Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia automotiva

Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software diesel-RK com utilização de Diesel, Biodiesel e suas misturas

Autor: Felipe Leone
Vicente Isidio Ferreira Neto
Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF
2020

Felipe Leone
Vicente Isidio Ferreira Neto

Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software diesel-RK com utilização de Diesel, Biodiesel e suas misturas

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia automotiva).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF
2020

Felipe Leone
Vicente Isidio Ferreira Neto
Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software diesel-RK com utilização de Diesel, Biodiesel e suas misturas/ Felipe Leone Vicente Isidio Ferreira Neto. – Brasília, DF, 2020-
51 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2020.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software diesel-RK com utilização de Diesel, Biodiesel e suas misturas

CDU 02:141:005.6

Felipe Leone
Vicente Isidio Ferreira Neto

Estudo da eficiência de um motor a partir da simulação pelo software diesel-RK com utilização de Diesel, Biodiesel e suas misturas

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia automotiva).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 13 de Dezembro de 2020:

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
Orientador

Prof. Dra. Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes
Convidado 1

Prof. Me. Saleh Barbosa Khalil
Convidado 2

Brasília, DF
2020

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a Deus, nossos familiares e aos professores da Universidade de Brasília - FGA, por todo apoio concedido durante esta jornada. Gostaríamos de agradecer ao senhor Vicente Isídio Ferreira Filho pelo amparo prestado.

Resumo

Todas as atividades exercidas hoje pela humanidade necessitam do consumo ativo e diário de fontes de energia, o biodiesel, uma dessas fontes, é uma fonte de energia renovável, tem grande importância no que nos diz a estratégia energética, podendo ser uma solução para para o déficit de diesel nacional, quanto pela maior oferta de fontes de energia renovável para produção de energia elétrica. O presente estudo tem como objetivo a simulação de um motor diesel 4.4L, no software Diesel - RK, em que houve variações na concentração de biodiesel, varaindo desde B0, B20, B40, B60, B80 e B100. A construção do motor teve seus dados fudamentados no Perkins 1104, originalmente construido para utilização de B0, e sua rotação variada de 1000 RPM até 4000 RPM. Os resultados mostram as variações geradas nas curvas de potência de cada combustível utilizado, além dos níveis de emissões dos mesmos, seguido pelo consumo específico, nos mostrando uma análise do motor ciclo diesel com estes combustíveis. Sendo observado na conclusão a viabilidade do uso do B20 como fonte de uso comum, os péssimos resultados das misturas B40 e B100, além da necessidade de uma melhora nas condições geómetricas do motor para um melhor aproveitamento do combustível.

Palavras-chaves: Biodiesel, Diesel, Motor diesel.

Abstract

All the activities carried out today by humanity require active and daily consumption of energy sources, biodiesel, one of these sources, is a renewable energy source, it has great importance in what the energy strategy tells us, and can be a solution for the diesel deficit national level, as well as the greater offer of renewable energy sources for the production of electric energy. The present study aims to simulate a 4.4L diesel engine, using the Diesel - RK software, in which there were variations in the concentration of biodiesel, ranging from B0, B20, B40, B60, B80 and B100. The construction of the motor had its data based on the Perkins 1104, originally built for use of B0, and its rotation varied from 1000 RPM to 4000 RPM. The results show the variations generated in the power curves of each fuel used, in addition to their emission levels, followed by specific consumption, showing us an analysis of the diesel cycle engine with these fuels. At the conclusion, the viability of the B20 as a source of common use was observed, the poor results of the B40 and B100 mixtures, in addition to the need for an improvement in the geometric conditions of the engine for an improved use of fuel.

Key-words: Biodiesel, Diesel, Diesel engine.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Processo de Transesterificaçao para o meio básico. PARENTE, (2003). 15
Figura 2 – Reações de Transesterificação. PARENTE, (2003). 17
Figura 3 – Esquemático da hidroesterificação. PARENTE, (2003). 19
Figura 4 – Reações de Hidrólise. PARENTE, (2003). 20
Figura 5 – Reaproveitamento no processo de hidrólise. PARENTE, (2003). 20
Figura 6 – Os 4 tempos do motor de ignição por compressão (Ciclo diesel). 24
Figura 7 – Diagramas p-V e T-S ciclo Diesel teórico. 25
Figura 8 – Ciclo Diesel teórico para carga parcial. Martins, (2007). 28
Figura 9 – Redução do rendimento em funçao do aumento da carga no ciclo teórico. Martins, (2007). 29
Figura 10 – Diagrama p-V do ciclo misto ou de sabathé teórico. Martins, (2007). . 29
Figura 11 – Redução do rendimento em funçao do aumento da carga para o ciclo misto teórico. Martins, (2007). 30
Figura 12 – Representação das partes do motor a combustao interna. VARELLA,(2010) 31
Figura 13 – Componentes internos da bomba rotativa. Fonte: autopeças Bosch . . . 32
Figura 14 – Prato de perfil ondulatório. Fonte: cnducoo.com 33
Figura 15 – Modelo bico injetor mecânico. Fonte:CURSO MAHLE METAL LEVE (2019) 34
Figura 16 – Modelo de Spray de um bico injetor na camara de combustão. Brunetti, (2012) 34
Figura 17 – Sistema de injeção comprometido pela formação da borra de biodiesel . 38
Figura 18 – Sistema de injeção suplementar para realização da manutenção 39
Figura 19 – Resultado após a limpeza do sistema de injeção com o descarbonizante 39
Figura 20 – Curva de potência do motor 40
Figura 21 – Consumo específico com rotação de 1800 RPM 41
Figura 22 – Consumo específico em função da variação da rotação 42
Figura 23 – Emisão de NOx a 1800 RPM 42
Figura 24 – Emisão de NOx em relação com a rotação 43
Figura 25 – Emisão de CO_2 para 1800 RPM 43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Reação de transesterificação 16
Tabela 2 – Biodiesel de Soja: Síntese, Degradação e Misturas Binárias. Roberlucia, (2008). 23
Tabela 3 – Especificações do motor 36
Tabela 4 – Propriedades do diesel e biodiesel 37

Lista de símbolos

ANP	Agência Nacional do Petróleo
PMS	Ponto morto superior
PMI	Ponto morto inferior
η_t	Rendimento térmico ciclo Diesel
W	Trabalho do ciclo
W_{liq}	Trabalho liquído
Q_u	Calor utilizado
p	Pressão
V	Volume
(c_p)	Calor específico a pressão constante
(c_v)	Calor específico a volume constante
T	Temperatura
k	Coeficiente de expansão adiabática
ϕ	Carga
ε	Taxa de compressão
(A/F)	Relação ar-combustível
$(A/F)_{est}$	Relação ar-combustível estequiométrico

Sumário

1 INTRODUÇÃO . . . 12
1.1 Objetivo geral . . . 13
1.2 Objetivos específicos . . . 13

2 REFERENCIAL TEÓRICO . . . 14
2.1 Biodiesel . . . 14
2.2 Processos de obtenção . . . 14
2.3 Transesterificação . . . 15
2.3.1 Preparação da matéria prima . . . 16
2.3.2 Reação de transesterificação . . . 16
2.3.3 Separação de fases . . . 17
2.3.4 Recuperação e desidratação do álcool . . . 17
2.3.5 Purificação dos ésteres . . . 18
2.3.6 Purificação da Glicerina . . . 18
2.4 Hidroesterificação . . . 18
2.4.1 Reação de Hidrólise e esterificação . . . 19
2.4.2 Propriedades físico-química . . . 20
2.4.2.1 Propriedades físicas do biodiesel . . . 21
2.4.2.2 Propriedades Químicas do biodiesel . . . 21
2.5 Princípio de funcionamento motor de ignicao por compressão . . . 24
2.5.1 Motor 4 tempos . . . 24
2.6 Ciclo teórico a pressão constante . . . 25
2.6.1 Cálculo da rendimento ciclo diesel teórico . . . 26
2.6.2 Ciclo Misto teórico . . . 29
2.7 Constituição de um motor diesel . . . 30
2.7.1 Sistema de injeção motor diesel . . . 30
2.7.2 Sistema de bomba rotativa ou distribuída . . . 32
2.7.3 Bicos Injetores . . . 32

3 METODOLOGIA . . . 35
3.1 Especificações e dados técnicos do motor . . . 35
3.2 Combustíveis utilizados . . . 37
3.3 Escolha do software . . . 37
3.4 Modelagem da simulação . . . 37
3.5 Procedimentos realizados para a manutenção do motor utilizado (limpeza do sistema de injeção, troca do filtro de combustível) . . . 38

4 RESULTADOS 40

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 45
5.1 Trabalhos futuros 45

6 REFERÊNCIAS 46

Apendice 49

1 Introdução

Locomoção, produção, entretenimento, transações financeiras, ou seja, qualquer atividade feita pelo ser humano demanda da produção e consumo de energia, a tornando um recurso estratégico e indispensável para qualquer civilização. Portanto, o Brasil, um país de dimensões continentais, possui um consumo de apenas 2% de toda energia produzida no mundo, contendo em sua matriz energética 42,9% de fontes renováveis, como hidrelétricas, derivados da cana de açúcar e vegetais oleosos, energia eólica, etc.

Dessa forma, analisando o balanço energético nacional, nota-se que o óleo diesel, item do estudo em questão, corresponde a 18,1% do consumo total das fontes energéticas disponíveis ANP, 2017, tendo um déficit e necessitando a importação de 12.955.000 m^3, que mesmo sendo constatado um crescimento de 12,9%, em 2017, na produção de biodiesel em relação ao ano anterior, salienta uma deficiência da matriz energética brasileira, que pode ser corrigido com a produção de biodiesel derivado da soja nacionalmente, mostrando uma relativa importância no investimento da produção de biodiesel como uma fonte alternativa de demanda para um país em desenvolvimento, além de toda a perspectiva econômica e social que o aumento da produção do biodiesel pode proporcionar como geração de empregos e menor dependência de importação de diesel.

Em 2017 foram produzidos 4.291.000 m^3 de biodiesel, sendo consumidos 4.250.000 m^3, que mesmo com um crescimento na produção, poderia ser um valor relativamente maior, visto que de acordo com Perin, 2015, a utilização de biodiesel na mistura diesel-biodiesel, em relação a seu aumento, diminui as emissões de gases poluentes como os CO_2 , NO e CO. Essa característica não sendo confirmada por Krhal, 2006, que ao realizar um estudo da utilização de biodiesel e suas variações notou um aumento na quantidade dos gases de emissões.

Em relação a eficiência de acordo com o estudo do Volpato, 2007, em que houve variações de biodiesel B10, B30, B50 e B70, ocorreu uma redução do consumo específico do motor ao se aumentar a concentração na mistura. Porém o Leite, 2019, além de observar que a redução no consumo específico ao utilizar biodiesel B100, notou que o houve uma redução no torque e na potência. E Reis, 2013, após realizar variações de cargas, notou uma queda na eficiência do motor, devido a uma alteração das propriedades fisicas ao decorrer ddo incremento de biodiesel na mistura.

Sendo assim, temos como objetivo estudar o consumo específico do motor, sua curva de potência e emissões, a partir da simulação de um motor rodoviário de ignição por compressão com injeção direta, comparando-o com diferentes níveis de mistura de biodiesel, como: B0, B20, B40, B60, B80 e B100. No software será gerado uma respectiva

potência, consumo específico, emissões de NOx, CO_2 e SO_2, para respestivas faixas de rotação, para uma análise grafica.

1.1 Objetivo geral

Estudar o consumo específico de combustível, curva de potência e emissões, de um motor rodoviário de ignição por compressão com injeção direta, através de simulações no softaware Diesel-RK, comparando-o com diferentes níveis de mistura de biodiesel, como: B0, B20, B40, B60, B80 e B100. Além disso será realizado a variação de rotações por minuto do motor, para que gráficos de curva de potência, emissões e consumo específico sejam gerados e o estudo seja realizado ao longo de toda faixa de funcionamento do motor.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar a reparação do moto-gerador Heimer Silent 40 kVa presente na universidade;
- Realizar a simulação de um motor diesel 4.4L no software Diesel-RK;
- Realizar variações das misturas de combustíveis no motor diesel simulado, aplicando misturas como B0, B20, B40, B60, B80 e B100;
- Realizar variação nas rotações de funcionamento do motor simulado, a fim de aferir o consumo específico de combustível, potência e emissões, ao longo de toda faixa de funcionamento.

2 Referencial Teórico

2.1 Biodiesel

O uso de combustíveis provenientes de fontes renováveis para motores a combustão pode parecer algo recente, derivado da crise de petróleo dos anos 70 e 80, em que nos demonstraram que a oferta de combustíveis fósseis podem variar de acordo com o controle e as relações políticas entre os países. Porém, em 1900 um motor diesel feito pela "French Otto Company", foi apresentado pelo próprio Rudolf Diesel, em que utilizava óleo de amendoim produzido pelas colônias francesas, este óleo que fora um pedido do próprio governo francês que já naquela época visava não possuir dependências de combustíveis estrangeiros. (KNOTHE et al., 2006).

Sendo assim, o biodiesel é considerado uma alternativa para a substituição do diesel, que é derivado do petróleo, na utilização de motores a combustão do ciclo de compressão. É caracterizado como um combustível biodegradável, renovável e derivado de fontes naturais, principalmente de plantas oleaginosas como: sebo, dendê, girassol, mamona, soja e outras vários oleaginosas existentes. No caso deste estudo consideramos apenas o biodiesel derivado da soja.

