



DIEGO JOSÉ CARVALHO ALONSO

**ANÁLISE ENERGÉTICA E DE EMISSÕES DE UM MOTOR
MULTICOMBUSTÍVEL**

**LAVRAS - MG
2021**

DIEGO JOSÉ CARVALHO ALONSO

**ANÁLISE ENERGÉTICA E DE EMISSÕES DE UM MOTOR
MULTICOMBUSTÍVEL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola,
para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Alonso, Diego José Carvalho.

Análise energética e de emissões de um motor multicomcombustível
/ Diego José Carvalho Alonso - 2021.
92 p. : il.

Orientador: Carlos Eduardo Silva Volpato.

Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Arduíno. 2. Torque. 3. Potência. 4. GLP. I. Volpato, Carlos
Eduardo Silva. II. Título.

DIEGO JOSÉ CARVALHO ALONSO

**ANÁLISE ENERGÉTICA E DE EMISSÕES DE UM MOTOR
MULTICOMBUSTÍVEL**

ENERGY AND EMISSIONS ANALYSIS OF A MULTIFUEL ENGINE

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, área de
concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola,
para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de maio de 2021.

Dr. Carlos Eduardo Castilla Alvarez UFLA

Dr. Jackson Antônio Barbosa UFLA

Dr. Rafael de Oliveira Faria UFLA

Dr. Ronald Leite Barbosa IFMG

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

*Aos meus pais, Eunice e Claret, ao meu irmão Cleison, à minha cunhada Alessandra, à Débora e toda
à minha família e amigos.*

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia Agrícola, principalmente ao setor de Máquinas e Mecanização Agrícola pela oportunidade de cursar o doutorado.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

A todos os professores com quem tive o prazer de estudar e por me mostrarem o real sentido de ser educador.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato, pela orientação, ensinamentos, compreensão e paciência em toda a minha jornada de pós-graduando.

Aos amigos do setor de máquinas, Pedro e Alovera, que me ajudaram e deram todo o apoio necessário na pós-graduação.

Ao Rafael (Tampico), pela amizade e toda a ajuda que me foi prestada na pós-graduação.

À Helem que sempre atendeu com gentileza e prontidão todas as dúvidas e o de que mais precisava na secretaria da Pós-Graduação.

Ao professor Dr. Jackson Antônio Barbosa por me ajudar desde a graduação.

Ao laboratório de biocombustíveis (G-óleo) e ao professor Dr. Pedro Castro Neto por conceder o biodiesel da pesquisa.

Ao meu irmão Cleison, pela imensa ajuda na programação do dinamômetro e ao Éder (Patrão) por criar toda a parte metálica do projeto, os quais foram fundamentais neste projeto.

Este trabalho jamais seria possível sem a ajuda de todos que participaram, direta e indiretamente, meu muito obrigado a vocês.

*“All we have to decide
is what to do with the time
that is given us”.*

Gandalf, the Gray.

“Always pass on what you have learned”.

Yoda

RESUMO

Atualmente, todos os países do mundo criaram regulamentações, para gases de combustão lançados no ambiente. O crescimento do desempenho e eficiência dos motores vem agregando valor para o cumprimento dessas novas regulamentações que se tornarão mais restritivas e a redução dos gases nocivos é correlacionada ao desenvolvimento econômico sustentável. Testes de novos combustíveis de origem líquida e gasosa nos proporcionam a oportunidade de continuar nosso crescimento em equilíbrio ao nosso ambiente. A utilização de biodiesel possui características ambientais mais interessantes se comparado ao diesel mineral vindo a contribuir para a adequação às normas ambientais. O GLP (Gás liquefeito de petróleo) apresenta logística consolidada no território brasileiro, facilitando o acesso a esse combustível, contudo seu uso, em motores, ainda, permanece restrito, mas as pesquisas são válidas para testes. No entanto nenhum combustível vai ser comercialmente aceito se ele não possuir rendimento satisfatório. Nesta pesquisa, foi feita a coleta do torque e potência máximas do motor para cada combustível, bem como os valores dos gases de escape (CO, CO₂ e HC), para mensurar os valores de torque e potência e para impor cargas ao motor, cujo autor criou um dinamômetro de baixo custo. De acordo com tais questionamentos, o objetivo da pesquisa foi criar um ambiente automatizado, para a coleta das principais informações, a respeito da utilização de diferentes combustíveis num motor diesel, avaliando os seus parâmetros energéticos e ambientais; esses fatores podem ser mensurados pelos dados de potência, torque e os gases de escapamento. Para a criação da bancada de testes, foram utilizadas placas controladoras baseadas no IDE Arduino e sensores. A coleta dos dados dos combustíveis foi realizada, em um motor marca Yanmar, modelo TC14S, que recebeu apenas adaptações externas para utilizar diferentes combustíveis, de modo a poder utilizar líquido e gás. Os combustíveis líquidos utilizados foram o diesel comercial brasileiro com 12% de biodiesel e porcentuais de biodiesel de óleo residual; o combustível gasoso utilizado foi o gás liquefeito de petróleo ou GLP. A eficiência energética foi mensurada por dados de torque e potência máximos para cada combustível e os gases de escapamento foram mensurados pelo analisador multigás marca Alfatest. De acordo com os dados coletados, a utilização da bancada se mostrou eficaz estatisticamente, mostrando que o torque máximo mensurado pelo dinamômetro proposto é condizente com o valor apresentado pelo fabricante do motor, utilizando diesel comercial. Já o combustível que apresentou os maiores valores de torque e potência foi o B50 GLP, demonstrando que a substituição do diesel por GLP se apresentou viável do ponto de vista energético, entretanto, do ponto de vista ambiental, a utilização do GLP concomitante aos combustíveis líquidos apresentou valores maiores de CO e HC, mas com valores estatisticamente iguais aos de CO₂.

Palavras-chave: Dinamômetro. Biodiesel. GLP.

ABSTRACT

Currently, all countries have created regulations for flue gases released into the environment. The growth in engine performance and efficiency has added value to comply with these ever more restrictive regulations. The reduction of harmful gases is correlated with sustainable economic development. Testing new fuels of liquid and gaseous origin provides us with the opportunity to continue our growth in balance with our environment. Biodiesel has more interesting environmental characteristics compared to mineral diesel, contributing to the adaptation to environmental standards. LPG (Liquefied petroleum gas) has consolidated logistics in the Brazilian territory, facilitating access to this fuel. However, its use in engines remains restricted, but the research is valid for tests. However, no fuel will be commercially accepted if it does not have satisfactory performance. In this research, the maximum engine torque and power and the values of the exhaust gases (CO, CO₂, and HC) were collected for each fuel to measure the torque and power values. The author created a low-cost dynamometer to impose loads on the engine. Thus, the research objective was to create an automated environment for the collection of the main information regarding the use of different fuels in a diesel engine, evaluating its energetic and environmental parameters. These factors can be measured by the power, torque, and exhaust gases data. Controller boards based on the Arduino IDE and sensors were used to create the test bench. The fuel data collection was performed on a Yanmar model TC14S engine. The engine received only external adaptations to use different fuels, liquid and gas. The liquid fuels used were Brazilian commercial diesel with 12% of biodiesel and residual-oil biodiesel percentage, and the gaseous fuel used was liquefied petroleum gas. Energy efficiency was measured using maximum torque and power data for each fuel, and the exhaust gases were measured using an Alfatest multiglass analyzer. According to the data collected, the bench was proposed to be statistically effective, showing that the maximum torque measured by the proposed dynamometer is consistent with the value presented by the engine manufacturer using commercial diesel. The fuel with the highest torque and power values was the B50 LPG, demonstrating that the substitution of diesel for LPG proved to be feasible from an energetic perspective. However, from an environmental perspective, the use of LPG concomitant with liquid fuels showed higher values of CO and HC but statistically equal values of CO₂.

Keywords: Dynamometer. Biodiesel. LPG.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 - Bomba injetora em linha.....	16
Figura 2 - Sistema de combustível diesel com bomba de injeção em linha.	17
Figura 3 - Bico injetor em corte.	17
Figura 4 - Sistema de injeção de combustível.	18
Figura 5 - Carburador em corte.	20
Figura 6 - Sistema de injeção direta de combustível.	20
Figura 7 - Constituição da vela de ignição.	21
Figura 8 - Fonte luminosa e receptora do sensor encoder.	23
Figura 9 - Forças verticais atuando na célula de carga.	24
Figura 10 - Dinamômetro de freio Prony.	25
Figura 11 - Motor.	27
Figura 12 - Dinamômetro desenvolvido para a bancada de testes.	28
Figura 13 - Células de carga do dinamômetro.....	28
Figura 14 - Sensor encoder instalado no motor.	29
Figura 15 - Dinamômetro.	30
Figura 16 - Braço preso ao eixo do pêndulo.....	32
Figura 17 - Calibração do dinamômetro.....	32
Figura 18 - Comprimento da haste de calibração e braço do dinamômetro.	33
Figura 19 - Curva de calibração do dinamômetro.	34
Figura 20 - Gráfico de força do diesel.....	35
Figura 21 - Gráfico de força do Diesel GLP.	35
Figura 22 - Gráfico de força de B100.....	35
Figura 23 - Gráfico de força de B100 GLP.	36
Figura 24 - Gráfico de força de B80.....	36
Figura 25 - Gráfico de força de B80 GLP.	36
Figura 26 - Gráfico de força de B50.....	37
Figura 27 - Gráfico de força de B50 GLP.	37
Figura 28 - Gráfico de força de B20.....	37
Figura 29 - Gráfico de força de B20 GLP.	38
Figura 30 - Teste da rotação no dinamômetro.....	38

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Especificações do óleo diesel e do biodiesel de óleo residual.....	44
Figura 2 - Produção de GLP no Brasil.	46
Figura 3 - Constituição média dos gases presentes no GLP.....	47
Figura 4 - Motor acoplado ao dinamômetro.....	55
Figura 5 - Controle da pressão do sistema.....	57
Figura 6 - Coleta da massa de GLP de acordo com a abertura do registro.	57
Figura 7 - Coleta da massa com balança de precisão.	58
Figura 8 - Massa média de 10 bexigas.	58
Figura 9 - Massa de GLP de acordo com a abertura do registro.	59
Figura 10 - Entrada de GLP no motor.	60
Figura 11 - Curva de torque do diesel x diesel GLP.	62
Figura 12 - Curva de torque do B100 x B100 GLP.....	63
Figura 13 - Curva de torque do B80 x B80 GLP.....	63
Figura 14 - Curva de torque do B50 x B50 GLP.....	64
Figura 15 - Curva de torque do B20 x B20 GLP.....	64
Figura 16 - Curva de potência do diesel x diesel GLP.	66
Figura 17 - Curva de potência do B100 x B100 GLP.	66
Figura 18 - Curva de potência do B80 x B80 GLP.	67
Figura 19 - Curva de potência do B50 x B50 GLP.	67
Figura 20 - Curva de potência do B20 x B20 GLP.	68

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Teor de CO ₂ no gás de exaustão.	76
Figura 2 - Filtro utilizado para filtrar os gases.	81
Figura 3 - Analisador de gases.	81
Figura 4 - Ciclo 13 pontos.	82

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 - Especificações do sensor encoder.	22
Tabela 2 - Valores da calibração do dinamômetro.	33

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Evolução da quantidade de biodiesel no diesel brasileiro.	45
Tabela 2 - Aplicação e capacidade dos vasilhames de GLP no Brasil.	47
Tabela 3 - Propriedades químicas do GLP.	48
Tabela 4 - Poder calorífico dos combustíveis estudados.	55
Tabela 5 - Teste da massa de combustível injetada.	56
Tabela 6 - Teste Tukey do torque máximo médio para 10 combustíveis.	65
Tabela 7 - Teste Tukey da potência máxima média para 10 combustíveis.	68

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Análise dos dados da emissão de CO para cada combustível.	84
Tabela 2 - Análise dos dados da emissão de CO ₂ para cada combustível.	85
Tabela 3 - Análise dos dados da emissão de HC para cada combustível.	86
Tabela 4 - Análise dos dados da emissão de CO para cada combustível.	87
Tabela 5 - Análise dos dados da emissão de CO ₂ para cada combustível.	88
Tabela 6 - Análise dos dados da emissão de HC para cada combustível.	88

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DA ESTAÇÃO DE TESTES	14
1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Motor ciclo diesel	15
2.1.1	Bomba injetora	15
2.1.2	Bico injetor	17
2.2	Motor ciclo Otto	19
2.2.1	Carburador	19
2.2.2	Vela de ignição	21
2.3	Placa controladora arduíno	21
2.4	Sensores	22
2.4.1	Sensor de velocidade encoder	22
2.4.2	Célula de carga	23
2.5	Dinamômetro	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Desenvolvimento da bancada de testes	27
3.1.1	Células de carga utilizadas no dinamômetro	28
3.1.2	Encoder para mensurar a rotação do motor	29
3.1.3	Dinamômetro	29
3.2	Calibração dos sensores	30
3.2.1	Células de carga	30
3.2.2	Encoder	30
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	32
4.1	Calibração do dinamômetro	32
4.2	Validação do Dinamômetro	34
4.2.1	Curvas de força	34
4.3	Validação do sensor de rotação	38
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41
	CAPÍTULO 2 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO MOTOR UTILIZANDO MISTURAS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL E GLP	42
1	INTRODUÇÃO	42
2	REFERENCIAL TEÓRICO	43
2.1	Biodiesel	43
2.2	Biodiesel de óleo residual	43
2.3	Gás liquefeito de petróleo - GLP	45
2.4	Motor duplo combustível	48
2.4.1	Misturador de câmara simples	49
2.5	Torque	49
2.6	Potência	50
2.7	Pesquisas relacionadas	51
3	MATERIAS E MÉTODOS	53
3.1	Localização	53
3.2	Motor	53
3.3	Dinamômetro	53
3.4	Combustíveis	53
3.4.1	Poder calorífico dos combustíveis	54

3.5	Coleta de dados de eficiência.....	55
3.5.1	Teste de padronização do combustível.....	56
3.6	Uso de duplo combustível.....	59
3.6.1	Biodiesel de óleo residual.....	60
3.6.2	GLP.....	60
3.7	Parâmetros experimentais.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Análise do Torque.....	62
4.1.1	Diesel x diesel GLP.....	62
4.1.2	B100 x B100 GLP.....	62
4.1.3	B80 x B80 GLP.....	63
4.1.4	B50 x B50 GLP.....	63
4.1.5	B20 x B20 GLP.....	64
4.1.6	Teste Tukey para torque máximo médio.....	65
4.2	Análise da potência.....	66
4.2.1	Diesel x Diesel GLP.....	66
4.2.2	B100 x B100 GLP.....	66
4.2.3	B80 x B80 GLP.....	67
4.2.4	B50 x B50 GLP.....	67
4.2.5	B20 x B20 GLP.....	68
4.2.6	Teste Tukey para a potência máxima média.....	68
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71
	CAPÍTULO 3 - EFICIÊNCIA AMBIENTAL DO MOTOR, UTILIZANDO MISTURAS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL E GLP	74
1	INTRODUÇÃO	74
2	REFERENCIAL TEÓRICO	75
2.1	Gases de escape.....	75
2.1.1	Monóxido de carbono (CO).....	75
2.1.2	Dióxido de carbono (CO ₂).....	76
2.1.3	Hidrocarbonetos (HC).....	77
2.2	Analizador de gases.....	77
2.3	Pesquisas relacionadas.....	78
3	MATERIAIS E MÉTODOS	80
3.1	Análise dos gases.....	80
3.1.1	Ciclo 13 pontos.....	82
3.2	Parâmetros experimentais.....	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.1	Análise dos gases de escape em rotação nominal.....	84
4.1.1	Análise da emissão de CO.....	84
4.1.2	Análise da emissão de CO ₂	85
4.1.3	Análise da emissão de HC.....	86
4.2	Análise dos gases de escape em rotação intermediária.....	86
4.2.1	Análise da emissão de CO.....	87
4.2.2	Análise da emissão de CO ₂	87
4.2.3	Resultado da análise dos dados da emissão de HC.....	88
5	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	91

CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO DA ESTAÇÃO DE TESTES

1 INTRODUÇÃO

Os valores de torque e potência que um combustível desenvolve num motor podem ser quantificados por meio de um equipamento denominado dinamômetro, esse equipamento aplica cargas a um motor através da frenagem mecânica, hidráulica ou magnética. Apesar desses dinamômetros apresentarem valor proibitivo para o público em geral, a verificação dos valores de torque e potência mostra o quão eficiente um combustível pode ser transformado em energia mecânica, uma alternativa viável para essa verificação, é o desenvolvimento de um dinamômetro de baixo custo para motores de testes utilizando materiais encontrados no mercado, como freio de motocicleta e placas controladoras, essas placas que outrora possuíam valor elevado, hoje são baratas, versáteis e de código compartilhado, qualidades que agregam eficiência ao projeto. Este capítulo teve o objetivo de desenvolver um equipamento de baixo custo baseado no dinamômetro de Prony, esse modelo utiliza um sistema de freio que restringe a rotação do motor ao imprimir cargas ao seu eixo virabrequim, um sensor ótico realizou a leitura da rotação de acordo com o número de pulsos infravermelhos captados no receptor ótico e um conjunto de células de carga determinou a intensidade da força que o sistema de freio do dinamômetro impunha ao motor, essa força foi verificada em 10 combustíveis distintos e a acurácia dos dados do dinamômetro foi verificada confrontando os valores medidos aos valores fornecidos pelo fabricante do motor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Motor ciclo diesel

Criado em 1889 pelo Francês Rudolf Christian Karl Diesel e patenteado em 1892, tinha o intuito inicial de levar sua tecnologia à indústria naval Inglesa. Diesel foi colaborador do técnico em refrigeração, Carl von Linde (1842-1934) e, a partir dos seus estudos de Termodinâmica, desenvolveu um motor que pudesse se aproximar ao máximo do ciclo do físico francês Sadi Carnot, após a patente do motor. Ele publicou descrições físicas e teóricas no livro *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors* (1893), propondo o funcionamento do motor, de acordo com seu ciclo térmico, a partir do motor de combustão interna inventado por Nikolaus Otto (PERCILIA, 2019).

