	90 kW a 2.200 rpm
Torque máximo	525 Nm a 1.480 rpm
BMEP	1.588 kPa
Velocidade em vazio	700 – 800 rpm
Emissões	Stage III/IV categoria I (75 < P < 130 kW)

Este motor utiliza uma bomba injetora em linha Motorpal (Motorpal, Jihlava, República Tcheca) acionadas por engrenagens, com o tempo de injeção constante. A bomba é lubrificada pelo óleo do motor. O início da injeção é constante em todos os modos de operação. A pressão de abertura do injetor especificada é de 25 MPa (3675 psi).

O motor não utilizou nenhum tipo de equipamento para o tratamento dos gases de escape. Esse motor é certificado para cumprir com o padrão europeu de emissões EU Stage III A, aplicado a motores diesel de veículos off-road (Categoria I, Potência máxima entre 75 e 130 kW: CO 5,0 g/kWh; HC + NO_X 4,0 g/kWh, PM 0,3 g/kWh). Este também foi equipado com alternador, turbo-compressor, ventoinha de duas velocidades e sistema de recirculação de gases de escape (EGR) que, entretanto, esteve inativo durante a obtenção das curvas de máximo torque. A fim de manter o efeito da ventoinha sobre o arrefecimento do sistema de combustível e, consequentemente, a temperatura do combustível injetado, esta operou em condições normais de funcionamento.

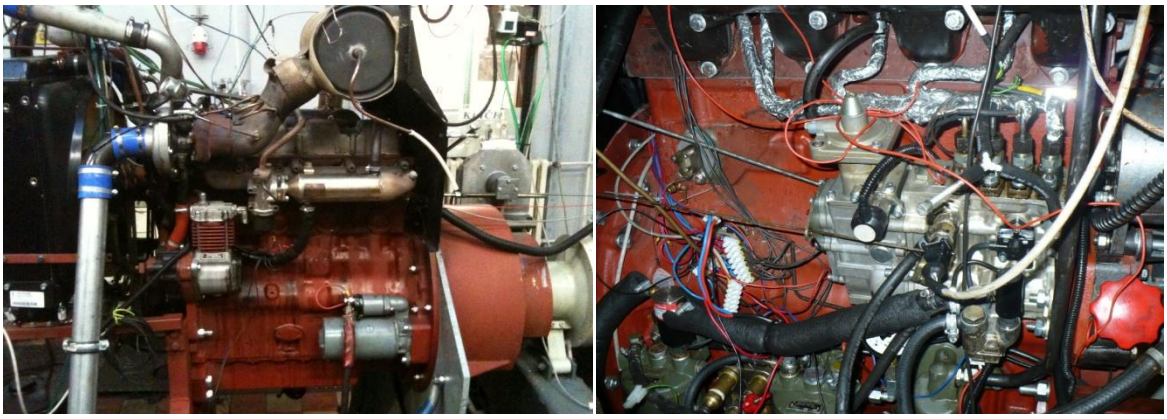


Figura 21 – Foto do motor Zetor 1505. Laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec.

3.2 Sistemas bi-combustível

3.2.1 Cummins ISBe 4 185

O sistema bi-combustível utilizado no motor Cummins ISBe4 conta com 2 válvulas manuais de 3 orifícios e 2 posições, uma responsável pela seleção do combustível fornecido ao motor e a outra pelo destino do fluido de retorno. Com esta configuração, estabelece-se um sistema com 3 modos de funcionamento. No primeiro modo, óleo diesel é fornecido ao motor e a linha de retorno conectada a entrada da bomba auxiliar que extrai este combustível. No segundo modo, óleo vegetal é fornecido ao motor e, da mesma forma, a linha de retorno se conecta a entrada da bomba auxiliar. No terceiro modo ou purga, diesel é injetado na câmera de combustão e o combustível de retorno volta ao tanque de óleo vegetal. A vantagem desse sistema é que, por possuir um modo de purga, elimina mais rapidamente o óleo vegetal presente no sistema antes de o motor desligar. O diagrama do sistema está representado na Figura 22.

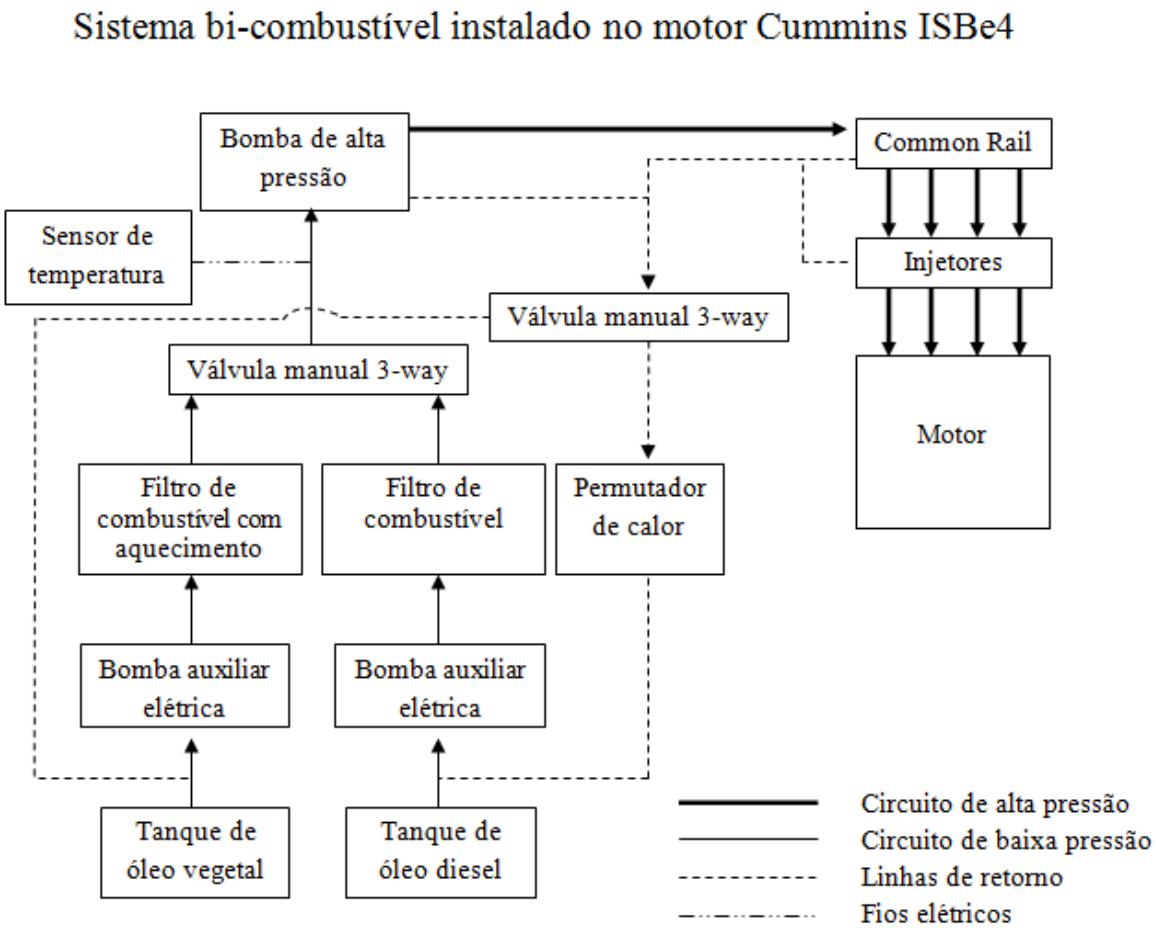


Figura 22 – Diagrama do sistema bi-combustível instalado no motor Cummins ISBe4.

Dos demais componentes, o permutador de calor serve para arrefecer o diesel que retorna dos injetores, Common Rail e bomba e assim evitar a perda de lubricidade e potência quando da

utilização deste combustível. O filtro de combustível do óleo vegetal possui aquecimento elétrico, importante para um aquecimento complementar ao adquirido no tanque. As linhas de combustível de óleo vegetal foram cobertas com material isolante para evitar a perda de calor. O tanque de combustível é equipado com aquecedor de resistência elétrica regulada por termostato.

3.2.2 Zetor 1505

O motor Zetor 1505 conta com um sistema bi-combustível que utiliza 2 válvulas elétricas de 3 orifícios e 2 posições (Figura 23). A posição energizada ou atuada dessa válvula alimenta o motor de óleo vegetal. Da mesma forma que ocorre com o Cummins, uma é responsável pela seleção do combustível fornecido ao motor e a outra pelo destino do fluído de retorno. Aqui também há 3 modos de funcionamento. No primeiro, óleo diesel é fornecido ao motor o fluido de retorno volta ao tanque de combustível. No segundo modo, óleo vegetal é fornecido ao motor e a linha de retorno se conecta a entrada do separador de água. No terceiro modo ou purga, diesel é injetado na câmera de combustão e o combustível de retorno volta ao tanque de óleo vegetal. Por possuir um modo de purga, esse sistema elimina mais rapidamente o óleo vegetal presente no sistema antes de o motor desligar.

Figura 23 – Válvula elétrica 3 orifícios e duas posições Greasecar e bomba auxiliar Facet utilizadas no sistema bi-combustível do motor Zetor 1505.

Dos demais componentes, o permutador de calor serve para fornecer um aquecimento adicional ao óleo vegetal pré-aquecido no tanque de combustível. O filtro de combustível do óleo vegetal possui aquecimento elétrico, que pode ser usado alternativamente ao permutador de calor. As linhas de combustível de óleo vegetal foram cobertas com material isolante para evitar a perda de calor. O tanque de combustível é equipado com aquecedor de resistência elétrica regulada por termostato.

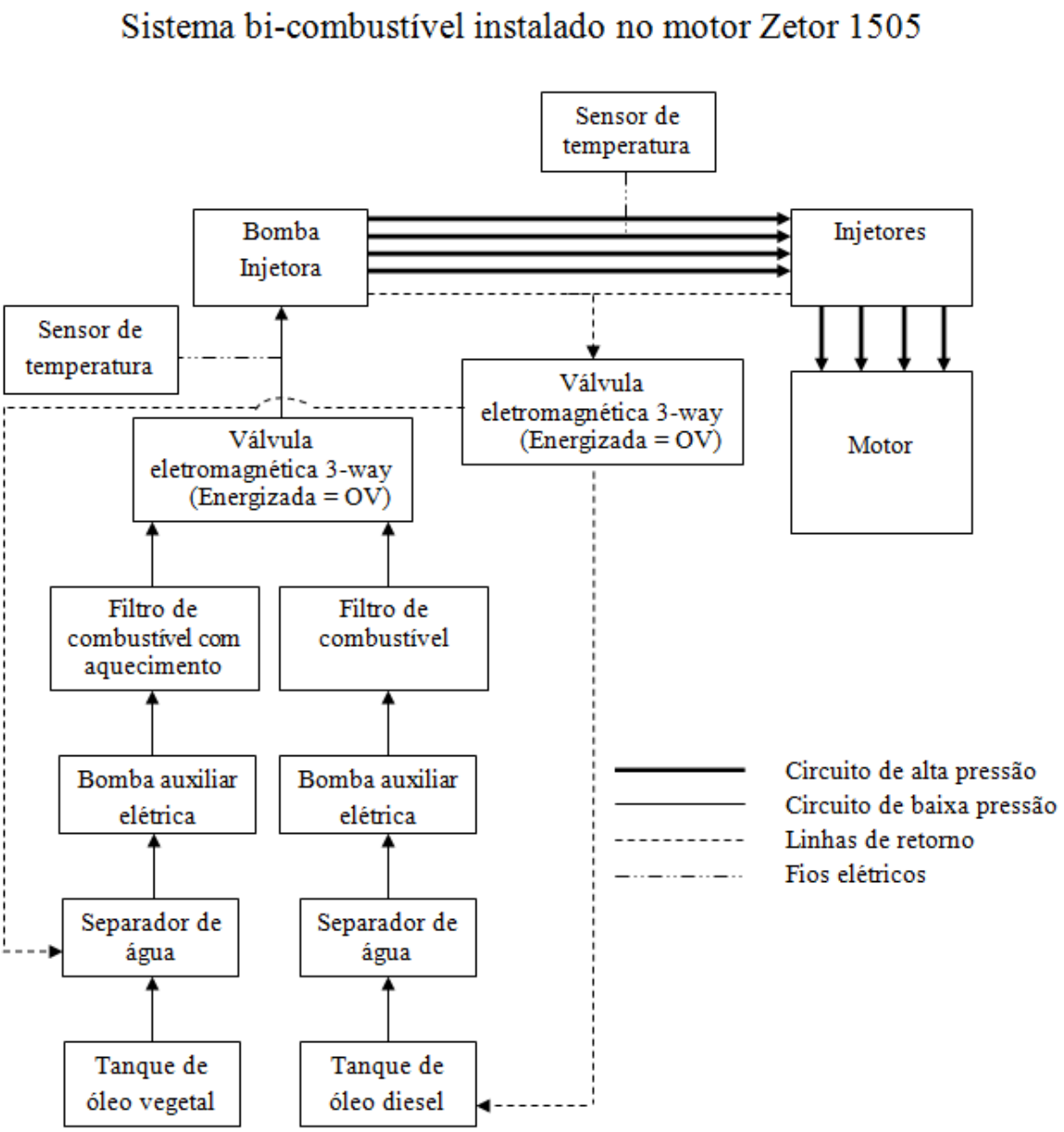


Figura 24 – Diagrama do sistema bi-combustível instalado no motor Zetor 1505.

3.3 Dinamômetro

O torque produzido por um motor em teste pode ser medido através de uma máquina chamada dinamômetro. A precisão com que tanto torque quanto rpm são medidos é fundamental para todas as outras medidas derivadas destas, como potência, consumo especifico, etc.

Dinamômetro hidráulico de caudal da variável

Com exceção do dinamômetro de disco, todos os demais dinamômetros hidráulicos utilizam princípio de funcionamento semelhante. Um rotor acoplado a um veio gira no interior de um estator preenchido com água. O movimento do rotor produz um movimento toroidal na água. O efeito é transferir momento do rotor para o estator e, portanto, desenvolver um torque resistente ao movimento do veio, balanceado por um torque igual e oposto atuando no estator.

Nessas máquinas, o torque absorvido varia de acordo com a quantidade (massa) de água em circulação no interior do estator. Esse ajuste é feito através de uma válvula, que geralmente controla o caudal de saída de água, associada a sistemas de controle de complexidade variada. A vantagem deste tipo de dinamômetro é conseguir uma variação de torque muito mais rápida do que a conseguida com outros tipos. Entre esta família de máquinas, possuem a maior gama de tamanhos, com rotores de até 5 m de diâmetro. Existem vários modelos de válvulas de controle de caudal e de acionamento de mecanismos e são empregados de acordo com a magnitude das cargas absorvidas e à velocidade de mudança de carga necessária. Para a obtenção de respostas mais rápidas, é necessário ter um volume de água disponível suficiente para encher o estator rapidamente e pode ser necessária a utilização de um sistema de controle integrado para as válvulas de controle de entrada e saída de caudal de água.

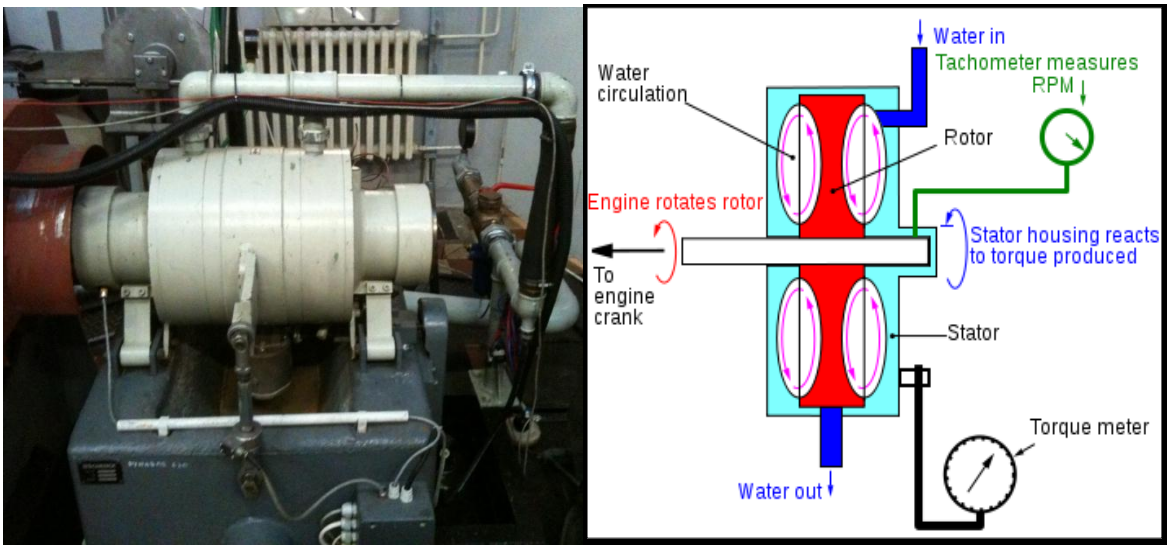


Figura 25 – Princípios de funcionamento de um dinamômetro hidráulico: (a) seção longitudinal do dinamômetro; (b) visão do rotor. Fontes: [35] [36].

3.4 Controle da célula

Um programa de testes aplicado a um motor acoplado a um dinamômetro é basicamente uma sequência de valores de torque e velocidade (rpm). Esta sequência é conseguida através da manipulação de apenas dois controles: A posição do acelerador e o torque absorvido pelo dinamômetro.

Para qualquer posição do acelerador, o motor tem sua característica própria de torque-velocidade assim como acontece com o dinamômetro para uma determinada configuração do controlador. A interação dessas duas características determina a estabilidade da combinação dinamômetro-motor.

O motor e o dinamômetro podem ser controlados de três formas: Posição, torque e velocidade. As duas combinações utilizadas nos ensaios foram: Posição e velocidade e torque e velocidade.

3.4.1 Posição e velocidade

Neste modo, a posição do acelerador é ajustada manualmente enquanto no dinamômetro, um controlador automático ajusta o torque absorvido pela máquina para manter a velocidade do motor constante, independentemente da posição do acelerador e da potência gerada (Figura 26a). Este modo é muito estável e geralmente é usado quando se deseja obter a curva de torque em função da velocidade.

3.4.2 Torque e velocidade

Este modo pode ser útil na simulação do desempenho do motor de um veículo ao andar por um percurso de subida. O dinamometro se mantém a velocidade constante, enquanto o controlador do motor progressivamente incrementa a injeção de combustível para aumentar o torque na velocidade definida (Figura 26b).

