



**PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA
MECÂNICA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE BAURU

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

LUIS FRANCISCO MICHELI

**EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO D-LIMONENO COMO ADITIVO À
MISTURA DIESEL-BIODIESEL NA EMISSÃO DE GASES EM MOTORES DE
IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**

BAURU-SP

2018

LUIS FRANCISCO MICHELI

EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO D-LIMONENO COMO ADITIVO À MISTURA
DIESEL-BIODIESEL NA EMISSÃO DE GASES EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR
COMPRESSÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, no programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na Área de Fenômenos de Transporte, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Délon Luiz Módolo

Bauru, SP

2018

Micheli, Luis Francisco.

Efeitos da utilização do D-Limoneno com aditivo à
mistura diesel-biodiesel na emissão de gases em
motores de ignição por compressão / Luis Francisco
Micheli, 2018

60 f. : il.

Orientador: Délon Luiz Módolo

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Biodiesel. 2. Aditivo. 3. D-Limoneno. 4. Gases de
exaustão. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade
de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de Luis Francisco Micheli, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru.

Aos 03 dias do mês de setembro do ano de 2018, às 17:00 horas, no(a) Anfiteatro do DTI / FEB / BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof.Dr. DELSON LUIZ MODOLO - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ELSON AVALLONE do(a) Departamento de Industria / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Catanduva/SP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUIS FRANCISCO MICHELI, intitulada **EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO D-LIMONENO COMO ADITIVO À MISTURA DIESEL-BIODIESEL NA EMISSÃO DE GASES EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof.Dr. DELSON LUIZ MODOLO

Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON

Prof. Dr. ELSON AVALLONE



DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a meus pais, Celso e Cecília e minha irmã Mariana por todo apoio e também às amizades conquistadas no durante meus estudos na UNESP.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Celso Micheli e Maria Cecília Malagi Micheli, e a minha irmã Mariana Cecília Micheli por tudo o que foram e continuam sendo em minha vida.

Agradeço também ao professor Dr. Santiago del Rio Oliveira e ao meu orientador professor Dr. Délon Luiz Módolo por me permitir participar do desenvolvimento de seu projeto e pelos conhecimentos transmitidos e também ao S.r. Luiz Eduardo Rodrigues Pereira pela ajuda indispensável nas atividades do laboratório.

Por fim, agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro e também à Universidade Estadual Paulista – UNESP por ter me recebido como aluno.

MICHELI, L.F. **Efeitos da Utilização do D-Limoneno como Aditivo à Mistura Diesel-Biodiesel na Emissão de Gases em Motores de Ignição por Compressão.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2018.

RESUMO

A reação de transesterificação de óleos vegetais com álcool etílico ou metílico dá origem a ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, conhecidos como biodiesel. Este apresenta propriedades próximas do óleo diesel mineral como o número de cetano, massa específica, poder calorífico e relação ar-combustível. Porém, problemas decorrentes de sua maior viscosidade resultam em uma pulverização deficiente pelos bicos injetores levando a uma combustão de qualidade inferior, e com isso, formação de depósitos indesejáveis no interior do motor, alterações nas propriedades do óleo lubrificante e na composição dos gases de escape. Frente a essa questão se faz necessário o estudo da utilização de um aditivo capaz de tornar as características do biodiesel mais adequadas à sua utilização em motores de ignição por compressão e também o acompanhamento das alterações na composição dos gases de escape. O aditivo estudado nesse trabalho foi o d-limoneno, um hidrocarboneto obtido como subproduto da citricultura, que foi adicionado ao óleo diesel à ser utilizado como combustível do conjunto moto-gerador utilizado nos ensaios. Neste sistema foram aplicadas diferentes cargas e coletados os dados relativos à emissão do motor. Resultados relevantes como a redução de material particulados foram observados mesmo com a adição de pequenas quantidades de d-limoneno.

Palavras-chave: **Biodiesel, Aditivo, D-Limoneno, Gases de exaustão.**

MICHELI, L.F. **Effects of the use of D-Limonene as an Additive to Diesel-Biodiesel Blends on the Composition of Exhaust Gases in Compression Ignition Engines.** Master of Science Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) – Engineering College of Bauru, Post-Graduation Program, São Paulo State University, 2018.

ABSTRACT

The transesterification of vegetable oils with methanol or ethanol results in methyl esters or ethyl esters of fatty acid, known as biodiesel. This one presents similar features of diesel oil, such as cetane number, specific weight, heat of combustion and air-fuel ratio. However, arising problems from its higher viscosity leads to a poor spraying by the fuel injectors and so to a low-grade combustion, causing formation of undesirable deposits inside the engine, changes in the properties of the lubricating oil and in the composition of the exhaust gas. Owing to this issue, it is necessary to study an additive able to make biodiesel characteristics more appropriate to be used in compression ignition engines, as well as a monitoring of changes in exhaust gas composition. The chosen additive was d-limonene, a hydrocarbon obtained as a byproduct of citriculture, which was added to diesel fuel to be used as fuel for the motor-generator set used in the tests. Different loads were applied to this system and the engine emission data were collected. Relevant results such as the reduction of particulate material were observed even with small amounts of d-limonene added.

Keywords: **Biodiesel, Additive, D-Limonene, Exhaust Gases.**

SUMÁRIO

Resumo	i
Abstract.....	ii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	v
1. INTRODUÇÃO	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Óleos vegetais	9
2.2 O biodiesel	11
2.3 Transesterificação	13
2.4 O d-limoneno	15
2.5 Emissões	18
2.5.1 Monóxido e dióxido de carbono.....	20
2.5.2 Hidrocarbonetos não queimados	21
2.5.3 Emissão de material particulado.....	24
2.5.4 Óxidos de nitrogênio	27
3. METODOLOGIA	30
3.1 Descrição da bancada de ensaio.....	30
3.2 Descrição do combustível utilizado no ensaio.....	39
3.3 Ensaio realizados	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5. CONCLUSÕES.....	53
6. REFERENCIAS	55
ANEXO I.....	58
ANEXO II	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica de um triglicerídeo	9
Figura 2 – Representação da reação de transesterificação	14
Figura 3 - Estrutura molecular do limoneno.....	16
Figura 4 - Formação de poluentes x relação ar-combustível.....	19
Figura 5 - Composição dos gases de escape.....	20
Figura 6 - Furo cego	22
Figura 7 - Emissão de HC em função do volume da câmara de injeção do injetor.....	23
Figura 8 - Distribuição de compostos carbonílicos	24
Figura 9 - Componentes do material particulado	25
Figura 10 - Diagrama de formação de partículas	26
Figura 11 - Coeficiente de velocidade.....	29
Figura 12 - Instalações do Laboratório de Motores.....	30
Figura 13 - Grupo moto-gerador	31
Figura 14 - Grupo moto-gerador com instrumentação	32
Figura 15 - Bancada resistiva	33
Figura 16 - Analisador de gases	34
Figura 17 - Derivação de saída para o analisador de gases	34
Figura 18 – Opacímetro.....	36
Figura 19 - Sonda do opacímetro	36
Figura 20 - Software Softgas	37
Figura 21 - Software Igor	37
Figura 22 - Frasco Mariotte e balança digital.....	38
Figura 23 - Instalação do termopar.....	39
Figura 24 - Emissão de hidrocarbonetos não queimados	41
Figura 25 - Valores percentuais de hidrocarbonetos em relação ao diesel S10	42
Figura 26 - Emissão de dióxido de carbono	43
Figura 27 - Valores percentuais de dióxido de carbono em relação ao diesel S10	44
Figura 28 - Emissão de monóxido de carbono	45
Figura 29 - Emissões percentuais de monóxido de carbono em relação ao diesel S10.....	45
Figura 30 - Emissão de oxigênio	46
Figura 31 - Emissões percentuais de oxigênio em relação ao diesel S10.....	46
Figura 32 - Emissão de óxidos de nitrogênio	47
Figura 33 - Emissões percentuais de óxidos de nitrogênio em relação ao diesel S10.....	47
Figura 34 - Emissão de material particulado	48
Figura 35 - Emissões percentuais de óxidos de material particulado em relação ao diesel S10.....	49
Figura 36 - Temperatura dos gases de escape	50
Figura 37 - Variação da temperatura dos gases de escape	50
Figura 38 - Consumo específico.....	51
Figura 39 - Consumo específico percentual particulado em relação ao diesel S10	52

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Propriedades físicas de óleos vegetais	10
Tabela II - Propriedades do Biodiesel	12
Tabela III - Comparação de propriedades Biodiesel-Diesel	13
Tabela IV - Propriedades físicas do limoneno	17
Tabela V - Poder calorífico e ponto de fulgor d-limoneno	18
Tabela VI - Acuracidade do analisador de gases	35

1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo são procuradas opções em relação à oferta de energia, não somente pelo risco de esgotamento das reservas naturais de petróleo, mas também por questões políticas, climáticas e ambientais.

A busca por combustíveis alternativos como complemento e até mesmo total substituição de combustíveis fósseis se mostra em crescimento acentuado nos últimos anos, e da mesma forma como aconteceu com o etanol em alternativa ao uso da gasolina, o mesmo fenômeno pode ser observado no sentido de encontrar uma alternativa ao óleo diesel. Nesse cenário pode-se destacar a utilização do biodiesel, uma realidade em muitos países e já utilizado no Brasil na proporção de 7% em volume de biodiesel adicionado ao óleo diesel vendido nos postos de combustíveis do país, denominado diesel B7.

Através da lei número 13.263 do ano de 2016 houve a alteração da lei número 13.033 que determina um novo cronograma para o aumento do teor de biodiesel a partir do ano de 2017. A partir de março do ano de 2017 o teor deverá ser de 8%, aumentando para 9% no mesmo mês do ano seguinte e finalmente 10% em março de 2019.

O processo de combustão de um motor de ignição por compressão difere significativamente de um motor de ignição por centelha. Enquanto em um motor de ignição por centelha a combustão é essencialmente uma frente de chama se movendo através de uma mistura homogênea, em um motor de ignição por compressão a combustão é um processo que ocorre de maneira instável em vários pontos do interior da câmara de combustão em um meio contendo uma mistura bastante heterogênea e controlado pela injeção de combustível (PULKRABEK, 1997).

A admissão de ar para o interior do motor é feita sem restrições e dessa forma o torque e potência do motor são controlados pela quantidade de combustível injetada em cada ciclo. Diferentemente de um motor de ignição por centelha, somente ar é admitido durante a fase de admissão o que permite que sejam atingidas altas taxas de compressão.

A utilização de óleos vegetais *in natura* em motores de ignição por compressão, é uma ideia bastante antiga e contemporânea ao desenvolvimento do próprio motor. Segundo Knothe (2006), no último capítulo de seu livro “A origem do motor diesel”, Rudolf Diesel afirma ter utilizado óleo de amendoim no funcionamento de um motor na

Feira de Paris em 1900, sem que muitos dos presentes no evento notassem a substituição do óleo mineral pelo vegetal.

Apesar de possível, a utilização de óleos vegetais em motores de ciclo diesel não é uma alternativa viável devido às várias diferenças nas propriedades físicas dos óleos vegetais quando comparadas com o óleo diesel de origem mineral, tais como: viscosidade cinemática, densidade e calor de combustão (HUNKE, 1981, KNOTHE, 2006, AGARWAL, 2001, COSTA, 2000, CLARK, 1984).

Dessa maneira novos métodos e processos foram desenvolvidos com o objetivo de transformar óleos vegetais em compostos com propriedades mais próximas ao óleo diesel mineral, dentre esses podemos citar: diluição, pirólise, micro emulsões e transesterificação.

O processo, porém, que é amplamente mais empregado é a transesterificação. Esse processo envolve uma reação química entre um óleo vegetal e um álcool resultando em glicerol e em ésteres de ácidos graxos, denominado biodiesel. Após serem submetidos ao processo de transesterificação os óleos resultantes apresentam características comparáveis às do óleo diesel de origem mineral, como massa específica, número de cetano, poder calorífico e relação ar/combustível.

No entanto, ainda apresentam viscosidade elevada, o que resulta em uma pulverização deficiente pelos bicos injetores e conseqüentemente uma combustão de pior qualidade, levando à formação de depósitos no interior do motor, contaminação do óleo lubrificante e alteração na composição dos gases de escape do motor.

Na combustão completa de hidrocarbonetos, o gás de exaustão contém dióxido de carbono e vapor de água, porém na combustão real, além desses gases outros como monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados, hidrogênio, óxidos de nitrogênio, e material particulado também são gerados (MERKER, 2012). Esses produtos da combustão são fonte significativa da poluição atmosférica, e têm inúmeros efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente.

Diante desse cenário, se faz necessário a utilização de aditivos no biodiesel visando tornar as características do biodiesel ainda mais próximas ao diesel mineral, minimizando ou eliminando os problemas decorrentes de sua utilização.

Na busca por um aditivo natural e com características compatíveis com o combustível, foi escolhido o d-limoneno, um hidrocarboneto obtido a partir da casca da

laranja nas indústrias de produção de suco de laranja, o que o torna também um recurso renovável.

Este trabalho tem como objetivo principal estudar os efeitos do uso do d-limoneno em parâmetros como emissões de hidrocarbonetos não queimados, dióxido e monóxido de carbono, oxigênio, óxidos de nitrogênio, material particulado e alterações na temperatura dos gases de escape e consumo específico quando utilizado em diferentes concentrações como aditivo ao óleo diesel B7.

Assim, foram inicialmente definidas que os parâmetros citados anteriormente seriam analisados utilizando-se somente óleo diesel, isto é, sem adição de d-limoneno como teste de controle e óleo diesel com a adição de 1%, 3%, 6%, 10%, 15% e 20% de d-limoneno em volume.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado a revisão dos principais conceitos e definições fundamentais relacionados à óleos vegetais *in natura*; biodiesel; processo de transesterificação; d-limoneno; motores de ignição por compressão e composição típica das emissões desses motores.

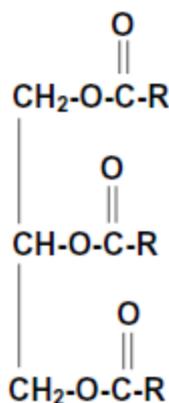
2.1 ÓLEOS VEGETAIS

Os principais componentes dos óleos e gorduras (animais e vegetais) são os triacilgliceróis, também denominados triglicerídeos. Pertencem ao grupo dos ésteres, sendo composto por moléculas de ácidos graxos unidas a moléculas de álcoois (BRUICE, 2006).

A forma mais comumente encontrada na natureza são ésteres de ácidos graxos e glicerol (1,2,3 propanotriol ou glicerina) (KNOTHE, 2006).

Os diferentes tipos de ácidos graxos que compõem os triacilgliceróis são responsáveis pelas características dos óleos e gorduras, sendo assim o parâmetro de maior influência de suas propriedades. A figura 1 ilustra a estrutura básica de um triglicerídeo.