O biodiesel é "obtido através da reação de óleos vegetais com um intermediário ativo, formado pela reação de um álcool com um catalisador, processo conhecido como transesterificação". O resultado dessa reação é um éster, que é o biodiesel, e glicerol, um composto orgânico pertencente à função álcool. (OLIVEIRA, 2002)

Da mesma forma KNOTHE et al., (2006) determina que biodiesel é uma gordura animal ou vegetal submetida a uma reação química nomeada de transesterificação, em que o óleo vegetal ou gordura é reagido com um catalisador e um álcool, como metanol, etanol ou isopropanol. Dessa mistura se obtém biodiesel, em que se utilizado metanol se obtém ésteres metílicos e ésteres etílicos se utilizado etanol, além do glicerol.

Por fim, de acordo com a resolução da Agência Nacional do Petróleo (ANP) RESOLUÇÃO ANP Nº 42, DE 24.11.2004: biodiesel é: "biodiesel – B100 – combustível composto de alquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais"

2.2 Processos de obtenção

Atualmente é possível se obter biodiesel de diversas formas possíveis como transesterificação, hidroesterificação, craqueamento térmico, transesterificação enzimática, tran-

sesterificação supercrítica, e esterificação de borras ácidas. Para este estudo será apenas tratado a transesterificação e hidroesterificação, por serem as mais comuns.

2.3 Transesterificação

A transterificação para a produção de biodiesel pode se dar pelas catálises homogêneas ou heterogêneas. Para as catálises homogêneas, há duas divisões: A catálise ácida e a catálise básica. Na catálise ácida são utlizados como catalisadores os ácidos de Brönsted, como os acidos HCl, H_2SO_4 e os ácidos sulfônicos, resultado num grande rendimento, tendo em contrapartida a necessida de um alcool/óleo com alta razão molar, somado de grandes perídos de síntese. Já na catálise básica, são comumente utilizados as bases NaOH e KOH. Por fim na catálise heterogênea por estarem em um estado físico diferente de seu solvente, como zeólitos ou óxidos, além de possuírem a qualidade de serem facilmente separados e ecologicamente adequados (GARCIA, 2006.).

Por meio de escolha e disponibilidade, será abordado os processos de transterificação dado pela catálise básica. Portanto para a produdação do biodiesel tem-se as seguintes etapas: Preparação da matéria prima, reação de transesterificação, separação de fases, recuperação do álcool e a purificação da glicerina e ésteres (PARENTE, 2003.).

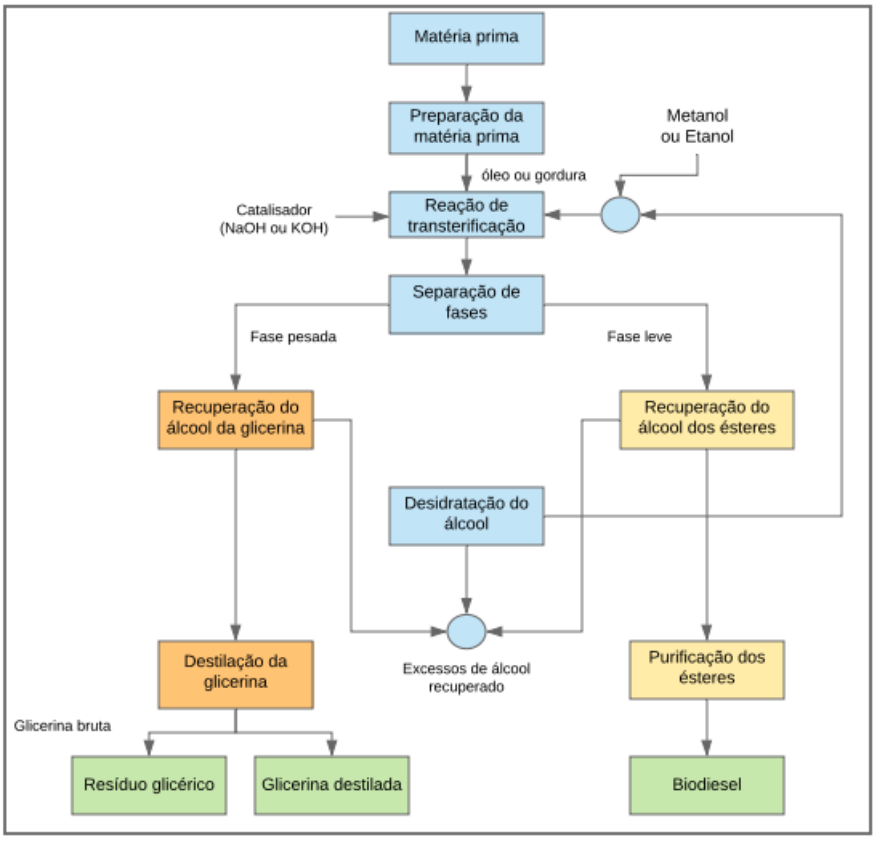

Figura 1 – Processo de Transesterificaçao para o meio básico. PARENTE, (2003).

2.3.1 Preparação da matéria prima

Para se obter uma máxima taxa de conversão e uma efetivação da reação de transesterificação a matéria prima deve ser separada e preparada de forma correta. Sendo assim, se faz com que a matéria prima tenha baixo nível de umidade e acidez, para que a reação tenha melhores condições de efetivação do processo transterificação, para a máxima taxa de conversão evitando reações secundárias como processos de saponificação, além da possível hidrólise dos triglecerídeos. Dessa forma a matéria prima é submetida a um processo de neutralização, em que a mesma é lavada com soluções de hidróxido de sódio ou potássio e seguida para um processo de secagem. (PARENTE, 2003.)

2.3.2 Reação de transesterificação

Após a preparação da matéria prima, segue-se para a adição dos alcoóis (metanol e etanol), para que conversão dos triglicerídios em acídos graxos e ésteres metílicos e etílicos ocorram, conforme mostra a Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Reação de transesterificação

Óleo vegetal ou gordura + Metanol	Ésteres Metílicos + Glicerol
Óleo vegetal ou gordura + Etanol	Ésteres Etílicos + Glicerol

Como o Brasil é um grande produtor de etanol, o mesmo está sendo estimulado para a utilização na conversão do óleo vegetal em biodiesel, garantindo o mesmo resultado que o metanol, pois as reações químicas se equivalem e por possuírem o mesmo resultado ambas são consideradas biodiesel (PARENTE, 2003.). Porém de acordo com KNOTHE et al., (2006), ésteres produzidos com a utilização do etanol e isopropanol podem apresentar qualidades superiores aos produzidos com metanol, mas são necessárias maiores quantidades de combustível em relação ao metanol, tornando o processo do metanol mais barato. Outro fator importante a ser salientado é que no Brasil o processo por utilizar etanol derivado da cana de açúcar torna o processo completamente natural e renovável, enquanto o resto do mundo utiliza metanol, que é um derivado do petróleo.

Em relação aos catalisadores para a reação por meio do processo básico, podem ser utilizados hidróxidos de sódio ou potássio. A diferença no resultado de ambos é considerada relativamente pequena e sua escolha é geralmente feita por fatores econômicos e de oferta. No Brasil é mais utilizado hidróxido de sódio por possuir um custo menor quando comparado com o hidróxido de potássio. Mas a escolha dos mesmos podem variar dependendo do caso em que serão utilizados.

De acordo com a PORTARIA ANP Nº 255, DE 15.9.2003 é recomenda utilizar cerca de 10 mg de catalisador para cada quilo de matéria prima. Importante informar que quanto maior a quantidade de catalisador, maior será a reação destes com os ácidos graxos

livres do óleo vegetal ou da gordura, gerando uma maior saponificação. Portanto voltamos ao tópico de preparação da matéria prima, mostrando a relevância de se diminuir a acidez da matéria prima.

Logo o processo se dá pelo aquecimento da matéria prima a 60°C se o metanol for utilizado ou 85°C para o etanol, durante a fase a de aquecimento, após a matéria atingir a temperatura ideal o combustível reagente é adicionado e a mistura deve permanecer sob agitação por 45 minutos se metanol e 90 minutos se for etanol. Após a conclusão dessa etapa, a mistura é transferida para o processo de separação de fases.

Figura 2 – Reações de Transesterificação. PARENTE, (2003).

2.3.3 Separação de fases

O processo de separação de fases pode ser feito através de decantação ou centrifugação (PARENTE, 2003.). Essa parte é muito importante, pois nela é que será separado o biodiesel (ésteres) da glicerina (glicerídios), constituindo dessa forma duas fases:

- Fase mais densa: é constituída de glicerina impregnada com álcool, água e impurezas inerentes da matéria prima.
- Fase menos densa: é constituída dos ésteres, que variam de acordo com o álcool utilizado, e também impregnada com excessos de álcool e impurezas.

2.3.4 Recuperação e desidratação do álcool

Após a separação de fase é necessário eliminar o excesso de álcool tanto da glicerina, pois é um produto que pode ser direcionado para indústria farmacêutica, quanto do biodiesel, pois esse excesso de álcool por ser muito volátil interfere na qualidade do combustível. A recuperação também importante pelo fato de reutilizar o alcóol para processos futuros de transesterificação.

A recuperação se dá de forma igual para ambos os produtos, porém feitos de maneira separada, que consiste na evaporação dessa matéria volátil em condensadores, cujo os vapores são direcionados para destiladores, pois esse mesmo álcool por conter excessos de água, se tem a necessidade de uma desidratação.

O processo de desidratação é feito pelo processo de destilação, sendo aplicada tanto para o metanol quanto para o etanol. O processo de destilação para o metanol consiste em uma destilação simples pois a volatilidade relativa é considerada alta.

Porém, para casos em que se utiliza etanol, devido a formação de um azeótropo entre o etanol e a água. Dessa forma uma das soluções é a adição de componentes de arrasto, para que se forme um novo azeótropo heterogêneo. O benzeno é o mais utilizado para essa função quando se trata de álcool etílico, pois forma um novo azeótropo que torna possível após a destilação a obtenção de álcool anidro.

2.3.5 Purificação dos ésteres

Nesta etapa os ésteres devem ser lavados em centrifugação e posteriormente desumidificados. Após esse processo o biodiesel deve ser enquadrado em certas normas técnicas de qualidade. No Brasil o biodiesel deve seguir as especificações, para o B100, de acordo com a RESOLUÇÃO ANP Nº 14, DE 11.5.2012 - DOU 18.5.2012

2.3.6 Purificação da Glicerina

A glicerina bruta mesmo ainda depois de passar pela retirada de álcool e água pelo processo de condensação pode conter ainda quantidade de água e impurezas em suas características, sendo assim, é de interesse a realização de destilação a vácuo, porque dessa forma se obtém uma glicerina com 99% de pureza, que é altamente comercializável para indústria farmacêutica (PARENTE, 2003).

2.4 Hidroesterificação

Outra alternativa para a obtenção de biodiesel é através do processo de hidroesterificação, em que é formado por duas etapas uma de hidrólise e outra de esterificação dos ácidos graxos conforme apresentado na figura 3

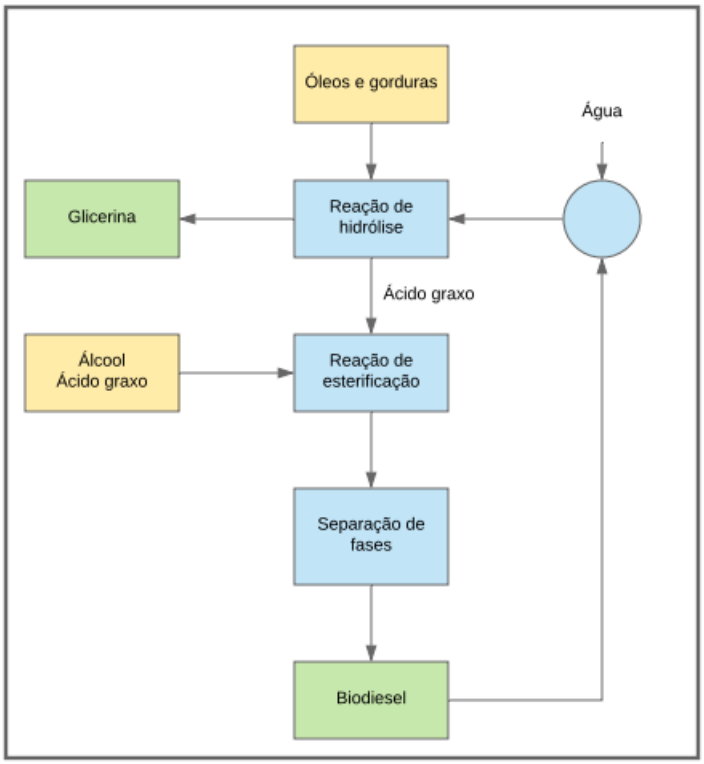

Figura 3 – Esquemático da hidroesterificação. PARENTE, (2003).

Este processo tem uma grande vantagem em relação a transesterificação devido a possibilidade da utilização de qualquer matéria prima oleaginosa, independente de seu nível de acidez e umidade, evitando-se assim os processos de neutralização e secagem da matéria graxa.

2.4.1 Reação de Hidrólise e esterificação

A hidrólise é a quebra de uma molécula pela ação da água, em que a mesma libera íons H+ e OH-. Quando a molécula é quebrada uma parte recebe o átomo de hidrogênio H+, enquanto a outra recebe a hidroxila, conforme a seguinte equação:

$$XY + H_2O \rightarrow HY + XOH \tag{2.1}$$

Para os triglicerídios, da matéria prima que será convertida em biodiesel, se tem a mesma reação, em que quando reagidos com a água em pressão e temperaturas específicas, algo em torno de 300°C e 7000 kPa, geram como produtos, ácidos graxos e glicerinas. Ao contrário do processo de transesterificação, ao se realizar a hidrólise, independente das características da matéria prima, se tem um produto com 99% de acidez, que nos mostra uma vantagem, pois essa acidez impede o processo de saponificação da glicerina, além de fornecer um ácido graxo e uma glicerina bem mais pura, ou seja, sem a presença de sais,

álcoois e impurezas, como acontece na transesterificação, evitando-se também o processos de purificação e de recuperação.