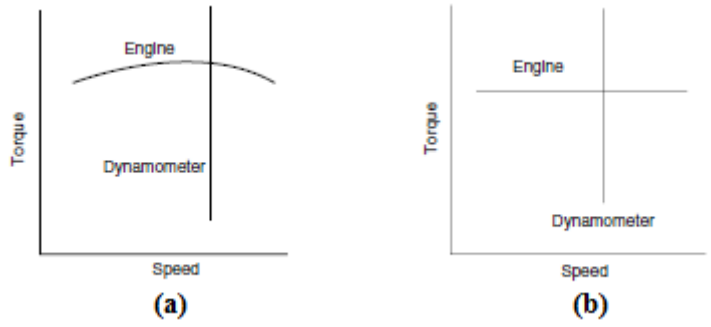


Figura 26 – Formas de controle da célula de ensaio. (a) Posição, velocidade (b) Torque, velocidade. Fonte: [36].

3.4.3 Software de controle

O software de controlo foi desenvolvido pelo eng Ph.D Michal Vojtisek-Lom, também orientador dessa tese, com a utilização do programa Control Web. Além da função de controlo, este software armazena os valores registrados por todos os sensores instalados no motor e acessórios em intervalos de 1 segundo. O layout do programa utilizado no controle do motor Cummins ISBe4 pode ser visto na Figura 27. O software utilizado no controle do motor Zetor 1505 possui layout e funções semelhantes.

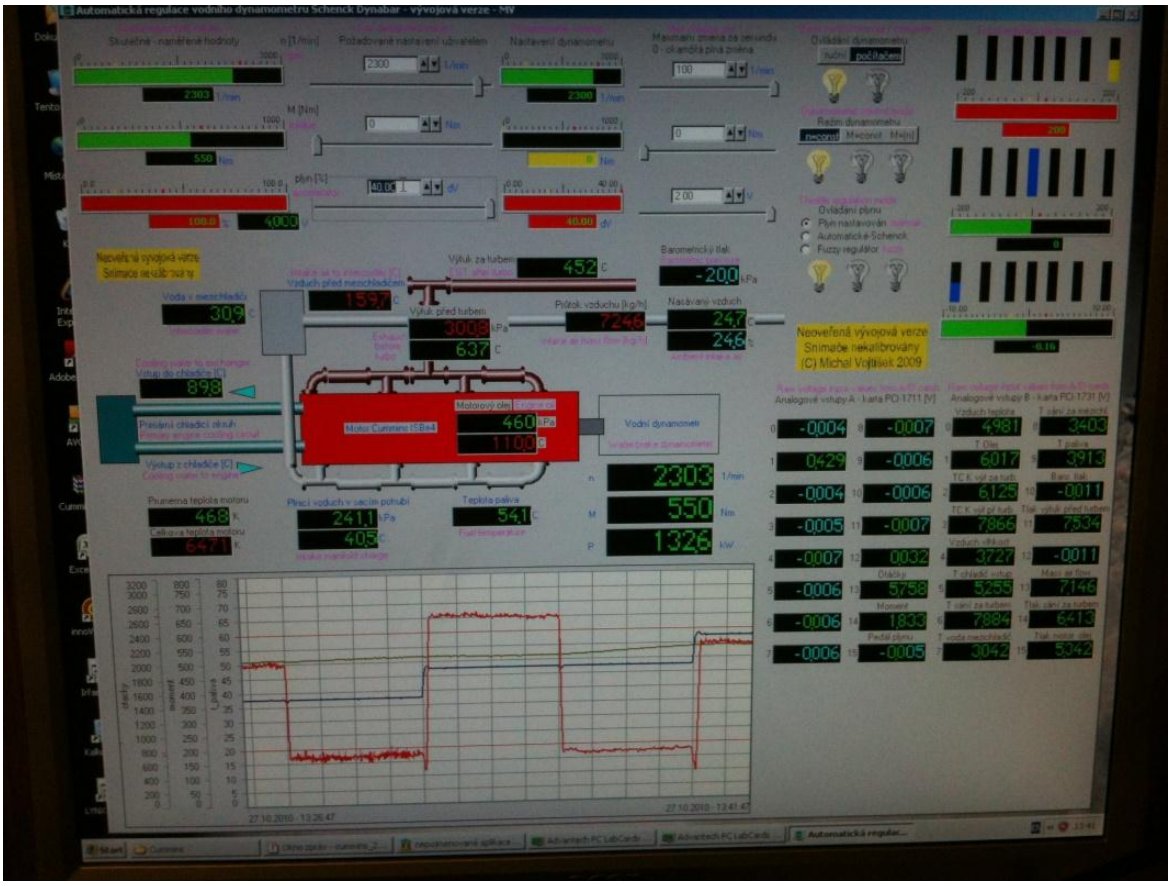


Figura 27 – Programa utilizado para o controle e aquisição de dados do motor Cummins ISBe4.

3.5 Ciclo de teste

3.5.1 ESC

Os ensaios foram realizados segundo o ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle). Este ciclo foi introduzido no ano 2000 (Diretiva 1999/96/EC de Dezembro 13, 1999) juntamente com os ciclos ETC (European Transient Cycle) e ELR (Eurogrande pean Load Response) para a certificação de conformidade de motores diesel de grande porte aos níveis de emissões prescritos nos padrões europeus (EURO III em diante), substituindo o antigo R-49.

Este ciclo é composto por 13 modos em estado estacionário (

Tabela 6). O motor deve ser operado pelo tempo prescrito em cada modo, sendo as alterações de rotação e carga completadas sempre nos primeiros 30 segundos. A velocidade especificada deve ser mantida dentro de um limite de tolerância de ± 50 rpm e o torque mantido dentro de um limite de ± 2% do valor máximo obtido à velocidade de teste. As emissões são medidas em cada modo e uma média é calculada para ciclo inteiro, utilizando um conjunto de fatores de ponderação. O resultado final das emissões é expresso em g/kWh. Este ciclo é caracterizado por elevados fatores de carga e temperatura dos gases de escape. Aos 13 modos padrão do ciclo foi adicionado um modo de pré-condicionamento com duração de 10 minutos, velocidade de 1900 rpm e 75% de carga, executado antes do primeiro modo. Em alguns ensaios, os tempos de duração de cada modo foram modificados. Quando existirem, essas modificações serão relatadas na apresentação de resultados no próximo capítulo.

Tabela 6 – Modos do ciclo de teste europeu ESC. Fonte: [37].

Modo	Velocidade		Carga		Peso	Duração
-	Prescrita (%)	Valores (rpm)	Prescrita (%)	Valores (N.m)	(%)	(min.)
1	Vazio	Vazio	0	0	0,15	4
2	A	1500	100	Max	0,08	2
3	B	1900	50	330	0,10	2
4	B	1900	75	495	0,10	2
5	A	1500	50	345	0,05	2
6	A	1500	75	518	0,05	2
7	A	1500	25	173	0,05	2
8	B	1900	100	Max	0,09	2
9	B	1900	25	165	0,10	2
10	C	2300	100	Max	0,08	2
11	C	2300	25	140	0,05	2
12	C	2300	75	420	0,05	2
13	C	2300	50	280	0,05	2
Soma					1	28

As velocidades de teste foram definidas pelas seguintes fórmulas:

$$A = n_{lo} + 0.25\ (n_{hi} - n_{lo}) \quad (3)$$

$$B = n_{lo} + 0.50\ (n_{hi} - n_{lo}) \quad (4)$$

$$C = n_{lo} + 0.75\ (n_{hi} - n_{lo}) \quad (5)$$

Onde n_{hi} é a maior velocidade (rpm) em que é possível obter 70% da potência máxima declarada (Acima da velocidade onde ocorre a potência nominal máxima) e n_{lo} é a menor velocidade (rpm) em que é possível obter 50% da potência máxima declarada (Abaixo da velocidade onde ocorre a potência nominal máxima).

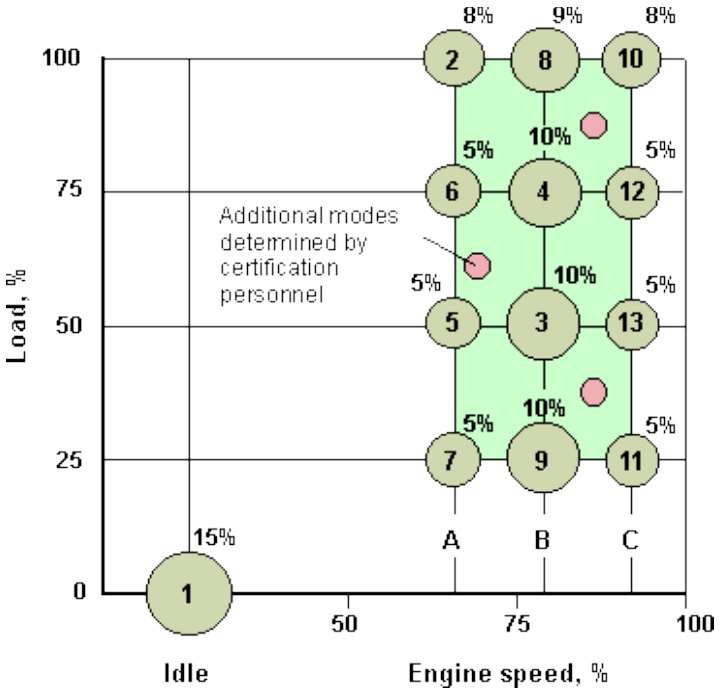


Figura 28 – Método para o cálculo das velocidades e cargas do ciclo de teste ESC. Fonte: [34]

3.5.2 WHSC

O WHSC é um ciclo de teste em estado de equilibro definido pelo regulamento técnico global (Global technical regulation - GTR), desenvolvido pelo departamento GRPE ECE da organização das nações unidas. Dois ciclos de teste, um com partida a quente e estado estacionário (WHSC) e um transiente (WHTC), com partidas tanto a quente quanto a frio, foram criados para simular condições típicas de condução na UE, EUA, Japão e Austrália. Os parâmetros do WHSC estão listados na

Tabela 7.

Tabela 7 – Modos do ciclo de teste WHSC. Fonte: [37].

Modo	Velocidade		Carga		Peso	Duração
-	Prescrita (%)	Valores (rpm)	Prescrita (%)	Valores (N.m)	-	(s)
0	Pré-cond.	1845	-		0,24	-
1	Vazio	Vazio	0	0	0,085	210
2	55	1845	100	Max	0,02	50
3	55	1845	25	173	0,10	250
4	55	1845	70	183	0,03	75
5	35	1465	100	Max	0,02	50
6	25	1275	25	165	0,08	200
7	45	1655	70	490	0,03	75
8	45	1655	25	175	0,06	150
9	55	1845	50	345	0,05	125
10	75	2225	100	Max	0,02	50
11	35	1465	50	245	0,08	200
12	35	1465	25	173	0,10	250
13	Vazio	Vazio	0	0	0,085	210
Soma					1	1895

Este ciclo é executado após um modo de pré-condicionamento para que o motor inicie o primeiro modo a quente. O modo sem carga é separado em duas partes, modo 1 no início do ciclo e modo 13 no final. O modo 0 só tem influência no fator peso, sendo desconsiderado nos cálculos de emissões e potência.

Para o cálculo das emissões específicas, o trabalho realizado no ciclo é calculado integrando os valores de potência ao longo deste. Os fatores peso são dados apenas para referência.

3.6 Medição de emissões

As emissões de CO, NO_X, CO_2, e HC foram medidas pelos métodos convencionais: NDIR, CLD aquecido (a 55 ºC), NDIR e FID aquecido (a 191 ºC) respectivamente. A quantidade de partículas emitidas foi medida através do método gravimétrico, utilizando um conjunto de filtros para cada um dos modos de operação, e através de um analisador de partículas por mobilidade elétrica (EEPS, modelo 3090, TSI, Minnesota, EUA) acoplado a um contador de partículas (CPC, TSI, Minnesota, EUA), os quais permitiram medir, além da quantidade total, a concentração de partículas por faixa de tamanho. Medições também foram realizadas com a utilização de um instrumento de medição em tempo real desenvolvido localmente.

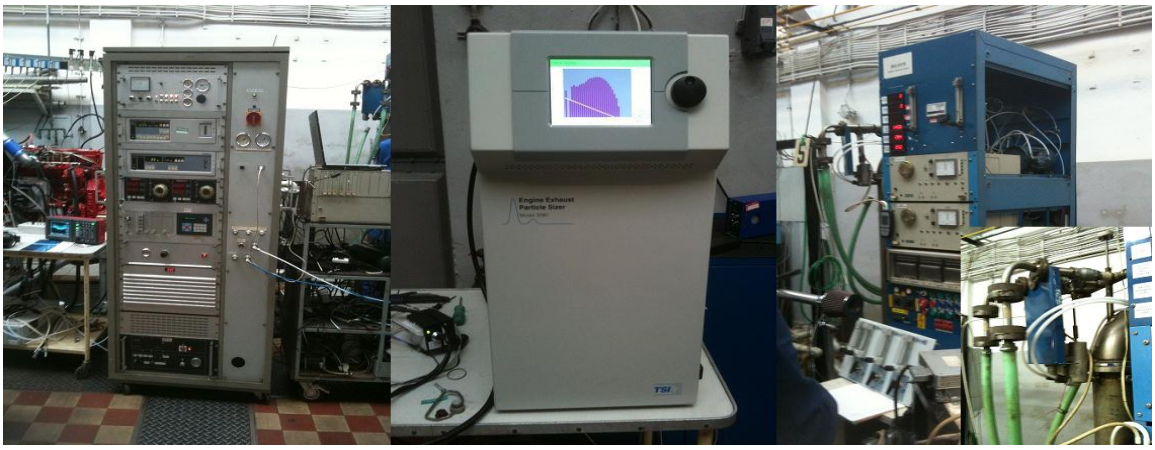


Figura 29 – Da esquerda para a direita: Banca com o NDIR, CLD e FID; EEPS; Banca para o ensaio gravimétrico com o lugar dos filtros em detalhe. Laboratório de motores da Universidade Técnica de Liberec.

3.6.1 Analisador infravermelho não-dispersivo (NDIR)

Este analisador é chamado de "não-dispersivo" porque toda a radiação infravermelha emitida pela fonte passa primeiramente pela amostra de gás para depois passar por um filtro que se encontra a frente do sensor. Nos instrumentos “dispersivos”, a filtragem da luz ocorre antes da passagem pela amostra (Figura 30).

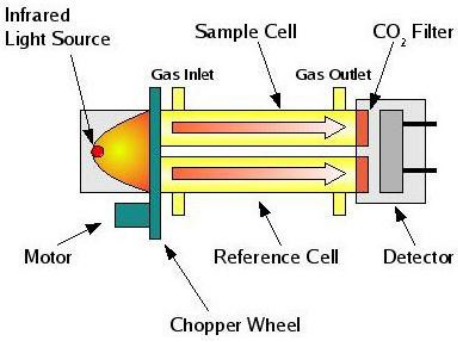


Figura 30 – Esquema da medição de gases em um instrumento NDIR. Fonte: [38].

A molécula de CO_2 tem uma banda de absorção de radiação infravermelha (IR) muito acentuada e que mostra um pico dominante no comprimento de onda de 4,26 µm. O sensor do instrumento é ajustado para detectar e medir esse comprimento de onda para depois convertê-lo em um sinal útil, que pode ser, por exemplo, um sinal de tensão. Ao selecionar filtros sensíveis a outros comprimentos de onda infravermelhos é possível detectar outros compostos, como o CO (4,8 µm) e hidrocarbonetos (3,4 µm). A medição de CO_2 utilizando esse tipo de analisador é sensível à presença de vapor de água na amostra de gás.

3.6.2 Detector de quimiluminescência (CLD)

Quimiluminescência é o fenômeno pelo qual algumas reações químicas produzem luz. A reação de interesse nas emissões de gases de escape é a seguinte:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \rightarrow NO_2 + O_2 + \text{fóton}$$

Os compostos de nitrogênio nesses gases são uma mistura de NO e NO_2, descritos genericamente como NO_X.

No detector, o NO_2 é primeiramente convertido cataliticamente em NO para depois reagir com o ozônio, gerado por uma descarga elétrica através do oxigênio a baixa pressão em uma câmara aquecida. A luz é medida por um fotomultiplicador e indica a concentração de NO_X na amostra.

3.6.3 Detector de ionização de chama (FID)

O FID tem uma vasta gama dinâmica e possui alta sensibilidade a todas as substâncias que contêm carbono. O funcionamento deste instrumento, representado esquematicamente na Figura 31, depende da produção de elétrons livres e íons positivos que ocorre durante a combustão dos hidrocarbonetos. Se a combustão ocorrer em um campo elétrico, o fluxo de corrente entre o anodo e o catodo será diretamente proporcional ao número de átomos de carbono que participaram da reação. No detector, a amostra é misturada com hidrogênio e o hélio e a mistura é queimada em uma câmara aquecida para evitar a condensação do vapor de água formado.

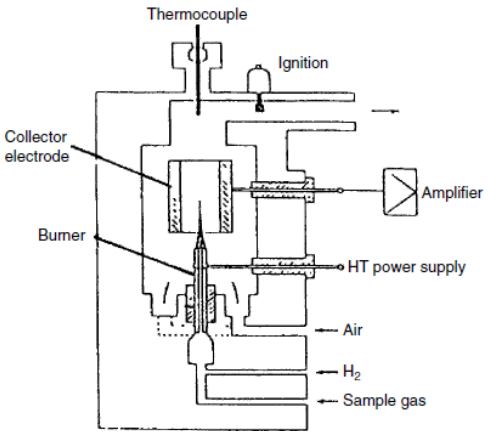


Figura 31 – Esquema de um detector FID. Fonte: [36].

3.6.4 Método gravimétrico

O princípio de funcionamento deste método é bem simples. Uma amostra dos gases de escape previamente diluída passa através de filtros de papel especialmente desenvolvidos que retém as partículas nanométricas. Posteriormente, pesam-se os filtros e após a comparação com seu peso inicial obtém–se a massa de partículas contidas na amostra de volume conhecido.

3.6.5 Analisador de partículas por mobilidade elétrica (EEPS)

O princípio de funcionamento do EEPS se baseia na medição das distribuições de tamanho das partículas usando uma técnica de detecção por mobilidade elétrica.