Figura 1 - Estrutura básica de um triglicerídeo



Fonte: Knothe (2006)

A viscosidade cinemática dos óleos vegetais *in-natura* é cerca de uma ordem de grandeza maior que a do óleo diesel, sendo responsável pela pior atomização do combustível na câmara de combustão do motor, levando a problemas como a formação de depósitos de material carbonizado no interior do motor (KNOTHE, 2006). A tabela abaixo apresenta propriedades físicas de alguns óleos vegetais a fim de poder compará-las com o óleo diesel.

Tabela I - Propriedades físicas de óleos vegetais

Características	Dendê (polpa)	Babaçu	Amendoim	Soja	Óleo Diesel
Poder Calorífico (kJ/kg)	37.448	37.879	39.591	39.436	45.837
Índice de Cetano	38-40	38	39-41	36-39	40
Viscosidade a 37,8 °C (cSt)	36,8	30,3	41,1	36,8	2,0-4,3
Ponto de Névoa (°C)	31	26	19	13	0
Temperatura de Destilação para destilar 90% do volume (°C)	359	349	349	370	338

Fonte: Stern (1983)

Óleos *in-natura* também apresentam maior densidade e capacidade energética menor por unidade de massa o que representa um aumento no consumo. A presença de um átomo de oxigênio na molécula de triglicerídeo provoca alteração na razão estequiométrica ar-combustível (HUMKE, 1981).

Ainda de acordo com Dermibas (2003), a utilização de óleos vegetais como combustível alternativo renovável para motores diesel foi proposta nos anos de 1980, citando como vantagens sobre o óleo diesel:

- Portabilidade
- Disponibilidade
- Ser renovável
- Poder calorífico elevado (cerca de 88% do valor do óleo diesel)
- Baixo teor de enxofre
- Baixo teor de compostos aromáticos
- Biodegradabilidade

Mesmo com essas características desejáveis (PRYDE, 1983) enumera algumas desvantagens:

- Viscosidade elevada
- Baixa volatilidade
- Fatores relacionados à reatividade de cadeias carbônicas insaturadas

Problemas decorrentes da utilização de óleos vegetais em motores diesel surgirão após longos períodos de utilização, especialmente em sistemas com injeção direta de combustível. Esses problemas incluem formação de depósitos de resíduos de material carbonizado no pistão e bicos injetores, prejudicando a injeção de combustível ou até o limite de causar entupimento dos bicos, aderência dos anéis de segmento e espessamento do óleo lubrificante como consequência de contaminação por óleo vegetal.

Dessa forma, a utilização direta de óleos vegetais ou misturas com óleo diesel em motores foi considerada insatisfatória e impraticável, tanto em sistema com injeção direta ou indireta.

Como forma de promover a melhora das características dos óleos vegetais, basicamente quatro soluções passaram a ser investigadas: a pirólise, a diluição no óleo diesel convencional, a microemulsificação e a transesterificação (KNOTHE, 2006), sendo que somente a última efetivamente empregada na conversão da maior parte dos óleos vegetais atualmente.

2.2 O BIODIESEL

Biodiesel é o nome dado a uma variedade de combustíveis oxigenados compostos de ésteres de ácidos graxos obtidos a partir de fontes biológicas renováveis, que podem ser óleos orgânicos vegetais ou gorduras (DERMIBAS, 2008), sendo, portanto, uma mistura de ésteres monoalquílicos de ácidos graxos.

O termo biodiesel é adotado como referência a óleos vegetais transesterificados para se referir ao seu uso como combustível diesel. Há um renovado interesse pelo uso de óleos vegetais para a produção de biodiesel, devido à sua natureza menos poluente e

renovável em oposição ao diesel convencional. Apresenta coloração âmbar-amarelada claro com viscosidade semelhante ao diesel.

O biodiesel pode ser produzido de uma grande variedade de matérias-primas. Estas incluem a maioria dos óleos vegetais (ex soja, algodão, palma, amendoim, colza e outros), gorduras de origem animal como sebo, bem como óleos de descarte (óleos usados em frituras) (KNOTHE, 2006).

Os ésteres, componentes do biodiesel, caracterizam-se pelas suas propriedades físicas e combustíveis, incluindo a densidade, viscosidade, índice de iodo, índice de acidez, ponto de névoa, o ponto de fluidez, o calor de combustão e volatilidade. O biodiesel fornece uma potência e um torque ligeiramente mais baixos e apresenta consumo maior de combustível em relação ao diesel, em termos de teor de enxofre, ponto de ignição, compostos aromáticos e biodegradabilidade o biodiesel apresenta vantagens (BALA, 2005).

A tabela II apresenta algumas propriedades importantes do biodiesel.

Tabela II - Propriedades do Biodiesel

Viscosidade Cinemática a 313K (mm ² /s)	3,3-5,2
Densidade a 288K (kg/m ³)	860-864
Ponto de ebulição (K)	>475
Ponto de fulgor (K)	430-455
Faixa de destilação (K)	470-600
Pressão de vapor a 295K (mmHg)	<5

Fonte: Dermibas (2007)

A Lei brasileira nº 11.097/2005, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, o define como sendo um “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustível de origem fóssil.

O metanol é o álcool mais utilizado na produção do biodiesel sendo também possível empregar outros álcoois como o etanol ou iso-propanol. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) o termo biodiesel é definido como um combustível renovável obtido a partir da reação de transesterificação utilizando-se um como reagente um álcool primário.

De maneira geral, as propriedades físicas, químicas e também o desempenho do motor são muito próximas tanto para ésteres metílicos (metanol) ou etílicos (etanol). Ambos apresentam praticamente o mesmo poder calorífico, a viscosidade dos ésteres etílicos é ligeiramente maior, o ponto de névoa e de fluidez são menores quando comparados com ésteres metílicos. A tabela III apresenta propriedades comparadas do biodiesel e diesel.

Tabela III - Comparação de propriedades Biodiesel-Diesel

Propriedades	Biodiesel	Diesel
Densidade (kg/m ³)	860-895	840-860
Número de Cetano	46-70	47-55
Ponto de Névoa (K)	262-289	256-265
Ponto de Fluidez (K)	258-286	237-243
Ponto de Fulgor (K)	408-423	325-350
% de Enxofre	0,0-0,0024	0,04-0,1
% de Cinzas	0,002-0,01	0,06-0,01
Viscosidade Cinemática (mm ² /s a 313K)	3,6-5	1,9-3,8
Poder Calorífico Superior (MJ/Kg)	39,3-39,8	45,3-46,7

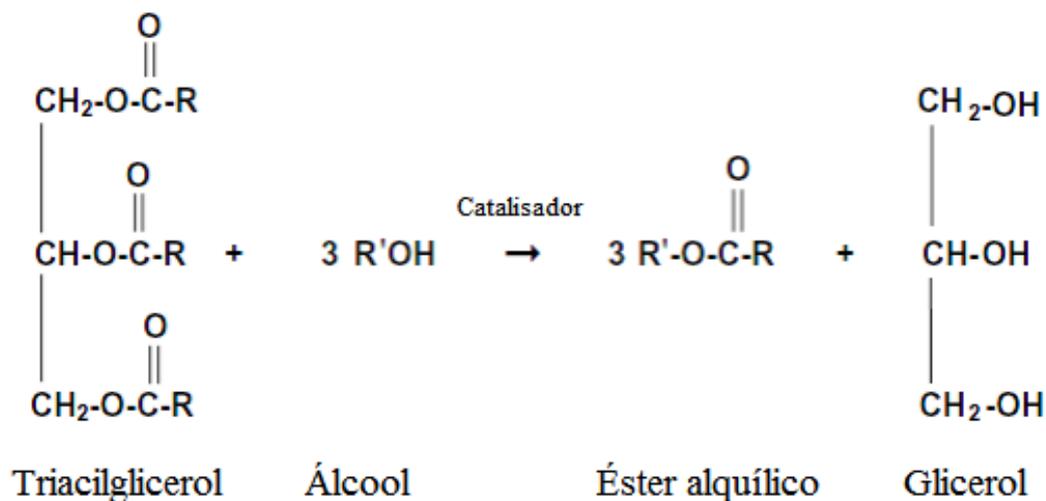
Fonte: Dermibas (2008)

A Resolução ANP nº 42 de 24/11/2004 delineou a definição contida na lei, como sendo um “combustível composto de alquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais” e estabeleceu as normas e especificações do biocombustível, de forma a garantir que suas características físico-químicas sejam semelhantes ao diesel mineral, para que possa substituí-lo, mesmo que parcialmente.

2.3 TRANSESTERIFICAÇÃO

O principal método de produção do biodiesel é através da transesterificação. Neste processo, um mol de triacilglicerol reage com três mols de álcool, usualmente o metanol, na presença de um catalisador, que pode ser homogêneo, heterogêneo ou enzimático. A transesterificação metílica de óleos vegetais em meio alcalino homogêneo é o processo mais comum de produção do biodiesel, e pode ser observado na figura 2.

Figura 2 – Representação da reação de transesterificação



Fonte: Knoth (2006)

Os alcóxidos metálicos são os catalisadores mais utilizados, sendo que estes podem ser adicionados diretamente ao meio de reação ou produzidos *in situ*, mediante a dissolução de hidróxido de sódio ou de potássio no álcool utilizado como agente de transesterificação.

Apesar de a razão molar estequiométrica de álcool e óleo na reação ser de 3:1 (três mols de álcool para um mol de óleo), um amplo excesso de álcool, usualmente 6:1 ou 12:1, é utilizado como forma de deslocar o equilíbrio químico da reação na direção de formação dos produtos.

Ao final da reação, os produtos obtidos são separados por centrifugação sendo uma fase composta de biodiesel e outra de glicerol com o excesso do álcool que não foi consumido na reação, que será posteriormente recuperado.

A molécula do éster de óleo de soja, por exemplo, possui um terço do peso da molécula do óleo de origem, resultando em uma viscosidade muito menor (CLARK, 1984). As moléculas do éster assemelham-se às do óleo diesel, embora possuam dois átomos de oxigênio.

Do ponto de vista técnico, o óleo transesterificado possui as seguintes características (MÓDOLO, 1998):

- O motor não necessita ser modificado, podendo assim trabalhar com ésteres, diesel ou mistura;
- Emissão de um menor índice de fumaça;
- Pode ser usado puro ou misturado com óleo diesel;
- As características básicas são muito semelhantes às do diesel e variam muito pouco em função do vegetal;
- Isento de enxofre;

Embora existam muitas vantagens e benefícios pela substituição do óleo diesel pelos ésteres de óleos vegetais, infelizmente também ocorrem inúmeros inconvenientes. Entre eles pode-se citar:

- Menor poder calorífico;
- Maior consumo específico;
- Acúmulo de resíduos sólidos em bicos injetores, pistões e anéis resultantes de uma combustão incompleta devido aos problemas consequentes da maior viscosidade cinemática em relação ao óleo diesel;
- Alteração nas características do óleo lubrificante principalmente em motores de injeção direta quando estes não são otimizados para esse tipo de combustível;
- Alterações na composição dos gases de exaustão, com aumento na quantidade de óxidos de nitrogênio.

2.4 O D-LIMONENO

Limoneno é o nome comercial da substância 1-etil-4-prop-1-en-2-il ciclohexeno, nome oficial definido pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

Trata-se de um composto orgânico produzido por diversos tipos de plantas e encontrado em óleos essenciais. É quimicamente classificado como um terpeno monocíclico insaturado, sendo assim também um hidrocarboneto.

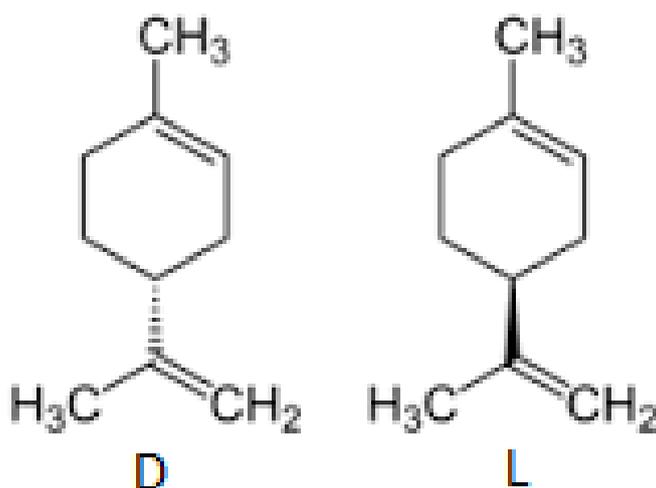
Por possuir um átomo de carbono quiral, ou seja, um átomo de carbono com quatro ligantes diferentes, o limoneno apresenta isomeria ótica, isto é, tem capacidade de desviar o plano da luz polarizada.

O limoneno apresenta dois isômeros, o r-limoneno (comumente denominado d-limoneno) que desvia o plano da luz polarizada no sentido horário e o s-limoneno (comumente l-limoneno) que desvia o plano da luz na direção oposta, sendo o d-limoneno o mais abundante na natureza.

Apresentam as mesmas características visuais, tornando difícil a sua identificação, porém os receptores olfativos humanos conseguem identificar que o d-limoneno confere o odor característico às laranjas e mexericas (*Citrus reticulata*) enquanto o l-limoneno é responsável pelo odor de pinheiros e também de laranja, porém mais balsâmico e com toque de terebintina (BREITMAIER, 2006).

Deve-se ressaltar que apesar de as nomenclaturas com os prefixos r e s serem as mais aceitas pela IUPAC, o nome comercial adota os prefixos d e l e assim serão referenciadas nesse trabalho.

A mistura racêmica (composta de quantidades iguais de d-limoneno e l-limoneno) recebe o nome de dipenteno. A figura 3 representa a geometria molecular dos dois isômeros do limoneno.



Fonte: Breitmaier (2006)

Em temperatura ambiente, o limoneno encontra-se no estado líquido, transparente e sem cor, com odor cítrico característico.

Como propriedade importante, deve-se ressaltar que o d-limoneno mistura-se perfeitamente com o biodiesel ou óleo diesel, mesmo que em grande quantidade, não sendo necessária qualquer modificação no sistema de injeção de combustível desses motores.

Apesar de suas propriedades óticas distintas, as características físicas são praticamente as mesmas, como pode ser observado na tabela IV (MODOLO, 2016).

Tabela IV - Propriedades físicas do limoneno

Propriedades	d-limoneno	l-limoneno	Dipenteno
Ponto de ebulição (°C)	175,5 - 176,0	175,5	176
Ponto de fusão (°C)	-74,35 / -96,9 ¹	-74,35	-95,9
Massa específica (g/cm ³ a 20 °C)	0,8411	0,8422	0,8402
Massa específica relativa (água = 1)	0,84 ²	0,84 ²	0,84 ²
Solubilidade em água (mg/L a 25 °C)	13,8	---	---
Pressão de vapor	0,19 kPa a 20°C	0,19 kPa a 20°C	0,19 kPa a 20°C
Massa específica relativa de vapor (ar = 1)	4,7 ¹	---	4,7 ³
Limite de inflamabilidade inferior	0,7% ²	0,7% ²	0,7% ²
Limite de inflamabilidade superior	6,1% ²	6,1% ²	6,1% ²
Temperatura de autoignição (°C)	237 ²	237 ²	237 ²
Viscosidade cinemática	0,9-1,05 cSt 20°C ⁵		
Ponto de fulgor (°C)	48 (recipiente fechado) ²	48 (recipiente fechado) ²	45 (recipiente fechado) ² 48 (recipiente aberto) ⁴

Fonte ¹IARC (1999), ²Canadian Centre for Occupational Health and Safety (2001),
³HSDB (acessado em 2017), ⁴Gangolli (1999), ⁵Venanzi (1991)

O poder calorífico do d-limoneno é superior ao do biodiesel, independente da matéria prima de origem, conforme pode ser observado na tabela V.