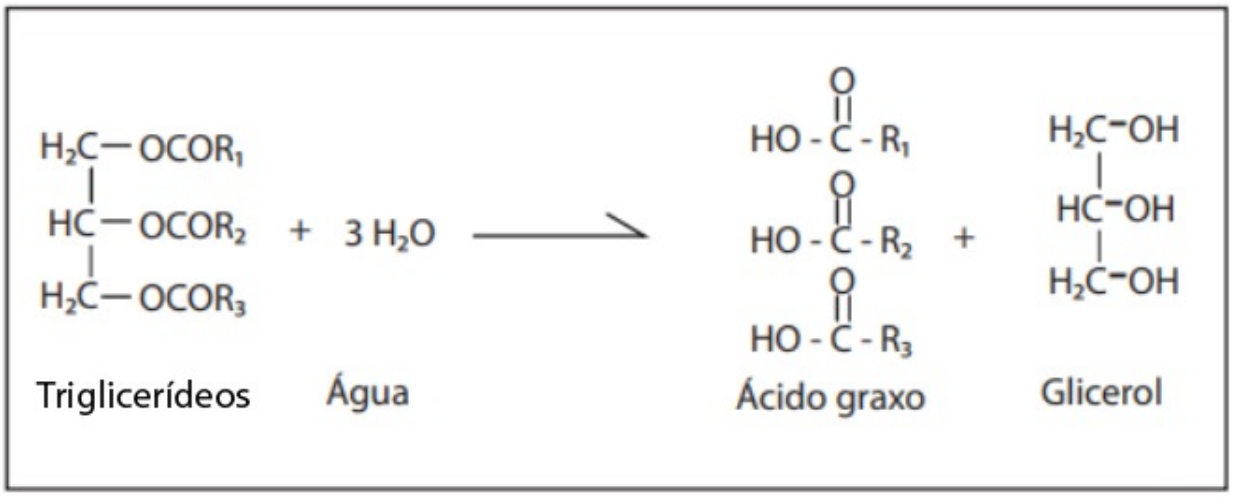

Figura 4 – Reações de Hidrólise. PARENTE, (2003).

Como podemos observar na figura 4, após o processo da hidrólise, há como produtos ácidos graxos e glicerina, e então, ambos são separados. A glicerina devido ao alto grau de pureza é destinada para seus mercados em específico, enquanto os ácidos graxos são transferidos para a etapa de esterificação, consequentemente transformados em biodiesel.

Após a separação, os ácidos graxos sofrem o processo de esterificação, reação com um álcool, para a formação de biodiesel. Devido ao processo de hidrólise, os ácidos graxos estão com um pH demasiado elevado, porém ao reagirem com o metanol ou etanol, sofrem um processo de neutralização e liberação de água que pode ser reaproveitada para o processo de hidrólise novamente.

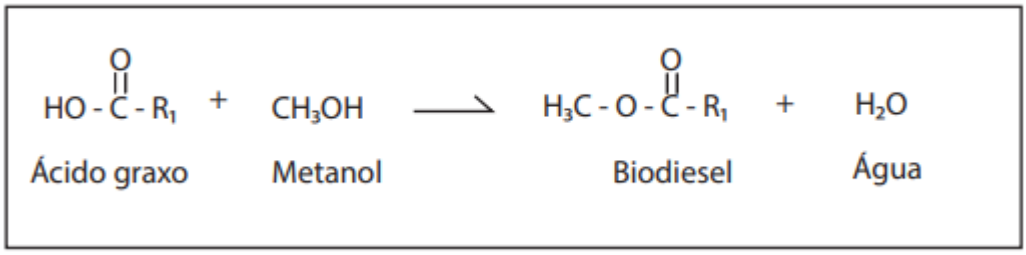

Figura 5 – Reaproveitamento no processo de hidrólise. PARENTE, (2003).

2.4.2 Propriedades físico-química

Para produzir e usar o biodiesel no Brasil, algumas normas devem ser cumpridas, para gera maior segurança e qualidade para o consumidor nacional e internacional.

A especificação dos padrões de qualidade do biodiesel no Brasil e realizada pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR15512 (ABNT) e normas internacionais como a American Society for Testing and Materials D6751 (ASTM), sendo estas regulamentadas pela ANP em 2008, sendo a vigente a ANP 734 - 2018.

2.4.2.1 Propriedades físicas do biodiesel

Como informado a padronização é de extrema importância para a manutenção da qualidade dos combustíveis em todo o mundo, dessa forma a ANP decidiu regulamentar as seguintes propriedades físicas do biodiesel:

- **Ponto de fulgor:** Representa a temperatura necessária para que um líquido se torne inflamável em presença de uma chama ou faísca. Propriedade importante para a segurança nos transportes, manuseios e armazenamentos.
- **Poder calorífico:** Representa a quantidade de energia desenvolvida pelo combustível por unidade de massa (KJ/Kg), quando este entra em combustão. Esta propriedade é diretamente relacionada com eficiência energética de um veículo.
- **Ponto de Névoa e de Fluidez:** O ponto de névoa e a temperatura em que o combustível, começa a ficar turvo, entretanto o ponto de fluidez representa a temperatura em que o combustível não escoa livremente. Propriedades relacionadas com a temperatura do ambiente em que se utiliza o combustível, pois afeta diretamente no funcionamento do motor.
- **Viscosidade e Densidade:** Estas propriedades fluidodinâmicas do combustível estão relacionadas com a circulação e a injeção no motor de injeção por compressão.
- **Índice de Cetano:** Propriedade que caracteriza o nível de combustão do diesel e do biodiesel. Quanto mais alto for este valor melhor será a combustão do combustível utilizado.

2.4.2.2 Propriedades Químicas do biodiesel

Já para as propriedades químicas as seguintes características devem ser respeitados:

- **Teor de Enxofre:** Os óleos vegetais e as gorduras de animais não possuem enxofre em sua composição, assim o biodiesel é completamente isento desse elemento.
- **Teor de Óxidos Nítricos (NOx):** Em relação ao diesel, o biodiesel apresenta um aumento nas emissões de NOx. Um dos fatores relacionados a este aumento pode ser atribuída a sua forma de fabricação.

- **Poder de Solvência:** O biodiesel solubiliza muitas substâncias orgânicas, devido sua constituição composta de mistura de ésteres de ácido carboxílicos.

- **Biodegradabilidade e Toxicidade:** O biodiesel se mostrou altamente biodegradável em uma simulação de derramamento no solo. Com a degradação ocorrendo de 4 a 6 semanas. Porém durante esse período de biodegradação, houve um rápido crescimento de microorganismo que prejudicaram o crescimento vegetal no solo. Quanto a toxidade o biodiesel apresenta uma menor taxa em relação ao biodiesel devido a sua composição.

- **Estabilidade Oxidativa:** O biodiesel e suscetível à oxidação quando exposto ao ar. Esta propriedade pode ser associada a existência das ligações insaturadas nas cadeias carbônica provenientes dos ácidos graxos, fato que pode comprometer a armazenagem e utilização do combustível. Essa oxidação do biodiesel podem formar ácidos orgânicos, água, peróxidos e produtos de polimerização, que são responsáveis pelo ataque de peças do motor, reduzindo o seu tempo de vida útil. A tabela 2 lista os principais defeitos que podem ser causados ao motor.

Tabela 2 – Biodiesel de Soja: Síntese, Degradação e Misturas Binárias. Roberlucia, (2008).

Caracteristica do combustivel	**Efeito**	**Falha**
Ésteres metilicos de ácidos graxos	Causa a corrosão e Ruptura dos elastômeros	Fuga de combustevel.
Metanol livre	Corrói o aluminio e o zinco; Baixa o ponto de inflamação.	Corrosão.
Catalisador	Compostos de sódio e potássio; Particulas sólidas	Entupimento dos injetores.
Água dissolvida	Formação de ácidos graxos	Entupimento dos filtros.
Água livre em misturas	Corrosao; Permite a existência de bactérias; Aumenta a condutividade elética.	Corrosão e Formação de depósitos.
Glicerina livre, mono e diglicerídeceos	Corroi metais não ferrosos; Ensopa os filtros de celulose; Sedimentação em partes móveis.	Entupimento dos filtros e coquefação nos injetores.
Ácidos graxos livres	Promove a corrosão do zinco; Formação de sais de ácidos graxos e de outros compostos orgânicos.	Corrosão, entupimento dos filtros e formação de depósitos.
Alta viscosidade	Gera excessivo calor, localizado nas bombas de distribuição; Maior tensão entre componentes.	Falhas em bombas e pobre atomização do combustivel.
Impurezas sólidas	Problemas de lubricidade.	Reduzido tempo de serviço.
Ácidos corrosivos (fórmico & acético)	Corrói todos as partes metálicas.	Corrosão
Produtos de polimerização	Forma depósitos.	Entupimento dos filtros e Formação de depósitos.

2.5 Princípio de funcionamento motor de ignicao por compressão

O funcionamento do motor de ignição por compressão (ciclo diesel) se difere do funcionamento de um motor de ignição comandada (ciclo Otto), devido este não possuir um sistema de preparação da mistura exterior nem sistema de ignição para realizar a combustão.

Seu funcionamento se dá pela aspiração do ar para o interior dos cilindros, que recebe a injeção de combustível em um meio sob pressão e temperaturas elevadas. Devido a alta pressão presente no cilindro, o ar se encontra em uma temperatura elevada que faz com que o combustível entre em auto-ignição no momento da injeção (fase final da compressão). Essa ignição faz com que pistão se desloque, gerando trabalho. MARTINS, (2006)

O combustível comumente utilizado é o Diesel comercial encontrado em postos de combustíveis, porém, podem se utilizar óleos de origem animais e vegetais, comumente chamados de biodiesel, além de carvão em pó e gases naturais.

Os motores ignição por compressão podem ser fabricados como sendo 2 tempos ou 4 tempos, dependendo se sua aplicação, portanto para compreender seu funcionamento, deve-se entender as diferentes fases do ciclo do motor, para que sua faixa de operação e eficiência possa ser determinada. As fases de ambos os motores são mostradas e descritas a seguir

2.5.1 Motor 4 tempos

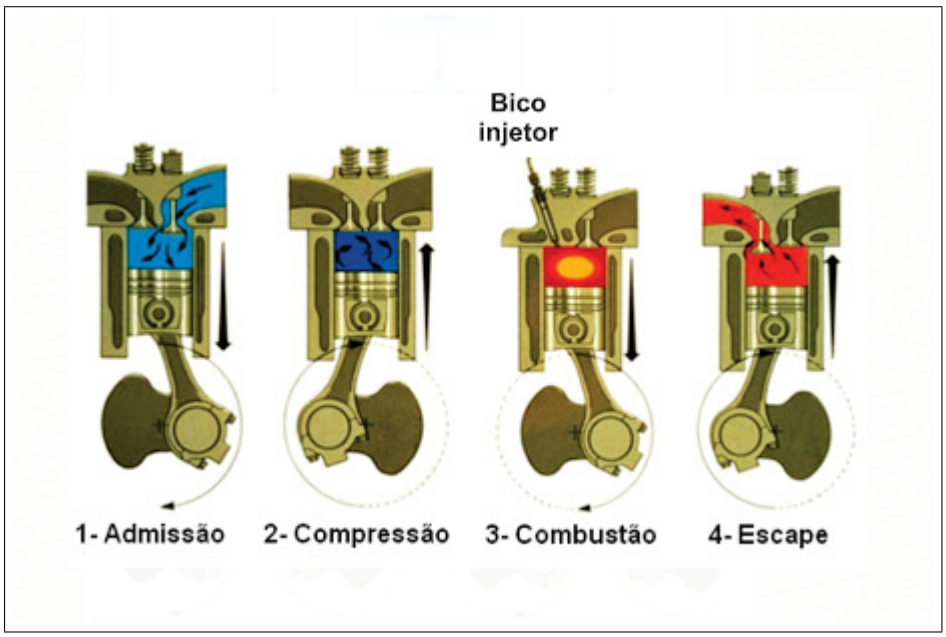

Figura 6 – Os 4 tempos do motor de ignição por compressão (Ciclo diesel).

- **Admissão:** O pistão parte do PMS, descendo até o PMI. A válvula de admissão encontra-se a aberta durante este admitindo ar puro dentro do cilindro.
- **Compressão:** Com ambas as válvulas fechadas, o pistão sobe até PMS comprimindo o ar puro encerrado no cilindro.
- **Combustão - Expansão:** No PMS ou antes, o combustível é injetado no seio do ar comprimido, inflamando-se espontaneamente no contacto com este. A injeção contínua durante parte da descida do pistão, sendo este o tempo do motor.
- **Escape:** Após a combustão é quando o pistão chega ao PMI a válvula de escape abre-se liberando os gases para a atmosfera, através do sistema de escape, durante a subida do pistão.

2.6 Ciclo teórico a pressão constante

Neste tópico é analisado o ciclo teórico do ciclo diesel, com isto é necessário o entendimento dos gráficos p-V e T-S do ciclo, para realizar os cálculos da eficiência teórica do ciclo, determinada pela pressão, volume, temperatura e entropia do sistema.