O instrumento extrai continuamente amostras dos gases de escape e as introduz em uma câmara onde serão carregadas positivamente por uma descarga de corona. As partículas carregadas são, então, introduzidas na região de medição que conta com uma coluna de eletrodos de alta tensão. Uma tensão positiva é aplicada ao eletrodo e este cria um campo elétrico que repele as partículas de carga positiva para serem progressivamente captadas por eletrômetros de acordo com sua mobilidade elétrica. As partículas carregadas atingem os respectivos eletrômetros e transferem sua carga. Uma partícula com maior mobilidade elétrica atinge um eletrômetro perto do topo, enquanto uma partícula com menor mobilidade atinge um eletrômetro para inferior do aparelho. Este arranjo multi-detector utiliza eletrômetros altamente sensíveis permitindo a medição simultânea da concentração de vários tamanhos de partículas. A Figura 32 esquematiza o funcionamento do aparelho.

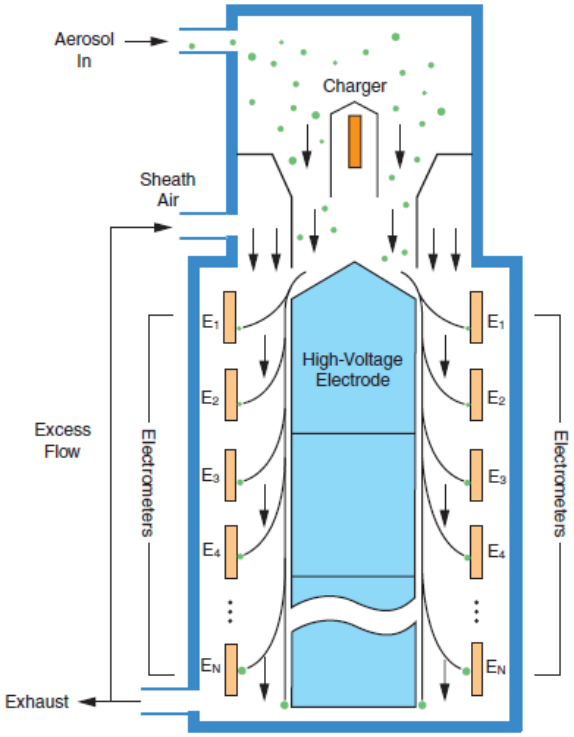


Figura 32 – Esquema de funcionamento do EEPS modelo 3090 da TSI. Fonte: [39].

3.7 Medição do consumo de combustível

O consumo de combustível foi medido com o auxilio de uma balança digital com precisão de 1 miligrama e um software computacional que registra os valores de massa medidos pela balança em intervalos de 1 s. A diferença entre os valores obtidos em dois segundos consecutivos representa a variação instantânea da massa contida no tanque de combustível. O mesmo valor pode ser traduzido como a massa de combustível sendo injetada na câmara de combustão durante cada modo de ciclo do teste. Entretanto, esses valores podem diferir em diversas situações como, por exemplo, quando há vazamentos ao longo das linhas de combustível ou quando ocorre acumulo e/ou entrada de ar em alguma(s) parte do sistema. A balança utilizada foi fabricada pela empresa Sartorius.

Figura 33 – Método utilizado para a medição da massa de combustível consumida.

3.8 Combustíveis

Os combustíveis utilizados foram: Diesel (EN 590, produzido por ETK, Liberec, República Tcheca), biodiesel (EN 14214) e óleo de colza produzido localmente (DIN 51605, produzido por FabioProduct, Holín, Republica Tcheca). A composição mássica do óleo de colza vale 76,1% carbono, 15,4% hidrogenio e 8,5% oxigenio. O óleo apresenta poder calorífico inferior de 36,9 MJ/kg.

No primeiro ensaio foram utilizadas as misturas B10, B30, B50; que contêm 10%, 30% e 50% de teor de biodiesel misturado ao diesel mineral, respectivamente, além de biodiesel puro (B100). No segundo ensaio utilizou-se uma mistura de 50 de diesel e 50% de óleo de colza. Nos demais ensaios somente combustíveis puros foram utilizados. As propriedades mais relevantes dos combustíveis são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades dos combustíveis.

Propriedades do combustível	Diesel	Biodiesel	Óleo de colza
Norma	EN 590	EN 14214	DIN 51605
Densidade a 15 °C (kg/m^3)	820 - 845	860 - 900	900 - 930
Número de cetano	> 51	> 51	33
Viscosidade cinemática a 40 °C (mm^2/s)	2,0 - 4,5	3,5 – 5,0	35
Ponto de fulgor (°C)	> 55	> 101	
Propriedades não reguladas [29]			
Tensão superficial a 20 °C (N/m)	0,023	0,026	0,032
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	43	37	37
Calor específico (J/kg.°C)	1850	2000	2000
Temperatura de destilação 10% (°C)	220	320	380
Temperatura de destilação 90% (°C)	300	340	420
Oxigênio, % Massa	0	10	10
Calor latente de vaporização	250	230	210
Relação estequiométrica ar-combustível	15,0	12,8	12,8
Massa molar	170	270	810

Capítulo 4

Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados. Foram quatro dias de ensaios: No primeiro, foi testado biodiesel e misturas de 10%, 30% e 50% deste com óleo diesel. No segundo, testou-se uma mistura de 50% de óleo de colza e óleo diesel. No terceiro, os ensaios foram realizados com óleo de colza a diferentes temperaturas. No penúltimo dia, foram realizados testes com óleo de colza a diferentes temperaturas e biodiesel. Por fim, no último dia o objeto de estudo foi a influência da temperatura dos óleos vegetais em um sistema de injeção em linha, e para isso, foram obtidas curvas de torque máximo para o óleo de colza a diferentes temperaturas.

Foram utilizados ciclos de teste ESC em todos os dias de ensaio. No terceiro dia, também se utilizou um ciclo de teste WHSC para comparação dos resultados. Os ciclos de teste sofreram desvios em relação ao estabelecido por norma no que diz respeito a duração dos modos, sendo tais desvios comentados ao longo desta seção. Também foram obtidas curvas de torque máximo em alguns desses ensaios.

Nem sempre todos os dados obtidos nos ensaios foram disponibilizados para estudo e apresentação neste trabalho. A primeira razão é que dois desses ensaios foram realizados por um grupo de pesquisadores e estudantes de pós-graduação, tendo cada um a propriedade de determinados dados que serão utilizados nos seus respectivos trabalhos e o segundo motivo foi por falha de equipamento. Dessa forma, o estudo desses dados não foi possível, e por isso não aparece nesse trabalho.

4.1 Desempenho

4.1.1 Diesel, biodiesel puro e misturas de biodiesel e óleo diesel

Neste ensaio foram testadas as misturas B10, B30, B50; além de biodiesel puro (B100). O ciclo de teste ESC sofreu uma pequena alteração e cada modo durou 4 minutos. Os testes foram realizados em um motor Cummins ISBe 4. Não houve a utilização de um sistema bi-combustível e, portanto, todos os combustíveis utilizaram o mesmo circuito de alimentação. Os valores máximos de torque obtidos em cada regime são apresentados na Tabela 9. Para o cálculo desses valores, utilizou-se a média aritmética dos valores de torque obtidos ao longo de cada modo. Com os valores de torque, utilizou-se a equação abaixo para a obtenção dos valores de potência.

$$\mathrm{P\ (kW)} = \mathrm{T\ x}\ \frac{2\pi\ \times \mathrm{N\ (rpm)}}{60}\ \mathrm{x}\ 10^{-3} \qquad (6)$$

Durante todos os modos, a temperatura do combustível se manteve em torno dos 25 °C a 1500 rpm e 27 °C nos demais regimes. Essa temperatura foi medida a entrada da bomba de alta pressão. Observa-se uma redução desprezível de menos de 1% no desempenho (Potência e torque máximos) em todos os regimes com a adição de 10% de biodiesel ao óleo diesel. Com a utilização de 100% biodiesel, a perda em desempenho chega a 8% a 1500 e 1900 rpm, e uma pequena perda de 3% a 2300 rpm. A perda observada nas demais misturas possui valores intermediários entre o B10 e o B100.

Tabela 9 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel, biodiesel e misturas de biodiesel e óleo diesel).

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)					Potência máxima (kW)				
	Diesel	**B10**	**B30**	**B50**	**B100**	**Diesel**	**B10**	**B30**	**B50**	**B100**
1500	701	697	682	675	645	110	109	107	106	101
1900	671	665	649	638	614	133	132	129	127	122
2300	565	562	554	546	546	136	135	133	132	132

Os 13 modos do ciclo de teste e os valores de torque e rpm obtidos podem ser visto na Figura 34**.** Chama-se a atenção para o fato de o motor ter funcionado a rotações mais baixas em vazio utilizando óleo diesel que os demais combustíveis. Esse fato ocorreu, provavelmente, devido a injeção de uma menor quantidade de combustível.

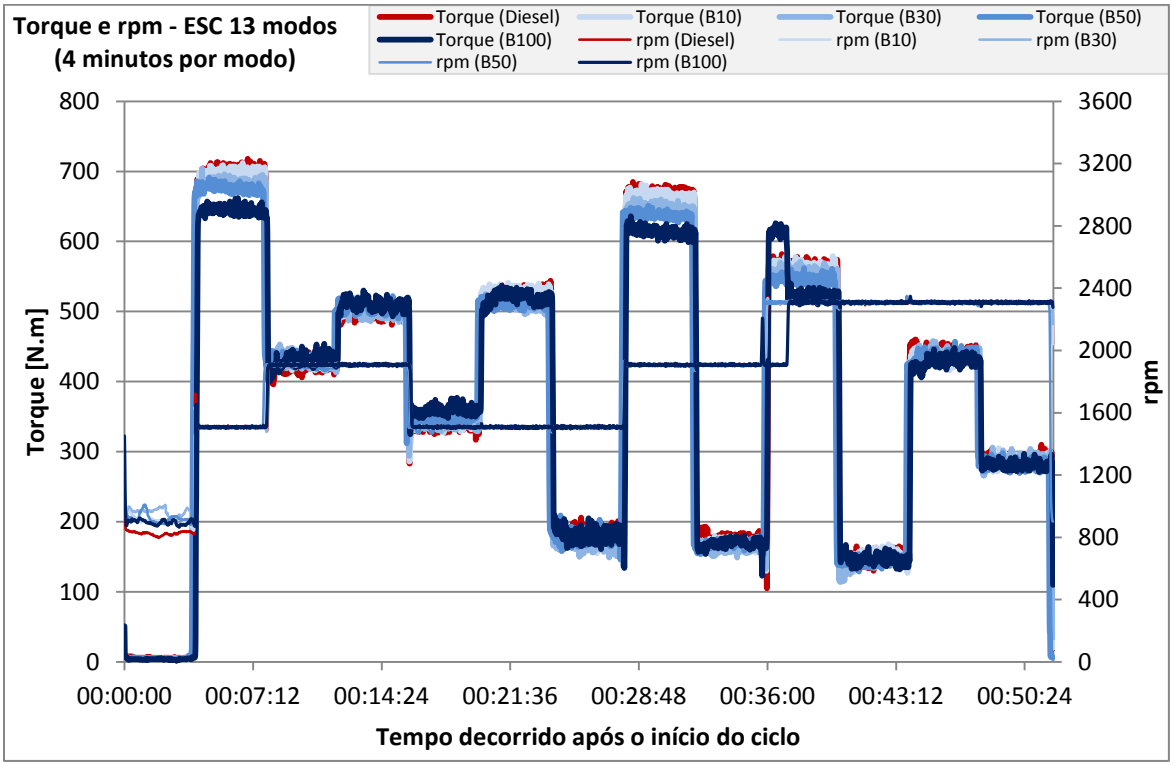


Figura 34 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle) em ensaios realizados utilizando óleo diesel, biodiesel puro e diferentes misturas entre esses dois combustíveis.

4.1.2 Diesel e mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo de colza

O combustível testado nesse experimento é composto por uma mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo colza. Como no ensaio anterior, cada modo do ciclo de teste durou 4 minutos. Os testes foram realizados em um motor Cummins ISBe 4. Ambos os combustíveis utilizaram o mesmo circuito de alimentação. Os valores máximos de torque obtidos em cada regime são apresentados na Tabela 10. Para o cálculo desses valores, utilizou-se a média aritmética dos valores de torque obtidos em cada modo. Com os valores de torque, utilizou-se a equação (5) para a obtenção dos valores de potência.

Tabela 10 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel e mistura 50% diesel – 50% óleo de colza).

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)		Potência máxima (kW)	
	Diesel	**Mistura**	**Diesel**	**Mistura**
1500	690	679	108	107
1900	666	654	132	130
2300	568	547	137	132

Durante os testes realizados com o óleo diesel, a temperatura do combustível se manteve sempre em torno dos 28 °C a entrada da bomba de alta pressão. Nos ensaios utilizando a mistura 50% diesel-OC, a temperatura variou e foi em média 45 °C, 51 °C e 54 °C nos regimes 1500 rpm,

1900 rpm e 2300 rpm, respectivamente. Com a adição de 50% de óleo de colza ao diesel, houve uma pequena perda de desempenho de 3% a 1500 rpm, 2% a 1900 rpm e 4% a 2300 rpm.

Os 13 modos do ciclo de teste e os valores de torque e rpm obtidos podem ser vistos na Figura 35**.** Nota-se um repentino aumento da velocidade em vazio no ensaio com a mistura, consequência de um aumento na quantidade de combustível injetada.

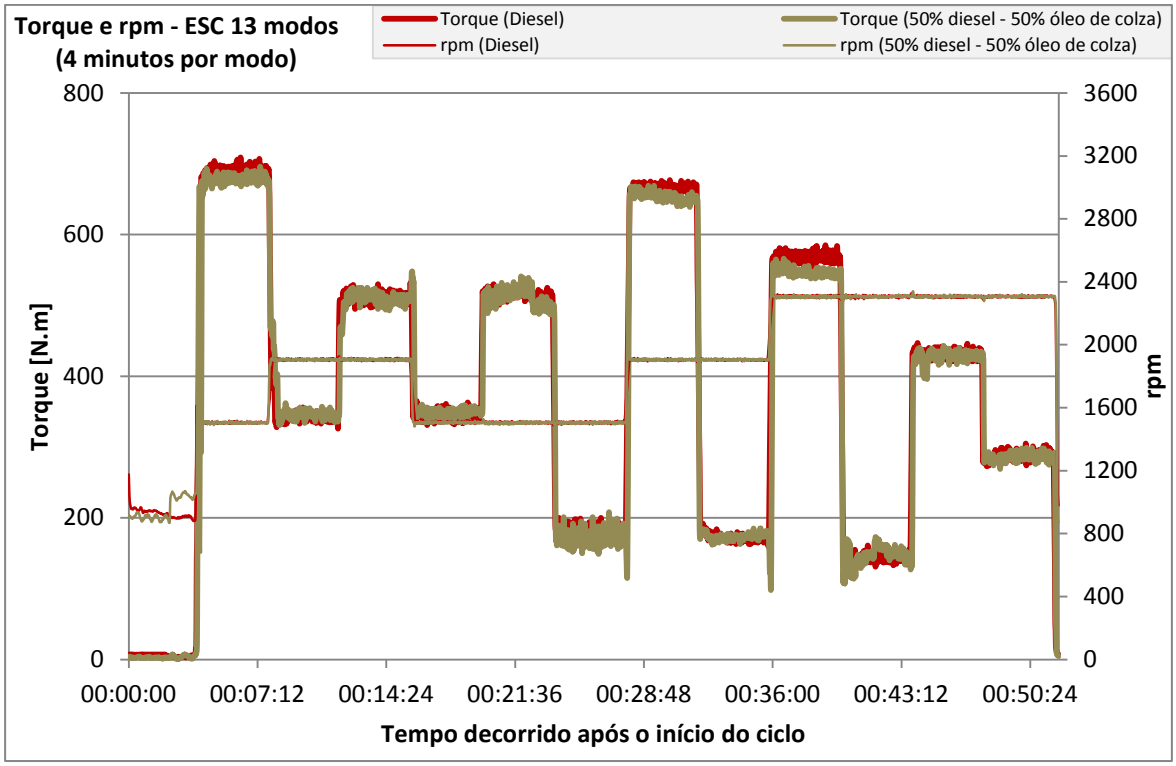


Figura 35 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle) em ensaios realizados com óleo diesel e mistura de 50% diesel e 50% de óleo de colza.

Influência da temperatura sobre o torque máximo

Com o auxilio de curvas de torque máximo, o efeito da temperatura sobre o desempenho foi investigado. Neste ensaio, a temperatura dos combustíveis variou a entrada da bomba de alta pressão, sendo realizada uma sequência de duas curvas para cada combustível com diferenças de temperatura em torno de 3 °C para o óleo de colza e 6 °C para a mistura. Como pode ser visto na Figura 36**,** tanto óleo de colza puro quanto a mistura experimentaram uma redução no torque máximo com o aumento da temperatura do combustível. Apesar da menor diferença de temperatura, essa perda foi maior para o óleo de colza puro. Também observa-se uma grande perda de torque a rotações mais baixas. Essa perda diminui bastante quando a curva é obtida na direção reversa, ou seja, começa a 2400 rpm e termina a 1100 rpm, e é atribuída a limitação da quantidade de combustível injetada imposta por um limitador mecânico e baseada na pressão do coletor de admissão.

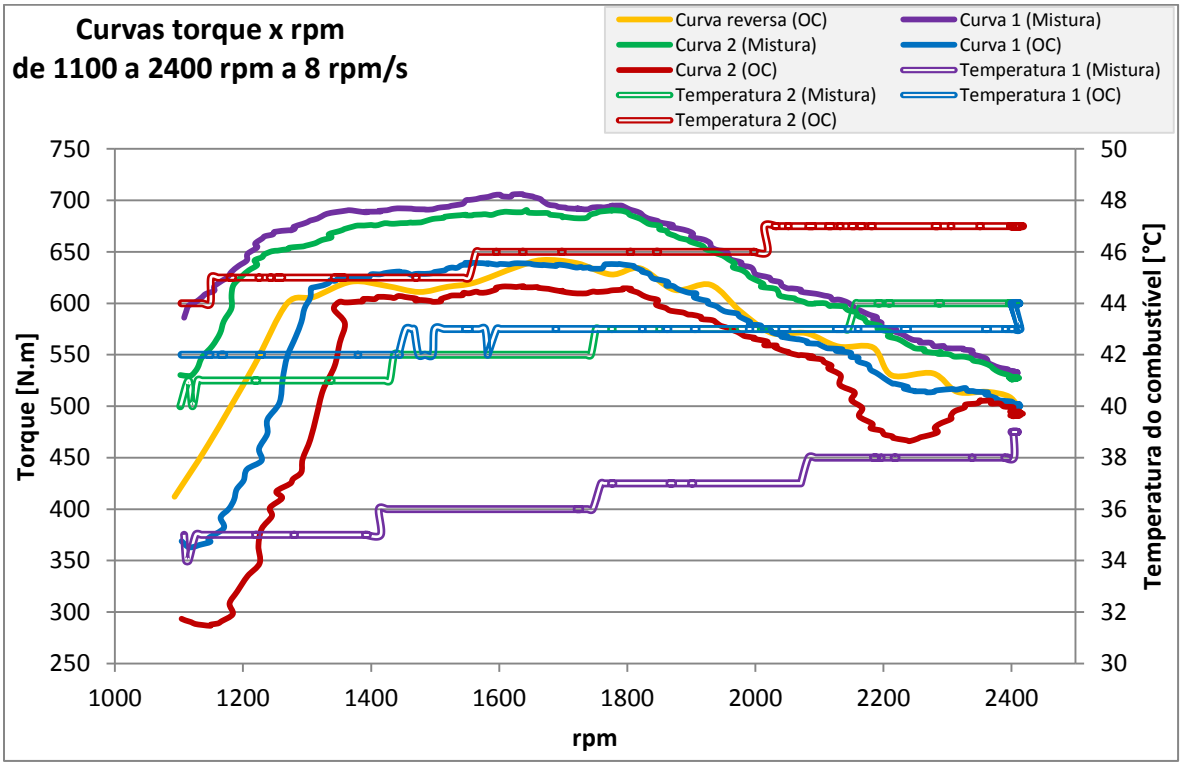


Figura 36 – Influência da temperatura sobre o torque máximo obtido com óleo de colza e mistura de 50% óleo de colza – 50% óleo diesel em um sistema de injeção do tipo Common Rail.