Tabela V - Poder calorífico e ponto de fulgor d-limoneno

Propriedade física	Amostras de d-limoneno analisadas		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Poder calorífico superior (PCS) (kJ/kg)	44.586	44.481	44.830
Ponto de fulgor (°C)	52	52	51

Fonte: Laboratório de Motores do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP

2.5 EMISSÕES

Na combustão completa de hidrocarbonetos formados apenas por átomos de carbono (C) e hidrogênio (H), o gás de exaustão contém oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água (H₂O).

Na combustão real, no entanto, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC), hidrogênio (H₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), e material particulado (MP) também são gerados em conjunto aos componentes da combustão completa (MERKER, 2012).

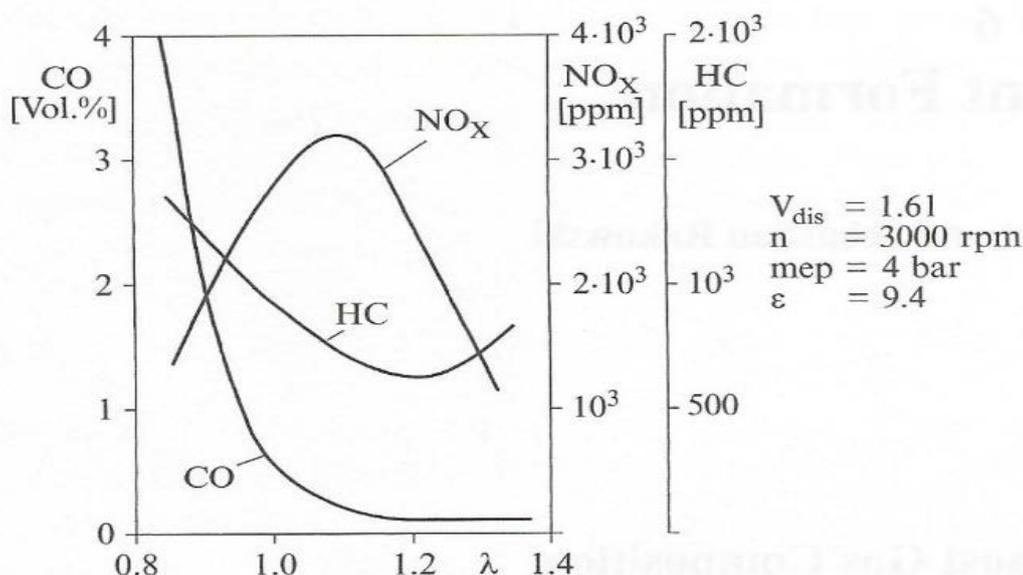
As principais emissões provenientes de motores a combustão interna incluem NO_x, CO, HC, MP e aldeídos. Esses produtos da combustão são fonte significativa da poluição atmosférica, dado que motores de combustão interna são a fonte de cerca de metade do NO_x, CO e HC na atmosfera. Esses gases têm inúmeros efeitos adversos à saúde humana e a meio ambiente.

Em contrapartida a essas substâncias, que são prejudiciais à saúde, o dióxido de carbono (CO₂) que também é responsável pelo efeito estufa, não é classificado como sendo um poluente pois não oferece risco direto à saúde e é um produto final de todo processo de oxidação completa de um hidrocarboneto. A redução de CO₂ nos gases de escape só é atingida através da redução do consumo de combustível ou pela utilização de

um combustível alternativo com menor teor de carbono em relação a seu poder calorífico (FERGUSON, 2016).

A formação de CO, HC e NO_x variam em função da relação ar-combustível e da temperatura de operação. Enquanto CO e HC aumentam em razão de combustão incompleta em misturas mais ricas ($\lambda < 1$), a formação de NO_x é maior em altas temperaturas com maiores quantidades de oxigênio ($\lambda \sim 1,1$). Operando em faixas de mistura mais pobres ($\lambda > 1,2$) a temperatura de reação cai e com ela a produção de NO_x, enquanto a produção de HC aumenta, conforme apresenta a figura 4.

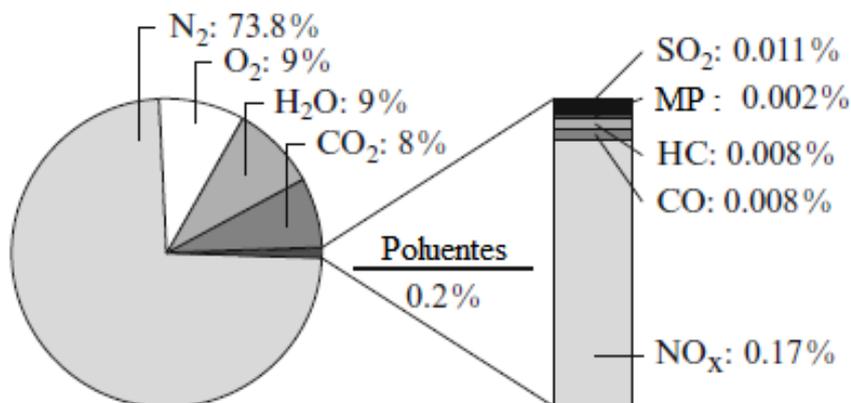
Figura 4 - Formação de poluentes x relação ar-combustível



Fonte: Merker (2012)

Na figura 5 pode-se observar a composição dos gases de exaustão de um motor de ignição por compressão. Nela pode-se perceber os baixos níveis de emissão de HC e CO, principalmente em função do motor funcionar com a mistura ar-combustível mais pobre, ou seja, com excesso de oxigênio. Já as emissões de NO_x e MP apresentam magnitude elevada, sendo aproximadamente 30% maior a emissão de NO_x e 2,5 vezes maior a emissão de MP quando comparadas a um motor operando no ciclo Otto.

Figura 5 - Composição dos gases de escape



Fonte: Merker (2012)

2.5.1 MONÓXIDO E DIÓXIDO DE CARBONO

Em uma reação de combustão mesmo tendo presente oxigênio em excesso para reagir com todo o combustível, a reação ocorre até atingir o equilíbrio químico, isto é, sempre será uma combustão incompleta mesmo sob condições ideais. Dessa forma sempre haverá uma certa quantidade de CO e hidrocarbonetos não queimados ao final do processo.

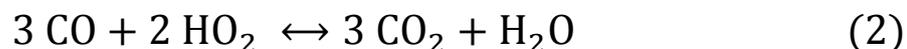
Na combustão de hidrocarbonetos, o CO surge como um produto intermediário da reação de oxidação, e na presença de radicais hidroxila ou hidroperoxila são convertidos a CO₂.

A maior parte do calor liberado no processo de combustão se dá pela oxidação do CO (FERGUSON, 2016), mostrada nas reações 1 e 2.

Monóxido de carbono com radical hidroxila



Monóxido de carbono com radical hidroperoxila



A reação com o grupo hidroxila, reação 1, é dominante no processo de combustão e dessa forma a oxidação do CO é fortemente dependente da concentração de radicais OH. A reação com a hidroperoxila, reação 2, se apresenta durante o processo de autoignição pois é o momento no qual o grupo HO₂ está presente em maior concentração.

Apesar de a taxa da reação oxidação do CO pelo radical hidroxila ser alta, esta é ainda assim menor que a taxa de reação entre os hidrocarbonetos e a hidroxila, e por essa razão, oxidação do CO é praticamente inibida até que as moléculas de combustível e espécies intermediárias de hidrocarbonetos sejam oxidadas (WESTBROOK, 1984).

Ainda segundo Ferguson, uma outra fonte de formação de CO seria a decomposição do CO₂ à alta temperatura, geralmente acima de 1000°C, representada pela reação 1 ocorrendo no sentido inverso.

2.5.2 HIDROCARBONETOS NÃO QUEIMADOS

A formação de hidrocarbonetos não queimados tem origem em zonas não totalmente envolvidas ou totalmente não envolvidas na combustão, e são compostos de vários componentes diferentes, que incluem desde combustível totalmente não queimado até parcialmente oxidados.

Entre os hidrocarbonetos não queimados também estão incluídos os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), importantes na formação de material particulado.

As legislações atuais restringem somente a soma de todos os componentes de HC, geralmente determinados através de detector por ionização de chama.

Como regra geral, motores emitem a maior parte de hidrocarbonetos não queimados logo na fase de partida a frio e aquecimento do motor, quando a temperatura na câmara de combustão está relativamente baixa (MERKER, 2012).

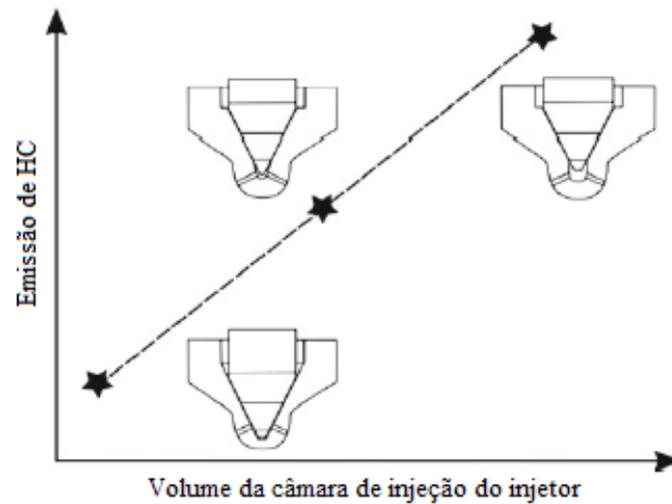
As principais fontes de HC em motores de ignição por compressão são:

- A periferia do spray – a composição da mistura sai da faixa de flamabilidade por estar muito pobre;
- A área interna do spray - a composição da mistura é muito rica, impedindo que seja totalmente oxidada;
- Extinção da difusão da chama pela queda rápida da pressão e temperatura durante ciclo de expansão e abertura da válvula de escape;
- Aderência do combustível nas paredes do cilindro que impede que ele seja consumido devido a temperaturas insuficientes;
- Injeção tardia de combustível, em sistemas de injeção mecânicos antigos, devido à reabertura da válvula de agulha do bico injetor após o tempo de injeção, resultando em gotas extremamente grandes de combustível que evaporam e queimam muito lentamente;
- Partida do motor com vazamento de combustível pelos bicos injetores;
- Evaporação do combustível contido nos orifícios do bico injetor próximo ao final da combustão, representado pela figura 6 e 7;

Figura 6 – Orifícios bico injetor



Figura 7 - Emissão de HC em função do volume da câmara de injeção do injetor



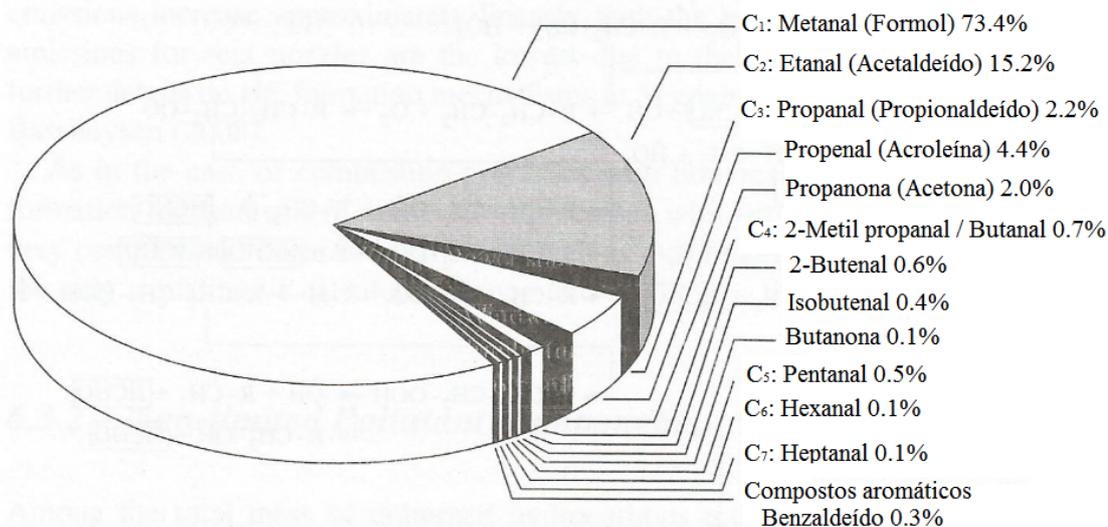
Fonte: Merker (2012)

Dentre o total de HC, alguns componentes são potencialmente prejudiciais à saúde ainda não são explicitamente regulados por leis como os compostos carbonílicos (C=O), que incluem aldeídos, cetonas e formaldeídos, as dioxinas e os furanos.

Compostos carbonílicos podem afetar diretamente a saúde humana ou indiretamente, como contribuição na formação do *smog* fotoquímico. Já as dioxinas e furanos variam em grau de toxicidade, e são originadas a partir de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e bifenilos.

A figura 8 ilustra a distribuição dos compostos nos gases de exaustão de um motor diesel (LANGE, 1996).

Figura 8 - Distribuição de compostos carbonílicos



Fonte: Lange (1996)

2.5.3 EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO

A alta concentração de material particulado pode ser percebida sob a forma visível de fumaça ou fuligem nos gases de exaustão. As emissões de particulados sofrem regulação de leis, pois a inalação dessas partículas pode desencadear sérios problemas respiratórios.

A emissão de material particulado é o maior dos problemas relacionados a emissões de motores diesel, pois o seu controle afeta diretamente a performance do motor.

Segundo a Agência de Proteção Ambiental americana (EPA), MP é qualquer substância que não seja água, que pode ser coletada por filtração dos gases de escape diluídos e resfriados a 52°C ou menos, em um processo definido de acordo com a norma ISO 8178.