Os diagramas p-V e T-S do ciclo diesel podem ser vistos na figura 8.

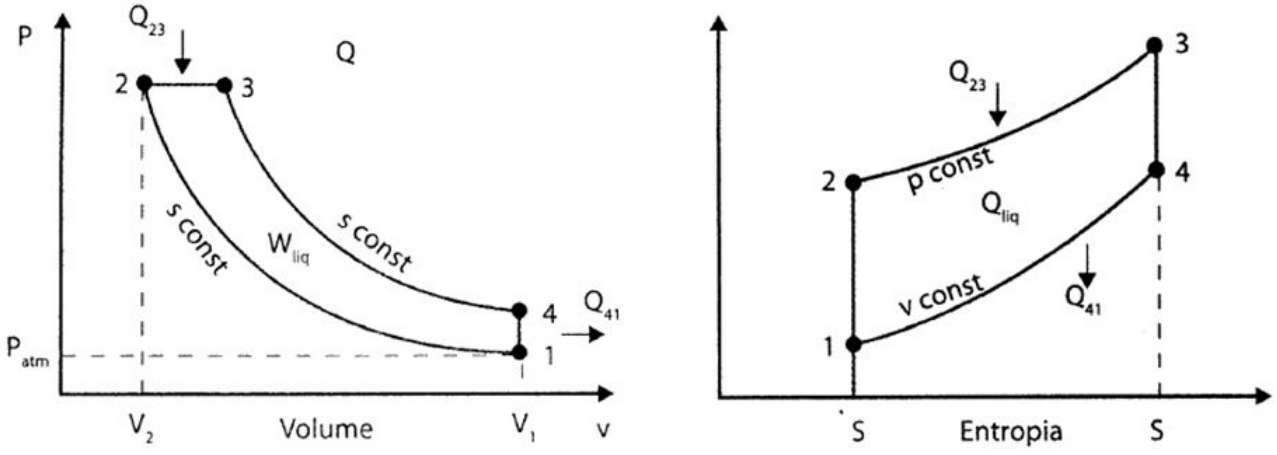

Figura 7 – Diagramas p-V e T-S ciclo Diesel teórico.

Analisando os diagramas acima pode- se identificar as seguintes transformações do ciclo:

- **1 - 2 Adiabática (isentrópica):** Compressão do ar, fornecendo-se o trabalho, que aumenta a energia interna do sistema (área debaixo da linha 1 - 2 do diagrama p-V).

- **2 - 3 Isobárica:** Injeção do combustível e queima durante o aumento do volume, seguindo um processo de fornecimento de calor a pressão constante.
- **3 - 4 Adiabática:** O fluido e expandido realizando o trabalho W a custa da sua energia interna, definido pela área limitada superiormente pela linha 3-4, do diagrama p-V.
- **4 - 1 Isocórica:** corresponde a perda de calor.

2.6.1 Cálculo da rendimento ciclo diesel teórico

Para realizar a dedução das equações do cálculo teórico do rendimento do ciclo diesel é necessário analisar os diagramas P-v e T-s do ciclo, onde na área 1-2-3-4 do diagrama P-v temos W_c (ou trabalho líquido W_{liq}) e na área 1-2-3-4 do diagrama T-S temos Q_u= Q_{23} - Q_{41} = W_c

Logo para determinar o rendimento térmico utilizaremos a seguinte expressão:

$$\eta_t = \frac{\mathrm{W_c}}{\mathrm{Q_{23}}} = 1 - \frac{\mathrm{Q_{41}}}{\mathrm{Q_{23}}} \tag{2.2}$$

Utilizando da primeira lei da termodinâmica:

$$\mathrm{Q_{23}} - \mathrm{W_{23}} = \mathrm{U_3} - \mathrm{U_2} \tag{2.3}$$

Como o processo do ciclo e isobárico temos:

$$\mathrm{Q_{23}} = \int_2^3 p.dv = p.(\mathrm{V_3} - \mathrm{V_2}) \tag{2.4}$$

Logo substituindo a equação (2.4) na (2.3) e agrupando os termos chega a seguinte equação:

$$\mathrm{Q_{23}} = (\mathrm{U_3} + p.\mathrm{V_3}) - (\mathrm{U_2} + p.\mathrm{V_2}) \tag{2.5}$$

Pela definição da entalpia e admitindo o sistema como gás ideal, determinamos os calores do ciclo como:

$$\mathrm{Q_{23}} = m.\mathrm{C_p}.(\mathrm{T_3} - \mathrm{T_2}) \tag{2.6}$$

$$\mathrm{Q_{41}} = m.\mathrm{C_v}.(\mathrm{T_4} - \mathrm{T_1}) \tag{2.7}$$

Logo substituindo as equações (2.6) e (2.7) na expressão (2.2) chega-se no seguinte resultado:

$$\eta_t = 1 - \frac{\mathrm{m.C_v.(T_4 - T_1)}}{\mathrm{m.C_p.(T_3 - T_2)}} = 1 - \frac{1}{\mathrm{k}}.\frac{\mathrm{T_1}}{\mathrm{T_2}}.[\frac{\frac{\mathrm{T_4}}{\mathrm{T_1}} - 1}{\frac{\mathrm{T_3}}{\mathrm{T_2}} - 1}] \tag{2.8}$$

Onde $k = C_p/C_v$, que representa o coeficiente de expansão adiabatica. Pela definiçao da compressão e expansão isoentropica, tem-se:

$$\frac{\mathrm{T_2}}{\mathrm{T_1}} = (\frac{\mathrm{V_1}}{\mathrm{V_2}})^{(k-1)} \quad e \quad \frac{\mathrm{T_4}}{\mathrm{T_3}} = (\frac{\mathrm{V_3}}{\mathrm{V_4}})^{(k-1)} \tag{2.9}$$

Agrupando os termos das equações (2.9) tem-se:

$$\frac{\mathrm{T_2.T_4}}{\mathrm{T_1.T_3}} = (\frac{\mathrm{V_1.V_3}}{\mathrm{V_2.V_4}})^{(k-1)} \tag{2.10}$$

Contudo pela analise do ciclo diesel temos que $V4 = V1$ e $V_3/V_2 = T_3/T_2$, assim reagrupando e organizando os termos na equação (2.10) chega-se na seguinte expressão:

$$\frac{\mathrm{T_4}}{\mathrm{T_1}} = (\frac{\mathrm{T_3}}{\mathrm{T_2}})^{k} \tag{2.11}$$

Logo a expressão para determinar o rendimento térmico do ciclo diesel teórico é dada pela seguinte expressão:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\mathrm{k}}.(\frac{\mathrm{V_2}}{\mathrm{V_1}})^{k-1}.[\frac{(\frac{\mathrm{T_3}}{\mathrm{T_2}})^{k} - 1}{\frac{\mathrm{T_3}}{\mathrm{T_2}} - 1}] \tag{2.12}$$

Assim denominamos a relação de combustão a pressão constante, dada pela relação entre os volumes no ponto 3 e 2 do ciclo como:

$$\delta = \frac{\mathrm{V_3}}{\mathrm{V_2}} = \frac{\mathrm{T_3}}{\mathrm{T_2}} \tag{2.13}$$

Observando a equação (2.12), o rendimento do ciclo de Diesel teórico depende não somente da taxa de compressão, mas também da relação de combustão a pressão constante (δ). Na realidade δ representa a quantidade de combustível injetado na câmara de combustão, pelo que o rendimento do ciclo de Diesel teórico depende da carga do motor. (Martins, 2006)

Contudo o rendimento do ciclo teórico pode variar com a sua carga, resultando no ciclo diesel com as cargas parciais, onde quanto maior a carga menor será o rendimento do ciclo, pode-se observar a representação do diagrama p-V na figura 9.

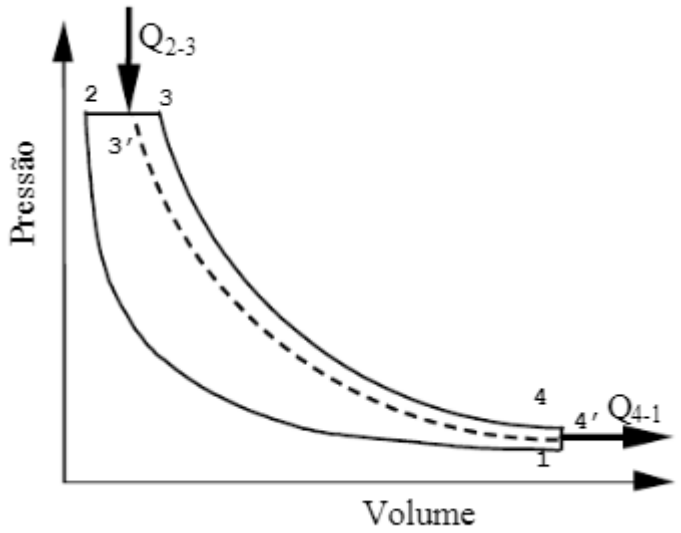

Figura 8 – Ciclo Diesel teórico para carga parcial. Martins, (2007).

Analisando o ciclo da Figura 9 pode-se calcular o rendimento do ciclo com carga parcial pelas seguintes equações:

$$\Phi = \frac{(\mathrm{A/F})_{\mathrm{est}}}{(\mathrm{A/F})} \tag{2.14}$$

Em que:

$$A(\Phi) = \frac{1 + (\mathrm{K}-1)\mathrm{Q_{pc}}}{\mathrm{KRT_1}\epsilon^{(\mathrm{K}-1)}} * \frac{\Phi}{1 + (\mathrm{A/F})_{\mathrm{est}}} \tag{2.15}$$

$$\eta_d = 1 - (\frac{1}{\varepsilon})^{k-1} * \frac{\mathrm{A}(\Phi)^{\mathrm{k}-1}}{\mathrm{K}(\mathrm{A}(\Phi) - 1)} \tag{2.16}$$

Com isto podemos observar, que o rendimento aumenta com a diminuição da carga solicitada, pois a menor quantidade de calor fornecida ao ciclo ocasiona em menor pressão e temperatura, assim perdendo menos entalpia no processo.

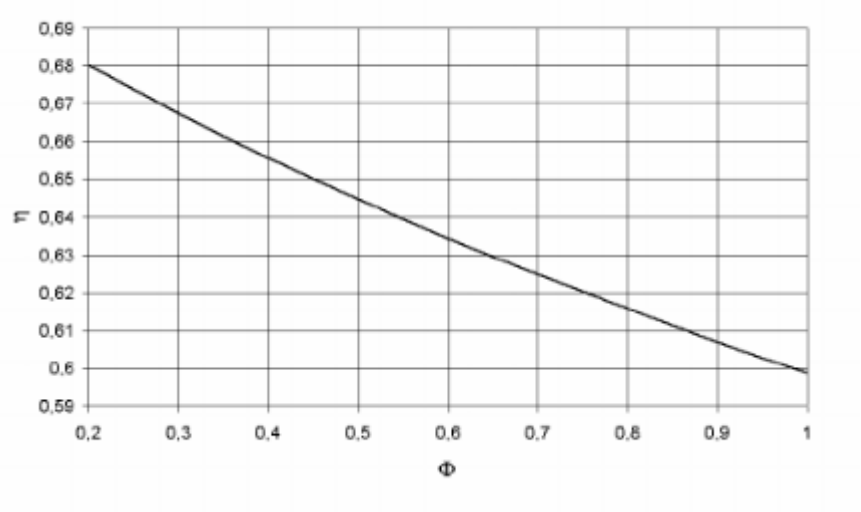

Figura 9 – Redução do rendimento em funçao do aumento da carga no ciclo teórico. Martins, (2007).

2.6.2 Ciclo Misto teórico

O ciclo misto ou de sabathé mostra uma maior aproximação o funcionamento teórico dos motores diesel atuais, logo o fornecimento de calor supõe-se em duas etapas uma a volume constante e a outra a pressão constante, onde pode ser visto nos motores atuais como o resultado de pré-injeções na câmara de combustão antes da ignição espontânea do combustível.

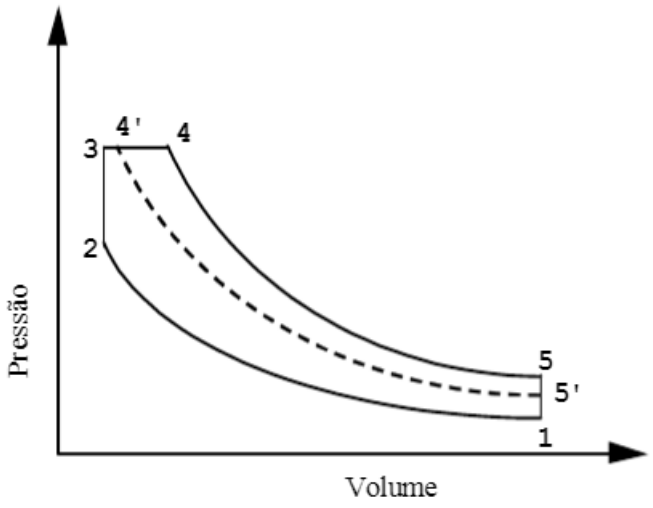

Figura 10 – Diagrama p-V do ciclo misto ou de sabathé teórico. Martins, (2007).

Assim como no ciclo a pressão constante o ciclo misto tem sua variação no rendimento teórico com a variação da carga no motor, logo para o melhor rendimento teórico é necessário menor carga, sendo variada exclusivamente pela extensão do fornecimento de

calor a pressão constante. Isto é observado na Figura 12, para uma taxa de compressão de 18:1.