4.1.3 Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas

Ciclo ESC

No terceiro dia de ensaios, foram testados óleo diesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes (Diferença em torno de 6 graus). Dessa vez, cada modo do ciclo de teste durou 2 minutos, exceto o primeiro modo (Vazio) que durou 4 minutos. Os testes foram realizados em um motor Cummins ISBe 4. Os valores máximos de torque obtidos em cada regime estão apresentados na Tabela 11**.** Para o cálculo dos valores de torque e potência, utilizaram-se os mesmos métodos descritos anteriormente. Durante os testes realizados com o óleo diesel, a temperatura do combustível se manteve sempre em torno dos 34 °C a entrada da bomba de alta pressão**.** Nos testes realizados com óleo de colza, a temperatura variou levemente em cada regime e apresentou valores de 66/70 °C, 67/72 °C e 67/73 °C a 1500 rpm, 1900 rpm e 2300 rpm, respectivamente. Essa diferença foi conseguida regulando o aquecedor elétrico instalado no tanque. Ao elevar-se a temperatura, verificou-se uma pequena melhora em desempenho em torno de 1% a 1500 rpm, o mesmo ocorreu a 1900 rpm e uma pequena piora de menos de 1% a 2300 rpm.

Tabela 11 – Potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas). T2 = Maior temperatura, T1 = Menor temperatura.

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)			Potência máxima (kW)		
	Diesel	**OC T2**	**OC T1**	**Diesel**	**OC T2**	**OC T1**
1500	685	607	600	108	95	94
1900	667	590	588	133	117	117
2300	558	503	506	134	121	122

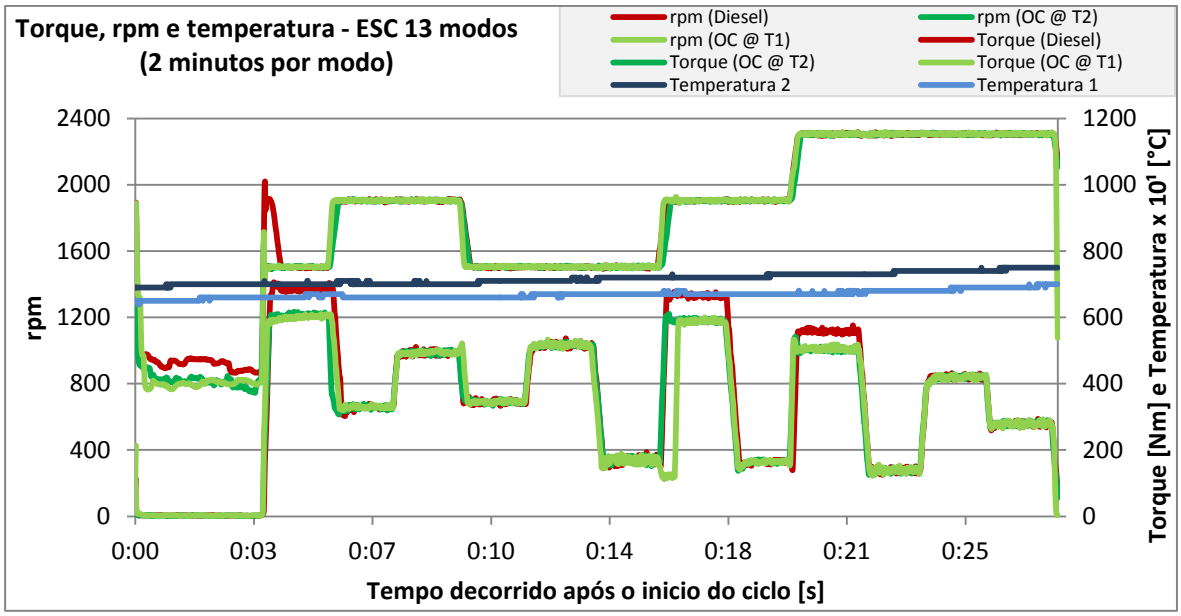


Figura 37 – Torque, rpm e temperatura. Ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle).

Ciclo WHSC

Este ensaio também foi realizado com a utilização de um ciclo de teste WHSC. Este ciclo possui modos com duração variada (Descrito no procedimento experimental). Os valores máximos de torque obtidos em cada regime são apresentados na Tabela 12**.**

Durante os testes realizados com o óleo diesel, a temperatura do combustível se manteve sempre em torno dos 37 °C a entrada da bomba de alta pressão**.** Nos testes realizados com óleo de colza, a temperatura variou levemente em cada regime e apresentou valores de 66/72 °C, 66/71 °C e 67/74 °C a 1465 rpm, 1845 rpm e 2225 rpm, respectivamente.

Com a utilização de óleo de colza a temperatura mais baixa, as perdas de rendimento ficaram por volta de 12% a 1845 rpm e 10% a 1465 e 2225 rpm em relação ao diesel. Ao elevar–se a temperatura, verificou–se uma redução ainda maior em torque e potência, que ficou por volta de 13% a 1845 rpm e 11% a 1465 e 2225 rpm.

Tabela 12 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime utilizando o ciclo de teste WHSC (Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas). T2 = Maior temperatura, T1 = Menor temperatura.

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)			Potência máxima (kW)		
	Diesel	**OC T2**	**OC T1**	**Diesel**	**OC T2**	**OC T1**
1465	678	600	609	104	92	93
1845	682	595	601	132	115	116
2225	568	509	511	132	119	119

Os 13 modos do ciclo de teste WHSC e os valores de torque, rpm e temperatura dos combustíveis podem ser vistos na Figura 38**.**

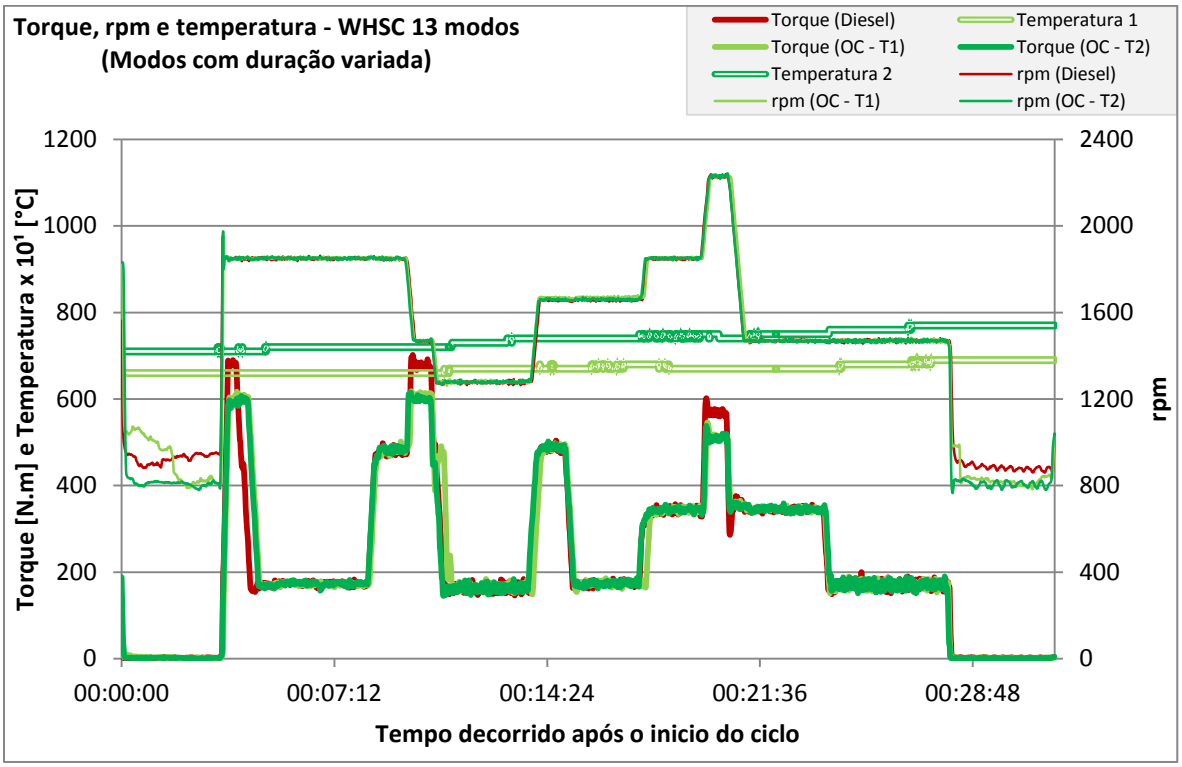


Figura 38 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste WHSC (World Harmonized Sationary Cycle) em ensaios realizados utilizando óleo diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas.

Influência da temperatura sobre o torque máximo

Neste ensaio, o óleo de colza foi aquecido a temperaturas consideravelmente superiores ao anterior com o auxílio de aquecimento elétrico localizado no filtro de combustível. Não se verifica diminuição do torque máximo com o aumento da temperatura. A essas temperaturas, também se verifica grande perda de potência a baixas rotações e a pouca influência da temperatura sobre essas perdas.

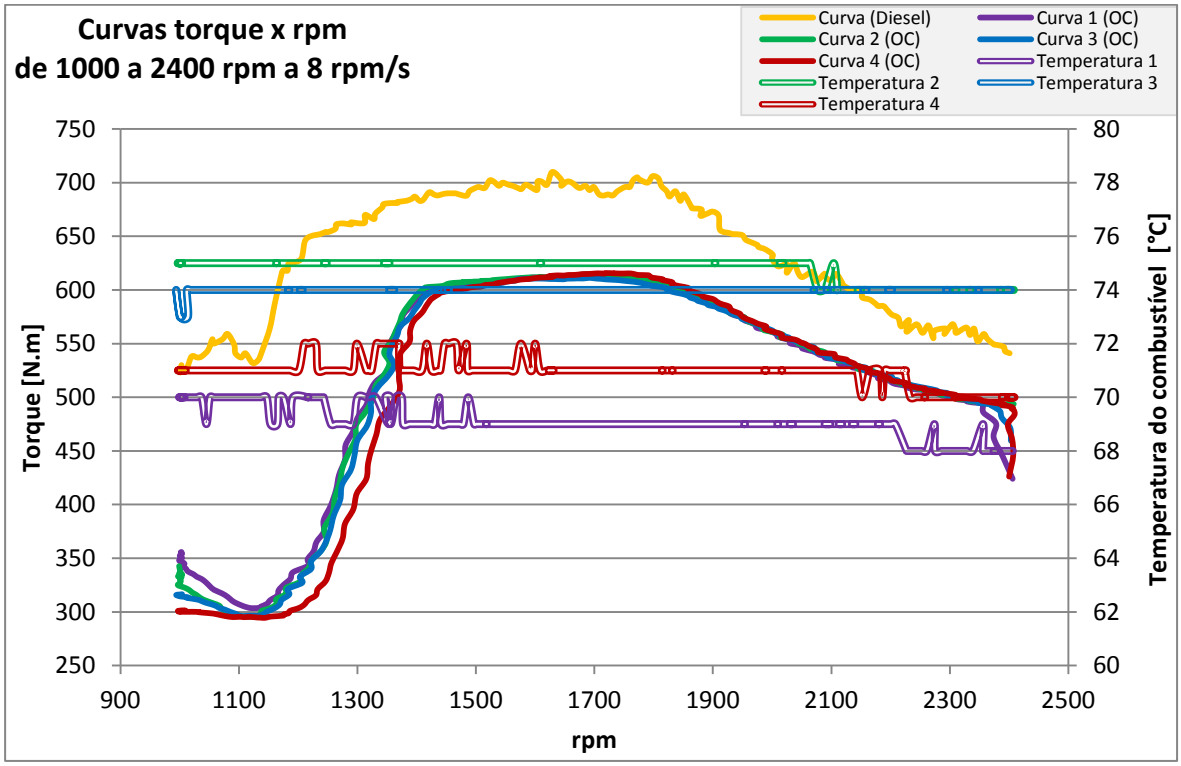


Figura 39 – Influência da temperatura sobre o torque máximo obtido com óleo de colza em um sistema de injeção do tipo Common Rail.

4.1.4 Diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas

No quarto ensaio foram testados óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas. Foram realizados diversos ciclos de teste ESC com modos de tempo variável em um motor Cummins ISBe 4. Os valores máximos de torque obtidos em cada regime para cada um dos combustíveis são apresentados nas Tabela 13Tabela 15. Para o cálculo desses valores assim como os de potência, foram utilizados os mesmos métodos descritos anteriormente. O número abaixo do nome de cada combustível representa a sequência em que os ciclos foram executados.

Tabela 13 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Diesel).

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)					Potência máxima (kW)				
	Diesel 1	**Diesel 2**	**Diesel 3**	**Diesel 4**	**Diesel 11**	**Diesel 1**	**Diesel 2**	**Diesel 3**	**Diesel 4**	**Diesel 11**
1500	667	662	657	661	662	105	104	103	104	104
1900	639	637	639	642	645	127	127	127	128	128
2300	541	541	540	544	546	130	130	130	131	132

Tabela 14 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Biodiesel).

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)		Potência máxima (kW)	
	Biodiesel 9	**Biodiesel 10**	**Biodiesel 9**	**Biodiesel 10**
1500	599	596	94	94
1900	588	587	117	117
2300	494	498	119	120

Tabela 15 – Valores absolutos de potência e torque máximos obtidos em cada regime (Óleo de colza a diferentes temperaturas).

Regime (rpm)	Torque máximo (N.m)				Potência máxima (kW)			
	OC T1 5	**OC T2 6**	**OC T3 7**	**OC T4 8**	**OC T1 5**	**OC T2 6**	**OC T3 7**	**OC T4 8**
1500	603	598	618	616	95	94	97	97
1900	581	589	596	594	116	117	119	118
2300	497	498	504	500	120	120	121	120

Durante os testes realizados com o óleo diesel e biodiesel, a temperatura do combustível se manteve em torno dos 34 °C e 42 °C, respectivamente, a entrada da bomba de alta pressão**.** Nos ensaios com óleo de colza, a temperatura foi diferente em cada modo e em cada ensaio e é apresentada na tabela abaixo:

Tabela 16 – Temperatura do óleo de colza em cada ensaio.

Regime (rpm)	Temperaturas (°C)			
	T1	**T2**	**T3**	**T4**
1500	69	70	58	63
1900	70	66	60	64
2300	71	66	61	66

O desempenho obtido com a utilização do óleo diesel foi semelhante em todos os ciclos, mesmo no último, ciclo que foi executado após a utilização de biodiesel e óleo de colza. O mesmo comportamento é visto para o biodiesel. Para os óleos vegetais, presencia-se uma perda de desempenho com o aumento da temperatura. Em relação ao diesel, as perdas de desempenho foram de 10%, 10% e 7 % a 1500 rpm; 8%, 8% e 7% a 1900 rpm e 8,5%, 8% e 7,5 % a 2300 rpm para o biodiesel, óleo de colza a temperatura mais elevada e óleo de colza a temperatura mais baixa.

Os 13 modos do ciclo de teste e os valores de torque e rpm obtidos podem ser vistos na Figura 40 **.**

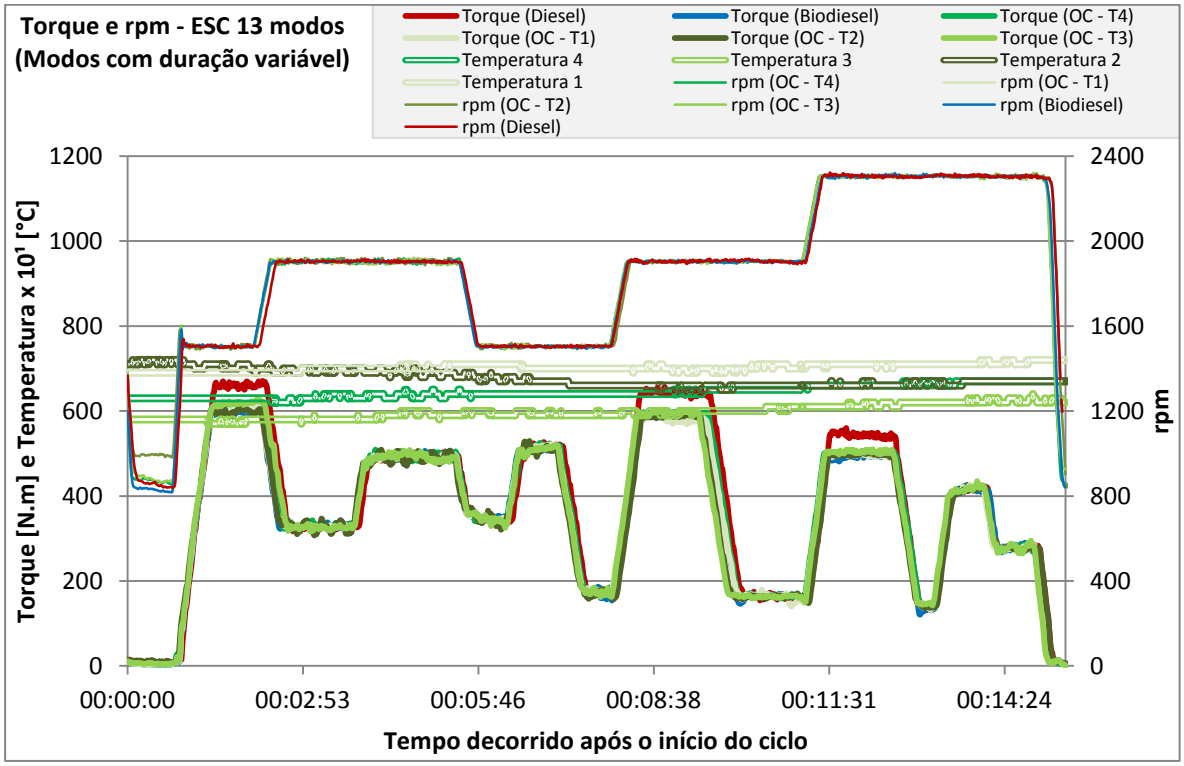


Figura 40 – Valores de torque e rpm obtidos ao longo do ciclo de teste ESC (European Stationary Cycle) em ensaios realizados utilizando óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas.