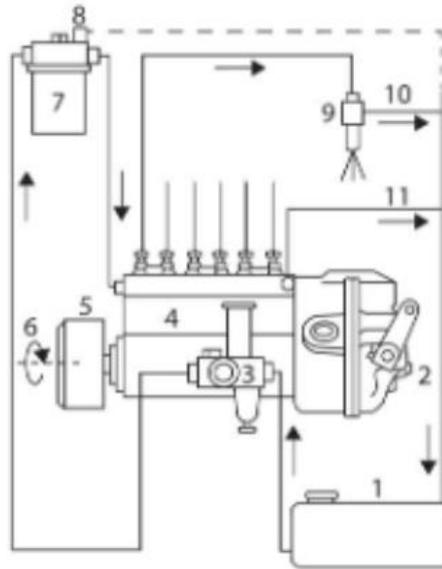
Nesse ciclo, o pistão comprime apenas o ar em que a compressão fica na faixa de 15 a 24 menor que o volume inicial; o ar aumenta sua pressão e temperatura, ao atingir o ponto mais próximo ao cabeçote, chamado ponto morto superior ou PMS; injeta-se o combustível no cilindro que reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar aquecido. Nesse ciclo, não há a necessidade de uma faísca, a temperatura do ar comprimido aquecido ocasiona a combustão, mas, para que ocorra, o ar deve atingir, no mínimo, a temperatura de autoignição ou TAI que, para o diesel, está na ordem de 250°C (BRUNETTI, 2012a).

Segundo Von Mitzlaff (1988), o motor aspira ar nas condições ambientes de pressão e temperatura e o comprime a uma pressão de aproximadamente 60 bar, o ar chega a temperaturas por volta de 600°C. Rapidamente, antes do pistão chegar ao ponto morto superior, o combustível é injetado e entra em autocombustão nessas condições, não sendo necessária a fonte externa de ignição.

2.1.1 Bomba injetora

Tem a função de dosar a quantidade correta de combustível, em cada cilindro em função da carga e da rotação desejada, acrescentando pressão ao combustível para que ele seja enviado no momento mais oportuno ao bico injetor. As bombas mais comuns são as em linha Figura 1, cujas linhas são compostas de eixos ressaltados e um elemento dosador, um para cada cilindro.

Figura 1 - Bomba injetora em linha.



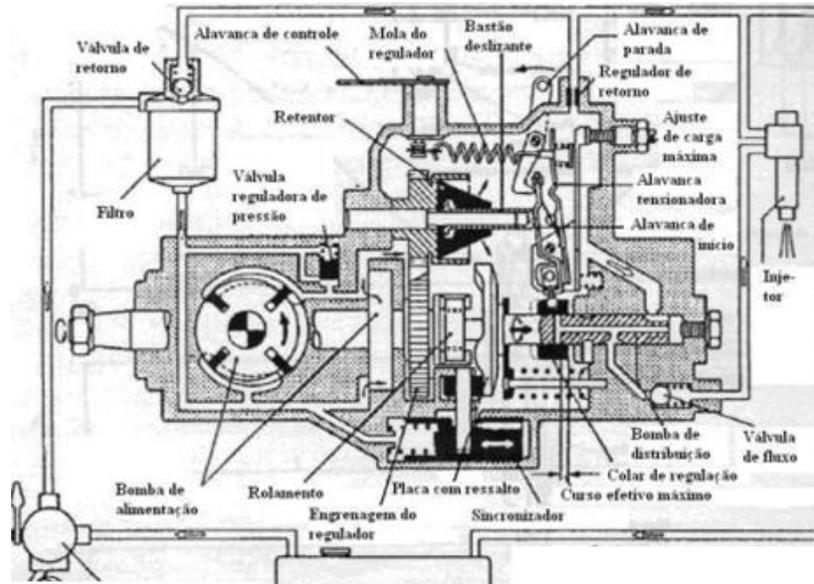
Fonte: Brunetti (2012b).

Segundo o autor, os principais componentes são:

- 1 - Tanque de combustível;
- 2 - Regulador;
- 3 - Bomba alimentadora ou de transferência;
- 4 - Bomba injetora;
- 5 - Avanço do ponto de injeção;
- 6 - Acionado pelo eixo do motor;
- 7 - Filtro de combustível;
- 8 - Dreno de ar;
- 9 - Conjunto porta-injetor;
- 10 - Linhas de retorno do conjunto porta-injetor;
- 11 - Bomba.

Acoplado à bomba injetora, encontra-se um dosador de débito e velocidade. O regulador é um componente do sistema de injeção que regula automaticamente as condições de injeção e estabelece a rotação máxima de rotação do motor. O diagrama completo do caminho do diesel na bomba injetora é exemplificado por Heywood (1988), na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Sistema de combustível diesel com bomba de injeção em linha.

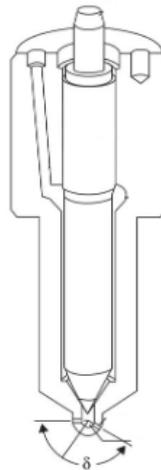


Fonte: Heywood (1988).

2.1.2 Bico injetor

São componentes de extrema precisão, responsáveis pela nebulização do combustível na câmara de combustão do motor; quanto melhor a sua nebulização, melhor a eficiência térmica do motor, conseqüentemente, menor consumo de combustível e menor emissão de gases poluentes (BRUNETTI, 2012b). Ainda, segundo Brunetti, os bicos de agulha são utilizados em motores de injeção direta pela necessidade da melhor nebulização do combustível. A Figura 3 demonstra um bico injetor em corte.

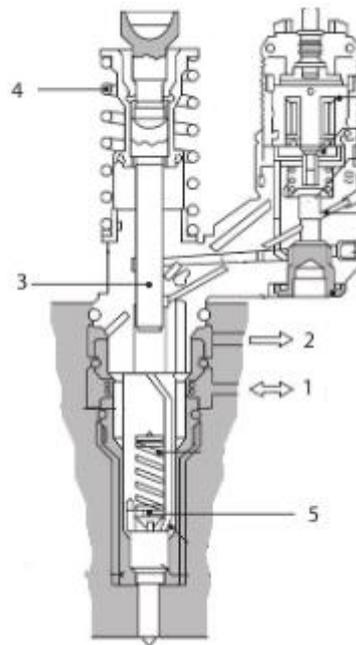
Figura 3 - Bico injetor em corte.



Fonte: Brunetti (2012b).

De acordo com Brunetti (2012b), a Figura 4 mostra a representação esquemática de uma unidade injetora eletrônica. Com a válvula magnética desenergizada, o combustível entra pelo orifício de admissão (1) e flui pelos dutos internos diretamente para o orifício de retorno (2) o que possibilita o enchimento da câmara da bomba durante o curso de retorno do pistão (3) impulsionado pela mola de retorno (4). No próximo ciclo, o pistão (3) impulsionando o eixo de ressaltos e seu balancim, para bombear o combustível e, com a energização da válvula magnética, o circuito de retorno se fecha e o combustível à alta pressão ultrapassa o valor de tensão da mola do bico (5), o injetor se abre e permite a nebulização do combustível na câmara de combustão do motor. Com a desenergização da válvula, abre-se novamente o canal de retorno de combustível, a pressão de injeção diminui rapidamente e a injeção se encerra.

Figura 4 - Sistema de injeção de combustível.



Fonte: adaptado de Brunetti (2012b).

No sistema mecânico, o combustível aumenta sua pressão, passando para o bico injetor; o combustível é direcionado abaixo da agulha do injetor, que fica sobre pressão de uma mola; como a agulha tem uma angulação, com o aumento da pressão a tendência é a força passar a força contrária da mola, a agulha se move para cima liberando o combustível para passar por pequenos furos e, assim, ser atomizado dentro do cilindro; após a pressão do combustível no bico injetor diminuir, a agulha retorna ao seu ponto inicial pela ação da mola (VON MITZLAFF, 1988).

2.2 Motor ciclo Otto

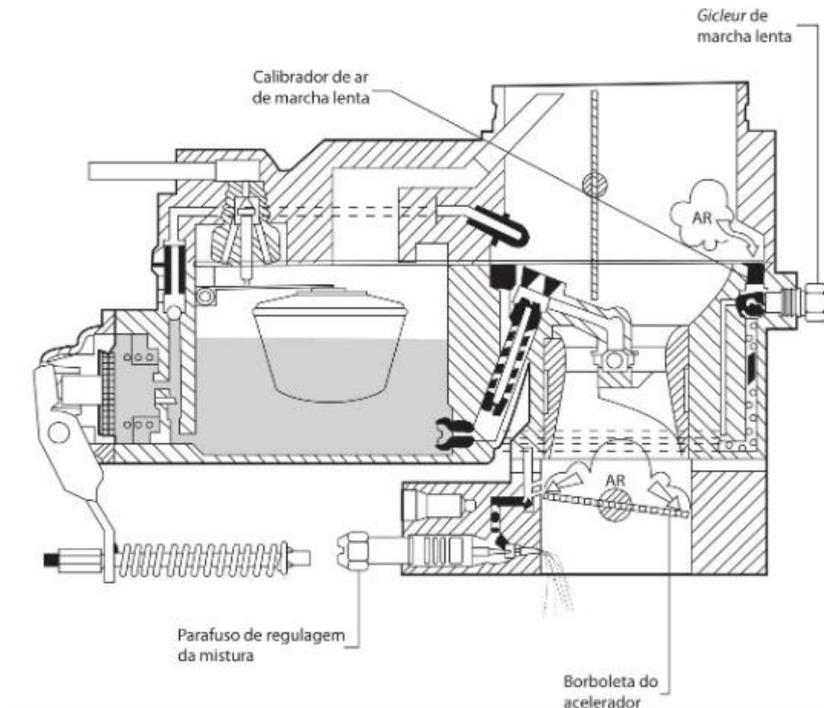
Criado em 1861 por Nikolaus August Otto, engenheiro alemão nascido em Holzhausen, em 1832, usou a teoria do motor de combustão interna de quatro tempos patenteado pelo engenheiro francês Aphonse Beau de Rochas, em 1862, oferecendo uma alternativa prática aos motores a vapor como forma de fonte de potência. Baseado nesse princípio, o seu motor foi um sucesso por causa de sua confiabilidade, eficiência e seu baixo nível de ruídos (NIKOLAUS, 2019).

Segundo Von Mitzlaff (1988), motores Otto aspiram a mistura pré-preparada de ar e combustível, a qual é comprimida a aproximadamente 20 bar e temperatura por volta de 400°C. Nessas condições, a mistura não entra em autoignição, uma vela de ignição é usada para iniciar a combustão, por meio de uma faísca elétrica, no momento adequado, a fim de proporcionar maior eficiência da combustão.

2.2.1 Carburador

Nos motores ciclo Otto, a mistura ar mais combustível é realizada pelo carburador, Figura 5, cujo equipamento tem a função de misturar de forma mecânica ar e combustível que serão injetados ao cilindro; esse equipamento já é obsoleto, nos dias atuais e foi substituído por um sistema eletrônico de injeção, ou seja, injeção eletrônica de combustível.

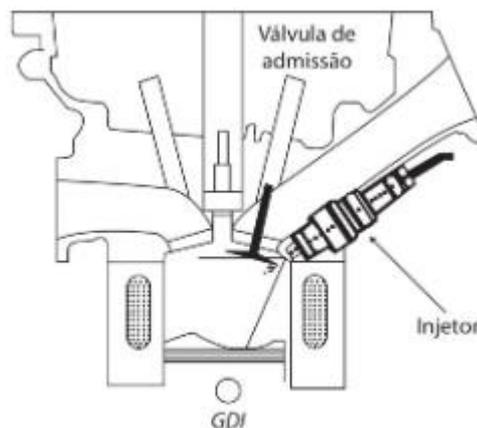
Figura 5 - Carburador em corte.



Fonte: Brunetti (2012a).

Quando se utiliza um combustível líquido, a mistura ar e combustível normalmente é preparada no carburador, em que ele dosa a quantidade de combustível, de acordo com a quantidade de ar, para obter uma mistura estequiométrica eficiente (VON MITZLAFF, 1988), contudo, hoje em dia, o sistema foi substituído pela injeção eletrônica e o uso da injeção direta de combustível, Figura 6. Esses sistemas proporcionaram melhor eficiência energética e diminuição dos gases poluentes, proporcionando novas etapas de pesquisas em motores mais tecnológicos.

Figura 6 - Sistema de injeção direta de combustível.



Fonte: Brunetti (2012a).

2.2.2 Vela de ignição

A vela de ignição tem a finalidade de iniciar a combustão no cilindro, quando a mistura está comprimida; ela gera uma faísca entre seus polos que é suficiente para dar início à combustão, segundo definição da empresa NGK (2020); a vela de ignição tem como função conduzir a alta voltagem elétrica, para o interior da câmara de combustão, convertendo-a em faísca para inflamar a mistura ar/combustível.

A Figura 7 demonstra a constituição da vela de ignição; de acordo com a empresa fabricante Bosch (2021), ela é essencialmente composta por diversos elementos como descrito, a seguir.

Figura 7 - Constituição da vela de ignição.



Fonte: Bosch (2021).

2.3 Placa controladora arduino

Segundo o fabricante Arduino (2020), a placa arduino é uma microcontroladora baseada no ATmega, o qual possui portas digitais, algumas, inclusive, com recurso PWM (Pulse wave modulate) e portas analógicas de entrada; a tensão de trabalho fica na faixa de 7 a 12 volts e a comunicação se dá via porta serial USB. Tal placa é famosa não por seu hardware, mas pela IDE (*Integrated Development Environment*) que é de código livre, permitindo o compartilhamento das bibliotecas desenvolvidas por outros programadores, formando uma grande comunidade de troca de informações de forma gratuita.

2.4 Sensores

Para a construção do dinamômetro, foram utilizados sensores de quantificação de rotação (encoder) e de quantificação de carga aplicada (célula de carga), os quais são descritos a seguir.

2.4.1 Sensor de velocidade encoder

O sensor de velocidade encoder é utilizado, para efetivar medições de rotação, é realizada uma contagem de acordo com a interrupção da leitura de um feixe luminoso e é indicado, para a utilização com um disco encoder. As falhas no disco irão permitir que o feixe de luz infravermelho seja recebido, conseqüentemente, contanto pulsos. Verificando a quantidade de falhas (sinais) e o intervalo de tempo entre os sinais, pode-se medir a velocidade de rotação. As especificações do encoder podem ser observadas na Tabela 1.

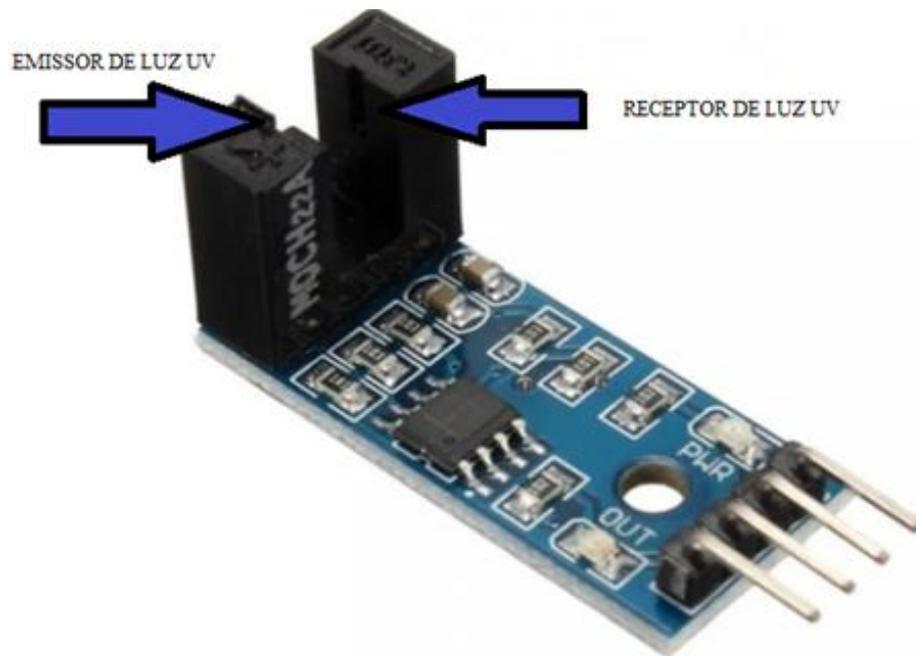
Tabela 1 - Especificações do sensor encoder.