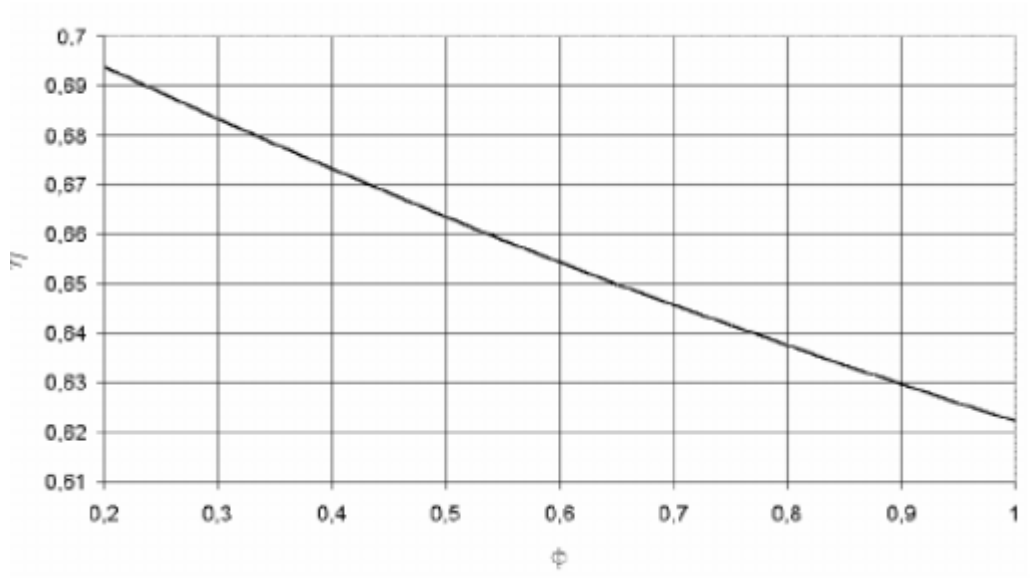

Figura 11 – Redução do rendimento em funçao do aumento da carga para o ciclo misto teórico. Martins, (2007).

2.7 Constituição de um motor diesel

Motores são máquinas térmicas constituídos da junção de vários componentes para seu funcionamento, dessa forma podemos dividir em 3 grandes conjuntos, sendo que cada um abriga sistemas que em conjunto determinam o funcionamento do motor:

Os seguintes conjuntos abrigam basicamente cada um dos sistemas:

- **Cabeçote:** se encontram as válvulas, comando de válvulas e os bicos injetores, sensores;
- **Bloco do motor:** cilindros, pistões, virabrequim, bielas, bomba de combustível, bomba d'água, sensores;
- **Cárter:** armazena o óleo e a bomba de lubrificação.

2.7.1 Sistema de injeção motor diesel

Devido a este estudo possuir como finalidade a comparação entre o diesel e o biodiesel feito de soja, a única parte que sofrerá alguma alteração significativa em seu funcionamento é o sistema de injeção, que tem como função:

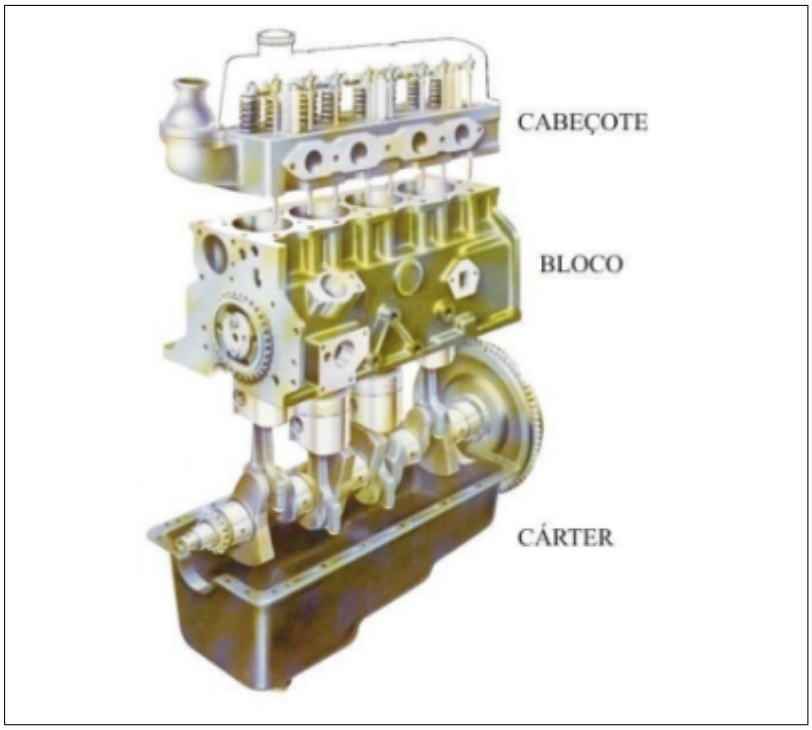

Figura 12 – Representação das partes do motor a combustao interna. VARELLA,(2010)

- Realizar a distribuição de combustível para cada cilindro conforme a necessidade em relação a carga e a combustão;
- Pulverizar o combustível de forma que a mistura e a combustão ocorram de forma completa;
- Realizar a injeção no tempo desejado, mesmo com variação da velocidade;
- Ter controle total da entrada do combustível, mesmo após o desligamento, evitamento gotejamento.

Dessa forma podemos definir que a função do sistema de injeção é extrair o combustível, no caso diesel ou biodiesel, do tanque de combustível através do uso de uma bomba injetora, em que a mesma envia o combustível pelos tubos para os bicos e consequentemente para os cilindros do motor.

Os sistemas de injeção existentes são os mais variados possíveis, sendo eles:

- sistema de bomba em linha;
- sistema modular de bomba individual;
- unidade injetora tipo bomba-bico;
- unidade injetora tipo bomba-tubo-bico;

- sistema de bomba rotativa ou distribuída.

O motor estudado que é o modelo Perkins 1104A-44G com injeção direta, utiliza o sistema de bomba rotativa ou distribuída, sendo assim, vamos nos atentar a somente esse sistema.

2.7.2 Sistema de bomba rotativa ou distribuída

Este sistema utiliza uma bomba rotativa ou distribuída, está possuem um rápido funcionamento, e de dimensões inferiores às bombas de injeção em linha. Sua aplicação e relacionada com motores diesel de baixa potência específica, como em motores estacionários, tratores, geradores e automóveis, isto é decorrente devido sua menor capacidade volumétrica em relação às bombas em linha.

A bomba rotativa é acionada pelo giro motor, por um único pistão, acionado por um eixo ligado a um prato com perfil ondulado, como mostrado na figura 16, que realiza o movimento de vai e vem do êmbolo, onde este pressuriza e distribui o combustível para cada um dos injetores do motor por meio do distribuidor da bomba. (Martins, 2006)

Por possuir uma construção mais compacta e sua lubrificação ser realizada pelo próprio combustível usado no motor, excluindo a necessidade de um sistema de lubrificação suplementar, a torna mais vulnerável a combustíveis contaminados e de baixa qualidade, assim tornando sua manutenção mais periódica. (BRUNETTI, 2010)

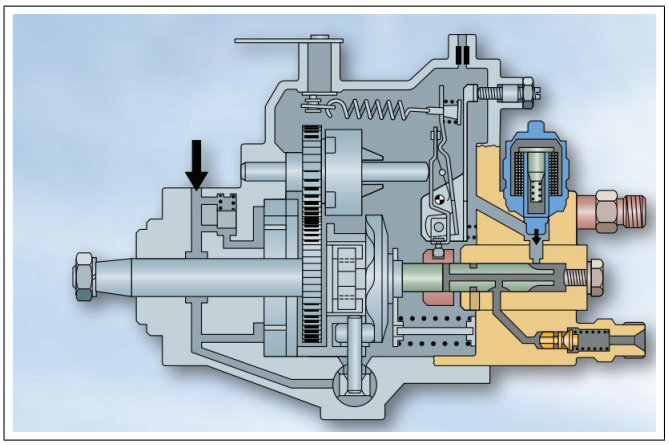

Figura 13 – Componentes internos da bomba rotativa. Fonte: autopeças Bosch

2.7.3 Bicos Injetores

Os bicos injetores são responsáveis pela injeção de forma pulverizada do combustível na câmara de combustão, proporcionando uma combustão completa .Uma maior eficiência e economia de combustível são alcançadas quando se tem uma melhor pulverização do combustível e atomização, tendo como resultado uma melhor qualidade nos

Figura 14 – Prato de perfil ondulatório. Fonte: cnducoo.com

gases de emissão. Os bicos mais tradicionais mostrado na Figura 15 são totalmente mecânicos, que se abrem devido a aplicação do combustível pressurizado, que incide sobre a extremidade do bico, enquanto no lado oposto, existe uma mola que tem como função manter a agulha fechada. (MARTINS, 2006)

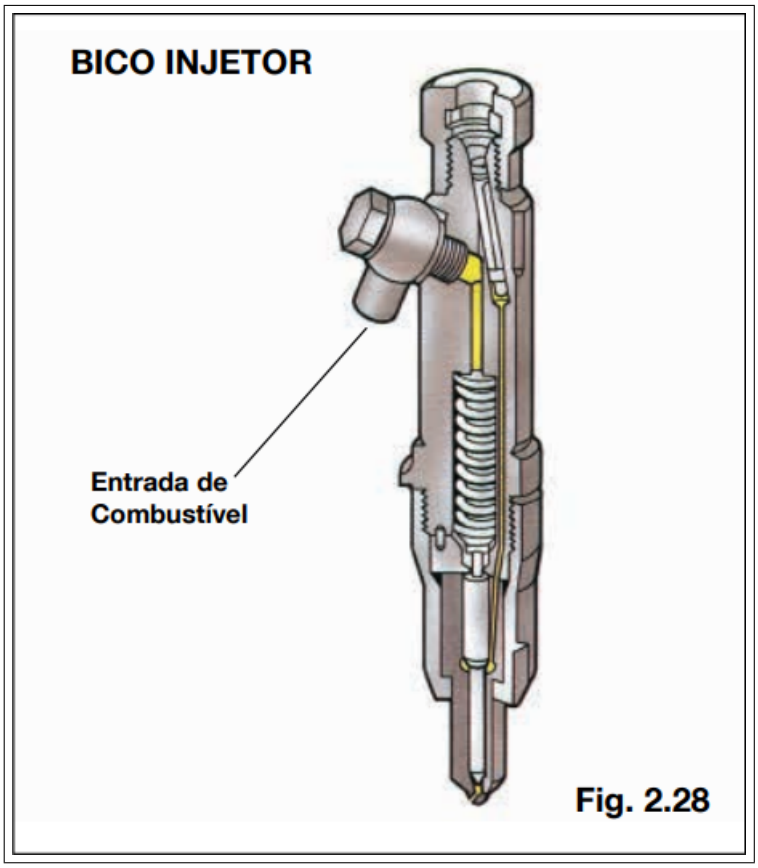

Figura 15 – Modelo bico injetor mecânico. Fonte:CURSO MAHLE METAL LEVE (2019)

Descrito o funcionamento do bico, existem dois tipos de bicos, os salientes (usadas em motores de câmara auxiliar) e os cônicos (utilizados em motores de injecção directa). Os bico cônicos possuem uma pulverização muito superior aos salientes, porém necessita de uma pressão superior para que funcione de forma eficaz. Ele tem como característica a pulverização de forma radial como mostrado na Figura 16, cobrindo toda a câmara de combustão, sendo essa a forma mais eficiente. (MARTINS, 2006)

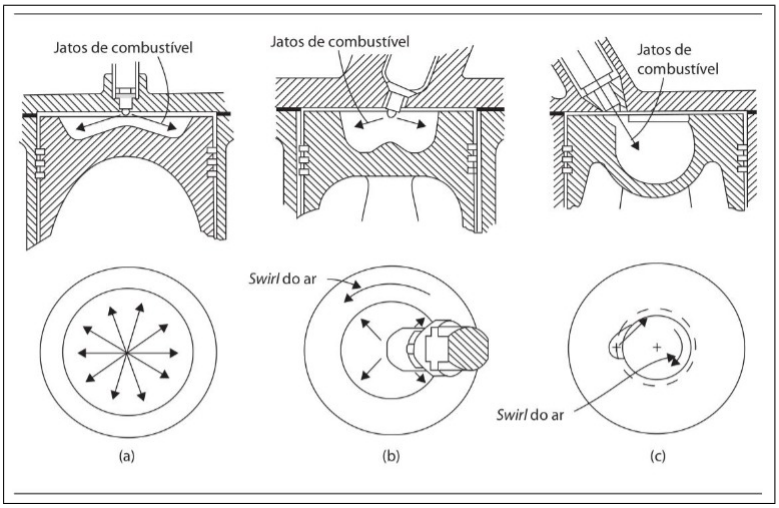

Figura 16 – Modelo de Spray de um bico injetor na camara de combustão. Brunetti, (2012)

3 Metodologia

A construção do estudo se deu por três etapas:

Inicialmente o motor a ser estudado se encontra atualmente na Universidade de Brasília, Campus Gama (FGA), em que foi identificado o modelo e fabricante visualmente mostrados no equipamento, logo após fora obtido os dados e especificações do motor, para realização do reparo do sistema danificado e manutenção do equipamento, porém com a atual pandemia gerada pelo COVID-19, e com a interrupção das aulas presenciais, não será possível a operação do motor que se apresenta na universidade, assim foi determinado um modelo em que será simulado um motor similar ao presente estudo, após a obtenção de dados das especificações técnicas e geométricas do motor, como mostra a Tabela 3 abaixo.