4.1.5 Comparação dos resultados

Um resumo dos resultados obtidos nos ciclos de teste realizados pode ser visto na Figura 41. Como os valores máximos de torque obtidos com o óleo diesel variaram de um ensaio para o outro, tornou-se inviável uma comparação de valores absolutos. Dessa forma, para a construção desse gráfico utilizou-se valores relativos ao diesel em cada ensaio. Foram plotados na figura tanto os resultados do ciclo de teste ESC quanto WHSC e os três regimes de teste onde se obtiveram valores de torque máximo.

Observa-se uma tendência em perda de desempenho com a adição progressiva de biodiesel ao óleo diesel. Também se observa perda de desempenho com a adição de 50% de óleo de colza ao diesel. Em ambos os ciclos de teste, houve perda de torque máximo com a elevação da temperatura do óleo.

Em relação ao regime de teste, nota-se um melhor desempenho a 2300 rpm, seguido pelo regime 1900 rpm e o pior desempenho a 1900 rpm.

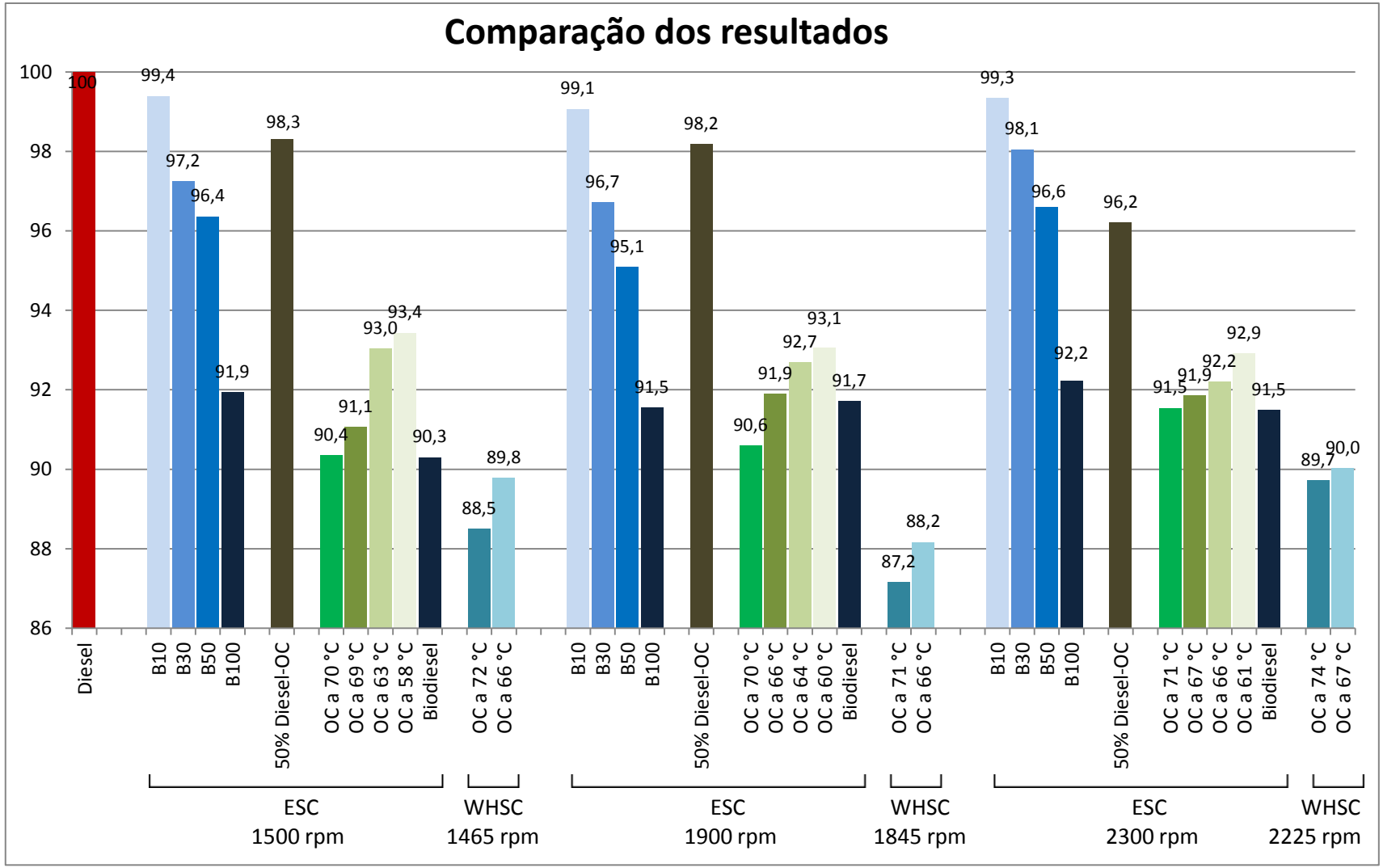


Figura 41 – Comparação dos resultados obtidos em todos os ciclos de teste.

4.1.6 Efeito da temperatura do combustível sobre um sistema de injeção em linha

Curvas de torque máximo também foram obtidas em ensaios utilizando um motor com sistema de injeção mecânico em linha (Zetor 1505) a fim de comparar os resultados com os obtidos previamente em um motor com sistema de injeção do tipo Common Rail.

Aqui também nota-se a influência da temperatura sobre o torque máximo obtido, com este decrescendo a medida que a temperatura aumenta. As temperaturas foram medidas a entrada do injetor, com uma diferença de 15 °C entre a mais elevada e a mais baixa. Os valores podem ser vistos na Figura 42. Como esse sistema utiliza um limitador da taxa de injeção de combustível acoplado ao governador, a quantidade de óleo fornecida a câmara de combustão também dependerá da pressão do coletor de admissão. Como no caso anterior, também há grande perda de potência a baixas rotações, também dependentes da temperatura.

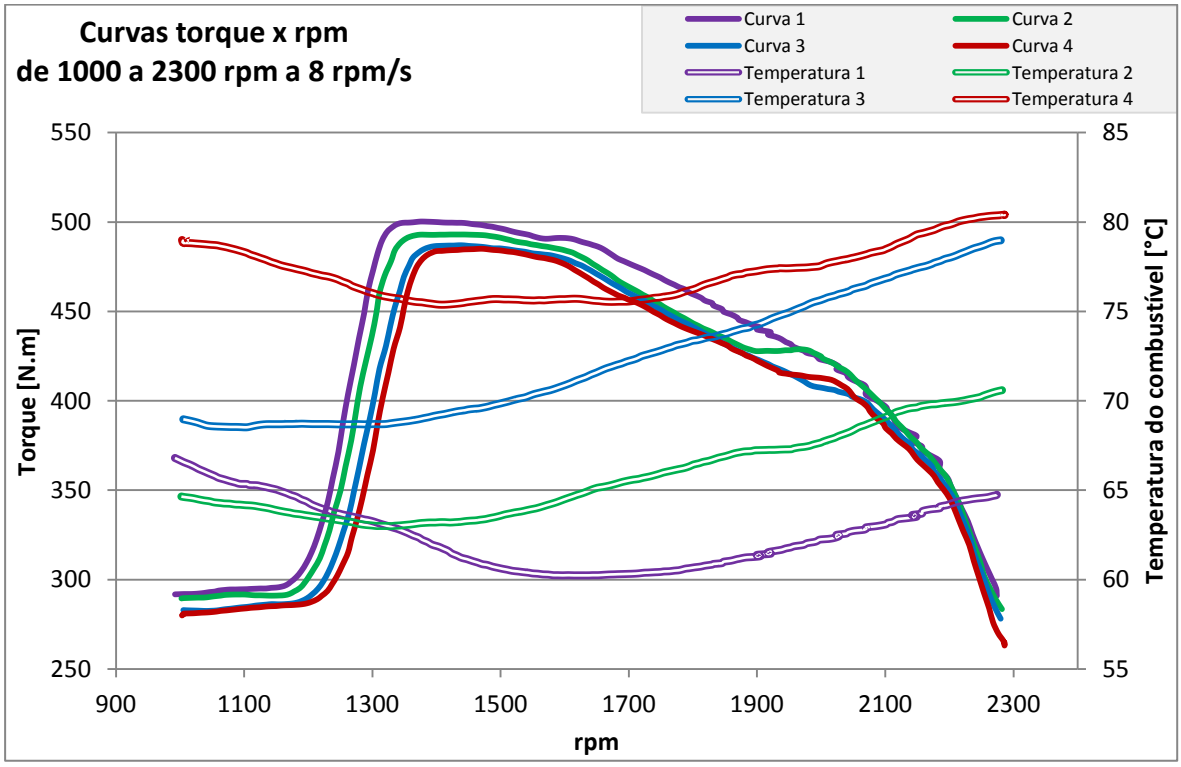


Figura 42 – Influência da temperatura sobre o torque máximo obtido com óleo de colza em um sistema de injeção mecânico em linha.

4.2 Consumo e eficiência

4.2.1 Diesel e mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo de colza

Neste ensaio, observa-se um aumento no consumo de combustível em todos os modos de operação com a utilização da mistura. Mesmo nos modos a carga máxima, quando a pressão de injeção do CR foi igual para ambos os combustíveis, o consumo de combustível foi maior. Também é de fácil observação que diferença entre os consumos é dependente do regime de operação e é tanto maior quanto maior for a potência requerida. Com o auxílio das equações (7) e (8), obtiveram-se os dados de consumo específico e eficiência. A eficiência de ambos os combustíveis foi a mesma e o consumo específico com a utilização da mistura foi um pouco maior (Tabela 17) Os valores obtidos no ensaio são apresentados na Figura 43. O consumo instantâneo é referente a variação mássica instantânea do tanque de combustível registrada pela balança. O consumo acumulado é referente a quantidade de combustível consumida em todo o ciclo.

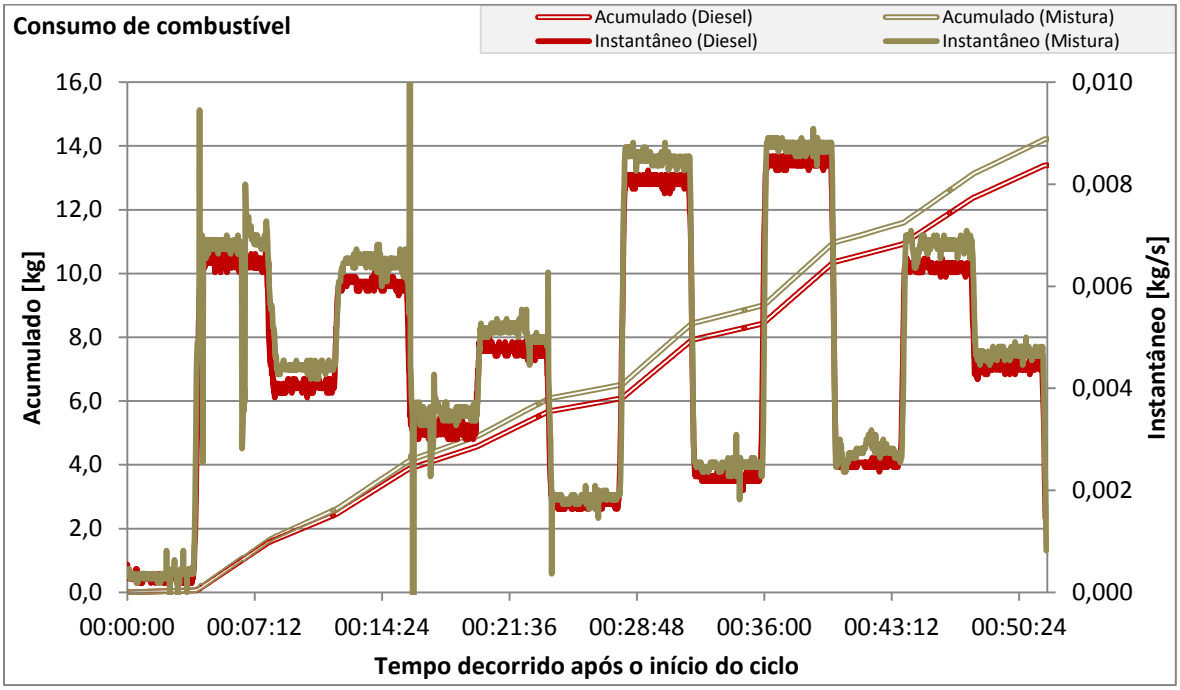


Figura 43 – Consumo acumulado e instantâneo verificado para o diesel e 50% Diesel-OC (Ciclo de teste ESC).

Tabela 17 – Valores absolutos de consumo acumulado, específico e eficiência (Diesel e mistura 50% diesel-OC).

Combustível	Consumo acumulado (kg)	PCI (MJ/kg)	Energia fornecida pelo combustível (MJ)	Energia absorvida pelo dinamômetro (MJ)	Consumo específico (g/kW.h)	Eficiência (%)
Diesel	13,394	42-43	569,2	229,312	210,26	40,29
Mistura	14,217	39-40	561,5	226,209	226,22	40,29

4.2.2 Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas

WHSC

Neste ensaio, não foi possível a comparação direta dos combustíveis em cada modo de operação, devido ao consumo instantâneo de OC não ter sido uniforme em algum deles. Isso aconteceu devido a dois motivos: Utilização de um sistema bi-combustível, que fez com que os óleos utilizassem circuitos diferentes, havendo possivelmente, acumulo de combustível no filtro do óleo vegetal e o tempo de duração de cada modo, tendo o consumo instantâneo dos modos com maior duração alcançado a estabilidade. Nestes modos, observa-se que o consumo de combustível foi maior para os óleos vegetais. Observa-se também que para uma mesma taxa de injeção mássica, a pressão no CR foi maior para o óleo com temperatura mais elevada. Os dados do ensaio podem ser vistos na Figura 44. Na Tabela 18 são apresentados os valores de consumo específico, consumo acumulado ao longo do ciclo e eficiência. Observa-se que o consumo específico é um pouco maior para o óleo de colza (Aproximadamente 15%) e a eficiência praticamente a mesma.

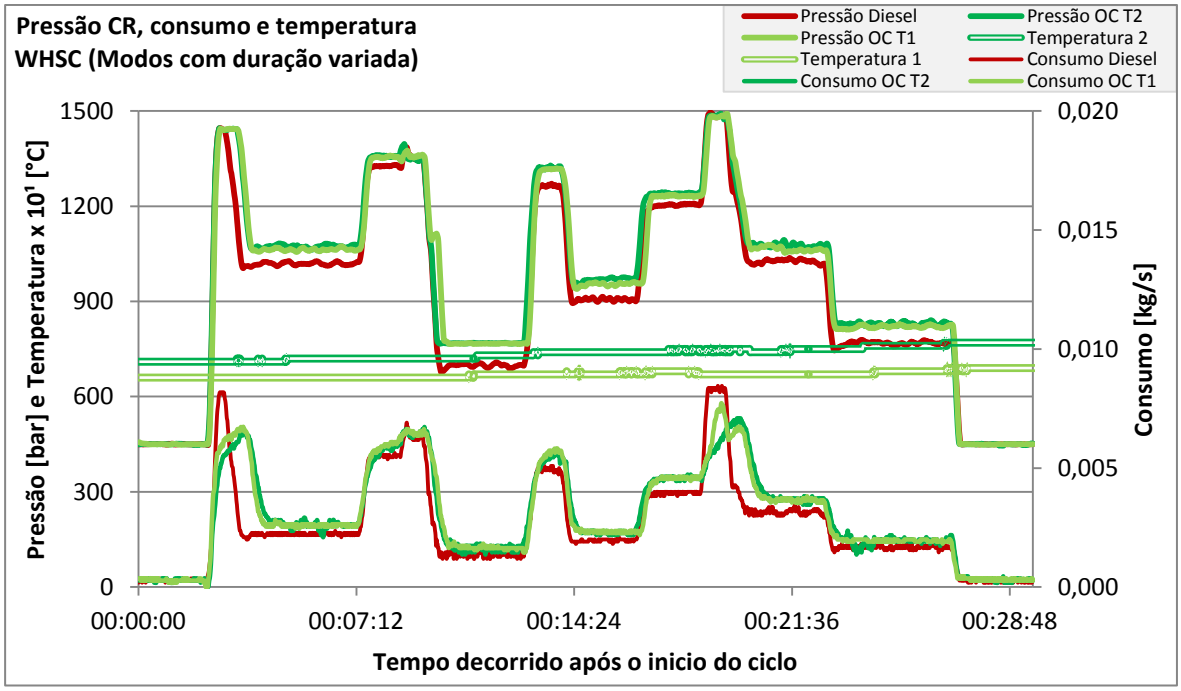


Figura 44 – Consumo instantâneo e pressão no CR verificados para o diesel e OC a diferentes temp (Ciclo WHSC).

Tabela 18 - Valores absolutos de consumo e eficiência para o Diesel e OC a diferentes temp (Ciclo WHSC).

Combustível	Consumo acumulado (kg)	PCI (MJ/kg)	Energia fornecida pelo combustível (MJ)	Energia absorvida pelo dinamômetro (MJ)	Consumo específico (g/kW.h)	Eficiência (%)
Diesel	4,387	42-43	186,4	73,5	214,8	39,43
OC T2	5,057	36-37	184,6	73,7	247,2	39,90
OC T1	5,063	36-37	184,8	73,6	247,5	39,84

ESC

Devido aos problemas citados anteriormente, também não foi possível a comparação do consumo instantâneo de combustível modo a modo. Entretanto, no segundo e décimo modo, ambos de torque máximo, as curvas possuem forma semelhante e estão sobrepostas, e verifica-se um maior consumo a temperatura mais elevada a 1500 rpm e o contrário a 1900 rpm. Em relação ao consumo acumulado, este foi maior para os óleos vegetais e não houve influência da temperatura. Os dados do ensaio podem ser vistos na Figura 46. Na Tabela 19são apresentados os valores de consumo específico, consumo acumulado ao longo do ciclo e eficiência. Observa-se que o consumo específico é um pouco maior para o óleo de colza (Aproximadamente 15%) e a eficiência praticamente a mesma. Apesar de serem diferentes, ambos os ciclos resultaram nos mesmos valores.