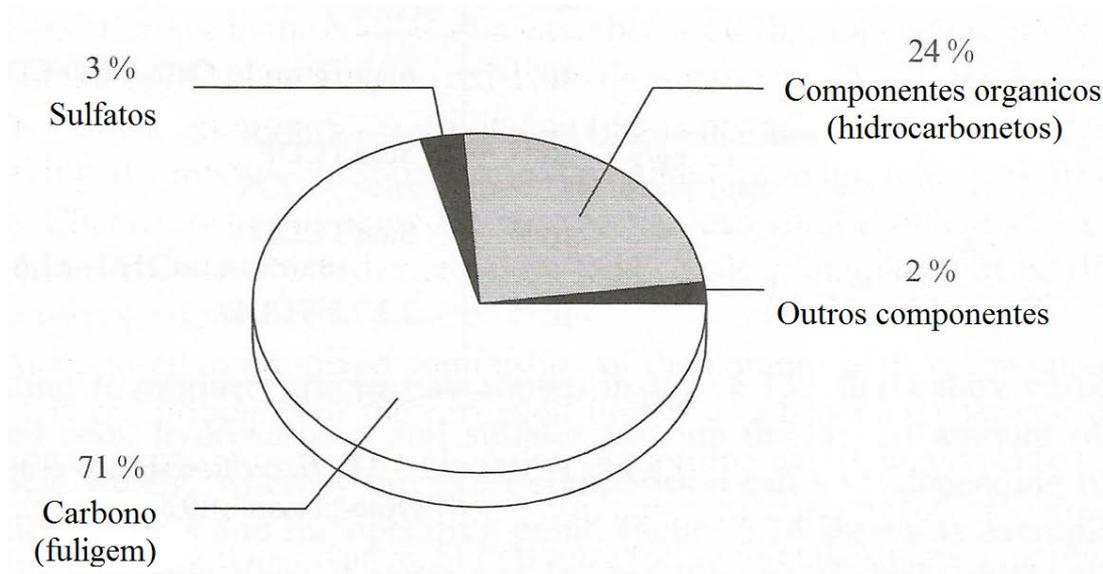
O material coletado no filtro pode ser classificado como: Material sólido de carbono ou fuligem e frações orgânicas compostas de hidrocarbonetos e seus produtos parcialmente oxidados condensados no filtro ou adsorvidos na fuligem. (FERGUSON, 2016)

A observação ao microscópio das partículas de fuligem mostra que se trata de partículas sólidas de aproximadamente 200 Å de diâmetro. Esses aglomerados oferecem

riscos à saúde pois são muito pequenas para serem retidas pelo nariz e se depositam nos pulmões. Partículas menores que 2,5 micra são consideradas finas e as mais perigosas à saúde.

Fuligem, também chamada de carbono elementar, hidrocarbonetos e sulfatos compõe a maior parte de toda massa de particulados, sendo que a composição pode variar com o processo de combustão e com o ponto de operação do motor, como visto na figura 9 (MERKER, 2012).

Figura 9 - Componentes do material particulado



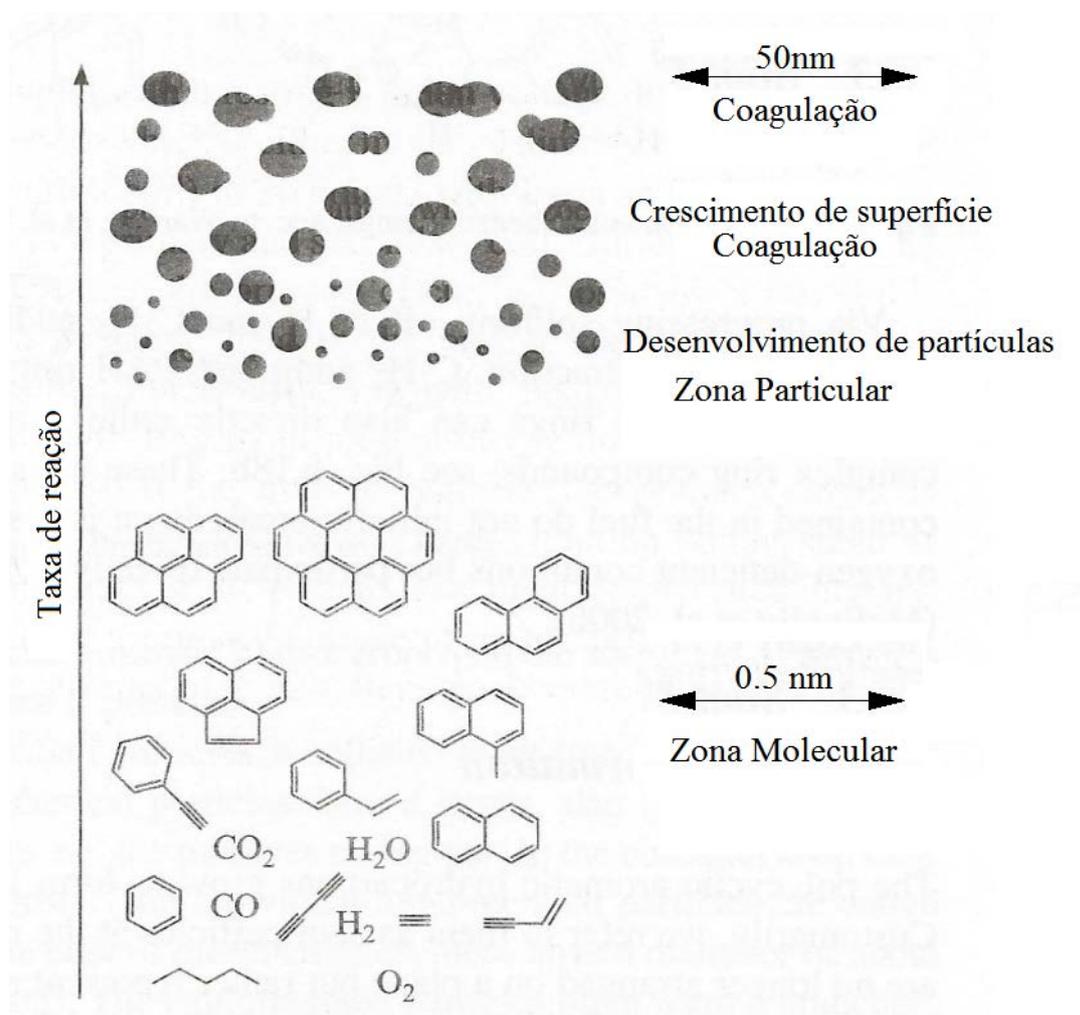
Fonte: Merker (2012)

Segundo Merker (2012), de acordo com o que se conhece, a formação de partículas se dá da seguinte maneira, também ilustrada na figura 10.

- Redução das moléculas de combustível sob quantidade deficiente de oxigênio, à menores moléculas de hidrocarbonetos como alquenos, alcadienos, alquinos e radicais responsáveis pela formação dos primeiros anéis aromáticos;
- Formação de compostos aromáticos policíclicos através da polimerização de anéis aromáticos com posterior desidratação;
- Condensação e formação de núcleos de carbono de dimensões aproximadas de 2 nm;

- Crescimento superficial e coalescência de núcleos de carbonos originando as primeiras partículas de 20 a 30 nm e se ligando a várias outras substâncias;
- Coalescência de partículas primárias para formar longas estruturas, chamado de aglomeração;
- Quebra de partículas e espécies intermediárias pela reação com o oxigênio e radicais OH.

Figura 10 - Diagrama de formação de partículas



Fonte: Merker (2012)

2.5.4 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

Óxidos de nitrogênio são formados ao longo de todo o processo de combustão devido à dissociação do nitrogênio (N_2) e do oxigênio (O_2) à seus estados elementares e subsequentemente suas reações com N_2 e O_2 , em estado molecular.

As reações de formação de NO_x são altamente dependentes da temperatura, dessa forma as emissões de NO_x são relativamente baixas durante o acionamento do motor e fase de aquecimento e aumentam proporcionalmente com a carga do motor.

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são compostos de óxido nítrico (NO) e óxido nitroso (NO_2) (FERGUSON, 2016).

Nos motores a combustão há a formação predominante de NO, que praticamente acaba convertido em NO_2 sob condições atmosféricas.

Existem três mecanismos principais responsáveis pela formação de NO, assim denominados: NO-Térmico ou mecanismo de Zeldovich, a formação ocorre pelo contato do nitrogênio atmosférico com os produtos da combustão em altas temperaturas e predominante nos motores a combustão interna; NO de Frente ou mecanismo de Fenimore, que ocorre dentro da relativamente pequena frente de chama da combustão; e o NO-Combustível produzido pela reação do nitrogênio contido na molécula do combustível, que se for de origem fóssil podem conter de 0,5 a 2% em massa de nitrogênio, que durante a combustão são convertidos a cianeto de hidrogênio e amônia e posteriormente reagem com oxigênio molecular originando NO (MERKER, 2012).

Sendo o volume dos gases queimados à alta temperatura muito maior que o volume instantâneo da frente de chama, a quantidade de NO gerada pelo mecanismo NO de Frente é muito pequeno comparado com o modelo térmico. (FERGUSON, 2016)

O modelo NO-Térmico é composto de três reações elementares, mostradas nas reações 3, 4 e 5.

Reação do oxigênio elementar com nitrogênio molecular



Reação do nitrogênio elementar com oxigênio molecular



Reação nitrogênio elementar com hidroxila



Valores experimentais obtidos para as constantes de velocidades k_1 , k_2 e k_3 propostos por Merker (2012) são apresentados no anexo 1 deste trabalho.

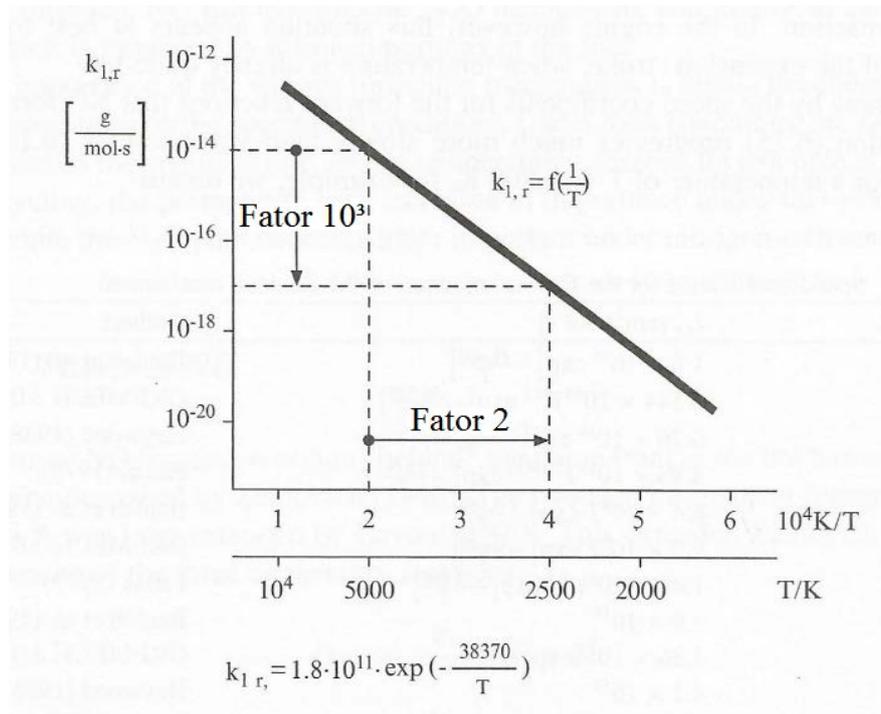
Quando a concentração instantânea de NO estiver abaixo da concentração de equilíbrio para uma dada temperatura, como é o caso em grande parte do processo de combustão, a reação direta tem influência decisiva no total da conversão. Somente quando momentaneamente a concentração de NO está acima da concentração de equilíbrio a conversão fica determinada pela reação reversa, que em um motor acontece na melhor das hipóteses no final do processo de expansão, quando a temperatura é mais baixa. (MERKER, 2012)

Pela análise dos coeficientes de velocidade de reação pode-se perceber que a reação da reação 3 é muito mais lenta que as reações mostradas na reação 4 e 5, sendo, portanto, a etapa dominante do processo.

A reação mostrada na reação 3 possui uma alta energia de ativação devido a estabilidade da ligação tripla do nitrogênio, e somente se processa de maneira rápida em elevadas temperaturas.

A figura 11 ilustra o comportamento dessa reação. Nota-se que multiplicando a temperatura por um fator de dois a formação de NO é multiplicada por um fator de 10^3 .

Figura 11 - Coeficiente de velocidade



Fonte: Merker (2012)

Devido à essa considerável dependência com a temperatura, define-se a formação de NO é controlada pela cinética da reação. Isso significa que a cinética da reação química na temperatura da câmara de combustão é baixa em comparação à escala de tempo física do campo de fluxo e deste modo o equilíbrio químico não pode ser atingido.

A velocidade da segunda e terceira reações é maior que a da primeira em algumas ordens de grandeza, dessa maneira o nitrogênio elementar formado na primeira reação é quase que imediatamente consumido e convertido a NO na segunda e terceira reações.

3. METODOLOGIA

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Motores e Biocombustíveis (LAMOBIO) do Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru onde estão instalados os equipamentos utilizados no procedimento experimental. A figura 12 fornece uma visão geral da sala de operações.

Figura 12 - Instalações do Laboratório de Motores



Fonte: O autor

3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO

Foi utilizado um moto gerador estacionário da marca BRANCO, modelo BD-4000-CFE equipado com motor monocilíndrico de ciclo diesel de 7,0 cv (5,12kW) de potência nominal e 0,296 L de deslocamento volumétrico (72 mm de diâmetro x 62 mm de curso) com comprimento de biela 102mm. O motor possui sistema de injeção direta

de combustível, lubrificação por bomba de óleo, sistema de arrefecimento a ar com partida elétrica e mecânica, como pode ser observado na figura 13.

Acoplado diretamente ao eixo do motor se encontra um gerador elétrico monofásico com tensões de saída de 127/220 V, frequência de 60Hz com potência máxima de 3300 W (3.3kVA) e nominal de 3000 W (3kVA).

Figura 13 - Grupo moto-gerador



Fonte: Fabricante

O conjunto moto-gerador opera na rotação de 3600 rpm, controlado internamente por um regulador de rotação que a mantém constante, e independente da carga aplicada ao gerador. Sendo assim, todos os ensaios foram realizados em rotação constante, variando-se apenas a carga. Na figura 14 pode-se observar o sistema moto-gerador com a instrumentação instalada.

Figura 14 - Grupo moto-gerador com instrumentação



Fonte: O autor

Com o objetivo de impor carga ao motor, de modo a simular uma real condição de funcionamento, uma bancada resistiva foi construída com dez lâmpadas halógenas de 500 W cada, ligadas em paralelo, com capacidade de dissipar uma potência nominal total de até 5 kW, potência essa que pode ser alterada acionando mais ou menos lâmpadas conforme a carga que se deseja impor ao motor, como pode ser observado na figura 15.