Em seguida, foi obtido as propriedades físico químicas de cada combustível a ser utilizado, como o B0, B20, B40, B60, B80 e B100.

Terceiro, os dados foram colocados dentro do software, que simulará o ciclo diesel, como explicado no capítulo 2, com as variações de rotações e combustiveis propostos.

3.1 Especificações e dados técnicos do motor

Para o motor simulado, sua construção teve dados que foram fundamentados no motor Perkins 1104, em que foi retirado a maioria dos dados de seu manaul de reparação. Contudo, alguns valores geométricos, não constava no mesmo. Dessa maneira, escolheu-se o caminho de utilizar-se dos valores padrões do programa, para que houvesse uma padronização na simulação. Dessa maneira, se obteve um motor experimental para que fosse possível a obtenção e verificação dos resultados. Segue abaixo os dados técnicos do motor diesel:

Tabela 3 – Especificações do motor

Ciclo do motor	4 tempos
Tipo de injeção	DI Diesel
Tipo de motor	linha
Quantidade de cil.	4
Refrigerção	liquida
Diametro do cilíndro	105 mm
Curso do pistão	127 mm
Rotação nominal	1800 Rpm
Compressão do motor	19:1
Aspiração	Natural
Numero de valvulas	2 por cili.
Pressão de injeção	294 bar
Relação R/L	0,289
Tamanho da biela	219 mm
Quantidade de aneis no pistão	3 aneis
Material do cilindro	Ferro
Espessura do pistão	10 mm
Design do pistão	PAN
Tempo de injeção	70 Graus
Diâmetro do furo do bico	0,214 mm
Numero de sprays	3
Angulo de defasagem	120 graus
Spray 1	63,5 graus
spray 2	65 graus
Spray 3	65 graus
D.cabeça da valvula admin	46,53 mm
D.cabeça da valvula exaust	41,75 mm

3.2 Combustíveis utilizados

Para a obtenção dos resultados, a segunda etapa se deu pela pesquisa e verificação das propiedades do biodiesel. Devido a falta de informações por órgaos oficiais, os dados utilizados foram retirados do estudo realizado pelo (Al-Dawody, 2011), que constam na tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do diesel e biodiesel

Especificações dos combustíveis	B0	B20	B40	B60	B80	B100
Composição C	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77
Composição H	0,126	0,124	0,123	0,122	0,120	0,119
Composição O	0,004	0,026	0,047	0,068	0,088	0,108
Quantidade de enxofre	0,0250	0,0011	0,0021	0,0031	0,0040	0,0050
Calor especifico (MJ/Kg)	42,50	41,18	39,89	38,64	37,41	36,22
Número de cetano	48,00	48,69	49,37	50,03	50,67	51,30
Densidade (Kg/m^3)	830	841	852	863	874	876
Tensão de superfície (N/m)	0,028	0,031	0,034	0,037	0,040	0,043
Viscosidade (Pa.s)	0,0030	0,0033	0,0037	0,0040	0,0043	0,0046
Massa molar (Kg/Kmol)	190,00	211,50	232,50	252,90	272,80	292,20
Temperatura critica (K)	710,00	721,20	734,00	748,70	765,90	789,00

3.3 Escolha do software

Devidos aos requisitos do estudo, após uma pesquisa dos softwares no mercado, o Diesel-RK, foi o selecionado por atender os requisitos de paramêtros geométricos do motor, parêmetros físico-quimicos dos combustives selecionados, além da disponibilidade de ser gratuito.

3.4 Modelagem da simulação

O software Diesel-Rk, tende a ser bem intuitivo, quanto ao seu passo a passo, logo para a simulação dos valores a serem obtidos, utilizamos a seguinte configuração de motor aprensentada na tabela 3, durante todo o processo de construção da simulação. Para obtenção de resultados foi determinado uma faixa de variação de rotações por minuto, aferindo toda a faixa de um motor diesel como: 1000 RPM, 1200 RPM, 1400 RPM, 1800 RPM, 2200 RPM, 3200 RPM 3600 RPM e 4000 RPM. Dessa forma é possível aferir o funcionamento simulando uma varaição de carga no motor, sendo a rotação de 1800 RPM a escolhida como faixa de funcionamento nominal do motor e escolhida para análises. Por

fim, foi introduzido as propriedades de cada combustível que será simulado, desde o B0 até o B100, como na Tabela 4.

3.5 Procedimentos realizados para a manutenção do motor utilizado (limpeza do sistema de injeção, troca do filtro de combustível)

Para a manutenção do motor foi aferido uma revisão nos seus componentes onde foi constatado o travamento da bomba injetora e dos bicos injetores através do uso de biodiesel de má qualidade ocasionando o entupimento do sistema de injeção devido a formação de borra (Biodiesel solidificado) como mostrado na Figura 17. Após confirmar o defeito apresentado foi realizado a limpeza do sistema utilizando o Descarbonizante de motores CAR80 juntamente com uma bomba auxiliar com pressão de 4 bar para a injeção do produto para o sistema mostrado na figura 18, após a limpeza foi realizada a injeção de diesel para o sistema de alimentação para conferir o funcionamento da bomba injetora e dos bicos injetores, que após 30 minutos de funcionamento apresentaram a normalização do sistema. Também foi realizada a troca do filtro de combustível.

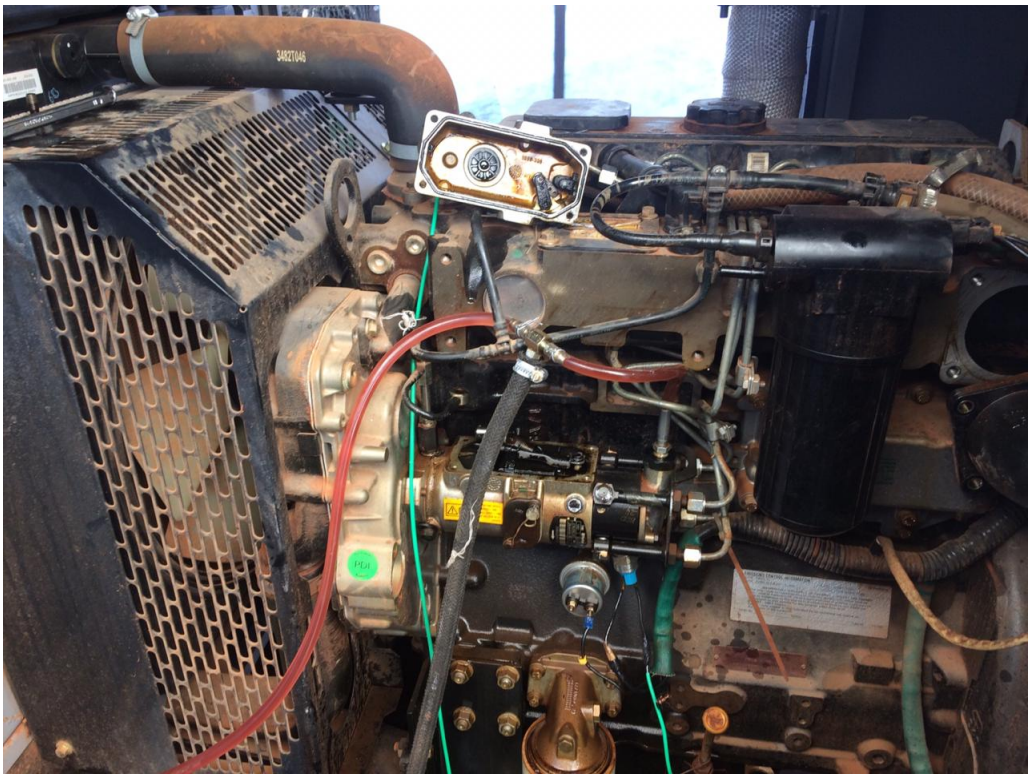

Figura 17 – Sistema de injeção comprometido pela formação da borra de biodiesel

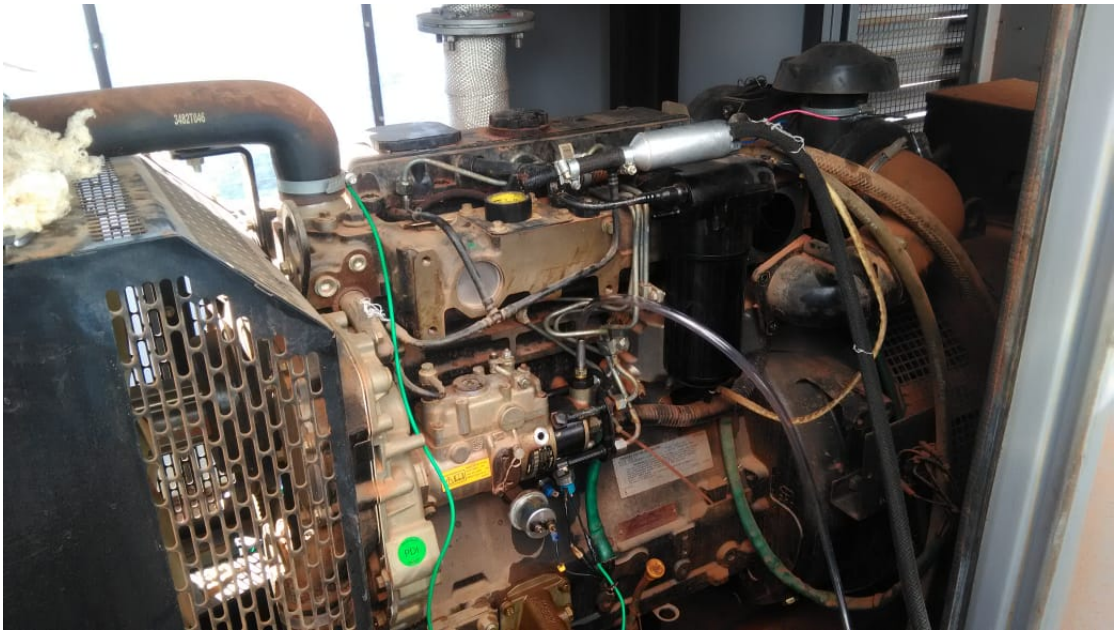

Figura 18 – Sistema de injeção suplementar para realização da manutenção

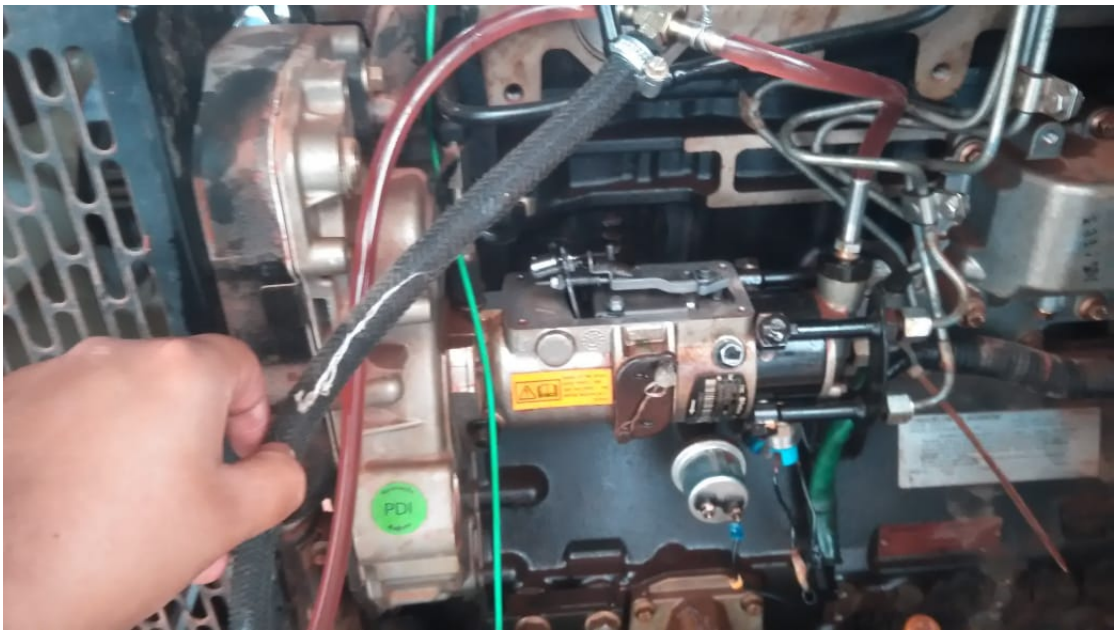

Figura 19 – Resultado após a limpeza do sistema de injeção com o descarbonizante

4 Resultados

Após a aplicação dos métodos explicados no tópico anterior, se obteve os valores de cada potência para sua respectiva rotação e dessa forma gerado a Figura 20, que representa as curvas de potência do motor para cada combustível simulado:

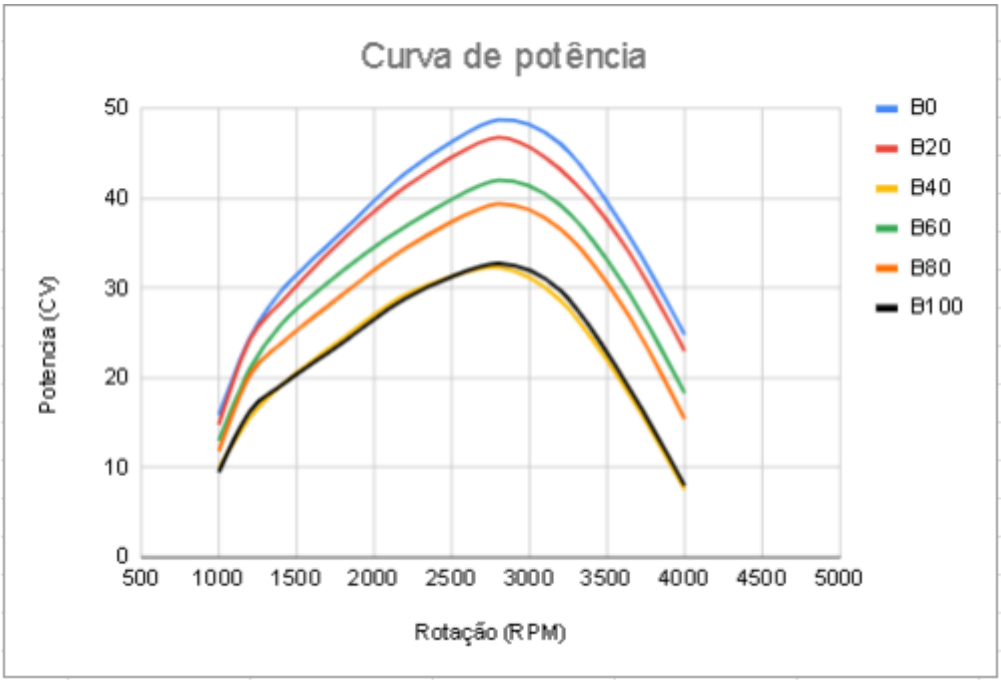

Figura 20 – Curva de potência do motor

É notório uma diminuição da potência gerada com a utilização do biodiesel, em que obtemos as menores potências geradas com as misturas B40 e B100, devido a fatores de propriedades químicas do combustível, principalmente a densidade que infuencia diretamente nas atividades de injeção e combustão, como observado por (Leite, 2019). Outro fator a se observar é a influência do poder calorífico, que diminui a medida que aumentamos a concentração do biodiesel no diesel e também influencia nos resultados de potência, como obervado por (M. Mofijur, 2013) e de dimensionamento da geometria interna do motor para este tipo de combustível, gerada por uma má explosão da mistura ar combustível e consequentemente a perca de potência.