Tabela 19 - Valores absolutos de consumo e eficiência para o Diesel e OC a diferentes temp (Ciclo ESC).

Combustível	Consumo acumulado (kg)	PCI (MJ/kg)	Energia fornecida pelo combustível (MJ)	Energia absorvida pelo dinamômetro (MJ)	Consumo específico (g/kW.h)	Eficiência (%)
Diesel	6,787	42-43	288,4	114,6	213,2	39,74
OC T2	7,430	36-37	271,2	108,6	246,2	40,05
OC T1	7,405	36-37	270,3	107,4	248,3	39,72

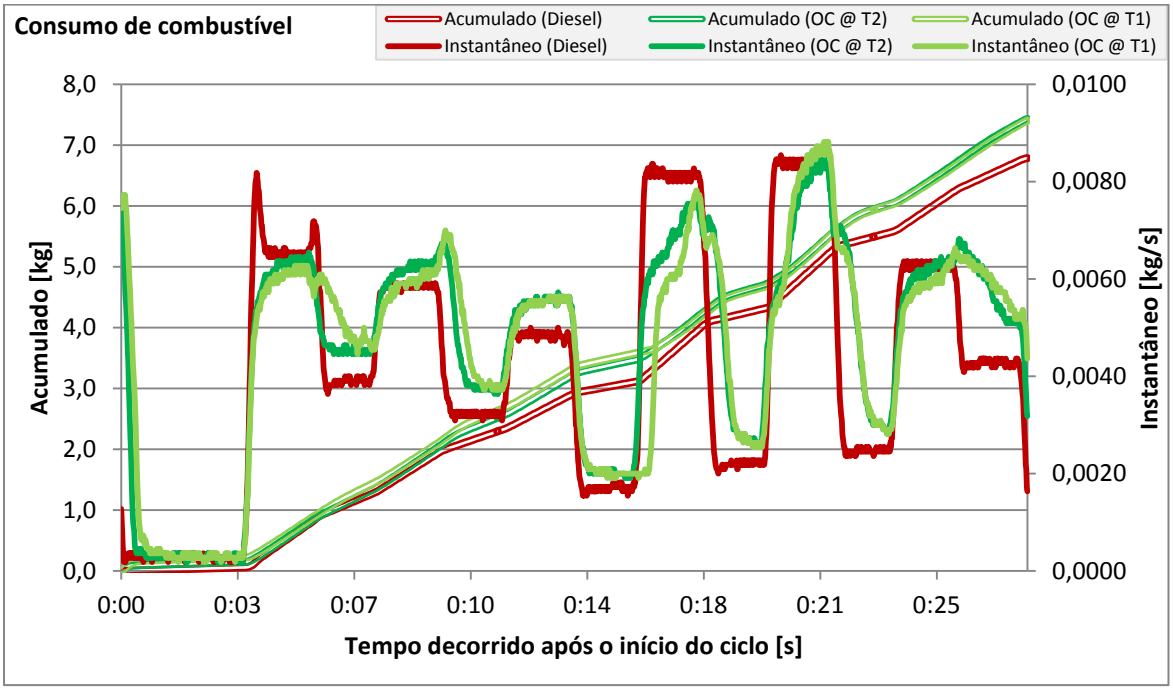


Figura 45 – Consumo instantâneo e acumulado verificados para o diesel e OC a diferentes temp (Ciclo ESC).

4.2.3 Diesel, biodiesel e óleo de colza

Neste ensaio fica evidente a influência da duração de cada modo no sistema bi-combustível utilizado. Dessa forma, fica impraticável a comparação do consumo instantâneo. A Figura 46 mostra os valores de consumo instantâneo e acumulado obtidos. Observa-se eficiência semelhante para todos os combustíveis, c.e. um pouco maior para o biodiesel (13,5%) e OC (14,5%). Esses dados podem ser vistos na Tabela 20.

$$c.e\left(\frac{g}{kW.h}\right) = \frac{m_f\ (g)}{\sum P\ (kW.h)} \tag{7}$$

$$\eta\ (\%) = \frac{\sum P\ (MJ)}{m_f\ (kg) \times PCI\ \left(\frac{MJ}{kg}\right)}\ x\ 100 \tag{8}$$

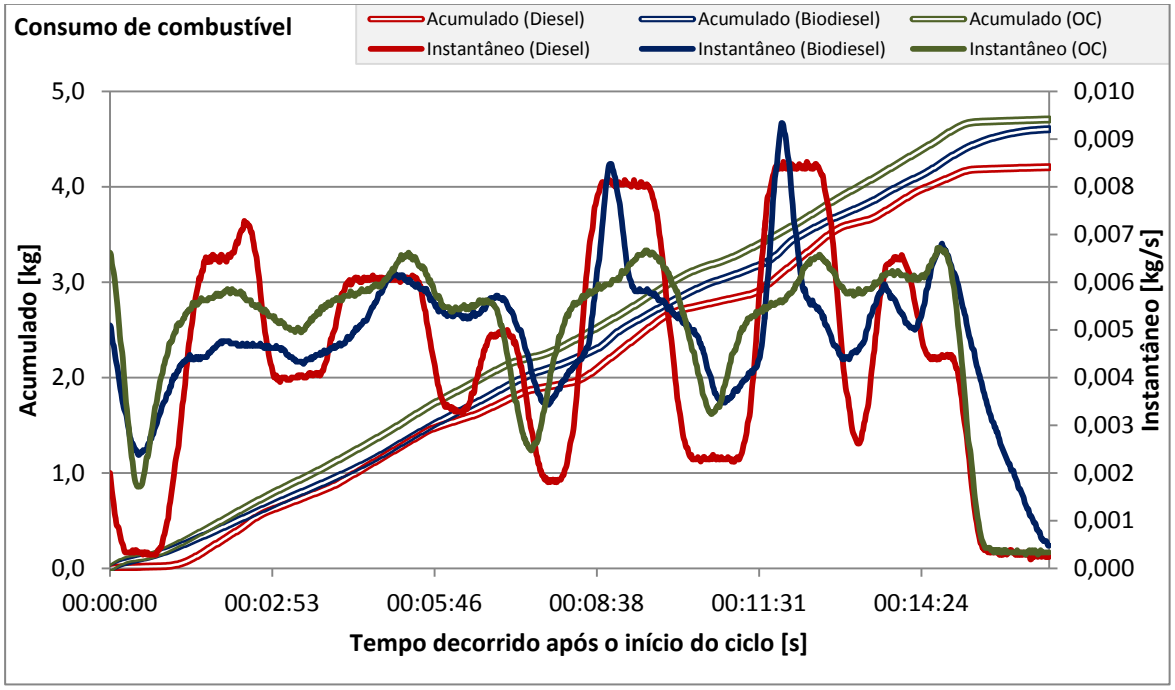


Figura 46 – Consumo acumulado e instantâneo verificado para o diesel, biodiesel e OC (Ciclo de teste ESC).

Tabela 20 - Valores absolutos de consumo acumulado, específico e eficiência (Diesel, biodiesel e OC).

Combustível	Consumo acumulado (kg)	PCI (MJ/kg)	Energia fornecida pelo combustível (MJ)	Energia absorvida pelo dinamômetro (MJ)	Consumo específico (g/kW.h)	Eficiência (%)
Diesel	4,206	42	178,8	69,1	219,1	38,64
Biodiesel	4,604	36	168,0	66,0	251,1	39,30
OC	4,706	36	171,8	66,2	255,9	38,57

4.2.4 Comparação dos resultados

Um resumo dos resultados obtidos nos ciclos de teste realizados pode ser visto na Figura 47. Relativamente ao diesel, todos os combustíveis apresentaram um consumo específico mais elevado. Nota-se uma diferença pequena entre o óleo de colza e o biodiesel. Com a adição de 50% de OC ao diesel, verifica-se uma redução no consumo específico. A temperatura não tem influência nesse parâmetro. A eficiência pode ser considerada igual em todos os casos, pois a pequena diferença encontrada é menor que o erro.

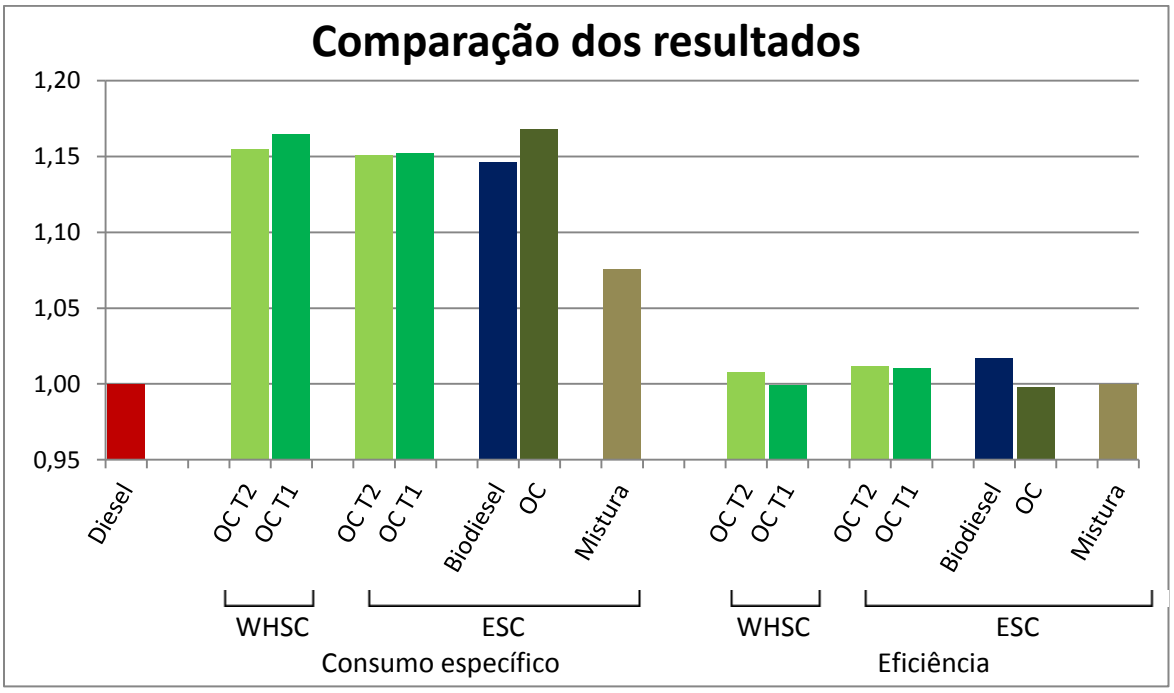


Figura 47 – Comparação dos resultados de consumo específico e eficiência com a utilização de diversos combustíveis em um motor Common Rail a diesel.

4.3 Emissões de partículas

4.3.1 Diesel e mistura de 50% de óleo diesel e 50% de óleo de colza

Número total de partículas

O número total de partículas emitidas foi maior para a mistura que para o óleo diesel em todos os modos, exceto a 1500 e 2300 rpm a carga máxima (Figura 48). A diferença nas emissões foi muito acentuada em vazio.

A distribuição de partículas por tamanhos desde aproximadamente 5 nm até aproximadamente 600 nm é apresentada nas Figura 49 -Figura 54 -. Alguns dos 13 modos de operação foram selecionados para comparação. A análise das figuras aponta uma menor emissão de nano partículas de até aproximadamente 20 nm para o diesel a 1900 rpm (todas as condições de carga), enquanto para partículas maiores, as emissões foram ligeiramente maiores para este combustível. Em vazio, as emissões de partículas foram consideravelmente maiores até 50 nm e praticamente iguais para partículas maiores. A 1500 rpm e carga máxima as emissões de partículas de até 15 nm foram ligeiramente inferiores para o diesel e as emissões de partículas maiores foram praticamente iguais.

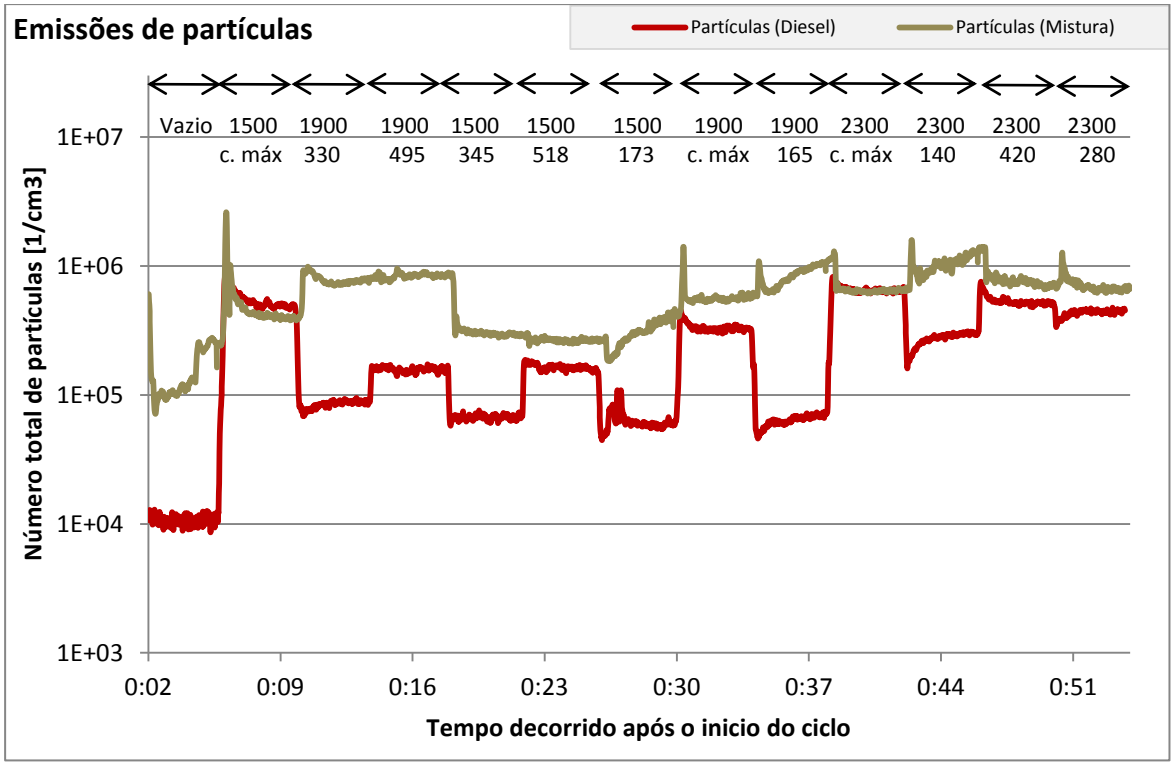


Figura 48 – Emissões totais de partículas. Diesel e mistura 50% diesel – 50% óleo de colza. Ciclo ESC.

Distribuição por tamanho

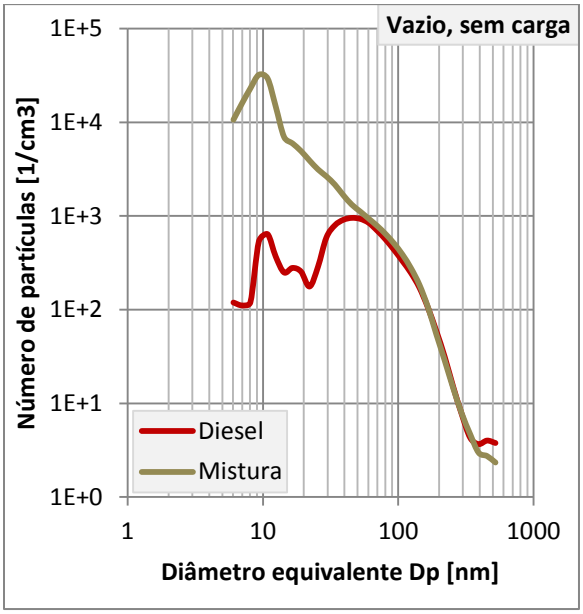


Figura 49 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel e mistura 50% diesel – 50% óleo de colza. Regime de rotações em vazio.

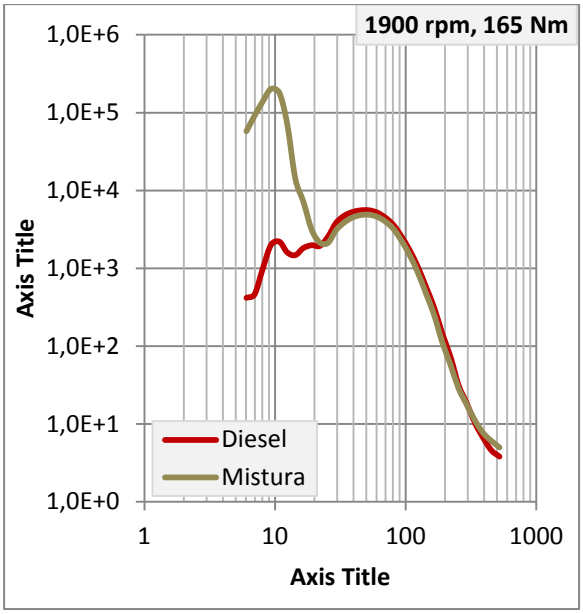


Figura 50 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 165 N.m.

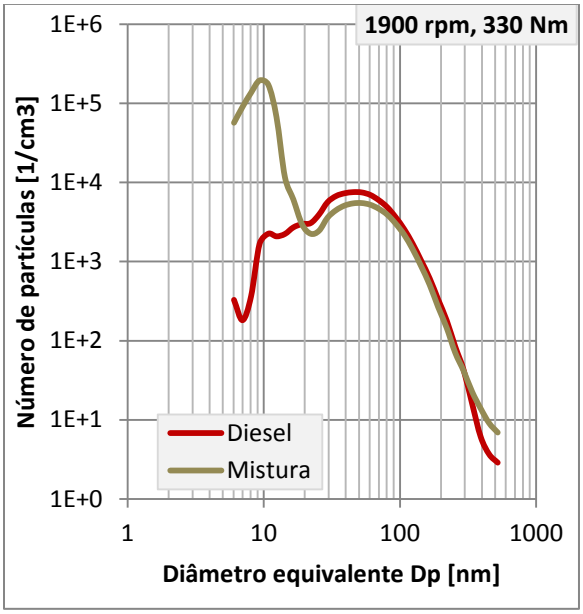


Figura 51 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 330 N.m.