Figura 15 - Bancada resistiva



Fonte: O autor

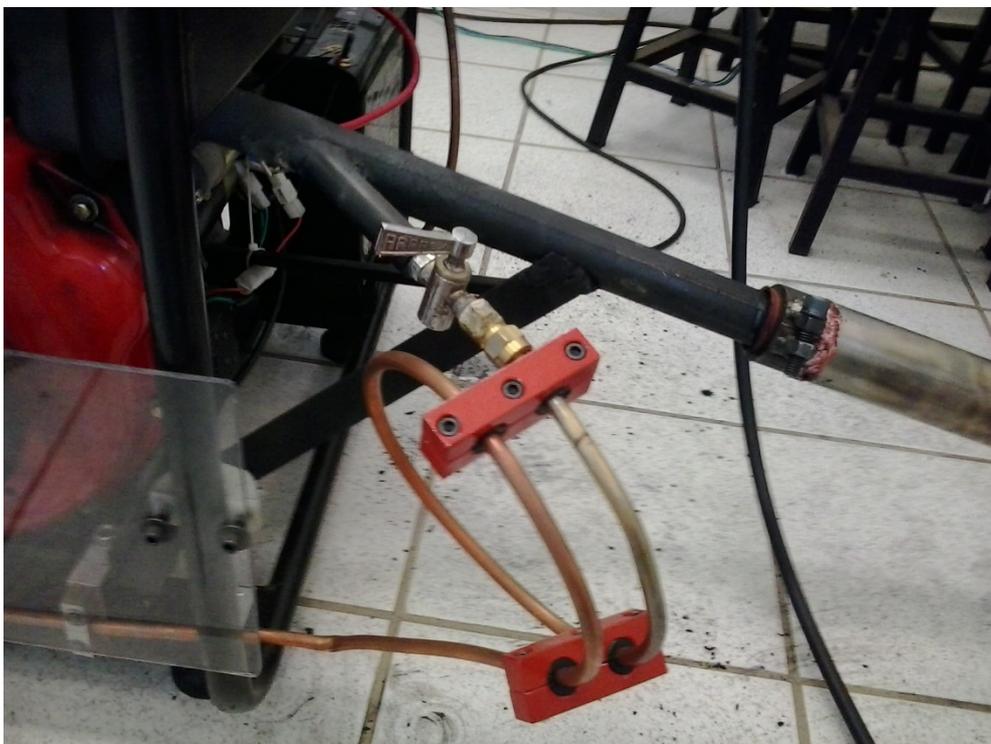
A análise dos gases de exaustão emitidos pelo motor foram realizadas através de dois equipamentos distintos. O primeiro é um analisador de gases da marca TECNOMOTOR, modelo TM 131, capaz de medir as emissões de hidrocarbonetos não queimados, monóxido e dióxido de carbono, oxigênio e óxidos de nitrogênio, mostrado na figura 16 e instalado em uma derivação da saída da tubulação de escape como se observa em detalhes na figura 17.

Figura 16 - Analisador de gases



Fonte: O fabricante

Figura 17 - Derivação de saída para o analisador de gases



Fonte: O autor

A acuracidade do analisador de gases, na medida de cada um dos componentes, constante no manual do fabricante é apresentada na tabela VI.

Tabela VI - Acuracidade do analisador de gases

Emissão	Acuracidade
Hidrocarbonetos não queimados (HC)	12 ppm
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,5 % em volume
Monóxido de carbono (CO)	0,06 % em volume
Oxigênio (O ₂)	0,1 % em volume
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	32 ppm

Fonte: O fabricante

O segundo equipamento é um opacímetro também da marca TECNOMOTOR, modelo TM 133 mostrado na figura 18, que realiza a medição da opacidade dos gases com acuracidade de 2% através de uma sonda instalada na tubulação de escape, como mostra a figura 19.

Figura 18 – Opacímetro



Fonte: O fabricante

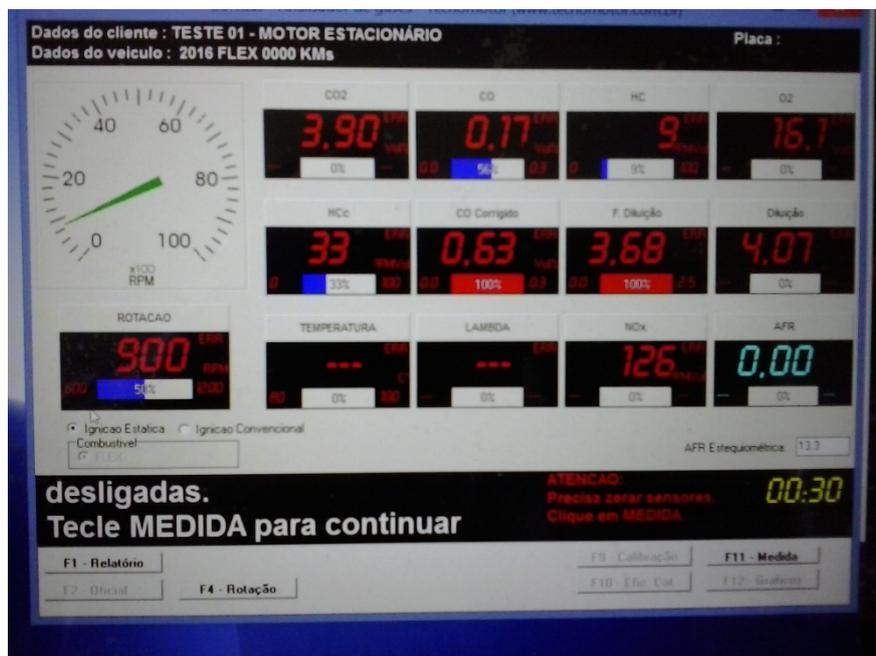
Figura 19 - Sonda do opacímetro



Fonte: O autor

A aquisição dos dados provenientes do analisador foi feita pelo software SOFTGAS, figura 20, e do opacímetro pelo software IGOR, figura 21, ambos fornecidos pelo fabricante dos equipamentos.

Figura 20 - Software Softgas



Fonte: O autor

Figura 21 - Software Igor



Fonte: O autor

A medição do consumo específico de combustível foi feita através de uma balança digital de bancada da marca DIGI-TRON com bandeja de aço inoxidável, capacidade 10 kg com resolução de 0,001 kg sobre a qual foi instalado um frasco de Mariotte com capacidade de 10 L, a ser abastecido com combustível e dessa forma possibilitando medir o consumo em cada ensaio, figura 22.

Figura 22 - Frasco Mariotte e balança digital



Fonte: O autor

A temperatura dos gases de escape foi medida através de um termopar tipo K instalado na tubulação de escape no ponto mais próximo possível ao cabeçote do motor onde se aloja a válvula de escape, como ilustra a figura 23. Os valores de temperatura foram lidos em um multímetro digital da marca INSTRUTHERM com precisão de 1°C.

Figura 23 - Instalação do termopar



Fonte: O autor

3.2 DESCRIÇÃO DO COMBUSTÍVEL UTILIZADO NO ENSAIO

A partir do óleo diesel S-10 contendo 7% de biodiesel de acordo com a legislação brasileira, adquirido em um posto de combustíveis da rede BR Distribuidora, foram preparadas seis misturas contendo diferentes quantidades do aditivo d-limoneno expressos em percentuais volumétricos de 1%, 3%, 6%, 10%, 15% e 20% sendo respectivamente assim denominadas L1, L2, L3, L6, L10, L15 e L20 em alusão ao termo limoneno. Esta faixa de valores foi escolhida com a finalidade de abranger um intervalo relativamente grande, de 0 a 20%, partindo de intervalos menores como 1% a 6% que são valores condizentes com uma faixa admissível de utilização de um aditivo.

O óleo diesel sem a adição de d-limoneno também foi utilizado nos ensaios e será assim referido como S10.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

Os testes foram realizados com cada uma das misturas preparadas e também com o diesel sem adição de d-limoneno exatamente do mesmo modo.

Inicialmente foi abastecido o frasco de Mariotte com a mistura a ser ensaiada e registrou-se a massa inicial da mistura. O sistema funciona inicialmente alimentado com diesel sem aditivo proveniente do tanque de combustível do próprio grupo gerador. Através de manobras com válvulas seletoras é possível alternar a alimentação do motor de seu tanque para a alimentação do frasco de Mariotte.

Com o sistema em funcionamento e alimentado com o combustível proveniente do tanque do gerador, a alimentação é então alternada para a mistura contida no frasco Mariotte e iniciam-se as medições, com a condição de carga de 500W, 1000W, 1500W, 2000W, 2500W e 3000W que corresponde à condição limite para o uso contínuo do gerador. Ao final todos os dados foram coletados e reiniciou-se a operação substituindo o conteúdo do frasco Mariotte pelas demais misturas e novamente o procedimento anterior foi repetido, sendo também utilizado o óleo diesel sem aditivo.

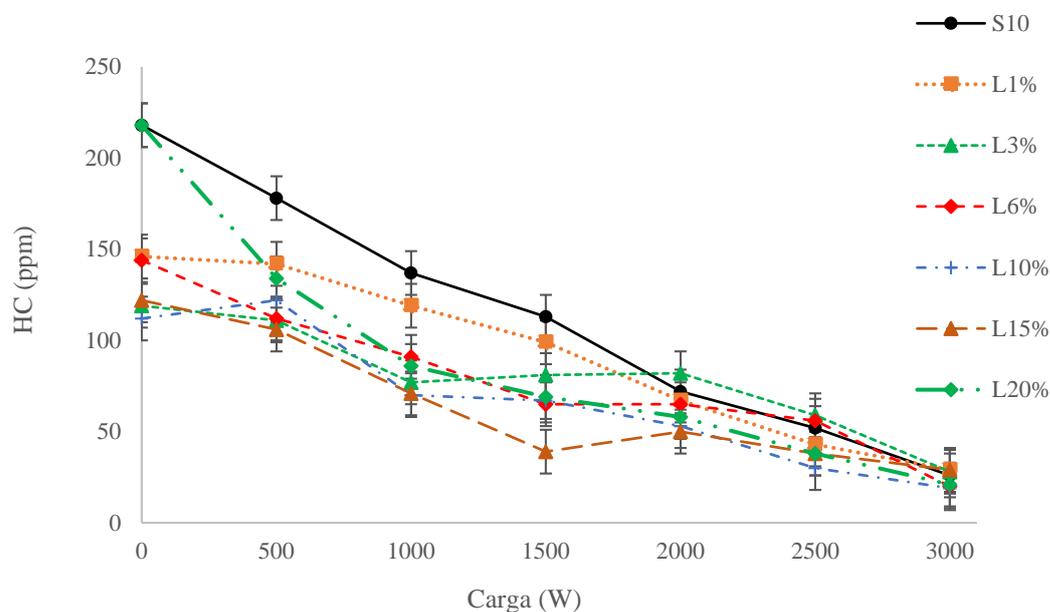
Os dados obtidos nos ensaios foram agrupados em tabelas e são apresentados no anexo II. De posse desses dados foi possível organizá-los de forma gráfica, representando cada variável medida em função da carga imposta ao sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados nos gráficos seguintes, todos baseados na carga imposta ao gerador. As legendas dos gráficos apresentam as denominações L1, L2, L3, L6, L10, L15 e L20 que se referem à porcentagem de d-limoneno adicionada à mistura, 1%, 2%, 3%, 6%, 10%, 15% e 20% respectivamente e também S10, que é o óleo diesel sem adição de d-limoneno.

A figura 24 mostra os resultados obtidos com relação à emissão de hidrocarbonetos não queimados para diferentes condições de carga. É possível observar que para todas as misturas com aditivo as emissões foram significativamente menores até a carga de 2000 W, acima desse valor porém, os valores de HC de todas as amostras se encontram em uma faixa estreita de valores.

Figura 24 - Emissão de hidrocarbonetos não queimados



Fonte: O autor

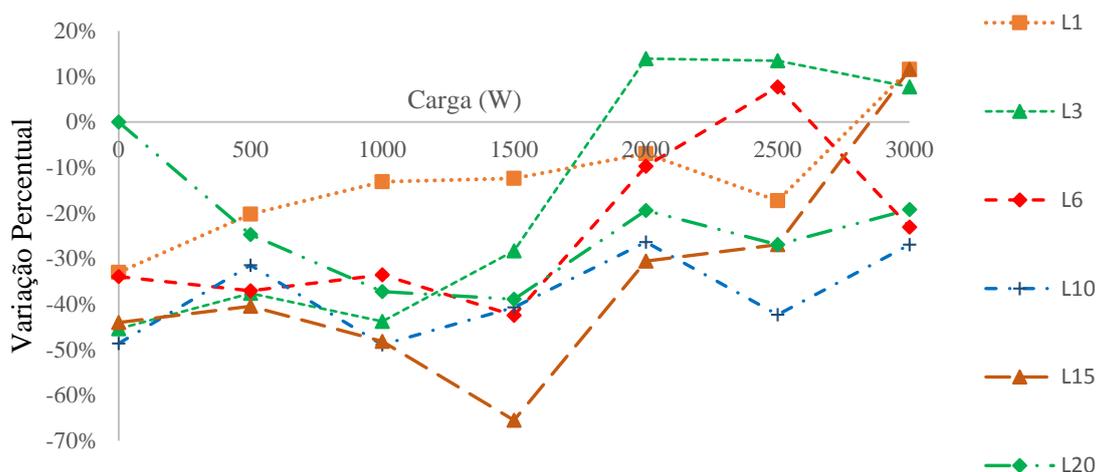
Como forma de facilitar a visualização dos resultados, a figura 25 apresenta os valores percentuais de emissão de hidrocarbonetos de cada mistura em relação ao óleo diesel S10. Neste gráfico pode-se observar que com exceção de 6 pontos de operação do

sistema, todos os demais apresentaram reduções significativas na emissões de hidrocarbonetos. A mistura L1 apresentou aumento de emissões quando o sistema operou a plena carga (3000 W), já a mistura L3 apresentou aumento com cargas acima de 2000 W.

A mistura L6 apresentou aumento quando o sistema operou com 2500 W de carga e voltou a apresentar diminuição com a carga de 3000 W. Pode-se perceber que o comportamento das misturas L10, L15 e L20 mantiveram suas emissões reduzidas no ponto de operação de 2500 W. Este fato leva a crer que o dado experimental da mistura L6 na carga de 2500 W possa conter um erro de medição. O mesmo pode-se dizer da mistura L15, que contrariando a tendência, apresentou aumento de emissão somente na carga de 3000 W e da mistura L20 que apresenta um valor equivalente ao diesel S10 quando o sistema é operado sem carga.

De forma geral, e admitindo que possam ter ocorridos erros de medição, o aditivo conseguiu promover a redução da emissão de hidrocarbonetos não queimados, ou seja, conseguiu promover uma melhora da oxidação do combustível a monóxido ou dióxido de carbono.