Tensão de operação	3,3 - 5 v
Abertura do disco encoder	5 mm
Saídas	Digital e analógica
Indicador de tensão	Led
Dimensões	32 x 14 x 7 mm

Fonte: Eletrogate (2020).

A fonte luminosa e a fonte receptora são demonstradas na Figura 8.

Figura 8 - Fonte luminosa e receptora do sensor encoder.

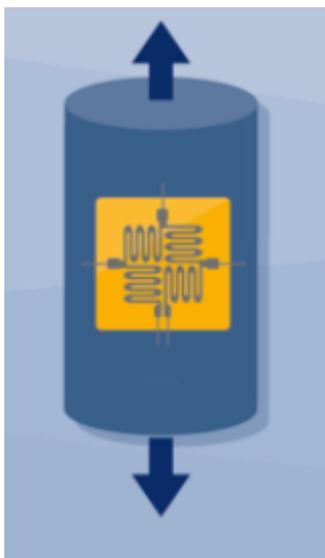


Fonte: Sensor (2021).

2.4.2 Célula de carga

Segundo a HBM (SCHMIDT, 2021), células de carga consistem de um elemento de medição em que os Strain Gages (pequenas pontes elétricas) são fixados. Essa ferramenta é, geralmente, feita de aço ou alumínio, significando que é muito resistente, mas também possui uma elasticidade mesmo que mínima. O aço ou alumínio é levemente deformado sob o efeito da carga (Figura 9), mas, então volta à sua posição inicial, com uma resposta elástica a cada carga. Essas mudanças extremamente pequenas (microdeformações) podem ser medidas pelos Strain Gages (abreviado como SG). Os SGs são firmemente fixados no elemento de mola, depois, são submetidos aos mesmos movimentos. Esses SGs são dispostos em um circuito ponte ou, mais precisamente, um circuito ponte de Wheatstone.

Figura 9 - Forças verticais atuando na célula de carga.



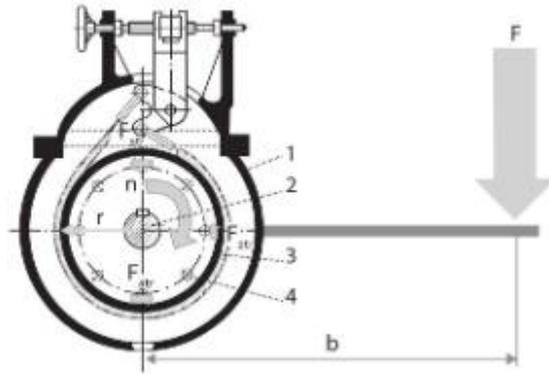
Fonte: Schmidt (2021).

2.5 Dinamômetro

O dinamômetro é um instrumento, para a determinação da potência, usualmente pela medição independente da força, do tempo e da distância em que ela atua. Pode ser classificado como de freio, de barra de tração ou de torção, de acordo com o modo pelo qual é aplicado o trabalho. Pode também ser dito de absorção ou transmissão, dependendo do destino que dá à energia (BARGER *et al.*, 1983). O dinamômetro de absorção, também, funciona sob o princípio da transformação do trabalho em calor. O meio de trabalho, normalmente à água, que circula no interior da carcaça e, pelo atrito, fica a uma temperatura mais alta que a anterior. A carcaça exterior, que é livre para girar em torno da árvore, liga-se ao braço de torção de alavanca e o conjugado obtido é igual ao que é entregue ao dinamômetro (BARGER *et al.*, 1983). A energia mecânica é transformada em calor, por meio da utilização de um freio hidráulico, sendo o calor gerado nesse freio dissipado pela passagem de água de arrefecimento.

A Figura 10 demonstra um dinamômetro e seus componentes.

Figura 10 - Dinamômetro de freio Prony.



Fonte: Brunetti (2012a).

Na Figura 10 podemos observar:

- 1- A carcaça pendular;
- 2- Eixo do motor/dinamômetro;
- 3- Cinta de frenagem;
- 4- Volante;

b - Distância do centro do eixo ao ponto de coleta da força, ou seja, o braço de alavanca.

Desenvolvido, em 1821, pelo engenheiro francês Gaspard Prony, é o elemento didático utilizado para que se compreenda o funcionamento dos dinamômetros. Ao se apertar a cinta do freio sobre o rotor, aplica-se uma força de atrito, de forma a obter uma situação de equilíbrio dinâmico, assim, Brunetti (2012a) demonstra como obter as grandezas físicas almejadas.

Pelo princípio da ação e reação, a força de atrito tem sentido contrário à rotação apoiando-se à balança que o mantém em equilíbrio:

$$F_{at} = F * b$$

F_{at} = Força de atrito;

F = ação do braço de alavanca sobre o dinamômetro;

b = Braço de alavanca.

Assim:

$$T = F * b$$

Conhecendo o braço de alavanca e com a leitura da força aplicada na célula de carga, pode-se obter o valor do torque no eixo do motor quando a velocidade angular ω é mantida constante.

Para o cálculo da potência disponível no eixo do motor (potência efetiva ou útil):

$$P = \omega * T$$

ou

$$P = 2 * \pi * n * T$$

Quando a rotação (n) estiver em rotações por segundo (rps) e o torque (T) em Newton metro (N.m), obtém-se a potência Watts (W), dividindo por 1000 em kW.

Ainda, segundo Brunetti (2012a), algumas unidades de medidas são mais usuais no cotidiano, se usarmos a rotação (n), em rotações por minuto (rpm) e torque (T) em kgf.m. O torque terá unidade de média em kgf.m/min, ao dividir o resultado por 4500, a potência será fornecida em cv, assim:

$$N(cv) = \frac{2 * \pi * n * T}{60 * 75}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Desenvolvimento da bancada de testes

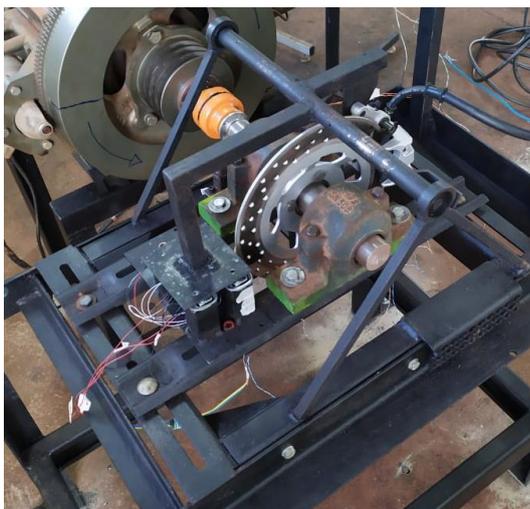
A bancada de testes foi confeccionada no Laboratório de protótipos, localizado no setor de máquinas e mecanização agrícola pertencente à Universidade Federal de Lavras, compreendido nas coordenadas 21°13'45.8"S 44°58'24.2"W. A bancada consiste em um motor de um cultivador motorizado TC14S, modelo NSB145S marca Yanmar, com potência máxima de 14 cv (10,3 kW) a 2400 rpm. Ligado ao motor se encontra o dinamômetro, concebido a partir de um freio de motocicleta; o disco de freio foi afixado ao eixo que está conectado ao motor e, ao acionarmos o freio, as pastilhas vão de encontro ao disco, assim, contabilizamos a força de reação da pastilha ao disco; a força de reação é mensurada por um conjunto de células de carga, na posição oposta ao freio. As Figuras 11 (motor) e 12 (dinamômetro) demonstram a bancada desenvolvida.

Figura 11 - Motor.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 12 - Dinamômetro desenvolvido para a bancada de testes.

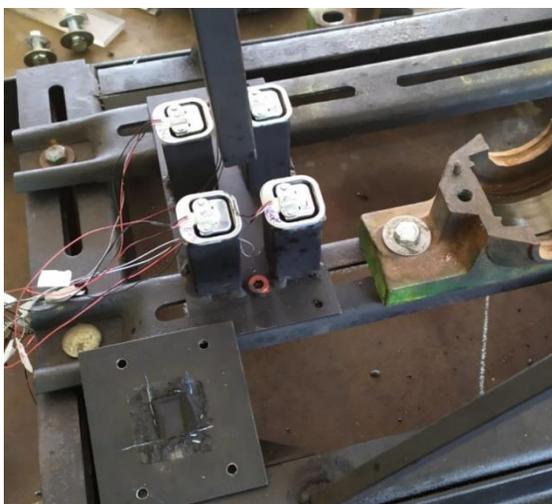


Fonte: Do autor (2021).

3.1.1 Células de carga utilizadas no dinamômetro

Para mensurar a força de reação do freio ao disco, foi utilizado um conjunto de células de carga, de capacidade máxima de medição de 50 kg, num sistema de pêndulo para transferir a referida força reativa do disco às células de carga. Elas estavam sob uma chapa de metal, para distribuir a força homogeneamente entre as 4 células de carga. Ao acionarmos o manete do freio, as pastilhas comprimiam o disco, mas, como o sistema de freio estava preso ao sistema de pêndulo, a força de reação era transmitida às células, então, quanto maior a força aplicada ao freio, maior a força de reação transmitida pelo pêndulo às células de carga. A Figura 13 demonstra as células de carga instaladas no dinamômetro.

Figura 13 - Células de carga do dinamômetro.

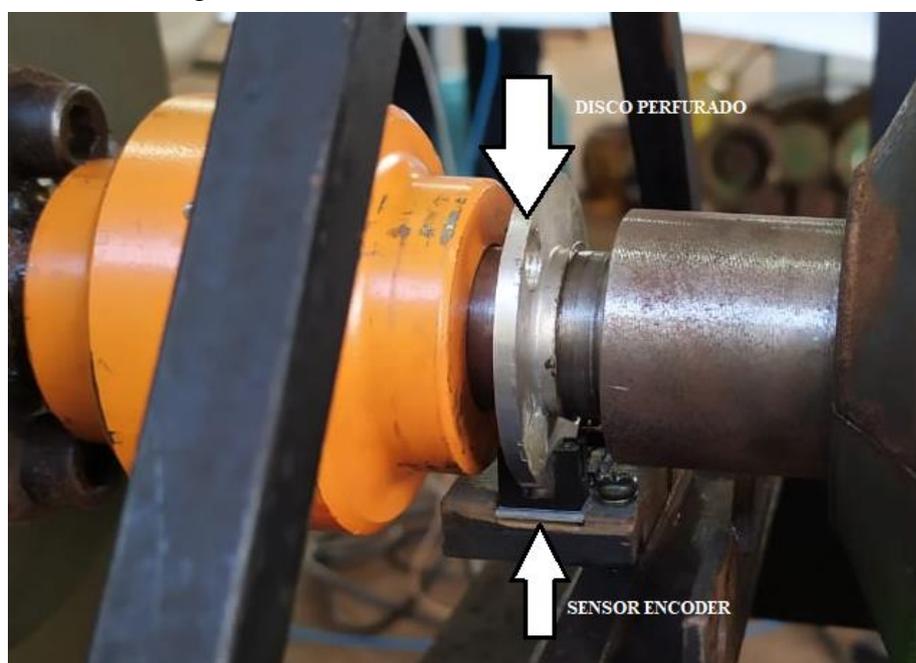


Fonte: Do autor (2021).

3.1.2 Encoder para mensurar a rotação do motor

Para mensurar a rotação do motor, foi utilizado um sensor encoder de emissão de luz infravermelho, instalado próximo ao eixo de entrada do dinamômetro. Entre o sensor e receptor foi afixado um disco perfurado de alumínio, contendo 2 perfurações e, para cada perfuração, era contabilizado um pulso; a contabilização do número de pulsos, num tempo determinado, fornece-nos a rotação do eixo e, conseqüentemente, do motor. A Figura 14 mostra o sensor e o disco instalados.

Figura 14 - Sensor encoder instalado no motor.

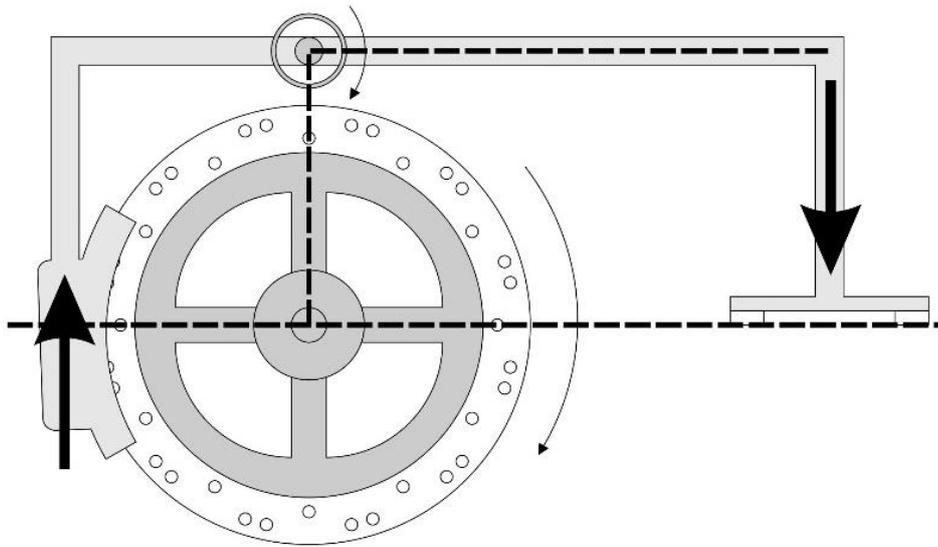


Fonte: Do autor (2021).

3.1.3 Dinamômetro

Para mensurar a força, foi instalado um conjunto de células de carga oposta ao freio do dinamômetro. No momento em que as pastilhas encontravam o disco, a sua tendência era que acompanhassem o movimento do disco pelo atrito e inércia, assim, foi desenvolvido um sistema cujo movimento fosse mensurado e coletado, quanto maior a força aplicada das pastilhas ao disco, maior a força de atrito mensurada. O sistema pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Dinamômetro.



Fonte: Do autor (2021).

3.2 Calibração dos sensores

Os sensores foram calibrados e seus procedimentos descritos a seguir.

3.2.1 Células de carga

Para a calibração das células de carga do dinamômetro, foi utilizada a biblioteca presente no IDE do Arduino. De acordo com tal algoritmo, deve-se posicionar algo com massa conhecida sobre elas. De posse do valor conhecido e mensurado, podemos confrontar os valores e criar uma curva de calibração; tal procedimento é realizado sempre que o sistema é ligado. Com relação à nossa pesquisa, posicionamos um bloco de massa 1kg sobre as células de carga para realizar a calibração.

3.2.2 Encoder

De acordo com a lógica empregada na biblioteca, o sensor de rotação deveria ler a quantidade de giros do eixo, em um determinado tempo, para isso, utilizamos um sensor encoder de luz ultravioleta. Quando a luz Ultravioleta é detectada pelo receptor, é contabilizado um pulso; o intervalo de tempo, na detecção de 2 pulsos, caracteriza uma rotação no eixo. Tal algoritmo segue de acordo com a equação da contagem dos pulsos, se

contabilizarmos, em 1 minuto, aproximadamente, 2000 pulsos, a rotação do sistema estará na faixa de 1000 rpm.

Equação de contagem dos pulsos:

$$Rpm \text{ motor} = \frac{\text{número de pulsos contabilizados em 1 segundo}}{\text{número de pulsos em uma volta}} \times 60$$

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do dinamômetro

Para a calibração do dinamômetro, o seguinte teste foi realizado. Uma haste de comprimento conhecido foi afixada ao ponto de giro do pêndulo, Figura 16. Foram alocados, em posição conhecida do braço, 5 blocos de massa 1, 2, 4, 5 e 10 kg, conforme Figura 17. A partir da leitura das células de carga concomitante ao comprimento do braço, podemos calcular o torque real, de acordo com os valores conhecidos, assim, ajustamos a curva de calibração do dinamômetro, por intermédio da regressão dos valores e obtivemos o valor do torque virtual (valor medido pelo dinamômetro desenvolvido).