O consumo específico do motor, também obtido através de simulações, consta nos valores mostrados na Figura 21, que determina o consumo específico do motor para cada combustível na rotação nominal de 1800 RPM. É perceptivel que quanto maior a concetração de biodiesel, maior será o consumo específico. Isso se dá, novamente, pelo aumento da densidade do combustível que varia de 830 kg/m^3 ,do BO, até 876 kg/m^3 para o B100, novamnete oberservado por (M. Mofijur, 2013). Considera-se também responsável a visco-

sidade e os poderes caloríficos de cada mistura que afetam diretamento no funcionamento mecânica da parte de injeção e combustão.

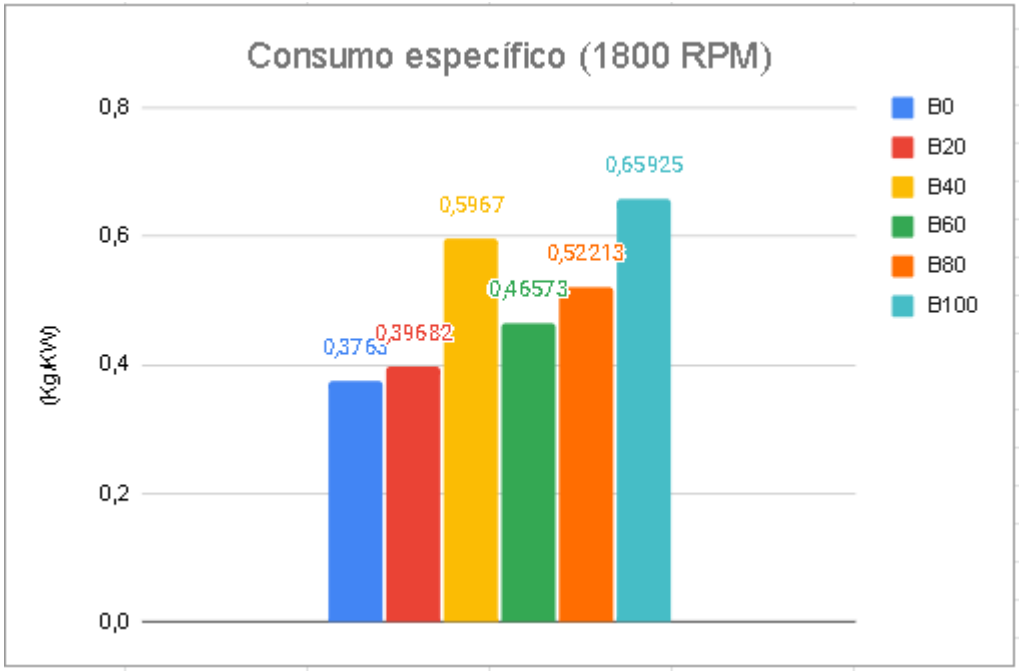

Figura 21 – Consumo específico com rotação de 1800 RPM

Os valores obtidos também determinam um mal funcionamento do motor em funcionamento com às misturas B40 e B100 que obtiveram um consumo muito elevado em relação às outras, onde o B40 teve um consumo cerca de 36,93% maior em relação ao B0 utilizado, caracterizando uma má eficiência na combustão desse combustível no motor. A análise do motor em função da rotação também foi efetuada chegando no gráfico que determina a variação do consumo do motor em diferentes níveis de rotação demonstrado na Figura 22.

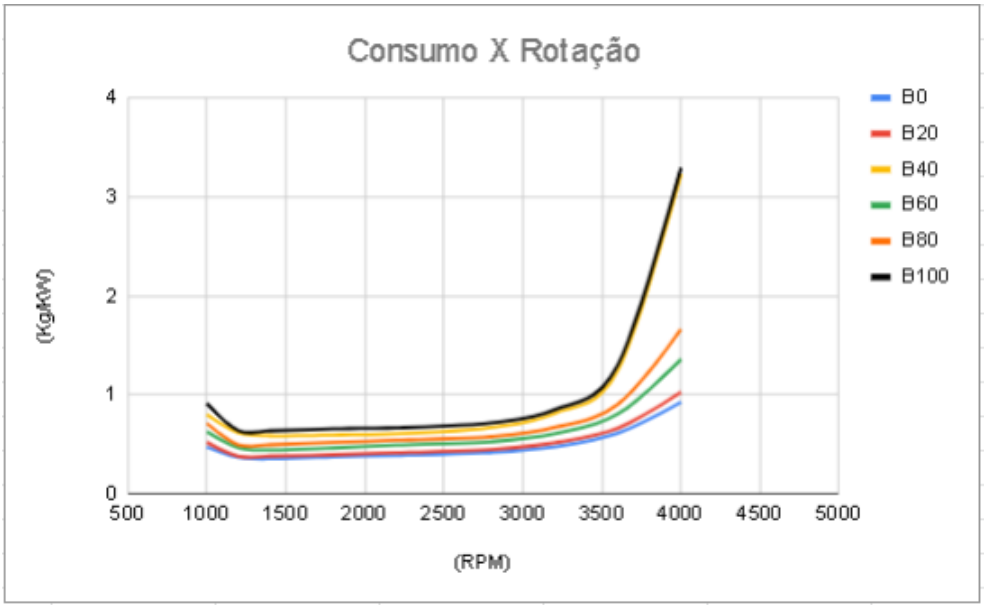

Figura 22 – Consumo específico em função da variação da rotação

Com a Figura 22 percebe-se um elevado consumo novamente com as misturas B40 e B100, além de que com a variação da rotação nota-se que a melhor faixa de operação é determinada pela rotação de 1500 a 3000 RPM, em que se determina o consumo mais estável para este modelo de motor.

Os parâmetros de emissões também foram analisados nestas simulações, logo foi obtido o valor da emissão de NOx com a rotação de operação de 1800 RPM, mostrado na Figura 23.

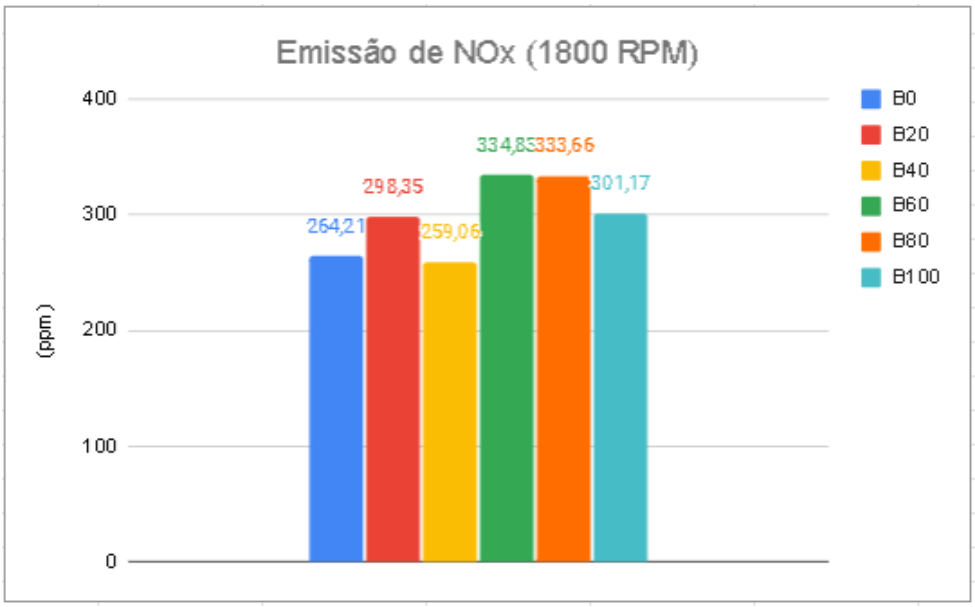

Figura 23 – Emisão de NOx a 1800 RPM

A emissão de NOx aumenta em relação às misturas de Biodiesel, confirmado

por(M. Mofijur, 2013), porém com as misturas B40 e B100. Como ambas apresentam um mal funcionamento do motor, ou seja uma combustão incompleta, o seus valores apresentam uma diminuição em relação aos valores de B20, B60 e B80. A emissão do NOx também tem um comportamento com a variação da rotação do motor onde há uma diminuição em relação ao aumento da rotação, esta é demonstrada na Figura 24.

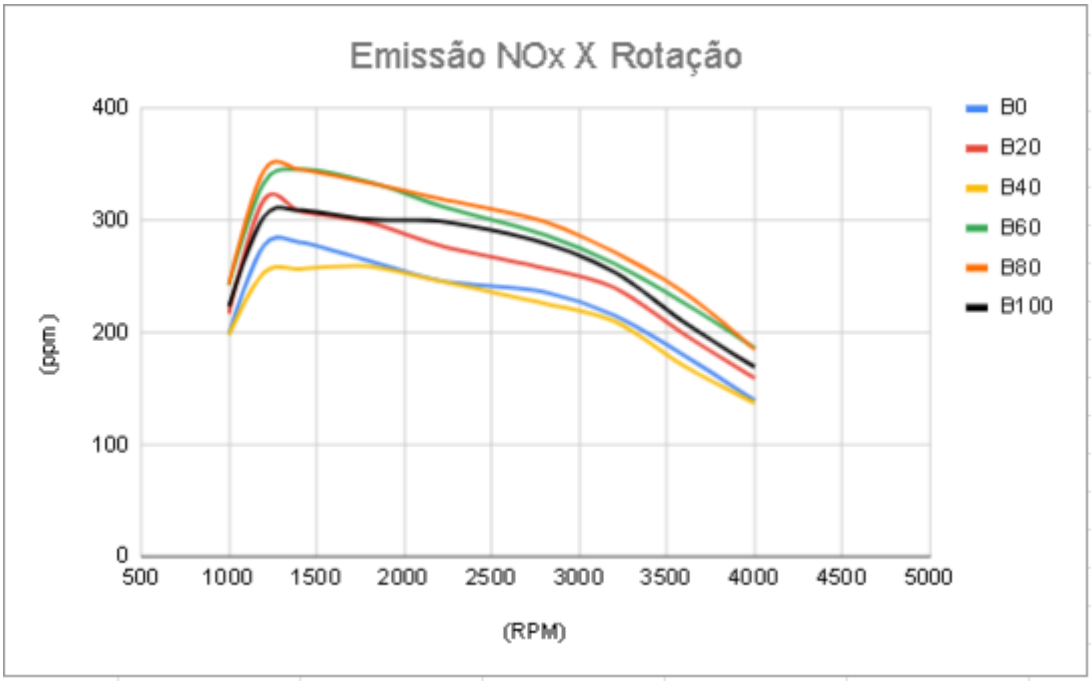

Figura 24 – Emisão de NOx em relação com a rotação

A emissão do dióxido de carbono também foi obtida pela simulação, em que houve um aumento com o uso do biodiesel. na Figura 25 e determinado os valores das emissões em relação a rotação de 1800 rpm.