Figura 25 - Valores percentuais de hidrocarbonetos em relação ao diesel S10

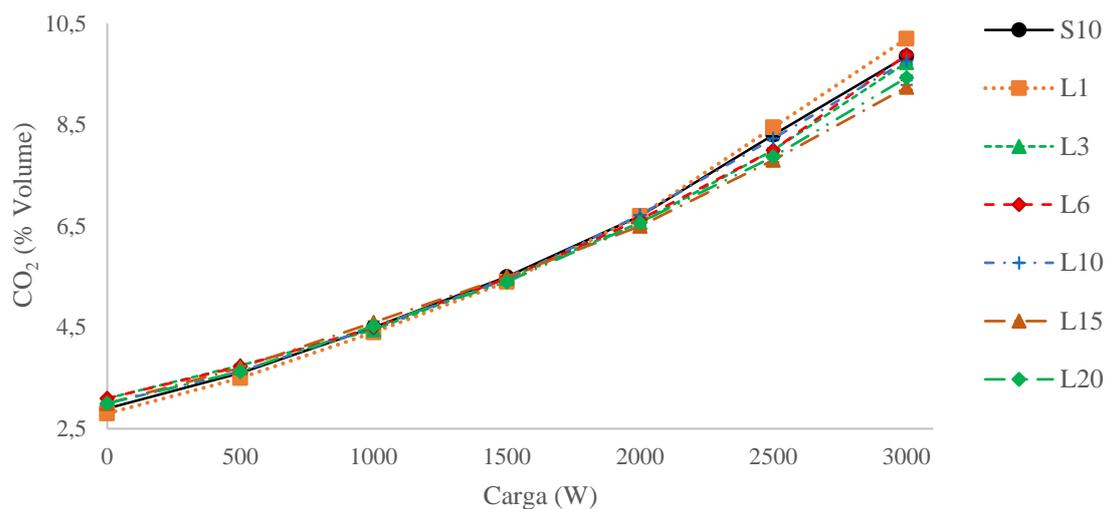


Fonte: O autor

A diminuição nas emissões de hidrocarbonetos não queimados geralmente é acompanhada pelo aumento desejável na emissão de dióxido de carbono (CO₂).

O gráfico da figura 26 apresenta valores praticamente coincidentes com todas as misturas para cargas de até 2000 W, com uma pequena dispersão dos pontos de operação em cargas superiores a 2000 W.

Figura 26 - Emissão de dióxido de carbono

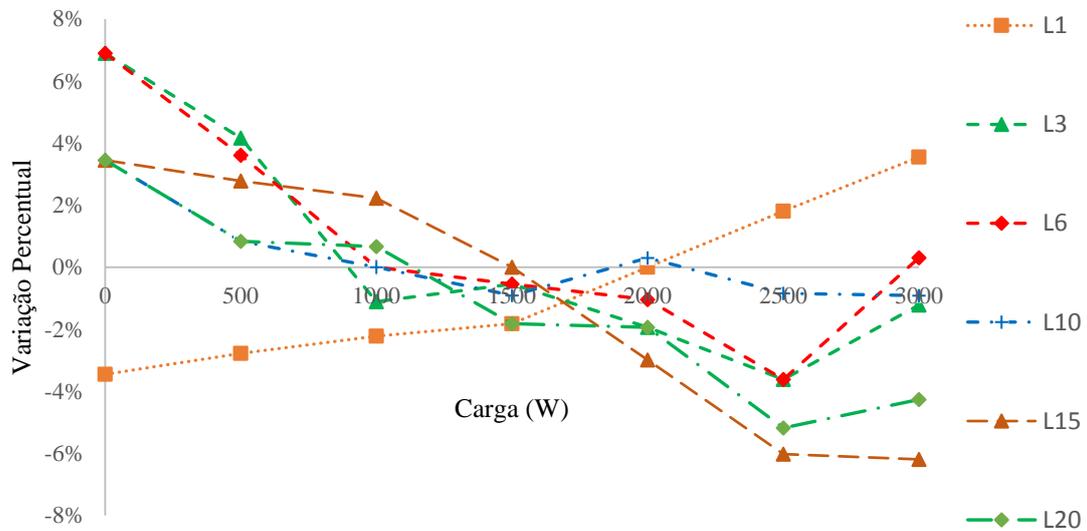


Fonte: O autor

Na figura 27 pode-se observar de maneira mais clara, em valores percentuais, a emissão de dióxido de carbono em relação ao combustível S10.

Observa-se que a mistura L1 apresenta um comportamento oposto às demais misturas, promovendo a diminuição da emissão de dióxido de carbono em menores cargas e o aumento em cargas mais elevadas. Essa fato porém deve ser relacionada à alteração na quantidade de carbono em cada mistura, principalmente nas misturas com maior quantidade de limoneno.

Figura 27 - Valores percentuais de dióxido de carbono em relação ao diesel S10



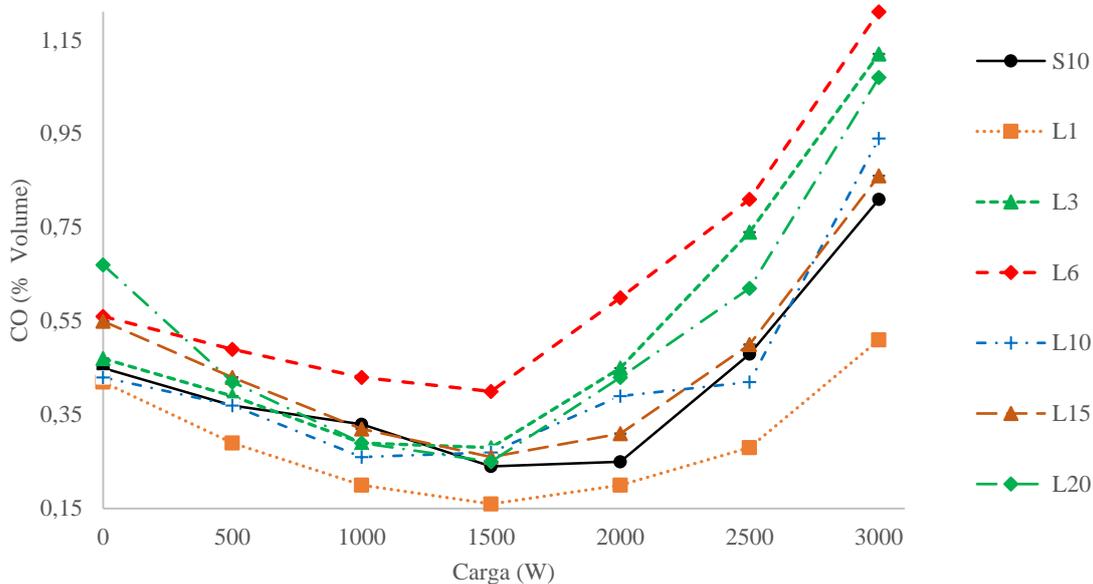
Fonte: O autor

A figura 28 mostra o comportamento das misturas em relação à emissão de monóxido de carbono.

A ordem de grandeza das emissões de monóxido de carbono é cerca de uma vez inferior à emissão de dióxido de carbono, com isso, pequenas alterações nas emissões de monóxido tendem a produzir alterações acentuadas no comportamento do gráfico, como pode se verificar principalmente em cargas maiores.

A única mistura que apresentou diminuição da emissão de monóxido de carbono foi a mistura L1, todas as demais apresentaram aumento.

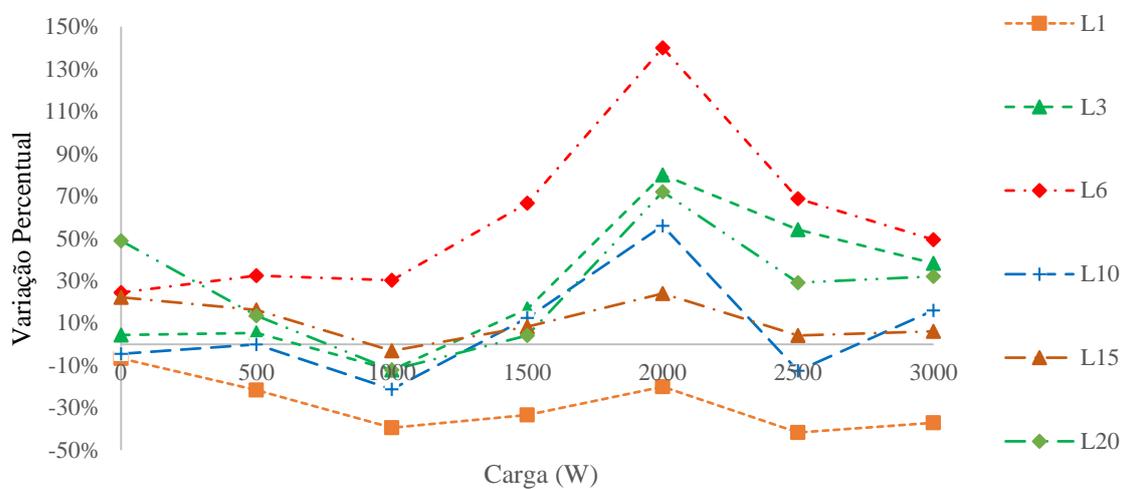
Figura 28 - Emissão de monóxido de carbono



Fonte: O autor

A análise da figura 29 deixa bastante evidente o comportamento indesejável da utilização do limoneno em quantidades superiores a 1% bem como o comportamento não previsível das emissões.

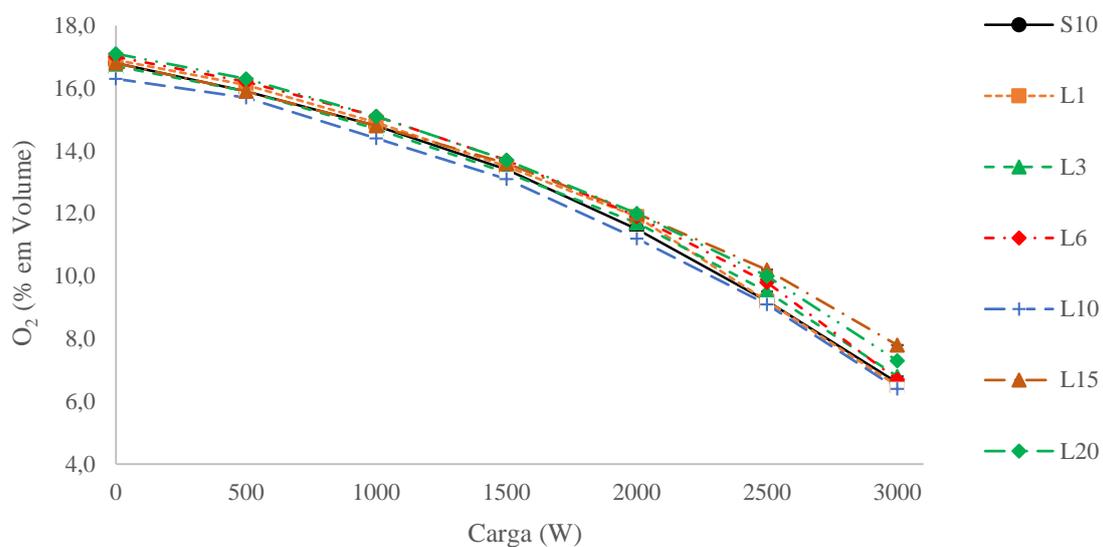
Figura 29 - Emissões percentuais de monóxido de carbono em relação ao diesel S10



Fonte: O autor

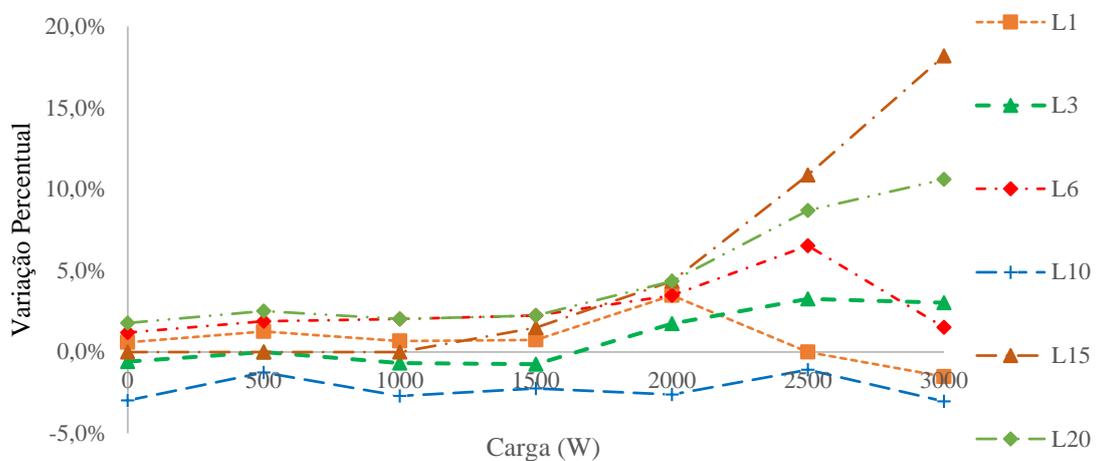
Os resultados obtidos na emissão de oxigênio, mostrados na figura 30, apresentam valores próximos. Porém como apresentam aumento da quantidade de oxigênio nos gases de escape indicam que a utilização do limoneno acaba por inibir a oxidação parcial ou total do combustível, principalmente em cargas mais elevadas, como evidencia a figura 31. Tal comportamento pode ser comprovado com a observação da figura 28 e figura 29 onde se observa aumento da emissão de monóxido de carbono.

Figura 30 - Emissão de oxigênio



Fonte: O autor

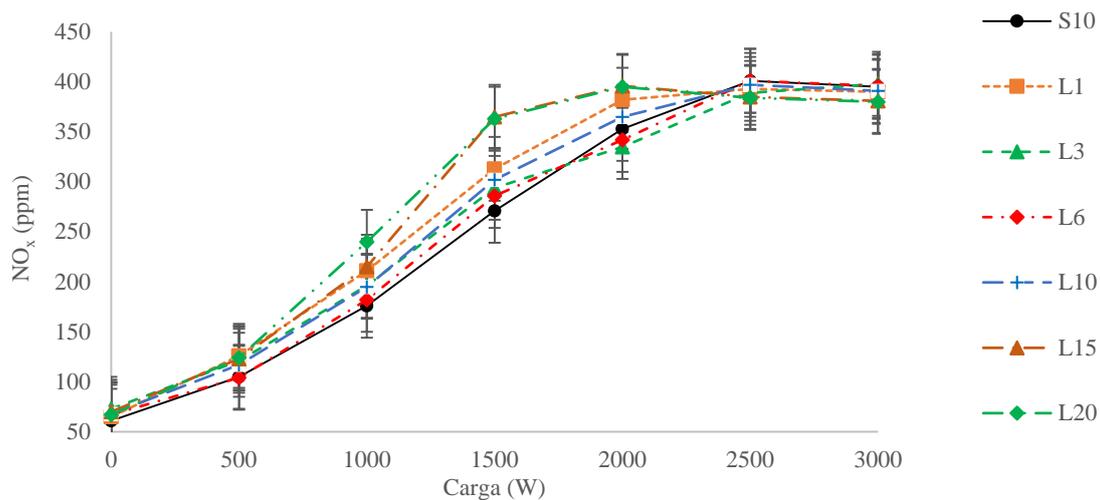
Figura 31 - Emissões percentuais de oxigênio em relação ao diesel S10



Fonte: O autor

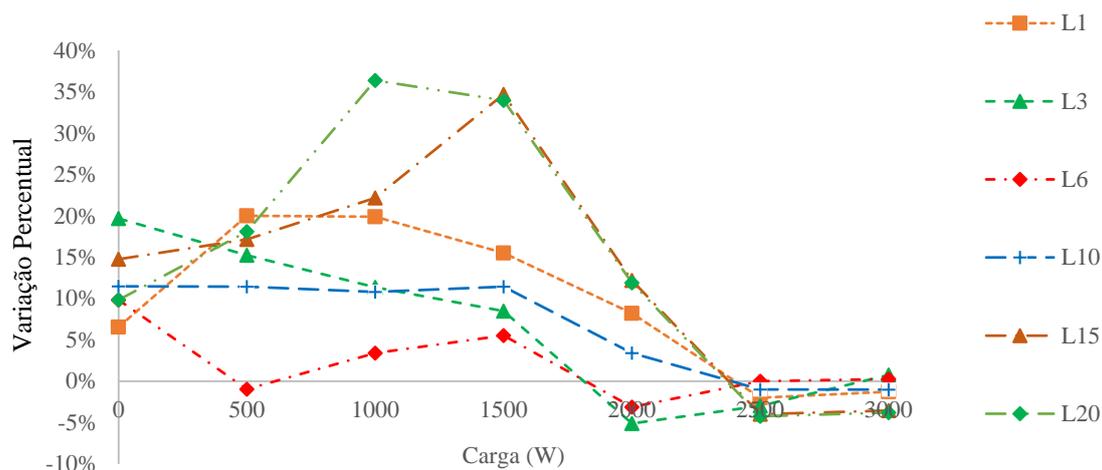
Pode-se observar na figura 32 que a utilização do aditivo promoveu o aumento significativo das emissões de óxido de nitrogênio para a faixa de operação de até 2000 W. Porém ao operar com as cargas de 2500 e 3000 W as emissões apresentaram valores muito próximos de emissões e até mesmo inferiores, como se observa na figura 33.