Figura 16 - Braço preso ao eixo do pêndulo.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 17 - Calibração do dinamômetro.



Fonte: Do autor (2021).

A haste de calibração possuía 0,37m (37cm) de comprimento e o braço de alavanca do dinamômetro de 0,17m (17cm). A Figura 3 mostra o comprimento da haste de calibração e o braço de alavanca do dinamômetro.

Figura 18 - Comprimento da haste de calibração e braço do dinamômetro.



Fonte: Do autor (2021).

De acordo com os valores de torque real e virtual, foi gerada a Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Valores da calibração do dinamômetro.

MASSA CONHECIDA (kg)	VALOR NA CÉLULA DE CARGA (kg)	TORQUE REAL (kgf.m)	TORQUE VIRTUAL (kgf.m)
1	2,07	0,37	0,35
2	4,9	0,74	0,83
4	11,4	1,48	1,94
5	14,9	1,85	2,53
10	29,8	3,7	5,84

Fonte: Do autor (2021).

A partir dos valores calculados e mensurados, podemos encontrar a equação da curva de calibração.

Equação de calibração:

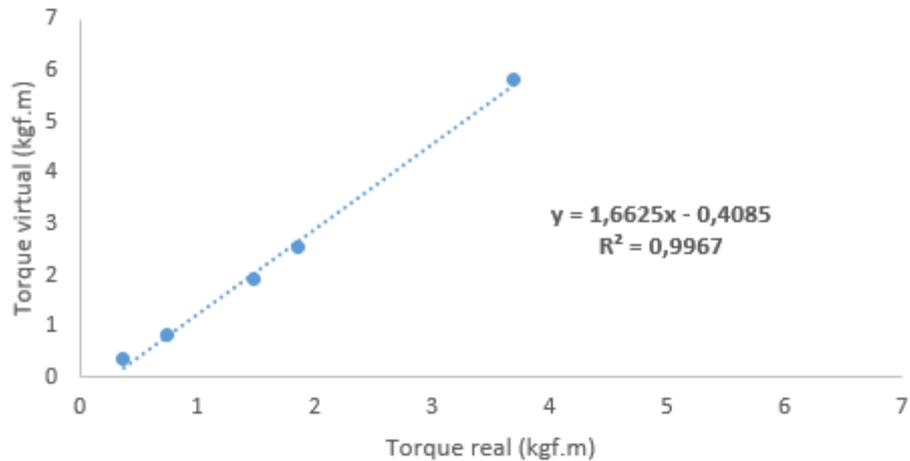
$$Tr = 1,6625 * Tv - 0,4085$$

Tr = Torque real;

Tv = Torque virtual.

A Figura 19 mostra o gráfico da curva de calibração, bem como quão próximos os dados estão da curva gerada (R^2).

Figura 19 - Curva de calibração do dinamômetro.



Fonte: Do autor (2021).

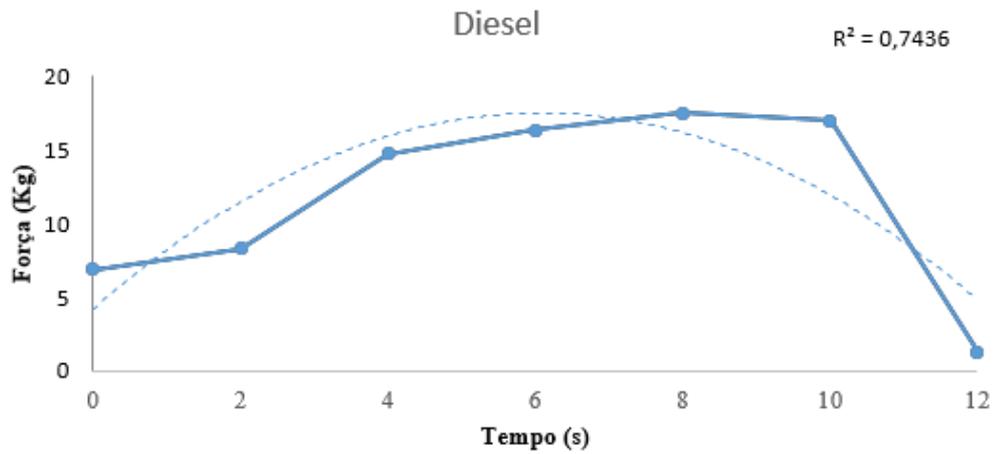
4.2 Validação do Dinamômetro

Para a validação do dinamômetro, realizamos dois testes, um para mensurar a força lida no dinamômetro, de acordo com a força exercida das pastilhas no disco de freio e a rotação do sistema, de acordo com a posição do acelerador do motor.

4.2.1 Curvas de força

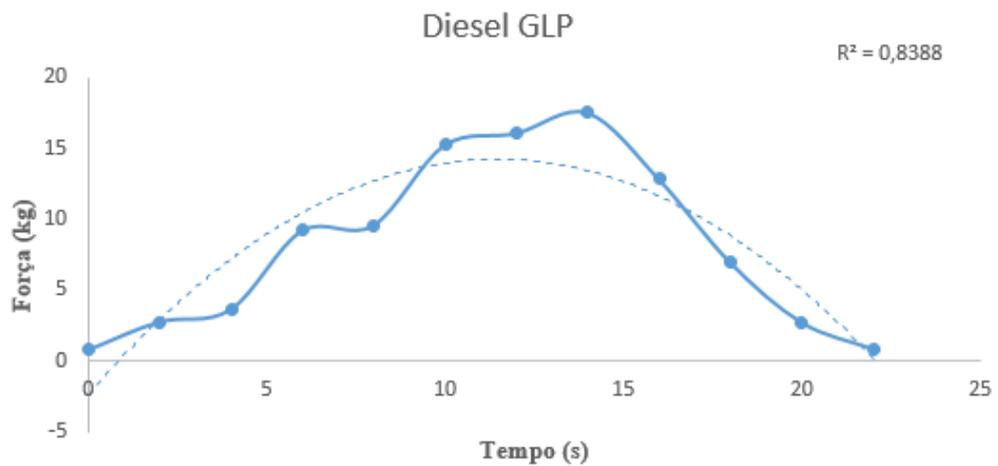
Para verificarmos a eficácia na coleta dos dados de força do dinamômetro, foram coletados 10 gráficos de força, um para cada combustível estudado. O teste consistia em ir aumentando gradualmente a força aplicada pelo freio e mensurando os valores de força pela célula de carga em relação ao tempo. Os gráficos são demonstrados nas Figuras 20 a 29.

Figura 20 - Gráfico de força utilizando diesel.



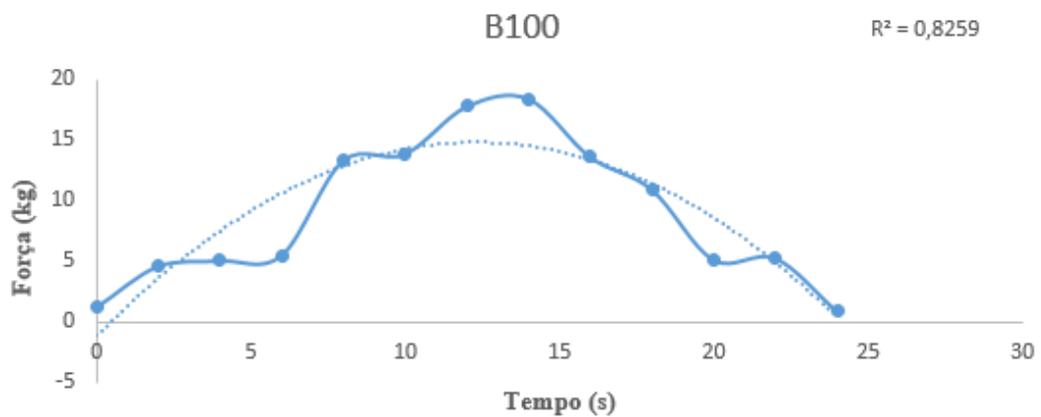
Fonte: Do autor (2021).

Figura 21 - Gráfico de força utilizando Diesel GLP.



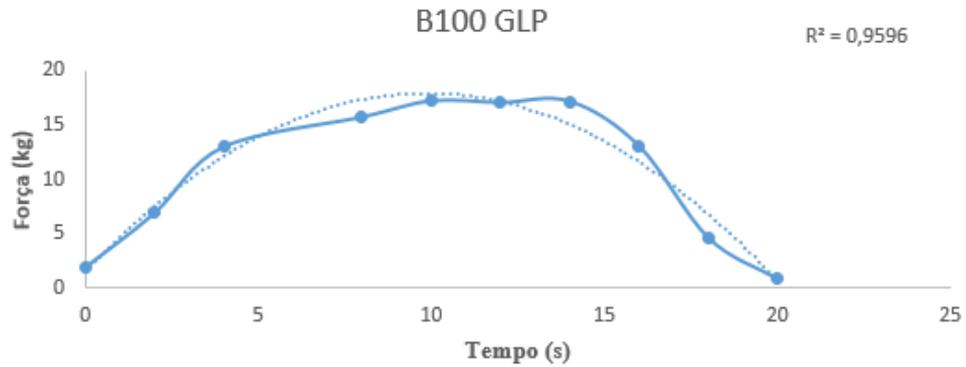
Fonte: Do autor (2021).

Figura 22 - Gráfico de força utilizando B100.



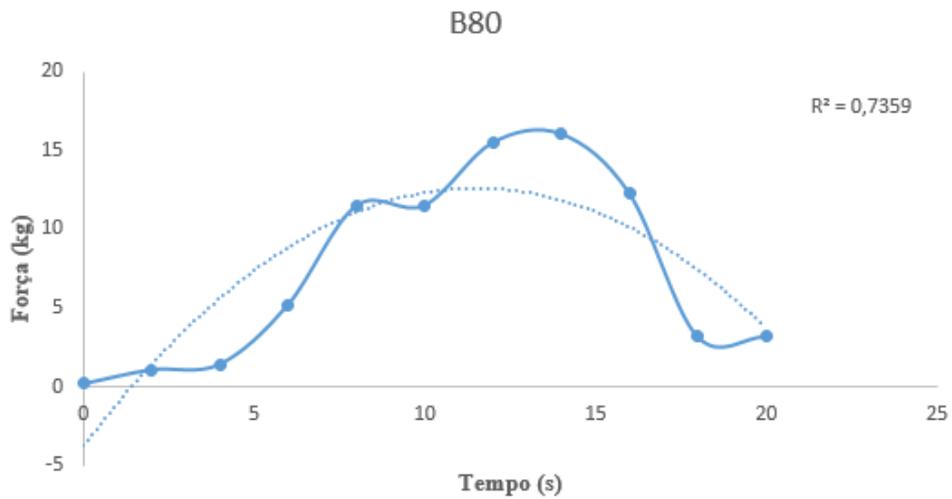
Fonte: Do autor (2021).

Figura 23 - Gráfico de força utilizando B100 GLP.



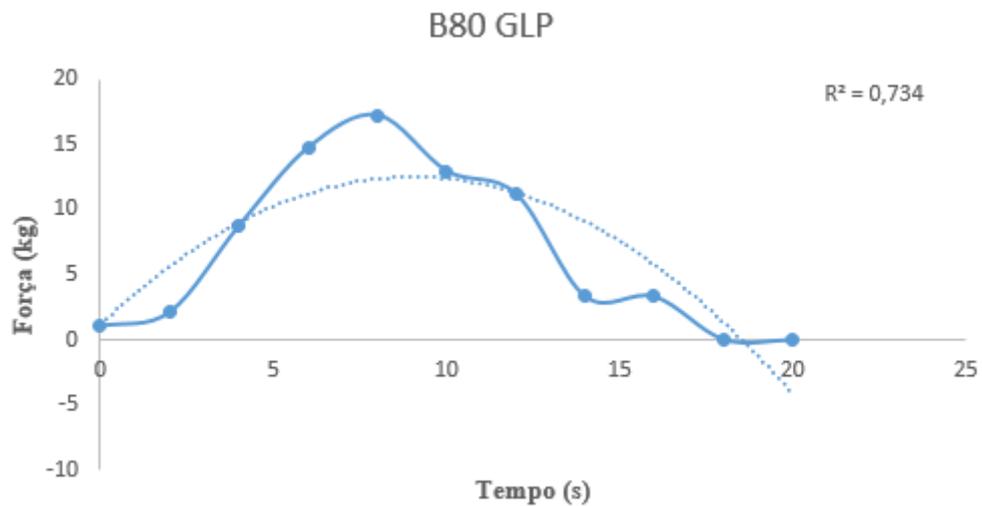
Fonte: Do autor (2021).

Figura 24 - Gráfico de força utilizando B80.



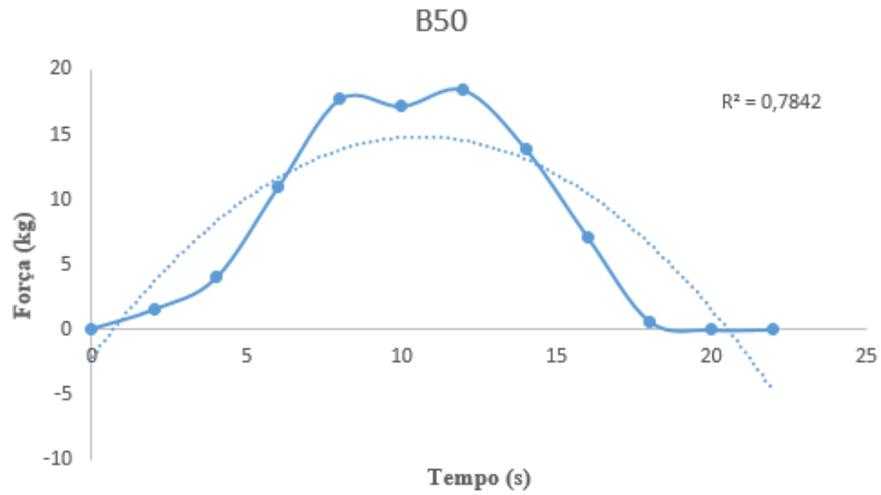
Fonte: Do autor (2021).

Figura 25 - Gráfico de força utilizando B80 GLP.



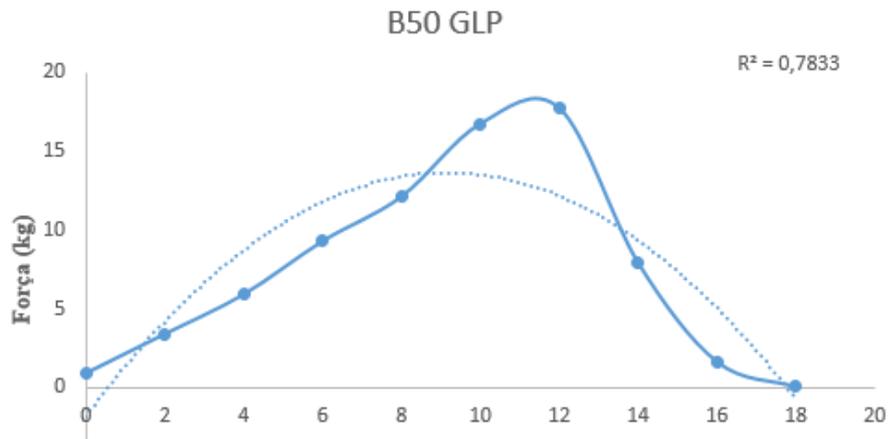
Fonte: Do autor (2021).

Figura 26 - Gráfico de força utilizando B50.



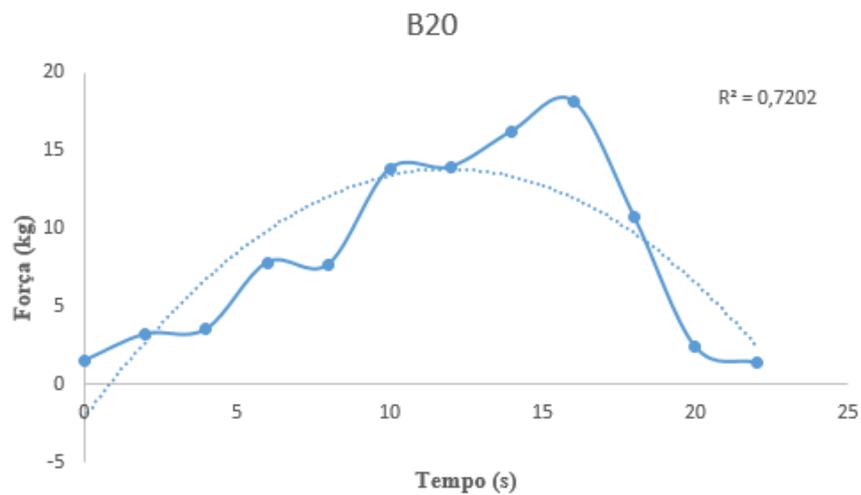
Fonte: Do autor (2021).