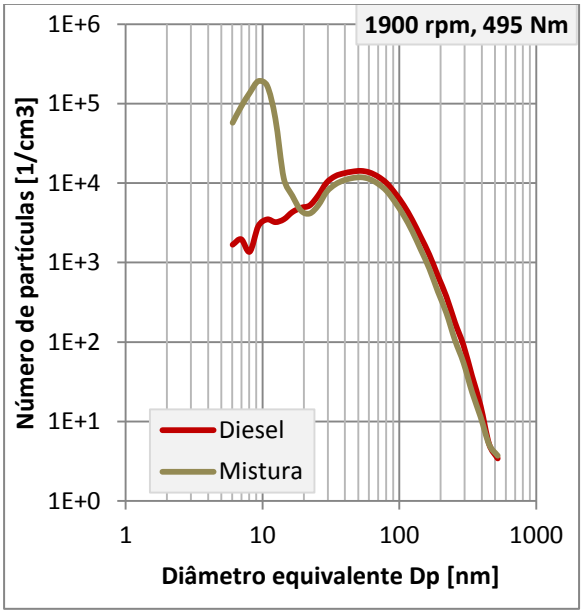


Figura 52 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 495 N.m.

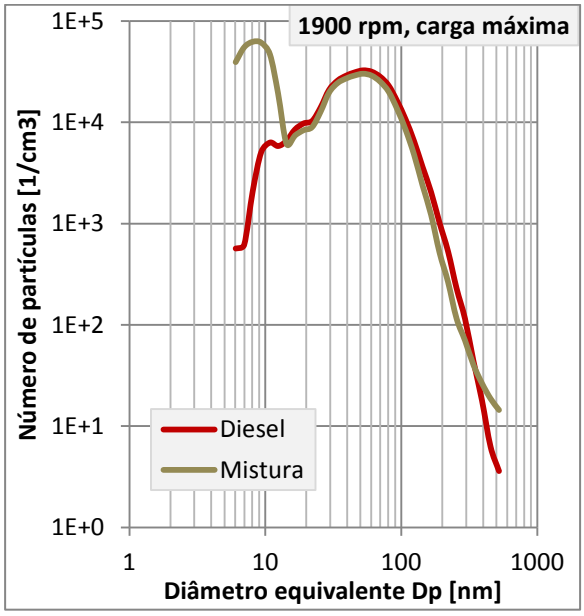


Figura 53 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, carga máxima.

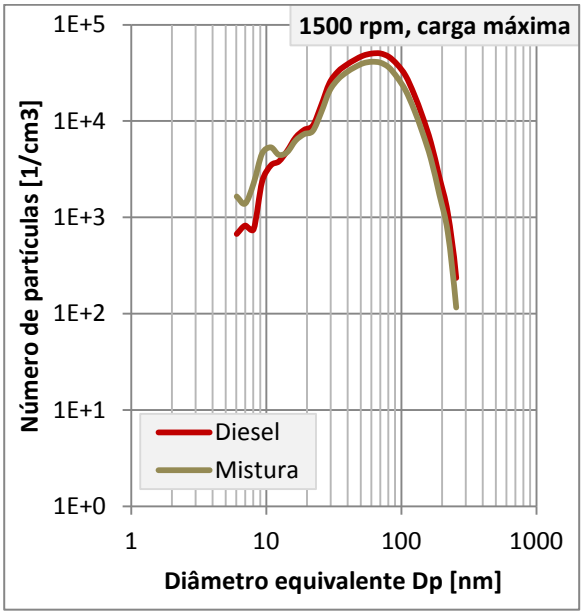


Figura 54 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, carga máxima.

4.3.2 Diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas

Total de partículas

O número total de partículas emitidas foi sempre maior para a o óleo de colza a temperatura mais baixa, exceto em alguns modos (Figura 48). Nesta comparação, o biodiesel se mostrou vantajoso sendo o combustível que apresentou as menores emissões.

A distribuição de partículas por tamanhos desde aproximadamente 5 nm até aproximadamente 600 nm é apresentada nas Figura 56Figura 61. Alguns dos 13 modos de operação foram selecionados para comparação. A análise das figuras aponta uma menor emissão de nano partículas de até aproximadamente 50 nm para o diesel quando o motor funciona em vazio. Acima de 50 nm, as emissões de todos os combustíveis são próximas e ligeiramente mais baixas para o diesel. A 1900 rpm e todas as cargas o óleo diesel apresenta menores emissões de partículas até 20nm. No entanto, essas emissões são ligeiramente inferiores as do biodiesel. Para partículas de dimensões maiores, o óleo diesel foi o que apresentou as maiores emissões. Para esses tamanhos, as emissões de OC e biodiesel foram comparáveis. A 1500 rpm e carga máxima não se verifica uma tendência clara sobre as emissões.

.

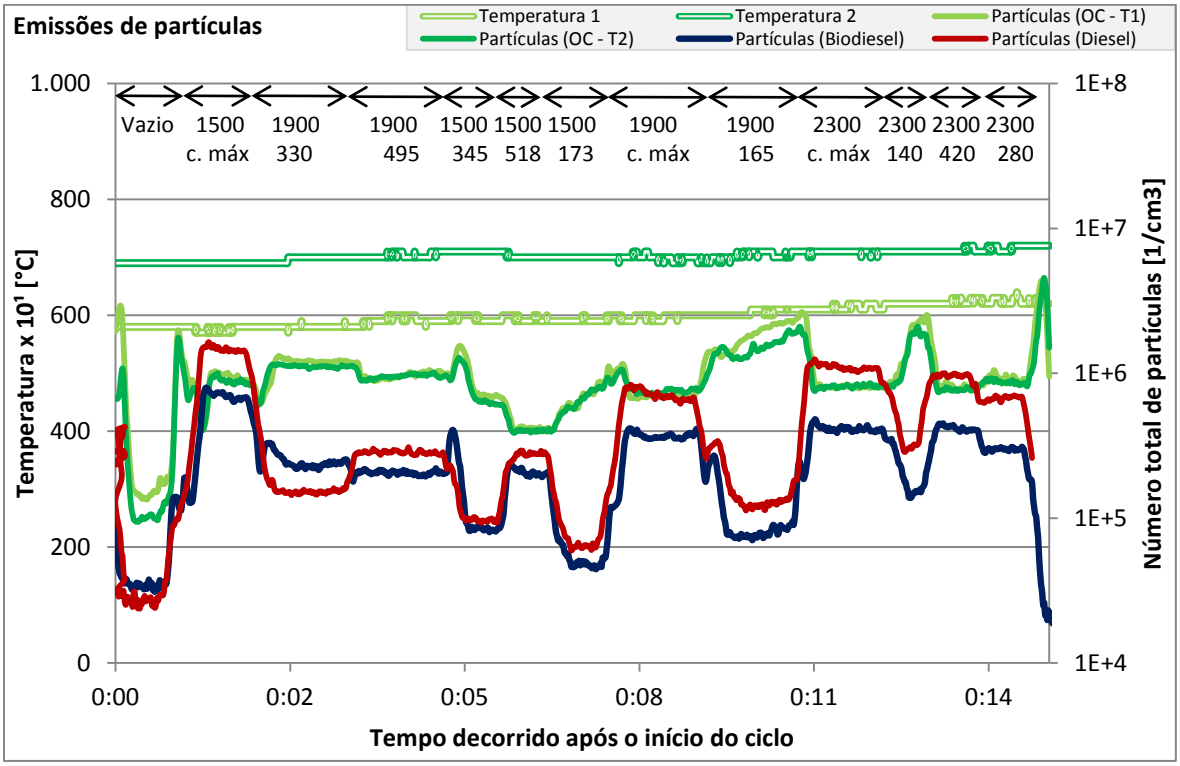


Figura 55 - Emissões totais de partículas. Diesel, biodiesel e óleo de colza a diferentes temperaturas. Ciclo ESC.

Distribuição de partículas por tamanho

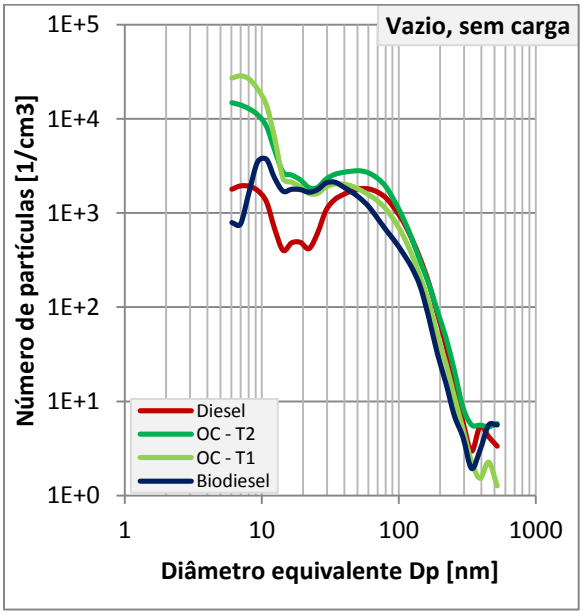


Figura 56 – Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. Regime de rotações em vazio.

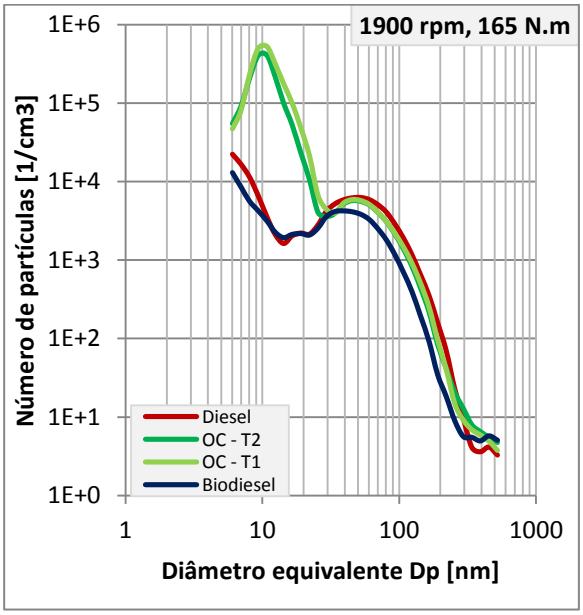


Figura 57 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 165 N.m.

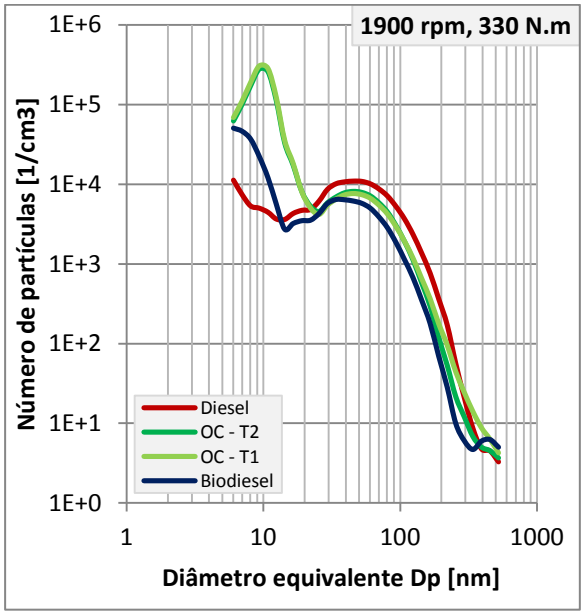


Figura 58 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 330 N.m.

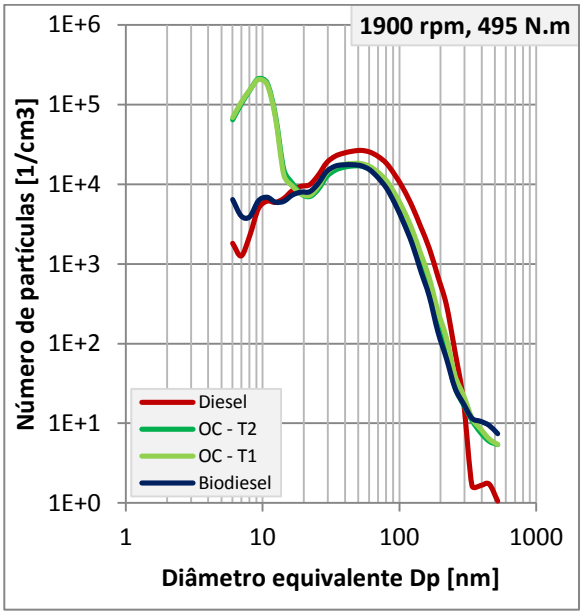


Figura 59 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, 495 N.m.

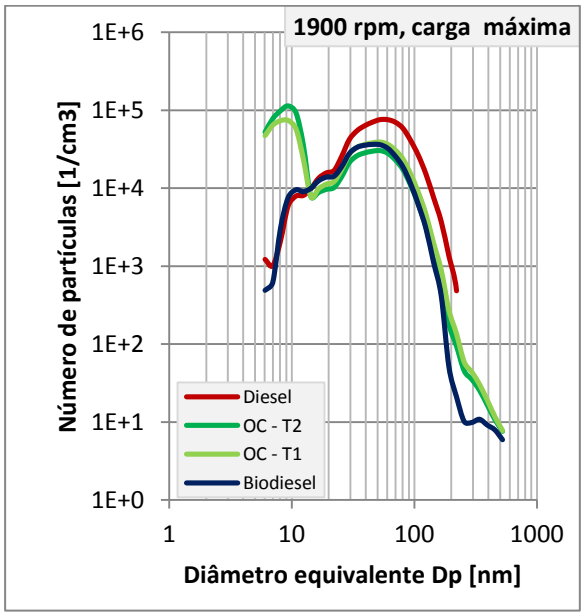


Figura 60 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1900 rpm, carga máxima.

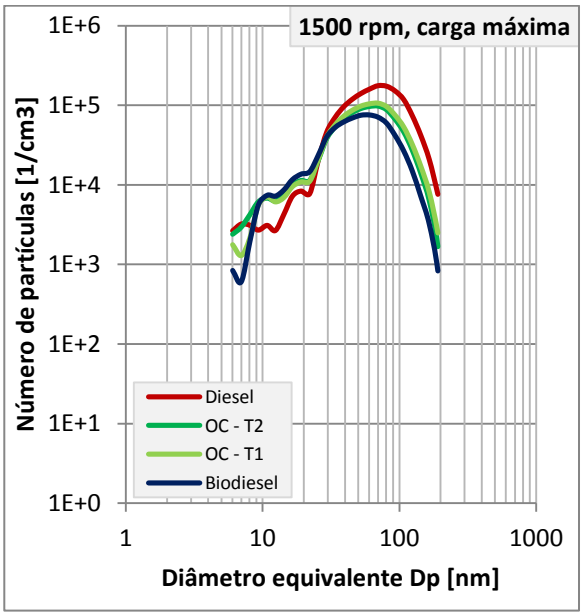


Figura 61 - Distribuição de partículas por tamanho para o óleo diesel, biodiesel e óleo de colza a duas temperaturas diferentes. 1500 rpm, carga máxima.

4.4 Emissões de gases

4.4.1 Diesel e óleo de colza a diferentes temperaturas

Os dados sobre as emissões provenientes de diversos ciclos de teste foram agrupados, e para cada ponto de operação as emissões do óleo de colza a temperatura mais elevada são expressas relativamente ao óleo diesel e ao OC a temperatura mais baixa. Os resultados das emissões de THC, NO_X e CO são apresentados através de gráficos de bolhas nas Figura 62Figura 67. A posição de cada bolha representa a combinação da velocidade de rotação do motor (eixo horizontal) e torque (eixo vertical), enquanto a área representa a diferença percentual de emissões (Também mostrada em valores numéricos acima das bolhas).

Em relação ao diesel, o óleo vegetal apresentou menores emissões de THC em todos os modos de operação. As emissões de CO foram maiores apenas no regime sem carga, enquanto as emissões de NO_X foram maiores em alguns regimes e tiveram uma leve redução em outros, exceto em vazio onde a redução foi substancial.

O aumento da temperatura do óleo de colza teve impacto na redução de THC em todos os regimes exceto em vazio, no aumento das emissões de NO_X exceto em vazio, e nas emissões de CO sem uma tendência definida.

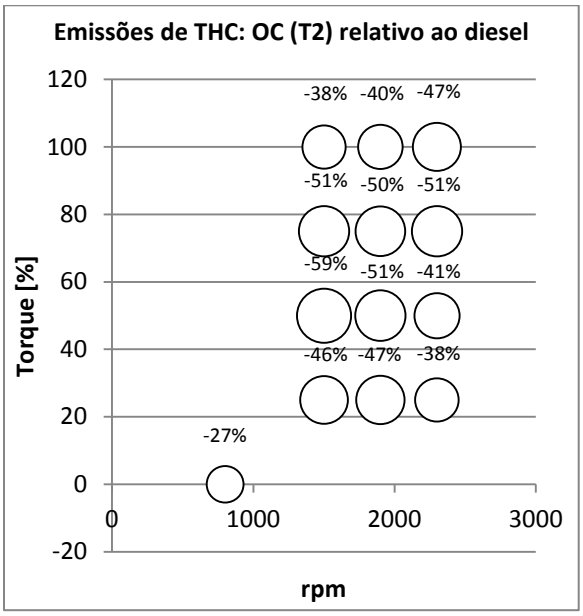


Figura 62 – Efeito do óleo de colza nas emissões de THC em vários regimes de funcionamento (relativo ao diesel).

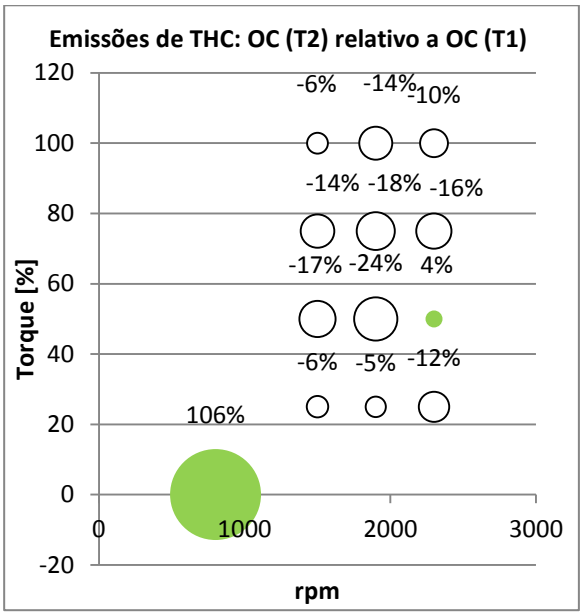


Figura 63 – Efeito da temperatura do óleo de colza nas emissões de THC em vários regimes de funcionamento (relativo ao óleo de colza a temp. mais baixa).