Figura 32 - Emissão de óxidos de nitrogênio



Fonte: O autor

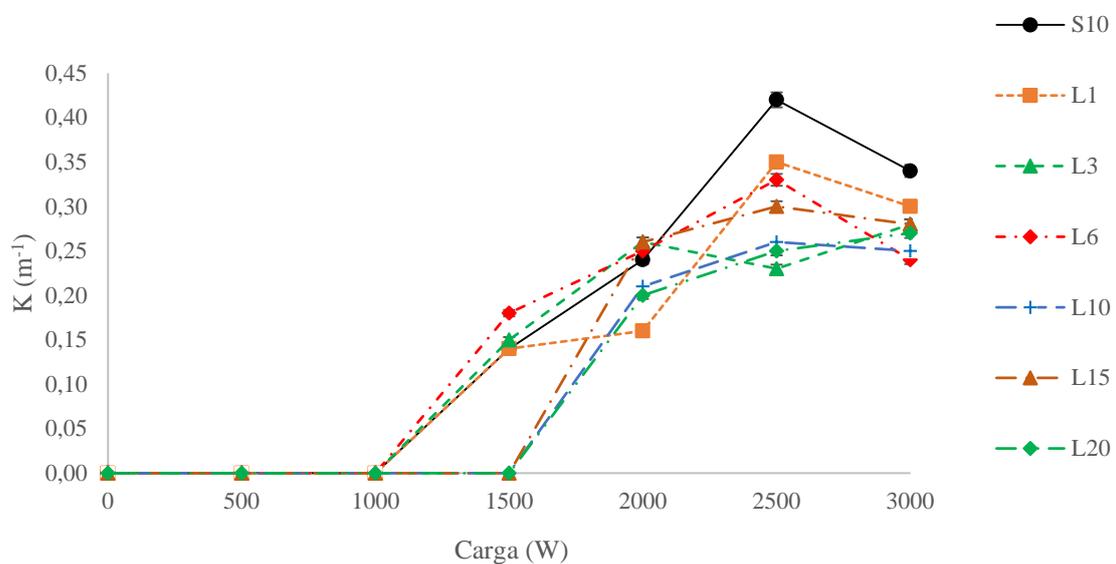
Figura 33 - Emissões percentuais de óxidos de nitrogênio em relação ao diesel S10



Fonte: O autor

Em relação à opacidade, figura 34, pode-se notar bons resultados utilizando-se quaisquer misturas. Ao se utilizar o combustível S10, a emissão de material particulado passa a ser detectável a partir da carga de 1500W e mesmo a quantidade reduzida de limoneno da mistura L1 foi suficiente para manter os níveis de emissão reduzidos até a aplicação de carga máxima. A utilização de quantidades maiores de limoneno como em L10, L15 e L20 conseguiram retardar a detecção de material particulado até a carga de 2000W.

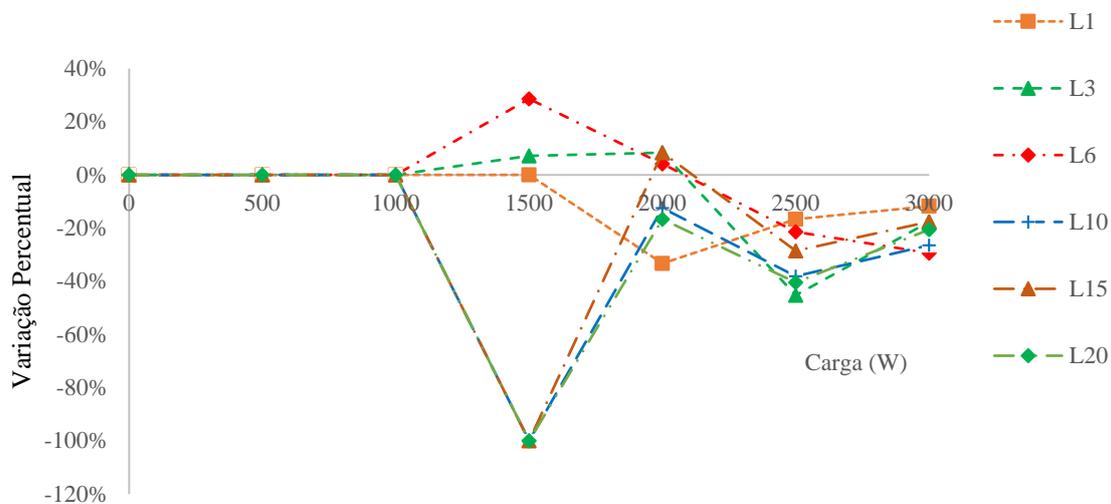
Figura 34 - Emissão de material particulado



Fonte: O autor

Através da figura 35 nota-se uma clara tendência de redução das emissões de material particulado, levando a incertezas em relação aos dados coletados com as misturas L3 e L6 na carga de 1500W e com as misturas L3, L6 e L10 na carga de 2000W.

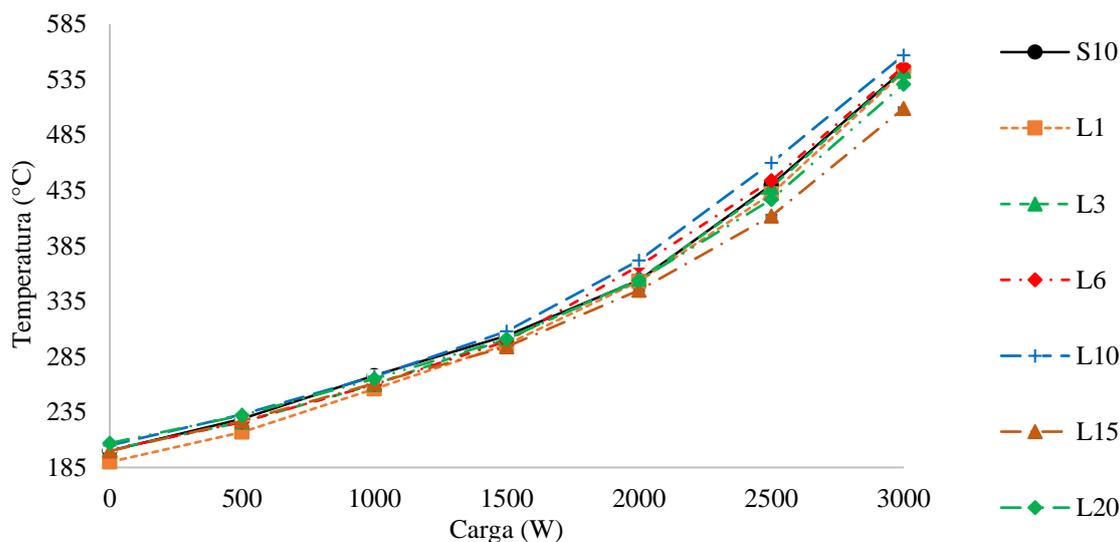
Figura 35 - Emissões percentuais de óxidos de material particulado em relação ao diesel S10



Fonte: O autor

Com relação à temperatura, conforme pode ser observado na figura 36, nota-se ao utilizar o combustível S10 que o intervalo de variação é amplo, partindo de 200°C e atingindo o valor de 544°C, conforme a carga do sistema é aumentada. Todas as misturas apresentam desvio de cerca de 10°C em relação ao combustível S10 até a carga de 2000W, acima desta carga as misturas L10 e L15 apresentaram desvios maiores como visto na figura 37.

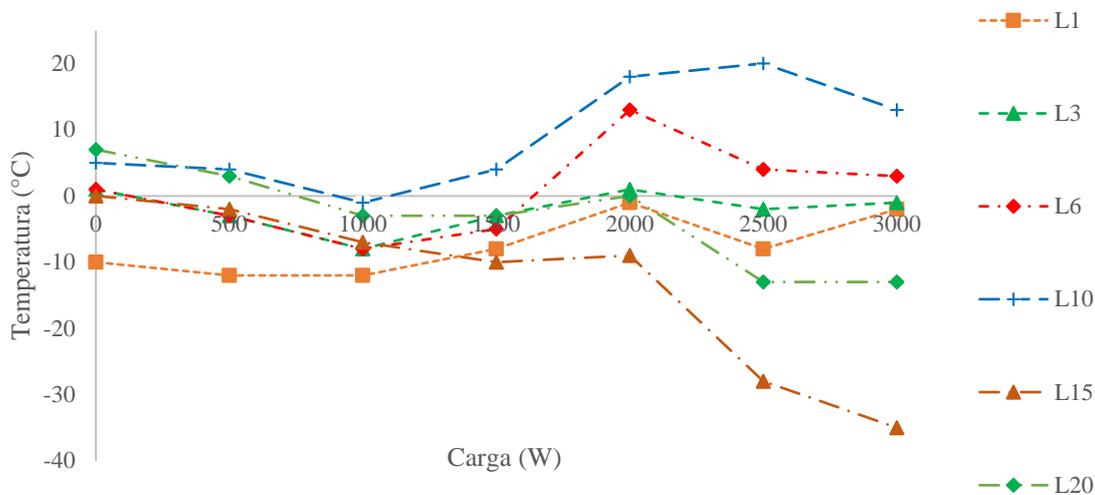
Figura 36 - Temperatura dos gases de escape



Fonte: O autor

A diminuição da temperatura observada quando se aplica as cargas de 2500 e 3000W coincidem com redução na emissão de óxidos de nitrogênio mostrada na figura 33, tal relação se mantém em relação as misturas L6 e L10 que promoveram aumento da temperatura e praticamente nenhuma redução nas emissões de óxidos de nitrogênio. Tal redução no entanto não é notada na aplicação de cargas inferiores a 2000W.

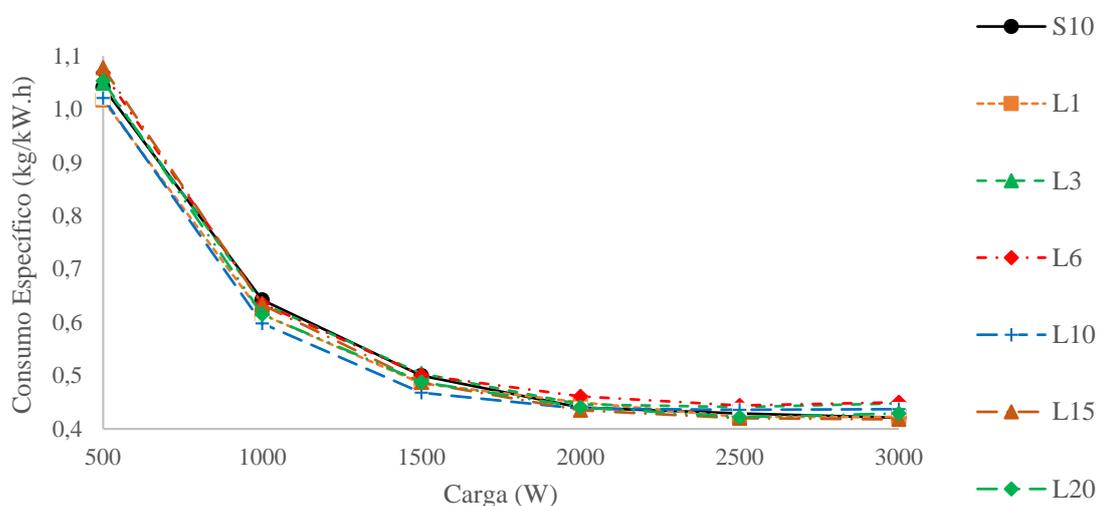
Figura 37 - Variação da temperatura dos gases de escape



Fonte: O autor

O consumo específico representado figura 38 mostra que todas as misturas testadas apresentaram a mesma tendência de comportamento, com resultados muito próximos. O d-limoneno possui poder calorífico elevado, cerca de apenas 3% inferior ao poder calorífico do óleo diesel, dessa maneira é esperado que o consumo específico possa ser maior em misturas com maior teor de d-limoneno. Essa diferença no poder calorífico é pequena e isoladamente não justifica com precisão as variações do consumo específico.

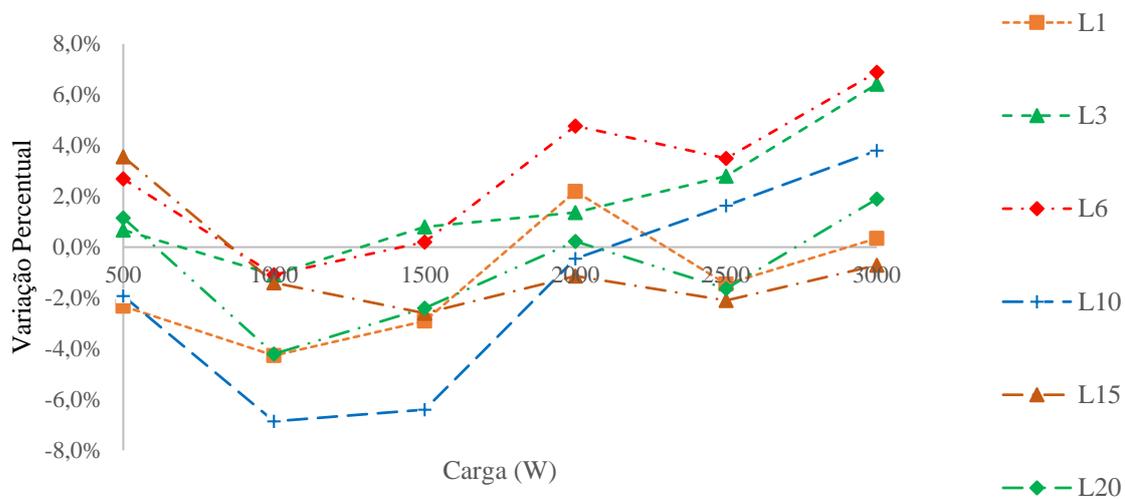
Figura 38 - Consumo específico



Fonte: O autor

A figura 39 explicita o maior consumo específico das misturas L3 e L6, em cargas mais elevadas, e o comportamento da mistura L10, que apresentou uma variação acentuada, com menor consumo específico em cargas menores, até 2000W e maior em cargas superiores.