Figura 27 - Gráfico de força utilizando B50 GLP.



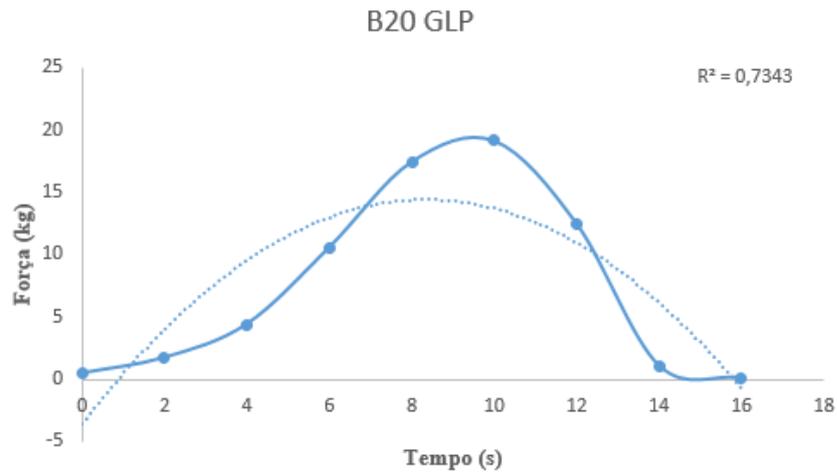
Fonte: Do autor (2021).

Figura 28 - Gráfico de força utilizando B20.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 29 - Gráfico de força utilizando B20 GLP.



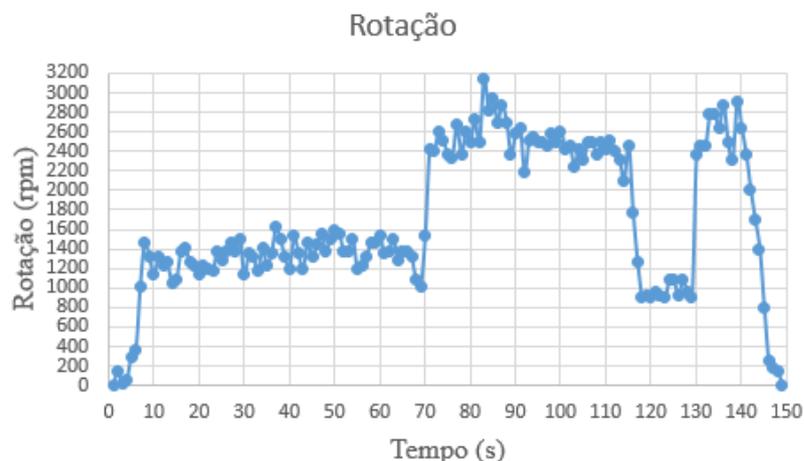
Fonte: Do autor (2021).

Em todos os gráficos, foi traçada uma curva de tendência polinomial de grau dois, valores de R^2 foram, em todos os gráficos, maiores que 72%, caracterizando uma boa aproximação dos dados mensurados à proposta de calibração.

4.3 Validação do sensor de rotação

Para validarmos o sensor de rotação, foram coletados dados de rotação, durante 150 segundos, variando a rotação do motor, em 3 valores médios, sendo de 900 rpm em lenta, 1400 rpm intermediária e 2400 rpm nominal. A diferença entre as rotações nominal e intermediária foi 60%, as rotações coletadas pelo sensor foram confrontadas às rotações mensuradas com o tacômetro digital comercial. O teste é demonstrado na Figura 30.

Figura 30 - Teste da rotação no dinamômetro.



Fonte: Do autor (2021).

No teste, o motor foi ligado com o acelerador, na posição intermediária (1400 rpm), após 60 segundos, mudou-se a posição do acelerador para nominal (2400), durante 40 segundos, então, o motor ficou, durante 10 segundos, em rotação mínima e acelerado para nominal, durante 10 segundos.

5 CONCLUSÃO

O perfil Normal dos gráficos de força condiz com o teste realizado; os valores de rotação coletados pelo sensor do dinamômetro foram semelhantes aos realizados pelo tacômetro digital; a potência máxima com diesel, descrita pelo fabricante, foi próxima à encontrada na curva de tendência do diesel, assim, o dinamômetro desenvolvido se mostra eficaz, para mensurar o torque e a potência dos combustíveis, em motores de pequeno porte, bem como aplicar cargas ao motor.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- BARGER, E. L. *et al.* **Tratores e seus motores**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 398 p.
- BOSCH. O que te move? **Bosch**, 2021. Disponível em: http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/velas/Catalogo-Velas-Cabos-Ignicao_2015-2016-LowRes.pdf. Acesso em: 24 mar. 2021.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012a. v. 1, 553 p.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012b. v. 1, 483 p.
- ELETROGATE. Sensor de Velocidade Encoder. **Eletrogate**, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: https://www.eletrogate.com/sensor-de-velocidade-encoder?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&gclid=Cj0KCQiAhs79BRD0ARIsAC6XpaUCCbdWCO7FQI2jlcJpAPwrCkMtTWRLHVKnRjzoJ_0FCr8Q-g8IcX4aAkvgEALw_wcB. Acesso em: 24 mar. 2021.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.
- NGK Velas. Características técnicas. **NGK Velas**, [S.l.], 2020. Disponível em: <http://www.ngkntk.com.br/manual/pdf/velas.pdf>. Acesso em: 20 out. 2020.
- NIKOLAUS Otto. **Encyclopaedia Britannica**, Chicago, 2009. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Nikolaus-Otto>. Acesso em: 13 fev. 2019.
- PERCÍLIA, E. Rudolf Christian Karl Diesel. **Brasil Escola**, Brasília, 2019. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/biografia/rudolf-christian-karl-diesel.htm>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- SCHMIDT, S. Design e função. **HBM**, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>. Acesso em: 24 mar. 2021.
- SENSOR de Velocidade Encoder. **Baú da Eletrônica**, São Paulo, 2021. Disponível em: https://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-velocidade-encoder.html?gclid=Cj0KCQiAzZL-BRDnARIsAPCJs73GPbSNGwzFiIjAB5MbQABH67MFjR-QrE0CGInj6Lk6Jk7l0VeEgbsaAomFEALw_wcB. Acesso em: 24 mar. 2021.
- VON MITZLAFF, K. **Engines for biogas**. [S.l.]: GTZ, 1988. 133 p.

CAPÍTULO 2 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO MOTOR UTILIZANDO MISTURAS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL E GLP

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de substituímos, gradativamente, os combustíveis fósseis por biocombustíveis fez crescer a necessidade de pesquisas a respeito de sua viabilidade. No meio agrícola, especificamente, a mecanização agrícola desempenha papel fundamental nesse aspecto, pois atua diretamente na cadeia de produção de biocombustíveis e a mecanização está presente do plantio da matéria-prima ao seu consumo em forma de energia.

O consumo de combustíveis renováveis vem crescendo, principalmente no âmbito nacional, com a adoção de medidas, como a da ANP (agência do petróleo, gás natural e biocombustíveis), que, em 2020, autorizou o aumento de 10 para 11% de biodiesel no diesel comercial, tendo o governo brasileiro estipulado a meta de atingir 15% em 2023. Ainda, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), a matéria-prima mais utilizada na produção de biodiesel foi o óleo de soja, que corresponde a 68% de toda a produção, seguido por gordura animal com 14%.

O GLP (gás liquefeito de petróleo ou gás de cozinha convencional) está em processo de liberação para uso em motores, de acordo com a lei, todavia existe um projeto de Lei 4217/19, relatado em comissão, que apresentou parecer favorável (BRASIL, 2019) e, de acordo com o jornal Globo (ORDOÑEZ, 2020), no ano de 2020, o uso do GLP foi autorizado, para ser usado na geração de energia, em um hospital que atendia pacientes enfermos da Covid 19. A pesquisa que propomos vem para contribuir para com as demais pesquisas que avaliaram a eficiência energética, quando há a adoção de dois tipos de combustíveis, líquido e gasoso num motor. Assim avaliamos o desempenho energético de diferentes misturas de combustíveis, utilizando diesel comercial e misturas de biodiesel de óleo residual; os combustíveis líquidos foram substituídos na proporção de 40% em massa por GLP; o torque e potência máximos médios foram mensurados para cada combustível; o motor do trator Yanmar, modelo NSB14S de 14 cv e, para mensurar o torque e potência, foi acoplado ao eixo virabrequim do motor o dinamômetro desenvolvido pelo autor no primeiro capítulo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biodiesel

De acordo com a resolução 7/2008 da ANP (2020), o biodiesel é um combustível composto de monoalquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais; é obtido, a partir da alteração da estrutura química desses óleos pelo processo de transesterificação, produzindo ésteres de cadeias menores.

A proposta da utilização de biocombustíveis, em motores de combustão interna, não é contemporânea. Durante a exposição de Paris em 1900, a companhia francesa Otto demonstrou o funcionamento de um pequeno motor diesel com óleo de amendoim (KNOTHE, 2001). Essa experiência foi tão bem-sucedida que apenas alguns dos presentes perceberam as circunstâncias em que havia sido conduzida. O motor havia sido construído, para consumir petróleo, mas operou com óleos vegetais sem qualquer modificação (KNOTHE *et al.*, 2006). No final do século XIX, já era óbvio que, no futuro, as perspectivas do motor de ignição por compressão estariam condicionadas ao desenvolvimento de seus combustíveis (CANAKCI; SANLI, 2008).

Segundo Knothe *et al.* (2006), em 1938, foi realizado um estudo no Brasil que tinha por objetivo investigar a utilização de óleos vegetais como combustíveis. Foram avaliados 20 diferentes tipos de óleos, todavia esse estudo foi inconclusivo e não houve engajamento na promoção do biodiesel, mesmo porque testes de emissões não eram comumente realizados naquela época.

2.2 Biodiesel de óleo residual

Atualmente, como não há uma legislação federal específica para o descarte de óleos residuais, o estado de Minas Gerais conta com a lei nº 20.011 de 5 de janeiro de 2012 (BRASIL, 2012) que incentiva o descarte adequado, refino e reutilização do óleo residual, mas muitos estabelecimentos descartam o óleo de fritura de forma inadequada, como, por exemplo, na rede de esgoto. Tal forma de descarte resulta no entupimento de tubulações e consequente utilização de produtos químicos para desentupi-las. Esses produtos, que são tóxicos, acarretam em mais danos ambientais e corroboram com a forma errada de descarte.

Ao ser despejado nas redes de esgotos comuns, o óleo acaba indo parar em rios e lençóis freáticos entre outros habitats aquáticos. Porém, apesar de todos os malefícios

ocasionados pela geração desses resíduos, é plenamente possível reverter esse quadro por meio da reciclagem e utilização das mais de 30.000 toneladas de óleo de fritura gerados anualmente (PARENTE, 2003). No Brasil, a reutilização de óleo de fritura se concentra basicamente na produção de sabão e biodiesel e, em menor proporção, nos setores de fabricação de tintas e massas de vidraceiro (NOGUEIRA; BEBER, 2009).

Segundo Silva (2011), o biodiesel de óleo residual apresenta vantagens sob o ponto de vista ecológico, em relação ao óleo derivado de petróleo. O éster de óleo residual possui a vantagem de não emitir, na combustão, compostos de enxofre responsáveis pela chuva ácida, além de ser rapidamente biodegradável no solo e na água. O autor ainda nos demonstra que o biodiesel de óleo de fritura, apesar de ser um óleo parcialmente oxidado, apresenta características bastantes semelhantes aos ésteres oriundos de óleos refinados.

Por intermédio da Figura 1, apresentada por Knoth *et al.* (2006), é possível perceber a semelhança das características entre os combustíveis, justificando a adição de biodiesel ao diesel.

Figura 1 - Especificações do óleo diesel e do biodiesel de óleo residual.

Características	Óleo Diesel	Biodiesel
Massa Específica 15 °C (Kg m ⁻³)	0,85	0,89
Ponto inicial de destilação (°C)	189	307
10% (°C)	220	319
20% (°C)	234	328
50% (°C)	263	333
70% (°C)	286	335
80% (°C)	299	337
90% (°C)	317	340
Ponto final de destilação (°C)	349	342
Aromáticos	31,5	nd
Carbono (%)	86,0	77,4
Hidrogênio (%)	13,4	12,0
Oxigênio (%)	0,00	11,2
Enxofre (%)	0,30	0,03
Índice de cetano	46,1	44,6
Número de cetano	46,2	50,8
Valor calórico (MJ Kg ⁻¹)	42,3	37,5

Fonte: Knoth *et al.* (2006).

Os ésteres metílicos obtidos pelo processo de transesterificação de óleos residuais, usados em frituras, podem ser utilizados como combustível, complementando ao biodiesel produzido por matérias-primas em maior disponibilidade. De acordo com Guabiroba,

D'Agosto e Franca (2014), o uso do óleo residual é o meio mais barato de se produzir o biodiesel, neste sentido, a utilização de óleo vegetal reciclado pode ser alternativa na redução dos custos. Com o aumento da porcentagem de biodiesel misturado ao diesel comercial, a utilização desse biodiesel é alternativa valiosa, visto que ele pode ser adquirido de forma gratuita ou com um valor baixo. A Tabela 1 nos mostra a evolução da mistura de biodiesel no diesel comercial no Brasil no passar dos anos.

Tabela 1 - Evolução da quantidade de biodiesel no diesel brasileiro.

Mês	Ano	Mistura
JUNHO	2008	B2
JUNHO	2009	B3
DEZEMBRO	2009	B4
JUNHO	2014	B5
OUTUBRO	2014	B6
FEVEREIRO	2017	B7
FEVEREIRO	2018	B8
AGOSTO	2019	B10
SETEMBRO	2019	B11
MARÇO	2020	B12
-----	2023	B15

Fonte: Adaptado da ANP (2020).

2.3 Gás liquefeito de petróleo - GLP

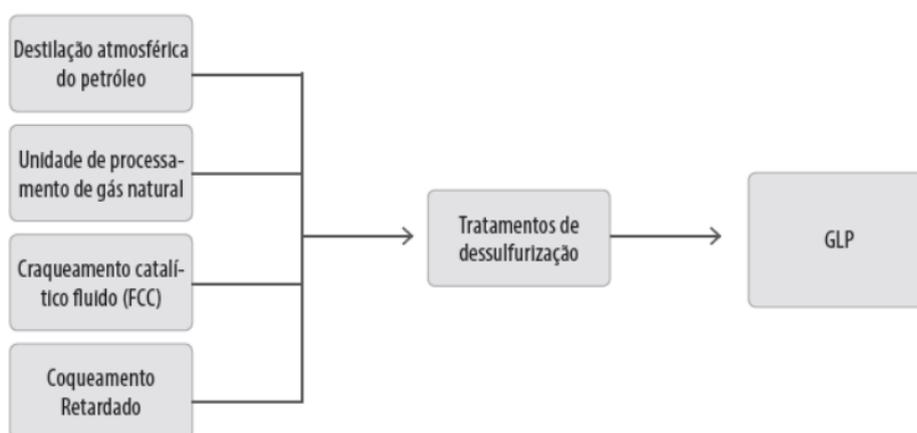
Segundo ANP (2020), o gás liquefeito de petróleo (GLP) é popularmente conhecido como gás de botijão ou gás de cozinha e sua queima proporciona baixo nível de emissões. Ele é composto essencialmente por dois gases extraídos do petróleo, butano e o propano, podendo conter, também, minoritariamente, outros hidrocarbonetos como o etano. Esse combustível é incolor e, para tornar o seu uso mais seguro, adiciona-se um composto à base de enxofre, de modo a torná-lo perceptível ao olfato humano em casos de vazamento.

De acordo com a Petrobras (2019), os principais constituintes do GLP são: propano (C₃H₈); propeno (C₃H₆); isobutano (C₄H₁₀); n-butano (C₄H₁₀); e buteno (C₄H₈). A presença de etano (C₂H₆) é restrita no GLP, porque torna difícil a liquefação do produto nas condições de armazenamento. O etano, normalmente, está presente no gás combustível junto com o metano. Por outro lado, os mais pesados, como o n-pentano (C₅H₁₂), estão restritos no GLP, porque dificultam a vaporização do produto e a sua queima completa, podendo levar à

ocorrência de fuligem. Normalmente, n-pentano e hidrocarbonetos mais pesados estão presentes na gasolina. A queima do GLP é limpa, comparada aos combustíveis mais pesados, produz baixo nível de emissões de CO₂ por sua alta proporção Hidrogênio/Carbono. Outro fator interessante, a respeito desse combustível, é a sua relação entre o volume gasoso e líquido, que é de 250, o que faz com que o volume comprimido e liquefeito ocupe pouco espaço. Quando se usa o GLP, é vaporizado lenta e seguramente pela abertura da válvula instalada na saída do recipiente de armazenamento (botijão). Ele pode ser transportado e armazenado como líquido e, quando liberado, é vaporizado e é queimado como gás e, por ser facilmente levado do estado líquido para o estado gasoso e vice-versa, faz-se um combustível único.