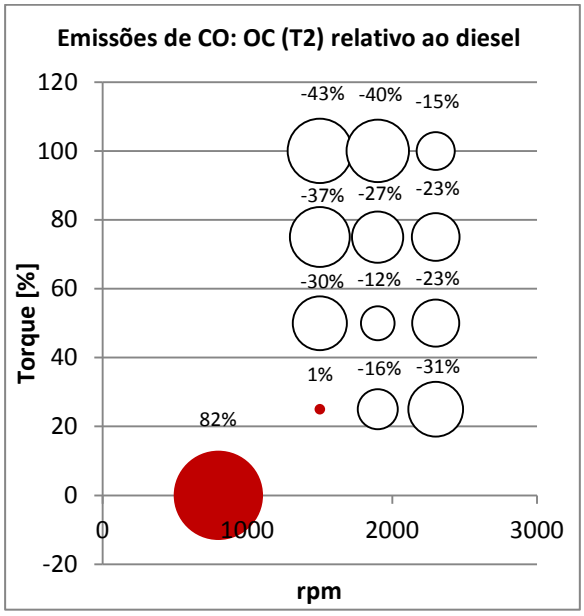


Figura 64 - Efeito do óleo de colza nas emissões de CO em vários regimes de funcionamento (relativo ao diesel).

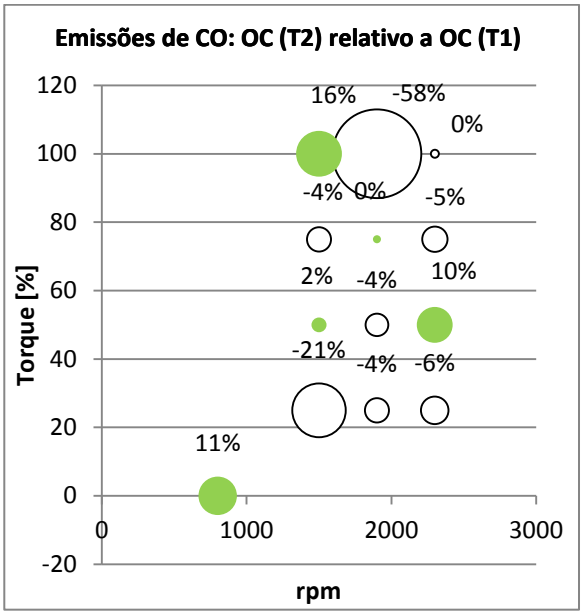


Figura 65 - Efeito da temperatura do óleo de colza nas emissões de CO em vários regimes de funcionamento (relativo ao óleo de colza a temp. mais baixa).

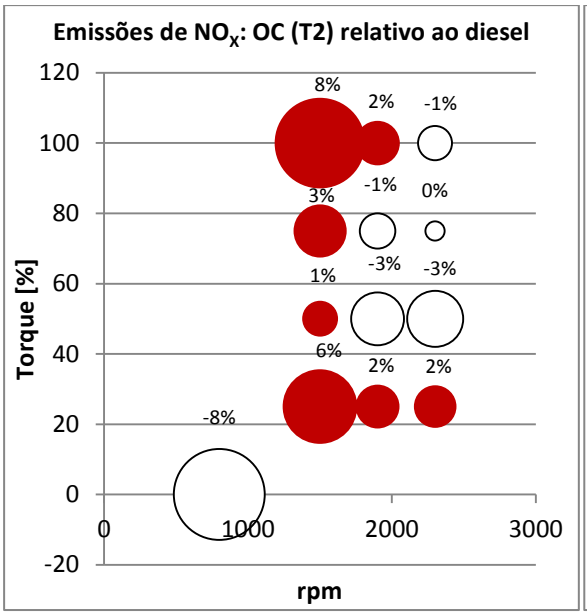


Figura 66 - Efeito do óleo de colza nas emissões de NO_X em vários regimes de funcionamento (relativo ao diesel).

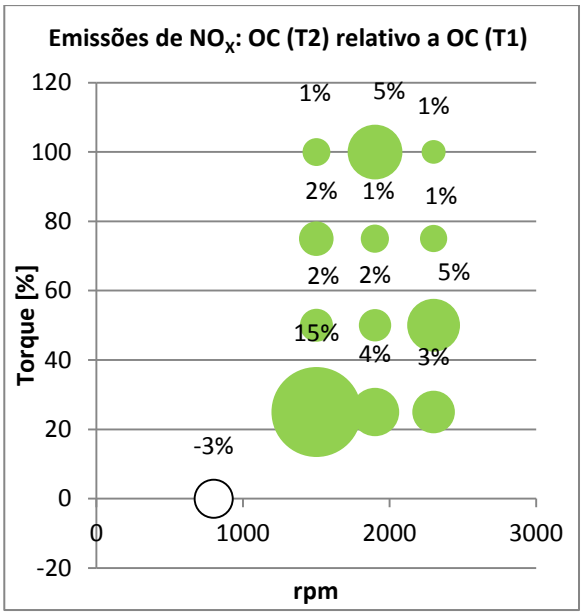


Figura 67 - Efeito da temperatura do óleo de colza nas emissões de NO_X em vários regimes de funcionamento (relativo ao óleo de colza a temp. mais baixa).

Capítulo 5

Discussão

A adição de biodiesel ao óleo diesel resultou em uma perda de desempenho proporcional ao teor deste na mistura. Tal fato está relacionado principalmente a menor densidade de energia (PCI) desse combustível. No entanto, esta perda ficou abaixo da perda teórica esperada, se somente esta propriedade for considerada. Tal fato se deve, provavelmente, a perda de potência ter sido parcialmente compensada por uma taxa de injecção de combustível mais elevada e uma maior eficiência de combustão.

A utilização de óleo de colza se mostrou bastante promissora, sendo obtido um desempenho apenas 10% inferior ao obtido com a utilização óleo diesel. Como aconteceu anteriormente, esse desempenho seria inferior se as perdas não fossem parcialmente compensadas por uma maior taxa de injecção. Tal fato não pode ser comprovado directamente pela análise do gráfico de consumo devido ao problema de acumulo apresentado pelo sistema bi-combustível, descrito na seção resultados. Entretanto, baseado na análise gráfica do ensaio realizado com a mistura de 50% diesel-OC, tudo indica essa ocorrência. Além desse factor, a análise do gráfico de bolhas, que compara as emissões do óleo de colza relativamente ao diesel, revela menores emissões de THC e CO e um aumento nas emissões de NO_X, todos indicativos de uma combustão mais eficiente.

Nos ensaios realizados com óleo vegetal, a temperatura teve um impacto negativo no desempenho, tendo o seu aumento levado a uma redução no torque máximo. Essa redução não foi verificada em apenas um dos experimentos, entretanto, atribui-se esse fato a temperatura do óleo não ser medida a entrada do injector e sim a entrada da bomba de alta pressão. Provavelmente, o óleo inicialmente a temperatura mais baixa a entrada da bomba foi injectado a temperatura superior devido a um maior aquecimento adquirido ao longo do circuito de alta pressão, hipótese sustentada pela verificação que a temperatura do fluido refrigerante esteve mais elevada nesse caso. Essa redução está inteiramente relacionada a injecção de uma maior quantidade de combustível, verificada nos gráficos de consumo, uma vez que a elevação da temperatura também resulta em uma combustão mais eficiente, que, no entanto, teve seu efeito suprimido pela maior injecção de combustível.

Misturar óleo vegetal ao óleo diesel se mostrou uma técnica bastante interessante, sendo possível obter valores de torque máximo próximos aos obtidos com a combustão do óleo diesel puro. Entretanto, essa proximidade também foi devido a maior taxa de injecção de combustível e, provavelmente, a uma combustão mais eficiente. Observa-se também uma menor velocidade em vazio e uma maior quantidade de combustível injectada necessária para manter o torque desejado.

A taxa de injecção de combustível em um sistema Common Rail é de análise extremamente complicada, uma vez que envolve diversos factores como: Diferença de pressão entre o bico do injector e a câmara de combustão, coeficiente de fricção durante o processo de injecção e a variação da amplitude das ondas de pressão, associada as características de amortecimento do combustível. Todos estes factores estão relacionados de forma complexa com as propriedades dos combustíveis como viscosidade, módulo de compressibilidade e densidade. Dentre estas, a densidade tem efeito dominante sobre as demais fazendo com que sua variação seja a principal responsável por uma maior ou menor taxa de injecção.

Esse fato explica porque os combustíveis menos viscosos apresentaram maior taxa de injecção mássica que o óleo diesel, compensando parcialmente a perda de potência devido a menor densidade de energia. Outra consequência desse fato foi a maior injecção de combustível presenciada para os óleos vegetais quando estes foram injectados a temperaturas mais baixas. A densidade dos óleos vegetais decresce linearmente com o aumento da temperatura, levando a uma menor taxa de injecção mássica. Embora a elevação da temperatura também tenha impacto na viscosidade, fazendo com que esta decresça logaritmicamente, o efeito sobre essa propriedade consequente melhora da combustão foi pequeno quando comparado ao efeito da densidade. Se a temperatura de injecção fosse mais baixa, a redução da viscosidade com o aumento da temperatura seria muito mais acentuada e, provavelmente, essa propriedade teria maior influência na taxa de injecção. Entretanto, a temperaturas mais baixas a qualidade da combustão seria inferior, e este provavelmente seria o principal factor da perda de desempenho.

Em um sistema mecanicamente controlado, um caudal volumétrico constante é enviado pela bomba ao injector. Assumindo a mesma perda de combustível devido as fugas entre o pistão e o cilindro da bomba injectora, necessárias para a lubrificação desses componentes, o torque máximo também terá relação directa com a densidade. Dessa forma, a elevação da temperatura causará a diminuição da densidade, uma menor quantidade mássica de combustível entrará na câmara de combustão, o que por sua vez levará a perda de desempenho. Este comportamento ficou evidente nos ensaios realizados.

A perda de torque a rotações mais baixas em regime transiente, verificada nas curvas de torque, também foi mais acentuada com a elevação da temperatura. Em ambos os sistemas de injecção, a quantidade de combustível injectada na câmara de combustão é controlada e limitada pela pressão no colector de admissão. Ao elevar-se a temperatura, o efeito da sobrealimentação de combustível para que o turbo-compressor chegue mais rapidamente ao regime de rotações onde seu rendimento é mais elevado é atenuado, fazendo com que esse processo seja mais lento.

Capítulo 6

Conclusão

A utilização de óleos de origem vegetal se mostrou bastante promissora no que diz respeito ao desempenho. A diminuição no torque máximo está relacionada com a menor densidade de energia desses combustíveis e apresentou o valor máximo de 10% para o óleo de colza puro. Para os demais óleos e misturas testados, essas perdas foram menores. Em todos os casos, as perdas foram parcialmente compensadas por uma taxa de injecção de combustível mais elevada, consequência da maior densidade desses combustíveis. Uma maior eficiência de combustão também ajudou a compensar as perdas de desempenho devido a menor densidade de energia. Em regimes de carga parcial, o consumo específico de combustível foi maior. Em vazio, quando a taxa de injecção de combustível foi a mesma, o motor funcionou a rotações mais baixas.

O aumento da temperatura causou a diminuição da densidade dos óleos vegetais testados, reflectindo na taxa de injecção mássica dos mesmos. Essa taxa foi menor, causando a perda de desempenho. O efeito benéfico da temperatura, de melhora da eficiência da combustão, foi insuficiente para compensar as perdas devido a menor densidade.

Tanto os sistemas de injecção mecânicos quanto os controlados electronicamente sofreram os mesmos efeitos da diminuição da densidade. O primeiro debita caudal volumétrico constante, tendo a densidade papel fundamental na injecção mássica de combustível. O segundo também sofre influência de outras propriedades, entretanto, a densidade tem efeito dominante.

A utilização de óleo de colza reduziu as emissões de THC em todos os modos de operação e as de CO em quase todos, exceto em vazio onde se verificou um aumento desses gases. As emissões de NO_X seguiram o caminho contrário, apresentando aumento em todos os modos de operação, exceto em vazio. As emissões de partículas foram maiores para os óleos vegetais e sua mistura com o diesel para tamanhos até 30 nm. Para tamanhos maiores, as emissões foram menores.

A diminuição da temperatura de injecção dos óleos teve sempre um efeito benéfico ao desempenho devido ao aumento da taxa de injecção de combustível ser dominante sobre a diminuição da eficiência da combustão. Entretanto, o ponto em que esse efeito deixa de ser dominante permanece uma incógnita. Essa lacuna no conhecimento poderia ser preenchida com a realização de ensaios com o óleo sendo injectado a temperaturas mais baixas.

Referências e Bibliografia

[1] **Hodgson, P.E.** The energy crisis. *Modern Age.* 2008, Vol. 50 (2), pp. 140-147.

[2] **Sperling, Daniel e Gordon, Deborah.** Two billion cars: Transforming a culture. *Transportation Research News.* 2008, Vol. 259 (8), pp. 11-25.

[3] **Administration, U.S. Energy Information.** *International Energy Outlook 2010.* Washington : U.S. Department of Energy, 2010. DOE/EIA-0484.

[4] **(IEA), International Energy Agency.** *Carbon Dioxide Emissions by Economic Sector.* 2005.

[5] **Knothe G, Van Gerpen J, Krahl J;.** The History of Vegetable Oil-Based Diesel Fuels. *The Biodiesel Handbook.* Champaign : AOCS Press, 2005, Capítulo 2. http://content.yudu.com/Library/A16ukj/TheBiodieselHandbook/resources/133.htm.

[6] *Histórico e Política do Biodiesel no Brasil.* **Pousa, Gabriella P. A. G., Santos, André L. F. e Suarez, Paulo A. Z.** Brasília : s.n.

[7] *Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine - A review.* **R.D. Misra, M.S. Murthy.** 9, Assam : s.n., 2010, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 3005-3013.

[8] Oilseeds: World Markets and Trades. [Online] 10 de 2010. [Citado em: 05 de 11 de 2010.] http://www.fas.usda.gov/oilseeds/circular/2010/October/oilseeds_full10-08.pdf.

[9] **Nestle.** [Online] http://www.nestle.com/Resource.axd?Id=156ED129-AAA0-481A-BF17-6AF3D74154F2.

[10] **Sheehan, John, et al.** *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus.* Golden, Colorado : NREL, 1998.

[11] [Online] [Citado em: 25 de Outubro de 2010.] http://www.indiana.edu/~oso/Fat/3sAnd6s.html.

[12] Capítulo 3: Vegetable Oils and Animal Fats. [A. do livro] Ayhan Demirbas. *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines.* Trabzon, Turquia : Springer, 2007.

[13] **Gregg, Forest.** *SVO.* Gabriola Island, Canada : New Society Publishers, 2008. 978-0-86571-612-4.

[14] **Srivastava, A. e Prasad, R.** Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 4,*. 2, 2000.

[15] [Online] 5 de Dezembro de 2010. http://web.archive.org/web/20060614155628/eere.energy.gov/afdc/pdfs/afv_info.pdf.

[16] *ASTM D975.* [Online] http://www.docstoc.com/docs/7656483/ASTM-D975.

[17] *ASTM 6751.* [Online] http://www.ncsc.ncsu.edu/cleantransportation/docs/AFC/Biodiesel_Fuel_Quality.pdf.

[18] **Ryan, TW., Callahan, T.J. e Dodge, L. G.** Characterization of Vegetable oils for use as fuels in Diesel Engines. *Vegetable Oil Fuels: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels.* 1982, pp. 70-81.

[19] **Pugazhvadivu, M. e Jeyachandran, K.** Investigation on the performance and exhaust emissions of a diesel engine using preheated waste frying oil as fuel. *Renewable Energy 30.* 2005, 14.

[20] **Bari, S. C., Yu, W. e Lim, T.H.** Performance deterioration and durability issues while running a diesel engine with crude palm oil. *Journal of Automobile Engineering 216.* 9, 2002, pp. 785-792.

[21] [Online] [Citado em: 25 de Outubro de 2010.] http://bunkum.us/svo/viscosity.html.

[22] [Online] 05 de Dezembro de 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/EN_590.

[23] **Varde, K. S.** Bulk modulus of vegetable oil-diesel fuel Blends. The University of Michigan-Dearborn, Dearborn, USA, 1983.

[24] Cole-Parmer: Chemical Resistance Database. [Online] [Citado em: 20 de 11 de 2010.] http://www.coleparmer.com/techinfo/chemcomp.asp.

[25] National Biodiesel Board, Materials Compatibility. [Online] 20 de 11 de 2010. http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Materials_Compatibility.pdf.

[26] *Chemical Compatibility of EVA and Polyethylene Tubing.* [Online] http://www.mcmaster.com/addlcontent/loadaddcontent.asp?doc=9334TAC.

[27] **Mahendra S., Wijayasinghe e Thomas B., Makey.** Cooking Oil: A Home Fire Hazard in Alberta, Canada. [ed.] Alberta Laboul Fire Commissioner's Ofice.

[28] Diesel fuel and exhaust emissions. [Online] 1996. http://inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc171.htm.

[29] **Rakopoulos, C.D., Antonopoulos, K.A. e Rakopoulos, D.C.** Multi-zone modeling of Diesel engine fuel spray development with vegetable oil, biodiesel or Diesel fuels. *Energy Conversion and Management.* 2006, Vols. 11-12, 47, pp. 1550-1573.

[30] [Online] 19 de 01 de 2011. http://www.cleanmpg.com/forums/showthread.php?t=14973.

[31] *J.B.Rossell, ed., Frying - Improving Quality.* [Online] Woodhead Publishing, 2001. [Citado em: 10 de Out de 2010.] http://www.knovel.com/ knovel2/Toc.jsp?BookID=544&VerticalID=0.

[32] **List, G.R., Wang, T. e Shukka, V.KS.** Storage, Handling, and Transport of Oils and Fats. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products.* F. Shahidi, Vol. 5, pp. 191-229.

[33] Cummins Engines Website. [Online] 10 de Out de 2010. http://www.cummins.rs/pocetna_stranica_files/ISBe.pdf.

[34] *Dieselnet.* [Online] http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php.

[35] [Online] [Citado em: 20 de Outubro de 2010.] http://www.thefullwiki.org/Water_brake.

[36] Engine Testing Theory and Practice. [A. do livro] M.A. Plint A.J. Martyr. Oxford, UK : Elseiver, p. 338.

[37] Dieselnet. [Online] http://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.html.

[38] [Online] [Citado em: 10 de Outubro de 2010.] http://www.esrl.noaa.gov/gmd/infodata/faq_cat-3.html.

[39] [Online] [Citado em: 10 de Outubro de 2010.] http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Spec_Sheets/3090_2980244A.pdf.