Figura 39 - Consumo específico percentual particulado em relação ao diesel S10



Fonte: O autor

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho analisou os dados obtidos a partir da adição de d-limoneno em diversas porcentagens ao óleo diesel comercializado em território brasileiro. Foram investigados os parâmetros mais importantes relacionados às emissões de motores de ignição por compressão como emissão de hidrocarbonetos não queimados, monóxido e dióxido de carbono, oxigênio, óxidos de nitrogênio e material particulado, sendo também analisadas a temperatura desses gases ao saírem da câmara de combustão e o consumo específico de combustível como forma de complementar a interpretação dos resultados.

De maneira preliminar e já durante os ensaios foi possível observar que o comportamento do sistema foi idêntico ao ser alimentado com óleo diesel comercial, referido no texto como S10, e alimentado com as misturas contendo o aditivo d-limoneno.

A utilização do aditivo foi responsável por uma significativa redução na emissões de hidrocarbonetos não queimados, com exceção de 6 pontos que apresentaram seu aumento em cargas elevadas. No entanto, observa-se que o sistema de injeção deste motor é limitado e não possui um sistema de avanço ou regulação da injeção, que poderia mudar esta situação.

Quando observadas as emissões de dióxido de carbono espera-se que atinjam altos índices, indicando dessa forma a maior oxidação do combustível e maior liberação de energia. Nesse mesmo sentido, a emissão de monóxido de carbono deve ser a menor possível, por se tratar de um gás venenoso e que deve oxidado novamente a dióxido de carbono liberando ainda energia. A utilização da mistura L1 forneceram dados contrastantes com as demais misturas. Enquanto a mistura L1 indica uma tendência de aumento na emissão de dióxido de carbono em função do aumento da carga as demais indicam diminuição, e em relação a emissão de monóxido de carbono a mistura L1 foi a única a efetivamente capaz de manter reduzidas as emissões em todas a faixa de trabalho. Esses contrastes indicam a necessidade de novos ensaios a fim de esclarecer e reforçar a compreensão do fenômeno.

Em motores de ignição por compressão, não existem restrições à admissão de ar e dessa forma a potência desenvolvida por este é apenas função da quantidade de combustível injetado na câmara de combustão. Por essa razão observa-se que com nenhuma ou pouca carga a emissão de oxigênio neste tipo de motor é muito alta, resultado de uma mistura pobre. Com o aumento da carga imposta, o sistema requer maiores quantidades de combustível e dessa maneira a quantidade de oxigênio nos gases de escape diminui. Nesse sentido as misturas L15 e L20 apresentaram resultados totalmente indesejáveis, pois aumentaram as emissões de oxigênio e monóxido de carbono e diminuíram as emissões de dióxido de carbono. A única mistura que apresentou redução na emissão de oxigênio em toda a faixa de cargas aplicadas foi a mistura L10, que permitiu a diminuição da emissão de hidrocarbonetos não queimados.

Ao se analisar as emissões de óxidos de nitrogênio percebe-se que a utilização do aditivo só se mostrou viável quando o sistema operou próximo à sua carga máxima, isto é, com 2500 e 3000 W de carga, apresentando valores próximos a 2%. É uma redução pequena comparada ao aumento de cerca de 15% quando o sistema opera com cargas

inferiores a 2000W, e em um sistema que opere com variações de carga esse resultado não é desejado.

A emissão de material particulado se mostrou bastante reduzida com a utilização do aditivo mesmo em baixas concentrações, como se observou utilizando a mistura L1. Com exceção de 5 pontos experimentais, todos os demais apresentaram diminuição nos níveis de material particulado, mas pelo comportamento dos gráficos é possível admitir que existam imprecisões nas medidas de emissões destes pontos. As reduções percentuais não revelaram porém uma relação direta com a quantidade de aditivo, mesmo mantendo diminuídas as emissões, o aumento da quantidade de aditivo apresentou variações nas quantidades de material particulado medido. Um fator que pode justificar essas variações é a formação de bolhas nas mangueiras que compõem o sistema de alimentação de combustível durante as manobras de válvulas para selecionar a origem do combustível e à vibração do conjunto moto gerador.

A temperatura dos gases de escape serviu para correlacionar os demais parâmetros avaliados e isoladamente não representa características que possam ser consideradas positivas ou negativas em relação à utilização do aditivo. Como dito anteriormente, o aditivo tem poder calorífico próximo ao do óleo diesel e dessa forma os dados obtidos apresentam valores muito próximos aos obtidos utilizando-se combustível sem o aditivo.

Admitindo as limitações de operação do motor utilizado no ensaio, como rotação constante e impossibilidade de alteração do ponto de injeção de combustível, é possível afirmar que a mistura L1 apresentou resultados bastante positivos em parâmetros como diminuição de hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono, emissão de material particulado e consumo específico e aumento na quantidade de dióxido de carbono.

Como se observa nesse trabalho, a obtenção de dados experimentais é passível de erros que não são imediatamente percebidos. Em função da indisponibilidade da realização de novos ensaios, se recomenda que uma nova metodologia de ensaios seja definida e então que se repita ensaios que possam ser necessários.

6. REFERÊNCIAS

- AGARWAL, A.K.; DAS, L.M. Biodiesel development characterization for uses as a fuel in compression ignition engines. *Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 123, April, 2001.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel, acesso em 03/09/2018.
- ATC. Technical Committee of Petroleum Additives Manufacturers in Europe. *Lubricant additives and the environment*. Leicester: European Chemical Industry Council, 1993. www.atc-europe.org/showdoc.asp?doc_id=102.
- BALA, B.K. 2005. Studies on biodiesels from transformation of vegetable oils for diesel engines. *Energy Edu Sci Technol* 5:1–45.
- BREITMAIER, E. *Terpenes, Flavors, Fragrances, Pharmaca, Pheromones*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- BRUCE, P.Y. *Química Orgânica 4ª Ed.* 2006 Pearson
- CLARK, S. J.; WAGNER, L.; SCHROCK, M. D.; PIENNAAR, P. G.; Methyl and Ethyl Soybean Ester as Renewable fuels for diesel engines; *Journal of American Oil Chemistry Society*, vol. 61, no. 10, October 1984.
- CORAZZA, M. L.; RODRIGUES, D. G. e NOZAKI, J.; “Preparação e caracterização do vinho de laranja”. *Química Nova*, vol. 24, no 4, 2001.
- COSTA NETO, P. R. e ROSSI, L. F. S.; “Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras”. *Química Nova*, vol. 23, no 4, 2000.
- DERMIBAS, A. *A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer, 2008.
- Diário Oficial da União de 14.01.2005. Lei nº 11.097/2005, disponível em www.planalto.gov.br, acessado em outubro de 2015.

Diário Oficial da União de 09.12.2004. Resolução ANP nº 42 de 24.11.2004, em www.anp.gov.br, acessado em outubro de 2015.

FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. Internal Combustion Engines - applied thermosciences; 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, 2016.

GANGOLLI, S. E.; The dictionary of substances and their effects. 2nd edition, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1999.

HSDB; Hazardous substances data bank. Disponível em: <toxnet.nlm.nih.gov> Acesso: 05/03/2017.

HUNKE, A.L.; BARSIC, N.J. Performance and emission characteristics of naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels - (part 2). SAE paper No. 810955, SAE, Warrendale, PA., 1981.

KNOTHE, G.; GERPEN, J.V.; KRAHL, J.; RAMOS, L.P. Manual de Biodiesel. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

MERKER, G.P; SCHWARZ, C; TEICHMANN, R. Combustion Engines Development. Mixture Formation, Combustion, Emissions and Simulation. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2012.

MÓDOLO, D.L. Desenvolvimento de um modelo matemático para simulação de sistemas de injeção para motores do ciclo diesel com bomba rotativa utilizando éster metílico de óleo de soja. EESC-USP, 1998.

MÓDOLO, D.L.; PEREIRA, L.E.R.; OLIVEIRA, S.D.R.O.; ÁVILA, M.T.; FERRREIRA, S.L.; Avaliação do desempenho e das emissões de um motor diesel operando com misturas diesel, biodiesel e limoneno. Anais do CIMCCO, Belo Horizonte, 2016.

PULKRABEK, W. Engineering fundamentals of the internal combustion engine. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

STERN, R.; GUIBET, J. C. e GRAILE, J.; “Les Huiles Végétales et leurs dérivés: carburant de substitution (analyse critique)” Revue de L’Institut Français du Pétrole, vol 38, no 1, p. 121, 1983.

WESTBROOK, C.K.; DRYER, F.L. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion (1984). *Prog Energy Combust Sci* 10:1–57.

ANEXO I

Tabela 1- Constantes de velocidade

Reação i	$k_{i/r}$ [cm ³ /mol.s]
k ₁	$1,8 \times 10^{14} \times \exp\left[-\frac{38,400}{T}\right]$
	$0,544 \times 10^{14} \times T^{0,1} \times \exp\left[-\frac{38,020}{T}\right]$
	$0,76 \times 10^{14} \times \exp\left[-\frac{38,00}{T}\right]$
	$4,93 \times 10^{13} \times T^{0,0472} \times \exp\left[-\frac{38,061}{T}\right]$
k ₂	$6,4 \times 10^9 \times T \times \exp\left[-\frac{3,150}{T}\right]$
	$9,0 \times 10^9 \times T \times \exp\left[-\frac{3,280}{T}\right]$
	$1,48 \times 10^8 \times T^{1,5} \times \exp\left[-\frac{2,860}{T}\right]$
k ₃	$3,0 \times 10^{13}$
	$3,36 \times 10^{13} \times \exp\left[-\frac{195}{T}\right]$
	$4,1 \times 10^{13}$
	$4,22 \times 10^{13}$

Fonte: Merker (2012)

ANEXO II

Em seguida encontram-se as tabelas que contém os dados coletados durante os experimentos.

A tabela 2 contém os dados relativos à emissão de hidrocarbonetos não queimados obtidos pelo analisador de gases em unidade de ppm.

Tabela 2 - Emissões de hidrocarbonetos não queimados

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	218	146	119	144	112	122	218
500	178	142	111	112	122	106	134
1000	137	119	77	91	70	71	86
1500	113	99	81	65	67	39	69
2000	72	67	82	65	53	50	58
2500	52	43	59	56	30	38	38
3000	26	29	28	20	19	29	21

A tabela 3 contém os dados relativos à emissão de dióxido de carbono obtidos pelo analisador de gases em porcentagem sobre o volume.

Tabela 3 - Emissões de dióxido de carbono

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	2,9	2,8	3,1	3,1	3,0	3,0	3,0
500	3,6	3,5	3,8	3,7	3,6	3,7	3,6
1000	4,5	4,4	4,5	4,5	4,5	4,6	4,5
1500	5,5	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4
2000	6,7	6,7	6,6	6,6	6,7	6,5	6,6
2500	8,3	8,5	8,0	8,0	8,2	7,8	7,9
3000	9,9	10,2	9,7	9,9	9,8	9,2	9,4

A tabela 4 contém os dados relativos à emissão de monóxido de carbono obtidos pelo analisador de gases em porcentagem sobre o volume.

Tabela 4 - Emissões de monóxido de carbono

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	0,45	0,42	0,47	0,56	0,43	0,55	0,67
500	0,37	0,29	0,39	0,49	0,37	0,43	0,42
1000	0,33	0,20	0,29	0,43	0,26	0,32	0,29
1500	0,24	0,16	0,28	0,40	0,27	0,26	0,25
2000	0,25	0,20	0,45	0,60	0,39	0,31	0,43
2500	0,48	0,28	0,74	0,81	0,42	0,50	0,62
3000	0,81	0,51	1,12	1,21	0,94	0,86	1,07

A tabela 5 contém os dados relativos à emissão de oxigênio obtidos pelo analisador de gases em porcentagem sobre o volume.

Tabela 5 - Emissões de oxigênio

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	16,80	16,90	16,70	17,00	16,30	16,80	17,10
500	15,90	16,10	15,90	16,20	15,70	15,90	16,30
1000	14,80	14,90	14,70	15,10	14,40	14,80	15,10
1500	13,40	13,50	13,30	13,70	13,10	13,60	13,70
2000	11,50	11,90	11,70	11,90	11,20	12,00	12,00
2500	9,20	9,20	9,50	9,80	9,10	10,20	10,00
3000	6,60	6,50	6,80	6,70	6,40	7,80	7,30

A tabela 6, contém os dados relativos à emissão de óxidos de nitrogênio obtidos pelo analisador de gases em unidade de ppm.

Tabela 6 - Emissões de óxidos de nitrogênio

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	61	65	73	67	68	70	67
500	105	126	121	104	117	123	124
1000	176	211	196	182	195	215	240
1500	271	313	294	286	302	365	363
2000	353	382	335	342	365	396	395
2500	401	393	389	401	397	385	384
3000	395	390	398	396	391	381	380

A tabela 7, contém os dados relativos à emissão de material particulado obtidos pelo opacímetro em unidade de m^{-1} .

Tabela 7 - Emissões de material particulado

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1500	0,14	0,14	0,15	0,18	0,00	0,00	0,00
2000	0,24	0,16	0,26	0,25	0,21	0,26	0,20
2500	0,42	0,35	0,23	0,33	0,26	0,30	0,25
3000	0,34	0,30	0,28	0,24	0,25	0,28	0,27

A tabela 8 contém os dados relativos à temperatura dos gases de escape obtidos pelo conjunto de multímetro com termopar em graus célsius.

Tabela 8 – Temperatura dos gases de escape

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L20
0	200	190	201	201	205	200	207
500	229	217	226	226	233	227	232
1000	268	256	260	260	267	261	265
1500	304	296	301	299	308	294	301
2000	354	353	355	367	372	345	354
2500	440	432	438	444	460	412	427
3000	544	542	543	547	557	509	531

A tabela 9 contém os dados relativos ao consumo específico.

Carga (W)	S10	L1	L3	L6	L10	L15	L15
0	0	0	0	0	0	0	0
500	1,041	1,017	1,048	1,069	1,021	1,078	1,053
1000	0,642	0,615	0,635	0,635	0,598	0,633	0,615
1500	0,500	0,485	0,504	0,501	0,468	0,487	0,488
2000	0,440	0,450	0,446	0,461	0,438	0,435	0,441
2500	0,429	0,423	0,441	0,444	0,436	0,420	0,422
3000	0,421	0,422	0,448	0,450	0,437	0,418	0,429