Ainda segundo a ANP (2020), o GLP pode ser produzido em refinarias ou em plantas de processamento de gás natural. Quando oriundo do refino, o Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) é o principal processo produtivo desse gás no Brasil. Após produção ou importação, o GLP pode ser armazenado, em vasos de pressão denominados esferas de GLP, sendo, em seguida, na revenda, acondicionado na forma líquida em botijões na correspondente pressão de vapor. O botijão de 13 kg (P13) é usado no consumo residencial para o cozimento de alimentos. O P13 é o recipiente mais usado no Brasil, porém o GLP também pode ser armazenado e distribuído em recipientes que variam de 2 a 90 kg, para consumo em áreas industriais e comerciais ou em navios-tanque dedicados ao transporte do produto. A Figura 2 mostra os processos para a produção do GLP no Brasil.

Figura 2 - Produção de GLP no Brasil.



Fonte: Petrobras (2019).

Já a Tabela 2 nos mostra os diferentes tipos de botijões que são comercializados, em versões que vão de 2 a 90 quilos de produto liquefeito, assim, há uma variedade de vasilhames comerciais para serem usados nas mais diversas aplicações.

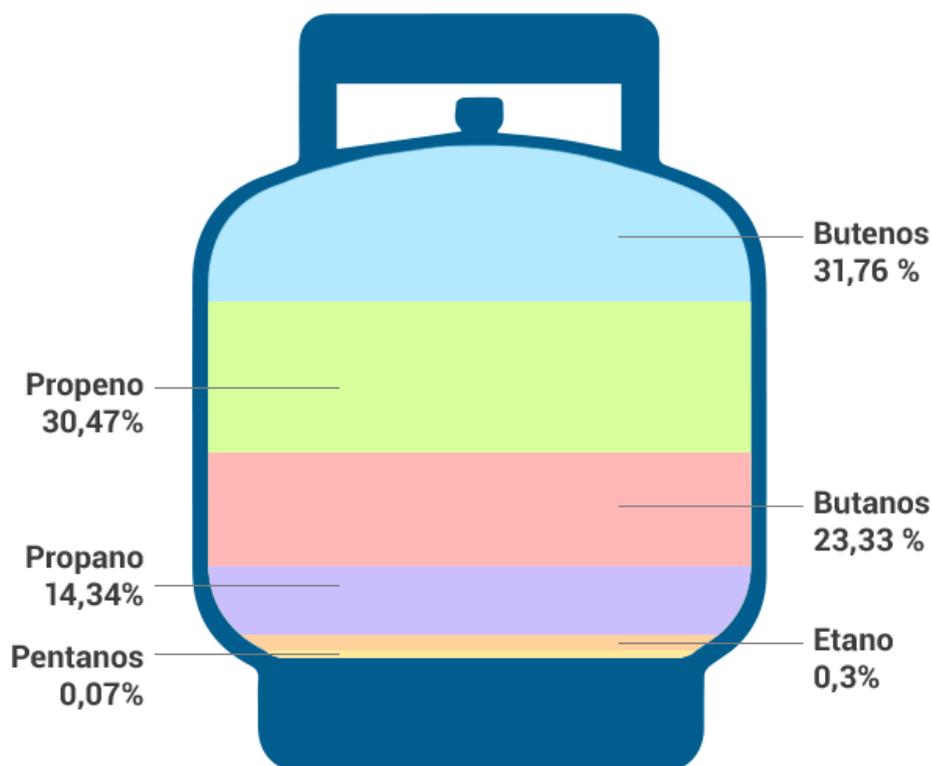
Tabela 2 - Aplicação e capacidade dos vasilhames de GLP no Brasil.

Embalagem	Capacidade, kg	Aplicação
P-2	2	Camping e ambulantes
P-5	5	Camping e ambulantes
P-7	7	Uso residencial
P-8	8	Uso residencial
P-13	13	Uso residencial
P-20	20	Empilhadeira
P-45	45	Condomínios
P-90	90	Restaurantes

Fonte: Petrobras (2019).

A Fogás (2020) nos mostra, na Figura 3, que a composição do gás no interior do bujão de GLP é constituída aproximadamente por:

Figura 3 - Constituição média dos gases presentes no GLP.



Fonte: Fogás (2020).

Ainda, segundo a Fogás, as propriedades químicas do GLP são descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades químicas do GLP.

	Propano	N-Butano
Peso Específico na fase vapor	1,522	2,0008
Volume específico (15,5°C)	1,9665	1,712 m ³ /t
Poder calorífico inferior	11000	11000 Kcal/kg
Poder calorífico inferior	21100	26500 Kcal/m ³
Temperatura de auto-ignição	480°C (com ar)	420°C
Temperatura crítica	96,8°C	152,0°C
Temperatura da chama no ar	1925°C	1895°C
Limites de inflamabilidade	2,37 a 9,50%	1,86 a 8,41%

Fonte: Fogás (2020).

2.4 Motor duplo combustível

Motor duplo combustível é determinado, quando são usados dois tipos distintos de combustíveis, na câmara de combustão, podendo ser ambos do mesmo ciclo ou de ciclos distintos, para motores ciclo diesel de duplo combustível com ciclos distintos. O diesel se torna um combustível piloto, ou seja, ele é necessário para se iniciar a combustão no cilindro, já que o ciclo diesel não apresenta vela de ignição.

Segundo Von Mitzlaff (1988), na operação em duplo combustível, o diesel ainda é pulverizado na câmara de combustão, mas o motor aspira e comprime uma mistura de ar e um combustível; na forma gasosa, que foi previamente misturado ao duto de admissão, as misturas entram em combustão quando o diesel é pulverizado no cilindro.

Ainda segundo Von Mitzlaff (1988), a quantidade de Diesel necessária para a mistura entrar em combustão é por volta de 10 a 20% da quantidade-padrão, num motor diesel convencional; o autor ainda aponta algumas vantagens de se possuir um motor duplo combustível, como:

- a) O motor pode voltar a operar apenas com diesel caso seja necessário;
- b) Qualquer contribuição com o gás combustível, de 0 a 85%, pode substituir uma parte correspondente de diesel enquanto a eficiência permanece semelhante ao diesel;

- c) Como o motor diesel possui um sistema que a quantidade de combustível injetada controla a potência e a rotação, podemos fixar uma quantidade de gás a ser injetada e apenas modificar a quantidade injetada de diesel.

Contudo a modificação do motor também possui algumas desvantagens, tais como:

- a) O motor não funcionará sem a injeção do combustível piloto, no caso, o combustível líquido;
- b) O motor não deve trabalhar com faixas de injeção de diesel menores que 15%, pois a probabilidade de superaquecimento do sistema, principalmente o bico injetor, é muito significativa;
- c) Na prática, a quantidade máxima para a substituição de diesel por gás combustível é de aproximadamente 40%, assim, o bico injetor se resfria e fica lubrificado, mas uma verificação a cada 500 horas do bico injetor é recomendada.

2.4.1 Misturador de câmara simples

A câmara simples consiste numa junção tipo T em que há entrada de ar atmosférico e gás, a mistura entra diretamente no coletor de admissão de ar do motor, sendo feita a homogeneização dos gases pela turbulência na admissão (VON MITZLAFF, 1988).

Ainda segundo Von Mitzlaff (1988), quando o motor está em regime estacionário, ou seja, sua rotação e potência não se modificam, a quantidade de ar admitido é constante, em consequência, é constante a relação ar e gás; contudo, ao sujeitar o motor a uma carga maior, ele irá diminuir a sua rotação e também a quantidade de ar admitido, tornando a mistura demasiadamente rica. Sendo assim, ao se colocar carga no motor, deve-se também modificar a quantidade de gás de acordo com a quantidade de ar admitido com carga.

2.5 Torque

A definição mecânica de torque é a seguinte: “o momento de um torque, por abreviação torque, é provocado por duas forças de intensidade igual agindo paralelamente, mas, em direções opostas, sobre um corpo que toma um movimento de rotação” (WYLEN; SONNTAG, 1993, p.). Mialhe (1980) assevera que torque é um momento, conjugado ou binário, que tende a produzir ou que produz rotação; é o produto de uma força por um raio

comumente denominado braço de torque. A mensuração do torque consiste, basicamente, em determinar-se a intensidade de uma força que, atuando, na extremidade de um braço, tende a produzir ou produz movimento de rotação. Quando o movimento de rotação é limitado, como no caso de porcas e parafusos, essa mensuração é feita por meio da chave torquimétrica. No caso de movimento rotativo contínuo, como acontece nos motores, o torque é medido pelos dinamômetros de absorção ou freios dinamométricos. O torque dos motores é expresso, comumente, em termos de metro x quilograma-força ou mkgf. É importante observar a ordem de apresentação das unidades: primeiro m (metro) e depois kgf, ou seja, mkgf, para não haver possibilidade de confusão com a unidade de trabalho kgm (quilogrâmetro). O torque provocado pelo produto da força desenvolvida sobre os pistões por um braço de alavanca fictício passa por um máximo em um valor determinado de velocidade de rotação (WYLEN; SONNTAG, 1993). Para medir o torque do motor, imprime-se-lhe uma força para que possa freá-lo, sendo o torque determinado por:

$$T = P * L$$

Onde:

T = torque (mkgf);

P = força (kg);

L = comprimento do braço de alavanca (m).

2.6 Potência

De acordo com Brunetti (2012a), para o cálculo da potência disponível no eixo do motor (potência efetiva ou útil), é utilizado a seguinte equação:

$$P = \omega * T$$

ou

$$P = 2 * \pi * n * T$$

Quando a rotação (n) estiver em rotações por segundo (rps) e o torque (T) em Newton metro (N.m), obtém-se a potência Watts (W), dividindo por 1000 em kW.

Ainda, segundo Brunetti (2012a), algumas unidades de medidas são mais usuais no cotidiano, se usarmos a rotação (n), em rotações por minuto (rpm) e torque (T), em kgfm; o torque terá unidade de medida em kgf.m/min, ao dividir o resultado por 4500, a potência será fornecida em CV, assim:

$$N(cv) = \frac{2 * \pi * n * T}{60 * 75}$$

A potência efetiva do motor é a potência desenvolvida por um torque (valor fornecido pela bancada de testes) e corresponde ao produto desse torque pelo deslocamento angular na unidade de tempo. Nos ensaios de potência, foi considerada a norma NBR ISO 1585, antiga ABNT NBR 5484 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1996). Ela se aplica à avaliação do desempenho, observando, em particular, a apresentação das curvas de potência à plena carga, em função da rotação do motor, isto é, somente para a avaliação da potência. De acordo com tal norma, para a execução dos ensaios, as medições devem ser tomadas, em um número tal de rotações do motor de modo que seja possível definir completamente a curva de potência, no intervalo entre a menor e a maior das rotações do motor recomendadas pelo fabricante, devendo-se incluir, nessa faixa de rotações, aquela rotação na qual o motor produz sua potência máxima. Para a nossa pesquisa, o dinamômetro gerou as curvas de potência máxima.

2.7 Pesquisas relacionadas

Mohebhi *et al.* (2012) testaram um motor marca Motorsazan MT4.244 de um trator agrícola de 3,99 litros, turbinado, 4 cilindros, injeção direta utilizando diesel e biodiesel de óleo residual. O aumento do percentual de biodiesel na mistura reduziu o torque e a potência do motor, com B100, a perda de potência e torque comparada ao diesel combustível foi de 5,3%.

Barbosa (2016) realizou testes de torque e potência num trator marca Valtra modelo A950 com blendas crescentes de biodiesel de óleo de macaúba. O autor verificou que, com o uso do B100 (biodiesel puro), na rotação de trabalho do trator, 540 rpm na tomada de potência, houve redução da potência de, aproximadamente, 28% em relação ao diesel. Quando o autor diminuiu a rotação para 324 rpm na tomada de potência, a potência diminuiu em 38% aproximadamente. Em relação ao torque, a redução foi de 17 e 36%, quando utilizado B100 nas rotações estudadas.

Colle (2018) pesquisou a potência de um motogerador quando foi utilizado biodiesel de óleo residual e biogás; o autor verificou que, ao adicionar biogás ao combustível líquido, obteve-se um sutil aumento de 5% na potência, se comparado com o uso com o combustível líquido; já entre os combustíveis líquidos, o uso de B100 teve redução na potência de aproximadamente 21% se comparado ao diesel.

Kolip (2011) analisou o torque e potência de um motor, quando porcentagens crescentes de GLP substituíssem o diesel; o autor verificou que houve aumento de torque de aproximadamente 10%, quando a substituição foi de 25% por gás; já a potência permaneceu próxima ao uso apenas de diesel.

Volpato *et al.* (2009) verificou o desempenho de um motor diesel, quando utilizado B100 do biodiesel de óleo de soja. Segundo o autor, a média do torque do B100 apresentou redução, se comparada ao diesel, de 10% do valor do torque, já a potência obteve uma redução na ordem de 5% comparando o biodiesel puro ao diesel mineral.

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 Localização

O trabalho foi realizado, no município de Lavras-MG, no laboratório de protótipos, localizado no Departamento de Engenharia agrícola, setor de máquinas e mecanização agrícola pertencente à Universidade Federal de Lavras-UFLA, compreendido nas coordenadas 21°22'94.1"S; 44°97'34.2"W a 800 metros de altitude.

3.2 Motor

O motor utilizado na pesquisa estava montado no trator marca Yanmar TC14S, removido do trator e instalado em bancada para a coleta dos dados. Ele é monocilíndrico de 4 tempos refrigerado à água e tem 14 cv de potência em 2400 rpm e seu modelo é o NSB14S fabricado em 2011.

3.3 Dinamômetro

Para mensurar os dados de eficiência energética do combustível no motor, foi utilizado o dinamômetro projetado e construído pelo autor descrito no primeiro capítulo; os dados de torque e potência máximas foram registrados para a análise.

3.4 Combustíveis

Foram utilizados 10 combustíveis, sendo eles de caráter líquido e líquido-gás. Para os combustíveis líquidos, utilizamos 5 misturas, sendo Diesel, B20, B50, B80 e biodiesel puro ou B100, cuja denominação BX corresponde à porcentagem de biodiesel misturado ao diesel comercial, por exemplo, combustível B80 equivale a 20% de diesel comercial e 80% de biodiesel. Outro detalhe é que foram utilizadas as misturas com o diesel comercial brasileiro, de acordo com resolução da ANP CNPE nº16 de 2018. Pela norma, a porcentagem de biodiesel presente no diesel, na bomba de combustível, pode variar de, no mínimo, 12% e, no máximo, 15%, contudo, neste estudo, ele será tratado apenas como diesel. Para o combustível líquido-gás, foi utilizado o GLP proveniente do distribuidor comercial, o percentual de GLP injetado foi regulado para substituir 40% da massa de combustível líquido injetado no

cilindro, testes foram realizados para padronizar as quantidades dos combustíveis para as posições do acelerador nas rotações intermediária e nominal (1400 e 2400 rpm).

3.4.1 Poder calorífico dos combustíveis

Foram utilizados os seguintes combustíveis, Diesel, Diesel GLP, B20, B20 GLP, B50, B50 GLP, B80, B80 GLP, B100 e B100 GLP.

De acordo com Colle (2018), o poder calorífico do biodiesel de óleo residual é em torno de 35912 kJ.kg^{-1} ; Sanli *et al.* (2015) nos registram que o poder calorífico do biodiesel de óleo residual de fritura foi mensurado em 37333 kJ.kg^{-1} ; Attia e Hassaneem (2016) com valor de 37951 kJ.kg^{-1} e Cunha, Guimarães e Rios (2015) encontraram um valor de poder calorífico do biodiesel de óleo residual de $40140,4 \text{ kJ.kg}^{-1}$; Cunha (2015) mensurou um poder calorífico de 40140 kJ.kg^{-1} . De acordo com a empresa Copergás (2020), o poder calorífico do diesel é de 44978 kJ.kg^{-1} e do GLP é de 49162 kJ.kg^{-1} .

O autor propôs a Equação 1 para quantificar o poder calorífico para cada combustível estudado.

Equação 1: Poder calorífico para os combustíveis:

$$Pc = \sum(Pcn \times Bx) \quad (1)$$

Onde:

Pc = Poder calorífico do combustível (kJ.kg^{-1});

Pcn = Poder calorífico de um combustível qualquer (kJ.kg^{-1});

Bx = Porcentagem desse combustível na mistura.

De acordo com a equação proposta pelo autor e os dados da literatura, o poder calorífico aproximado de cada combustível é descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Poder calorífico dos combustíveis estudados.