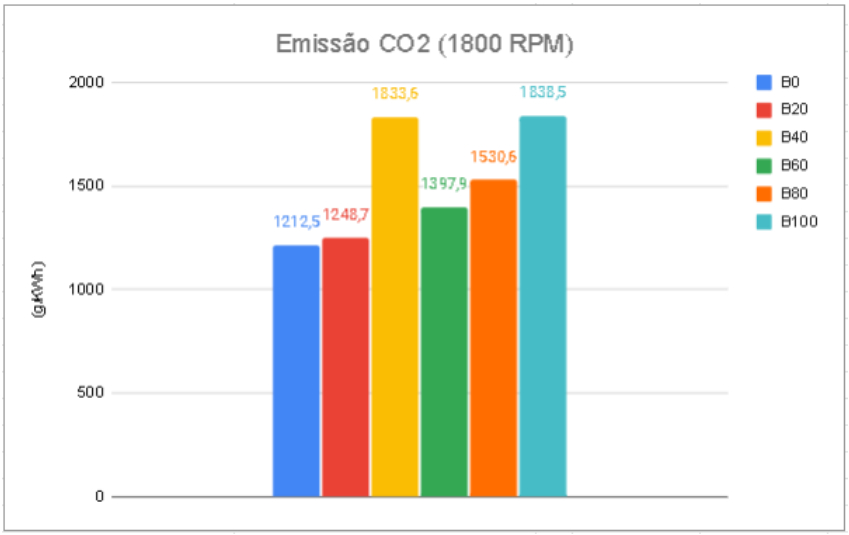

Figura 25 – Emisão de CO_2 para 1800 RPM

Novamente tem-se um aumento bem expressivo em relação aos B40 e B100, devido a combustão incompleta destes combustíveis, assim gerando uma maior emissão deste poluente.

5 Conclusão e trabalhos futuros

Portanto, pode-se concluir que através do incremento de biodiesel na mistura, até chegar em seu valor máximo, no caso B100. Percebe-se a uma diminuição da potência fornecida pelo motor, provavemnte potencializada pelos fatores de densidade de combustível, viscosidade, poder calorífico, gemoetria da câmara de combustão e sistema de injeção. Essas propriedades afetam diretamente o funcionamento do motor, que fora previamente dimensionado para o combustível B0, necessitando assim de uma reavalição dos sub-sitemas e uma readaptação dos mesmos para que o biodiesel puro e suas misturas tenham um funcionamento adequado.

Percebe-se no B20, uma pequena variação na potência e nas emissões o tornando uma alternativa interessante para o futuro, devido a questões produtivas.

Quanto a emissões, o biodiesel apresenta um pior desempenho, sendo um combustível com altos índices de elementos poluidores e danosos para saúde, quando aplicados em motores não configurados para este tipo de combustível, frisando assim a importância de um ajuste nas configurações do motor.

5.1 Trabalhos futuros

Este trabalho pode ser melhorado com uma análise e adaptação da geometria da combustão interna para biodiesel e suas misturas, partindo de uma aferição local das medidas necessárias;

Estudo sobre o sistema de injeção, considerando o funcionamento da bomba, bicos e do próprio jato de injeção, levando em conta a geometria de disperção. Assim como as consequências do uso de biodiesel em motores previamente configurados para diesel;

Realização de testes, como medição real da potência, níveis de emissões e consumo específico do motor em diversas faixas de funcionamento, além de uma análise química das misturas de combustíveis;

Verificação dos resultados para combustíveis oriundo de outras fontes, como: cânhamo, girassol, amendoim, coco, mamoma, algas, reaproveitamento de óleos utilizados no ramo culinário, óleo de palma e entre outros;

6 Referências

1. AL-DAWODY, Mohamed F.; BHATTI, S. K. **Effect of soybean oil biofuel blending on the performance and emissions of Diesel engine using diesel-rk software** International journal of engineering science and technology, v. 3, n. 6, p. 4539-4555, 2011.

2. BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M. DA; SALVADOR, N. VOLPATO, C. E. S. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 15881593, set./out., 2008.

3. Brasil Ferroviário. 2019. Disponível em: https://www.brasilferroviario.com.br/motor-diesel/. Acesso em: 29/11/2019.

4. BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna.** São Paulo: Blucher, 2012. V.1.

5. Candeia, R. A. **Biodiesel de soja: Síntese, Degradação e Misturas Binárias.** 2008. 150 f. Tese (Doutorado em Química Orgânica) - Universidade Federal da Paraíba. Departamento de Química. Fev. 2008.

6. Calderari, V. H. **Avaliação das propriedades físico-químicas do biodiesel de soja, algodão e mamona e da mistura de biodiesel de soja e algodão.** 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade do estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. 2011

7. Dib, F. H. **Produção de biodiesel a partir de óleo residual reciclado e realização de testes comparativos com outros tipos de biodiesel e proporções de mistura em um moto-gerador.** 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 2010.

8. Dinamac Máquinas - **Geradores de Energia.** 2019.Disponível em: https://www.dinamac.com.br/Paginas.aspx?IdPagina=12. Acesso em 18/11/2019.

9. Duco - **China Diesel Engine Cam Plate Manufacturer.** 2019. Disponivel em: http://www.cnducoo.com/diesel-engine-cam-plate.html. Acesso em: 30/11/2019.

10. Encarnação, A. P. G.; **Geração de biodiesel pelos processos de transesterificação e hidroesterificação uma avaliação econômica.** 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química.2008.

11. GARCIA, C. M. **Transesterificação de óleos vegetais** Dissertação – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, 2006. Dissertação de Mestrado.

12. GROTTA, D. C. C. **Desempenho de um trator agrícola em operação de gradagem utilizando biodiesel etílico filtrado de óleo residual como combustível.** Jaboticabal: UNESP, 2003. 44p. Dissertação Mestrado.

13. Krahl, J **Influência do biodiesel e de diferentes combustíveis diesel sobre as emissões de exaustão e seus efeitos sobre a saúde.** In: Knothe, G. (Org.); Gerpen, J. van; Krahl, J. Manual de biodiesel. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E. Blücher, 2006. p.193-201.

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

15. Lage, L. H.; Gonçalves, R. T.; Oliveira, U. A.; Saliba, W. A. **Análise dos processos de transesterificação e hidroesterificação na produção de biodiesel.** Artigo. Journal of Exact Sciences. 2019; 21(3):09-14.

16. Leite, D.; Santos, R. F.; Bassegio, D.; Souza, S. N. M.; Secco, D.; Gurgacz, F.; Silva, T. R. B. **Emissions and performance of a diesel engine affected by soybean, linseed, and crambe biodiesel.**

17. Martins, J. **Motores de Combustão Interna.** 2 ed. Minho. Publindustria. 2006.

18. MOFIJUR, M. et al. **Evaluation of biodiesel blending, engine performance and emissions characteristics of Jatropha curcas methyl ester: Malaysian perspective.** Energy, v. 55, p. 879-887, 2013.

19. OLIVEIRA, Luciano Bastos; COSTA, AO da.**Biodiesel: uma experiência de desenvolvimento sustentável.** In: Congresso Brasileiro de Energia. 2002. p. 1772-1779.

20. PARENTE, Expedito J. de S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado.** Fortaleza. Tecbio, 2003.

21. Perin, G. F.; Schlosser, J. F.; Farias, M. S.; Estrada, J. S.; Treichel, Helen.; Galon, L. **Emissões de motor agrícola com o uso de diferentes tipos de diesel e concentrações de biodiesel na mistura combustível.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.50, n.12,p.1168-1176, dez. 2015.

22. Pontes, A. S. G. C.; Santos, I. M. G.; Filho, J. R. C.; Sousa, A. G. **Influência da temperatura nas propriedades das blendas Diesel/Biodiesel de óleo**

de peixe. CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4 & SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1, 2010, João Pessoa. Inclusão Social e Energia: Anais... Campina grande: Embrapa Algodão, 2010. p. 122-127.

23. Reis, E. F.; Cunha, J. P. B.; Mateus, D. L. S.; Delmond, J. G.; Couto, R. F. **Desempenho e emissões de um motor-gerador ciclo diesel sob diferentes concentrações de biodiesel de soja.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental., v.17, n.5, p.565-571, 2013.

24. Santos, C. A. **Biodiesel: Uma Análise de Custos de Produção.** 2008 . 89 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

25. VARELLA & SANTOS. **NOÇÕES BÁSICAS DE MOTORES DIESEL.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica -RJ. 1º edição. Julho - 2010

26. Volpato, C. E. S.; Conde, A. P.; Barbosa, J. A.; Salvador, N. **Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100).** Revista ciênc. agrotec., Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125 - 1130, jul/ago. 2009.

27. ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P.; COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja em frituras.** Química Nova, v.23, n.4, p.531- 537, 2000

28. HEUI **Injeção eletrônica com acionamento hidráulico para motores diesel.** Disponivel em: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/reparador-diesel/heui-injecao-eletronica-com-acionamento-hidraulico-para-motores-diesel>. Acesso em 20/11/2019.

29. Wiring Schematic Diagram. 2019.
Disponivel em: http://137.wertewochen-lebensmittel.de/engine-injector-diagram.html. Acesso em: 30/11/2019.

Apêndice

Dados das simulações

B0

Rotação	Potencia (kW)	Consumo espcífico (kg/kW)	Emissão NOx (ppm)	Emissão CO2 (g/kWh)	NOx reduzido NO2 (g/kWh)	Emissão SO2 (g/kWh)
1000	11,659	0,475	198,660	1530,300	3,729	0,237
1200	17,971	0,370	277,870	1191,900	4,050	0,185
1400	21,832	0,357	280,870	1149,300	3,952	0,178
1800	26,768	0,376	264,210	1212,500	3,920	0,188
2200	31,471	0,391	246,520	1261,500	3,804	0,196
2800	35,862	0,420	236,400	1354,000	3,918	0,210
3200	33,917	0,478	215,530	1540,200	4,070	0,239
3600	27,231	0,615	179,390	1982,000	4,378	0,307
4000	18,257	0,926	139,710	2984,500	5,167	0,463

B20

Rotação	Potencia (kW)	Consumo espcífico (kg/kW)	Emissão NOx (ppm)	Emissão CO2 (g/kWh)	NOx reduzido NO2 (g/kWh)	Emissão SO2 (g/kWh)
1000	10,888	0,523	212,080	1645,700	4,369	0,011
1200	17,889	0,382	318,920	1201,700	4,681	0,008
1400	20,884	0,383	308,420	1206,700	4,543	0,008
1800	26,093	0,397	298,350	1248,700	4,544	0,008
2200	30,349	0,417	277,950	1313,200	4,452	0,009
2800	34,441	0,450	257,550	1415,100	4,449	0,009
3200	31,816	0,519	240,060	1632,00	4,790	0,011
3600	25,837	0,666	198,410	2095,500	5,105	0,014
4000	16,916	1,027	159,250	3146„700	6,360	0,022

B40

Rotação	Potencia (kW)	Consumo espcífico (kg/kW)	Emissão NOx (ppm)	Emissão CO2 (g/kWh)	NOx reduzido NO2 (g/kWh)	Emissão SO2 (g/kWh)
1000	7,353	0,804	197,980	2469,300	5,972	0,033
1200	11,458	0,619	253,580	1903,900	5,887	0,026
1400	14,102	0,589	256,770	1809,700	5,662	0,024
1800	17,962	0,597	259,060	1833,600	5,783	0,025
2200	21,526	0,608	246,140	1868,600	5,596	0,025
2800	23,777	0,672	226,080	2065,400	5,683	0,028
3200	21,078	0,814	210,190	2503,100	6,412	0,034
3600	14,247	1,245	170,000	3073,000	7,960	0,052
4000	5,544	3,231	137,240	3073,020	16,771	0,134

B60

Rotação	Potencia (kW)	Consumo espcífico (kg/kW)	Emissão NOx (ppm)	Emissão CO2 (g/kWh)	NOx reduzido NO2 (g/kWh)	Emissão SO2 (g/kWh)
1000	9,567	0,630	243,020	1891,700	5,590	0,039
1200	15,474	0,468	333,970	1404,000	5,689	0,029
1400	19,094	0,444	345,940	1331,700	5,589	0,027
1800	23,513	0,466	334,830	1397,900	5,673	0,029
2200	27,108	0,494	313,500	1482,700	5,635	0,030
2800	30,932	0,529	287,480	1587,800	5,539	0,033
3200	28,876	0,609	261,610	1829,000	5,817	0,037
3600	22,527	0,807	226,400	2421,600	6,694	0,049
4000	13,484	1,361	186,360	3001,500	9,347	0,084

B80

Rotação	Potencia (kW)	Consumo espcífico (kg/kW)	Emissão NOx (ppm)	Emissão CO2 (g/kWh)	NOx reduzido NO2 (g/kWh)	Emissão SO2 (g/kWh)
1000	8,694	0,714	243,160	2093,600	6,171	0,058
1200	14,985	0,497	344,960	1456,400	6,076	0,040
1400	17,517	0,498	345,910	1459,800	6,106	0,040
1800	21,583	0,522	333,660	1530,600	6,169	0,042
2200	25,325	0,544	319,850	1594,300	6,161	0,044
2800	28,970	0,580	299,080	1700,100	6,150	0,050
3200	26,928	0,672	271,910	1968,900	6,488	0,054
3600	20,647	0,905	235,640	2652,500	7,605	0,073
4000	11,348	1,662	185,150	2931,500	11,037	0,135

B100

Rotação	Potencia (kW)	Consumo espcífico (kg/kW)	Emissão NOx (ppm)	Emissão CO2 (g/kWh)	NOx reduzido NO2 (g/kWh)	Emissão SO2 (g/kWh)
1000	7,000	0,916	223,340	2624,100	7,084	0,092
1200	12,020	0,640	303,550	1831,800	6,705	0,064
1400	14,090	0,639	309,430	1829,900	6,827	0,064
1800	17,630	0,659	301,170	1838,500	6,846	0,066
2200	21,214	0,669	299,600	1915,900	6,912	0,067
2800	24,091	0,719	280,070	2058,800	6,949	0,072
3200	21,880	0,850	254,130	2435,100	7,470	0,085
3600	14,777	1,301	209,160	2863,300	9,442	0,130
4000	5,890	3,295	169,430	2863,300	19,481	0,329