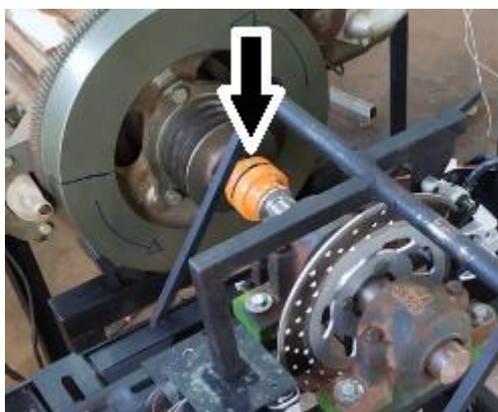
Combustível	Poder calorífico (kJ.kg ⁻¹)
Diesel	44978
Diesel GLP	46651
B20	43482
B20 GLP	45754
B50	41239
B50 GLP	44408
B80	38996
B80 GLP	43062
B100	37500
B100 GLP	42164

Fonte: Do autor (2021).

3.5 Coleta de dados de eficiência

O motor de teste foi acoplado ao dinamômetro pela saída do seu eixo virabrequim, a ligação do conjunto é demonstrada na Figura 4.

Figura 4 - Motor acoplado ao dinamômetro.



Fonte: Do autor (2021).

Os dados de torque e potência foram coletados, armazenados e tratados. Foi utilizado o teste Tukey a 5% de significância, para qualificar qual combustível possuía maior média de valores de torque e potência máximas; para a estatística quantitativa, foi utilizada a regressão linear para plotar os gráficos de torque e potência máximos de acordo com o uso do dinamômetro.

3.5.1 Teste de padronização do combustível

Para a padronização da massa de combustível líquido e gasoso, foram feitos dois testes, um para verificar qual a massa de diesel (combustível líquido), de acordo com duas posições do acelerador (intermediária e nominal) e um teste para verificar qual a massa de GLP (combustível gasoso), de acordo com três posições do registro 45°, 90° e 135° da sua posição inicial.

Para o teste do combustível líquido, a massa foi coletada com o acelerador na posição nominal e intermediária, neste teste, o tubo de condução de combustível foi desconectado antes do bico injetor e o combustível coletado em proveta. Para tal, giramos manualmente o volante do motor por 50 vezes e a massa do combustível quantificada a cada 10 rotações, quantificamos algebricamente a massa de combustível injetada nas rotações nominal e intermediária, a Tabela 5 mostra os valores do teste realizado.

Tabela 5 - Teste da massa de combustível injetada.

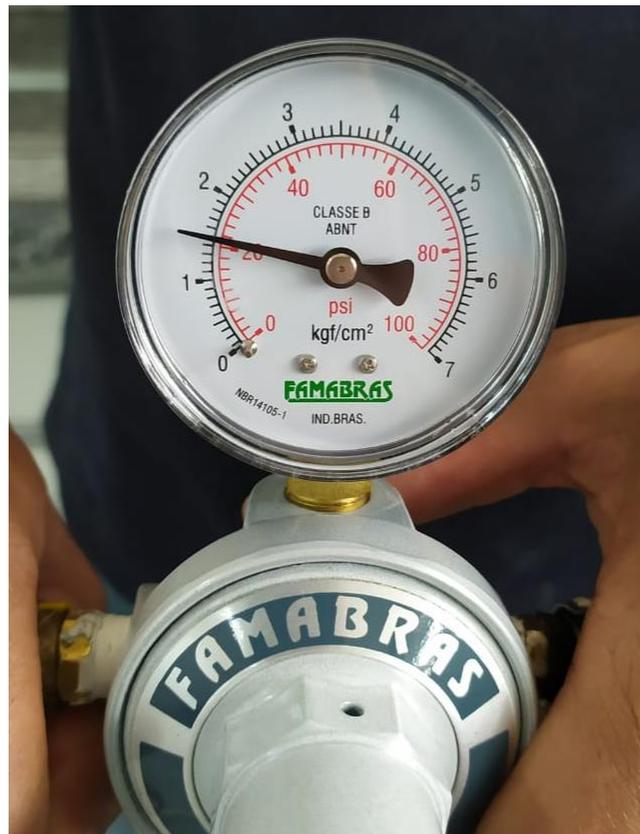
Posição nominal		
VOLTAS DO VIRABREQUIM	MASSA COLETADA (g)	MASSA (g/s)
10	0,26	1,04
20	0,42	0,84
30	0,61	0,81
40	0,76	0,76
50	1	1,04
Posição intermediária		
VOLTAS DO VIRABREQUIM	MASSA COLETADA (g)	MASSA (g/s)
10	0,15	0,35
20	0,25	0,29
30	0,36	0,28
40	0,45	0,26
50	0,58	0,27

Fonte: Do autor (2021).

A média da vazão de diesel calculada na posição nominal do acelerador foi de 0,9 g/s e 0,29 g/s para a posição intermediária.

Para o teste do combustível gasoso, foi coletada a massa de GLP, de acordo com a abertura de um registro; nesse teste, foi utilizado um regulador de pressão de gás marca Famabras, modelo Frg-45b, mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Controle da pressão do sistema.



Fonte: Do autor (2021).

O sistema foi estabilizado na pressão de 20 psi, após a pressão permanecer constante foi realizado a coleta. O registro apontado na Figura 6 foi aberto em 3 posições, 45°, 90° e 135° da posição inicial do registro, a massa de GLP e o tempo de abertura da válvula coletados, para medirmos a vazão mássica média de gás, de acordo com a posição do registro.

Figura 6 - Coleta da massa de GLP de acordo com a abertura do registro.



Fonte: Do autor (2021).

O GLP foi coletado e armazenado em bexiga e verificado sua massa, por intermédio de uma balança de precisão de duas casas decimais (centigrama), demonstrada na Figura 7.

Figura 7 - Coleta da massa com balança de precisão.



Fonte: Do autor (2021).

A massa de 10 bexigas foi mensurada, e a massa média de cada uma foi obtida, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Massa média de 10 bexigas.



Fonte: Do autor (2021).

Assim, foi coletada a massa em 3 posições do registro de GLP, os dados foram submetidos a uma regressão linear descrita na Equação 1.

Equação 1: Equação do peso de gás liberado de acordo com a posição da válvula.

$$Q_{GLP} = -0,0325x^2 + 0,2839x - 0,1458 \quad (1)$$

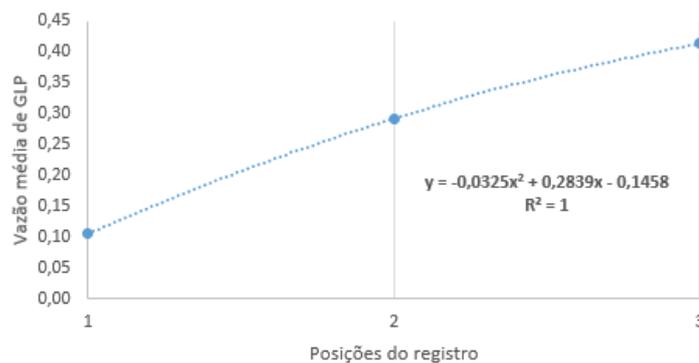
Onde:

Q_{GLP} = Vazão de GLP (g);

x = Ângulo da válvula do GLP (graus).

A vazão mássica do GLP pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Massa de GLP de acordo com a abertura do registro.



Fonte: Do autor (2021).

3.6 Uso de duplo combustível

Para implantar o regime de duplo combustível, foi seguida a proposta de Von Mitzlaf (1988), em que o diesel atua como combustível piloto. Não são necessárias modificações internas no motor, apenas deve-se injetar o gás no coletor de admissão para ficar homogêneo ao ar atmosférico aspirado pelo motor. A saída do registro de gás foi instalada na entrada do coletor de admissão do motor conforme a Figura 10.

Figura 10 - Entrada de GLP no motor.



Fonte: Do autor (2021).

Um dos fatores levado em consideração é que o motor não exceda sua rotação máxima, assim, para verificar qual seria a posição do acelerador, para substituímos 40% do combustível líquido pelo gasoso, sem ultrapassar a rotação máxima, verificamos a quantidade de diesel, para obter uma mistura de 40% de GLP à rotação nominal e à rotação intermediária, posicionando-o anteriormente à abertura do registro do gás.

3.6.1 Biodiesel de óleo residual

O biodiesel foi produzido no laboratório de biocombustíveis pertencente à Universidade Federal de Lavras. A matéria-prima utilizada foi obtida do óleo vegetal filtrado, coletado no restaurante universitário da universidade, o qual foi submetido ao processo de transesterificação, para a obtenção do biodiesel, que tem a vantagem de se tratar de um subproduto do restaurante universitário da universidade, proporcionando sua reciclagem.

3.6.2 GLP

O GLP foi adquirido, em distribuidora localizada no município de Lavras, Minas Gerais, segundo a Petrobrás (2019), possui em sua composição propano (C_3H_8); propeno (C_3H_6); isobutano (C_4H_{10}); n-butano (C_4H_{10}); e buteno (C_4H_8). O GLP utilizado estava armazenado em botijão de 13kg, o mesmo utilizado em residências.

3.7 Parâmetros experimentais

Foi utilizado o Delineamento inteiramente casualizado - DIC. Os combustíveis utilizados foram diesel e misturas de biodiesel de óleo residual de B20, B50, B80 e B100. Para cada combustível líquido, substituímos 40% de sua massa por GLP, totalizando 10 combustíveis. Foi utilizado o esquema fatorial de $5 \times 2 \times 2 \times 5$, foram estudados dez combustíveis, sendo cinco líquidos e cinco combustíveis com a adição de GLP, em duas rotações, com cinco repetições, totalizando 100 dados. Para a comparação das médias do torque e potências máximas, foi utilizado o teste Tukey a 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo da eficiência energética, foram feitos dois tratamentos estatísticos para torque e dois para potência; a regressão linear foi utilizada, para gerar os gráficos do acionamento do dinamômetro e o teste Tukey para médias a 5% de significância.

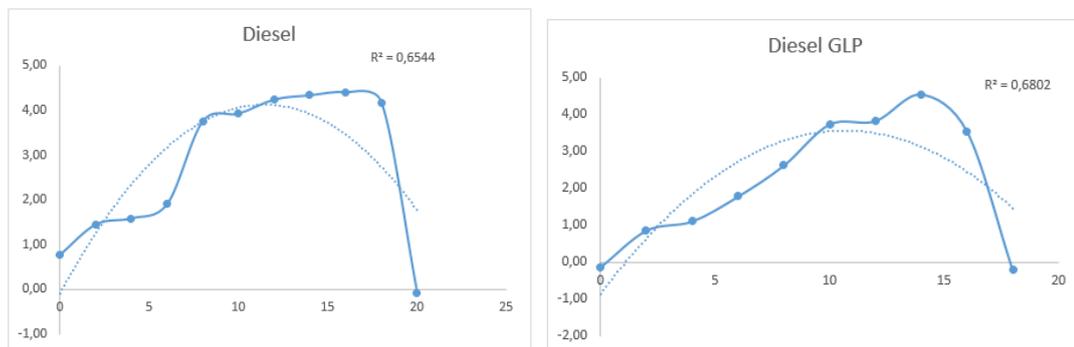
4.1 Análise do Torque

Cada gráfico demonstra o acionamento do dinamômetro para encontrarmos o torque máximo médio para cada combustível. Os gráficos são descritos a seguir.

4.1.1 Diesel x diesel GLP

A Figura 11 demonstra o gráfico do torque do diesel com e sem o uso do GLP.

Figura 11 - Curva de torque do diesel x diesel GLP.



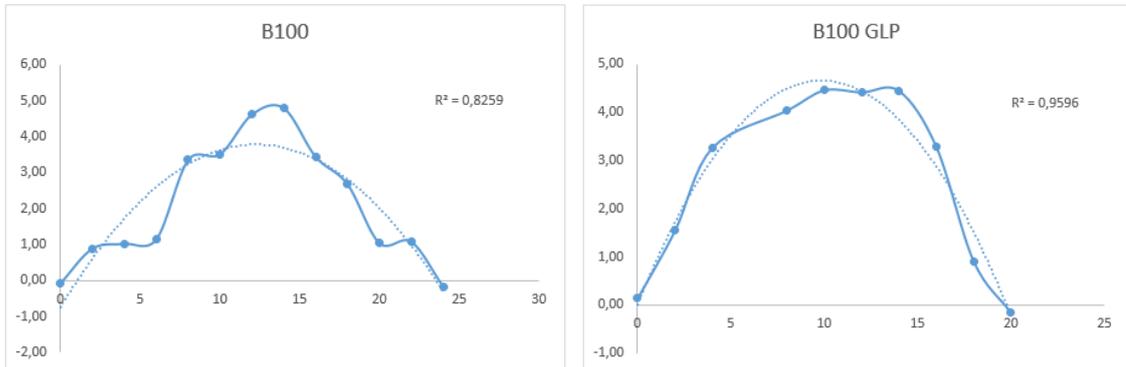
Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o Diesel proporcionou torque máximo exibido pela curva de tendência de aproximadamente 4 kgf.m e, quando utilizado GLP, o torque máximo foi de aproximadamente 3,5 kgf.m.

4.1.2 B100 x B100 GLP

A Figura 12 demonstra o gráfico do torque do B100 com e sem o uso do GLP.

Figura 12 - Curva de torque do B100 x B100 GLP.



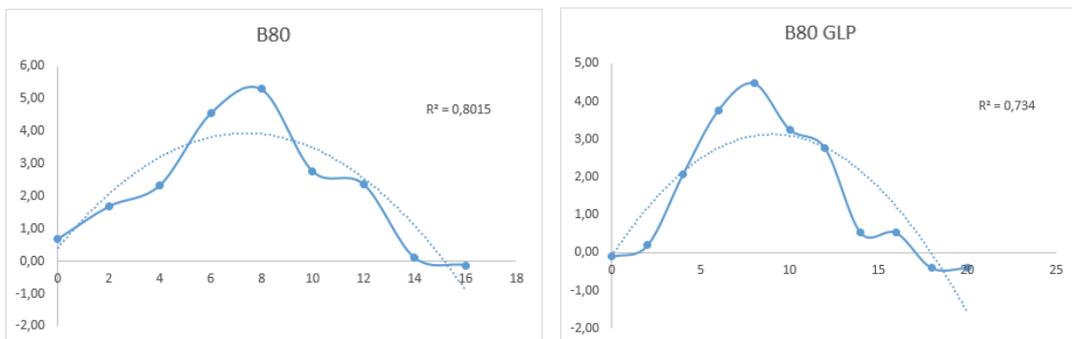
Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B100 proporcionou torque máximo exibido pela curva de tendência de aproximadamente 3,8 kgf.m e, quando utilizado GLP, o torque máximo foi de aproximadamente 4,8 kgf.m.

4.1.3 B80 x B80 GLP

A Figura 13 demonstra o gráfico do torque do B80 com e sem o uso do GLP.

Figura 13 - Curva de torque do B80 x B80 GLP.



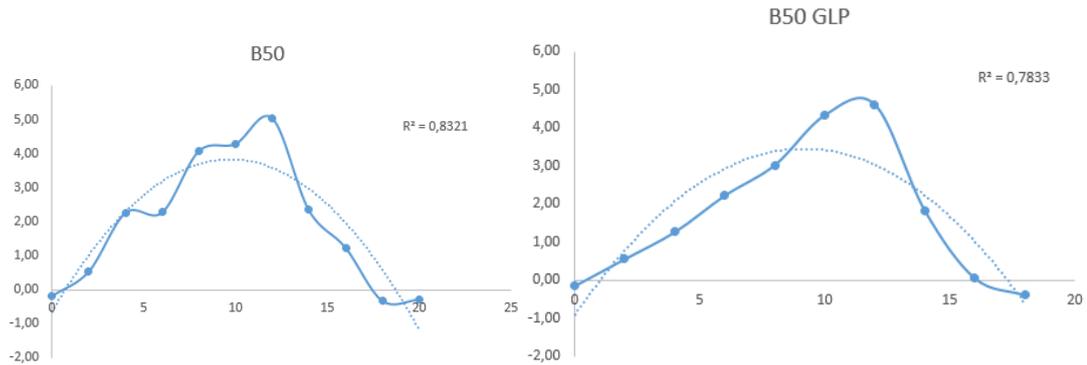
Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B80 proporcionou torque máximo exibido pela curva de tendência de aproximadamente 3,7 kgf.m e, quando utilizado GLP, o torque máximo foi de aproximadamente 3 kgf.m.

4.1.4 B50 x B50 GLP

A Figura 14 demonstra o gráfico do torque do B50 com e sem o uso do GLP.

Figura 14 - Curva de torque do B50 x B50 GLP.



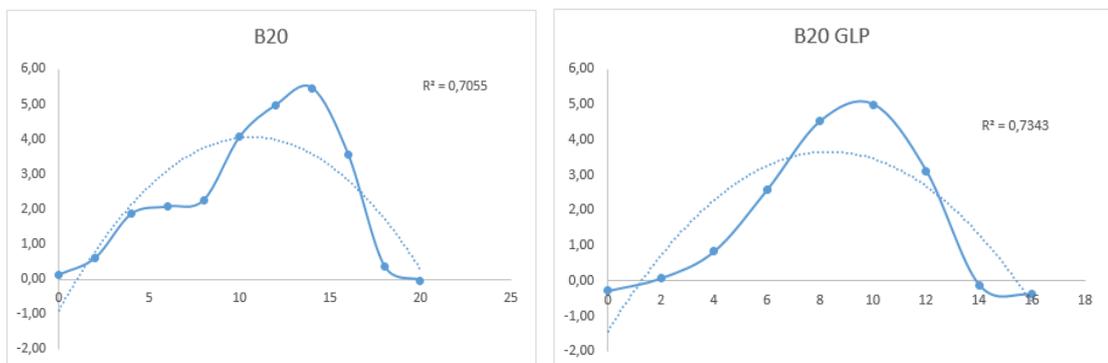
Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B50 proporcionou torque máximo exibido pela curva de tendência de aproximadamente 3,7 kgf.m e, quando utilizado GLP, o torque máximo foi de aproximadamente 3,3 kgf.m.

4.1.5 B20 x B20 GLP

A Figura 15 demonstra o gráfico do torque do B20 com e sem o uso do GLP.

Figura 15 - Curva de torque do B20 x B20 GLP.



Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B20 proporcionou torque máximo exibido pela curva de tendência de aproximadamente 4 kgf.m e, quando utilizado GLP, o torque máximo foi de aproximadamente 3,7 kgf.m.

4.1.6 Teste Tukey para torque máximo médio

Para a comparação qualitativa das médias do torque máximo médio dos combustíveis, foi feito um teste Tukey a 5% de significância, que é demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Teste Tukey do torque máximo médio para 10 combustíveis.

Combustível	Torque máximo médio (kgf.m)	
B50 GLP	4,20	A
DIESEL	4,34	A
DIESEL GLP	4,54	A
B80	4,61	A
B80 GLP	4,66	A
B50	4,81	A
B100	4,81	A
B100 GLP	4,82	A
B20 GLP	4,93	A
B20	5,05	A

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

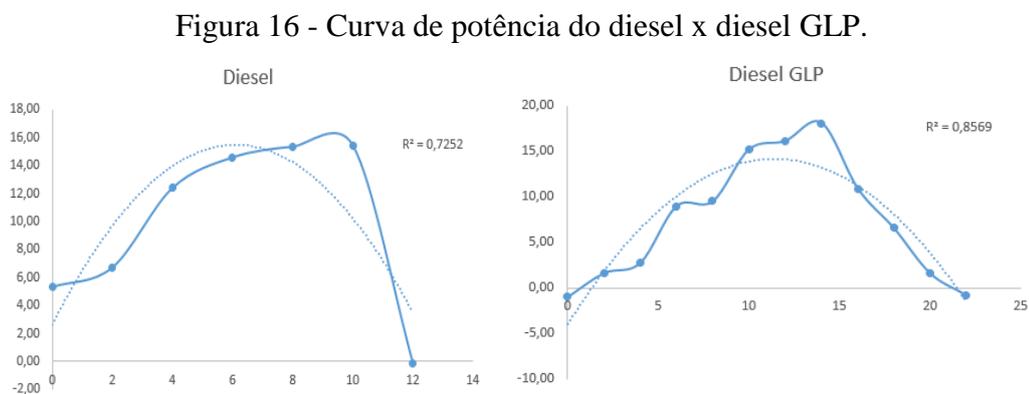
Podemos verificar que não houve diferença significativa no teste Tukey do torque máximo, para nenhum dos combustíveis estudados, entretanto o combustível B20 torque obteve o maior valor de torque, sendo 15% superior ao diesel e 5% superior ao B100; o combustível B20 GLP foi 8% superior ao diesel GLP e 2% em relação ao B100 GLP. Kolip (2011), ao avaliar diferentes quantidades de GLP injetado ao motor diesel, mostrou que o motor permanece com torque máximo, quando injetado 25% de GLP. Se comparado ao diesel, fato esse comprovado pela pesquisa, mostra que a substituição do combustível líquido pelo gasoso proporciona aumento de torque em que apenas o combustível B50 teve um comportamento diferente com redução de 14% se comparado ao B20 GLP. Volpato *et al.* (2009), ao testar biodiesel de soja em comparação ao diesel, mostrou que há redução de aproximadamente 9%, quando utilizado o B100. Nossa pesquisa demonstrou que, ao utilizarmos biodiesel de óleo residual puro, houve acréscimo de 10% do torque, em relação ao diesel, já Barbosa (2016), ao analisar o torque do uso de blendas crescentes de biodiesel de óleo de macaúba, demonstrou que há redução de aproximadamente 20% do torque do B100 se comparado ao diesel comercial.

4.2 Análise da potência

Cada gráfico demonstra o acionamento do dinamômetro, para encontrarmos a potência máxima média, para cada combustível. Os gráficos são descritos a seguir.

4.2.1 Diesel x Diesel GLP

A Figura 16 demonstra o gráfico da potência do diesel com e sem o uso do GLP.

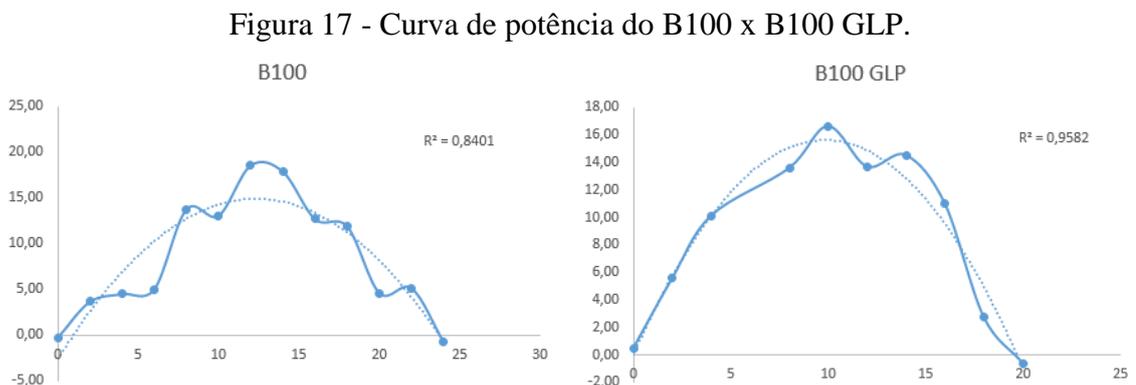


Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o Diesel proporcionou potência máxima exibido pela curva de tendência de aproximadamente 15 cv e, quando utilizado GLP, a potência máxima foi de aproximadamente 13 cv.

4.2.2 B100 x B100 GLP

A Figura 17 demonstra o gráfico da potência do B100 com e sem o uso do GLP.

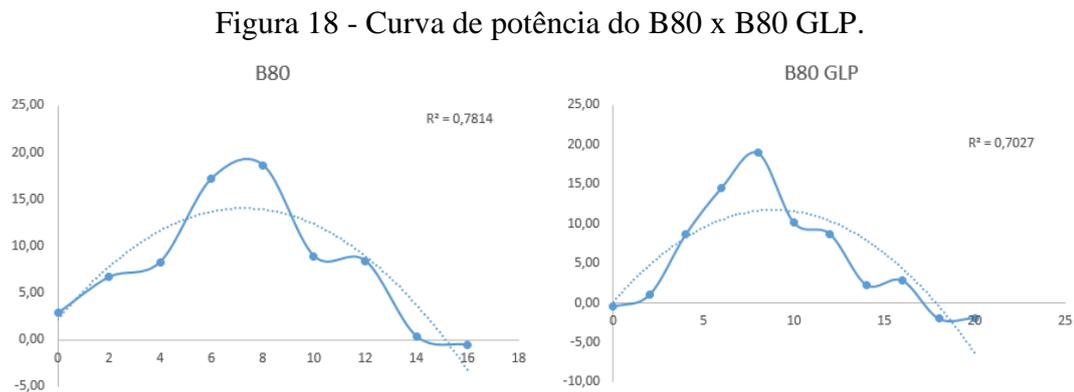


Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B100 proporcionou potência máxima exibido pela curva de tendência de aproximadamente 14 cv e, quando utilizado GLP, a potência máxima foi de aproximadamente 15 cv.

4.2.3 B80 x B80 GLP

A Figura 18 demonstra o gráfico da potência do B80 com e sem o uso do GLP.

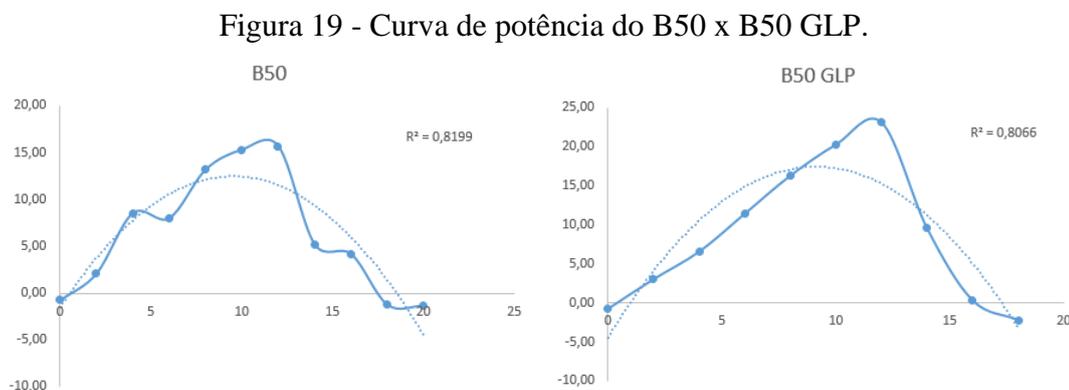


Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B80 proporcionou potência máxima exibido pela curva de tendência de aproximadamente 14 cv e, quando utilizado GLP, a potência máxima foi de aproximadamente 12 cv.

4.2.4 B50 x B50 GLP

A Figura 19 demonstra o gráfico da potência do B50 com e sem o uso do GLP.

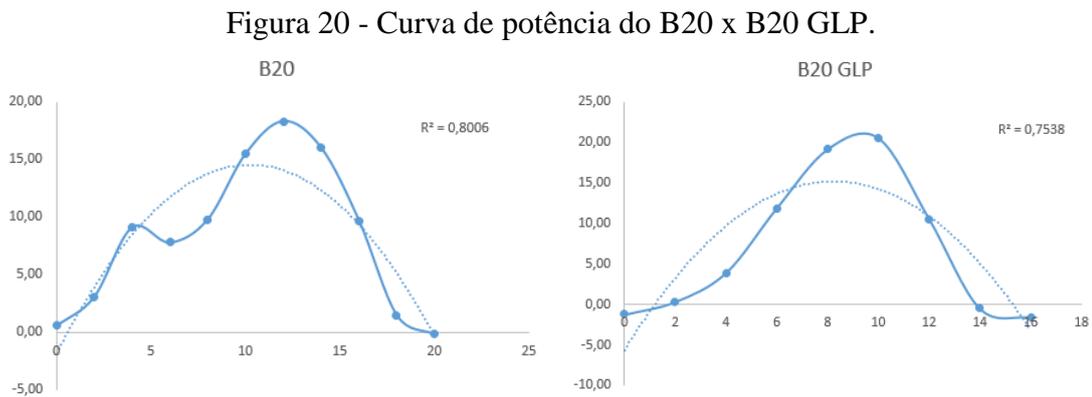


Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B50 proporcionou potência máxima exibido pela curva de tendência de aproximadamente 13 cv e, quando utilizado GLP, a potência máxima foi de aproximadamente 17 cv.

4.2.5 B20 x B20 GLP

A Figura 20 demonstra o gráfico da potência do B20 com e sem o uso do GLP.



Fonte: Do autor (2021).

Podemos observar que o B20 proporcionou potência máxima exibido pela curva de tendência de aproximadamente 14 cv e, quando utilizado GLP, a potência máxima foi de aproximadamente 15 cv.

4.2.6 Teste Tukey para a potência máxima média

Para a comparação qualitativa das médias do torque máximo médio dos combustíveis, foi feito um teste Tukey a 5% de significância, que é demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Teste Tukey da potência máxima média para 10 combustíveis.

(Continua)

Combustíveis	Potência máxima (cv)		
B50 GLP	16,72	A	
B20 GLP	15,61	A	B
B50	15,57	A	B
B80	15,5	A	B
DIESEL GLP	15,49	A	B
B80 GLP	15,4	A	B
DIESEL	15,3	A	B

Tabela 7 - Teste Tukey da potência máxima média para 10 combustíveis.

(Conclusão)

Combustíveis	Potência máxima (cv)		
B20	15,06	A	B
B100 GLP	14,83	A	B
B100	13,15		B

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

A potência proporcionada pelo Diesel não diferiu com nenhum combustível estatisticamente, contudo o combustível B50 GLP teve diferença significativa com o B100. Colle (2018), ao testar biodiesel e biogás, em um motor ciclo Diesel, mostrou que a potência, quando utilizado combustível gasoso, é semelhante à potência se utilizando apenas combustível líquido, fato corroborado por Kolip (2011) e Sahoo, Sahoo e Saha (2009). O autor também encontrou resultados semelhantes à literatura citada; Barbosa (2016) demonstrou que o biodiesel de óleo de macaúba apresenta 22% de redução de potência em relação ao diesel, fato esse semelhante ao encontrado nesta pesquisa, pois houve redução de 15% da potência entre os combustíveis líquidos.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os dados, a utilização do biodiesel de óleo residual concomitante ao diesel e GLP não obteve diferença significativa entre si pelo teste Tukey a 5% de significância, justificando o uso desses combustíveis do ponto de vista energético. Os combustíveis B20 obtiveram o maior valor de torque; o combustível B50 GLP obteve a maior potência entre os combustíveis utilizados, diferindo apenas do combustível B100, fatos que justificam a substituição parcial do combustível líquido pelo gasoso.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Biodiesel. ANP, Rio de Janeiro, set. 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 11 mar. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 1585:** veículos rodoviários - código de ensaio de motores - potência líquida efetiva. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 26 p.

ATTIA, A. M. A.; HASSANEEN, A. E. Influence of diesel fuel blended with biodiesel produced from waste cooking oil on diesel engine performance. **Fuel**, London, v. 167, n. 2, p. 316-328, Nov. 2016.

BARBOSA, R. L. **Análise de gases de combustão de um motor de ignição por compressão utilizando biodiesel de óleo de Macaúba.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto que autoriza uso de gás de cozinha em motores em geral é aprovado.** Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2019. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/615250-projeto-que-autoriza-uso-de-gas-de-cozinha-em-motores-em-geral-e-aprovado/>. Acesso em: 20 out. 2020.

BRASIL. Lei nº 20.011, de 05 de janeiro de 2012. Dispõe sobre a política estadual de coleta, tratamento e reciclagem de óleo e gordura de origem vegetal ou animal de uso culinário e dá outras providências. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, MG, 6 jan. 2012.

CANAKCI, M.; SANLI, H. Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, Oxford, v. 33, n. 5, p. 431-441, Mar. 2008.

COLLE, D. **Avaliação de desempenho energético de um gerador elétrico operando no modo dual, utilizando biogás e blendas de biodiesel de óleo residual de fritura.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

COPERGÁS. **Industrial.** Copergás, Recife, 2020. Disponível em: <https://www.copergas.com.br/produtos/industrial/>. Acesso em: 4 maio 2020.

CUNHA, A. C. D. **Estudo da produção de biodiesel a partir de óleo residual do restaurante universitário da UNILAB.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias) - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarapé, 2016.

CUNHA, A. C. D.; GUIMARÃES, A. P.; RIOS, M. A. S. Caracterização físico-química do biodiesel produzido a partir do óleo residual do restaurante universitário da UNILAB. *In:* CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2015, Ceará. **Anais [...]**. Ceará: Contecc, 2015. p. 1-4.

FOGÁS. **GLP: o que é, qual a composição química e fórmula molecular do gás.** Manaus: Fogás, 2020. Disponível em: <https://www.fogas.com.br/residencia/propriedade-glp/>. Acesso em: 4 maio 2020.

GUABIROBA, R. C. S.; D'AGOSTO, M. A.; FRANCA, L. S. Análise de viabilidade econômica da participação de cooperativas populares na cadeia de fornecimento de óleo residual de fritura a fábricas de biodiesel. **Journal of Transport Literature**, Manaus, v. 8, n. 4, p. 164-186, out. 2014.

KNOTHE, G. *et al.* **Manual de biodiesel.** São Paulo: Edgard Blucher, 2006. v. 1, 352 p.

KNOTHE, G. Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuel. **American oil Chemist's Society**, Champaign, v. 12, n. 11, p. 1103-1107, Nov. 2001.

KOLÍP, A. Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with LPG. **International Journal of the Physical Sciences**, London, v. 6, n. 8, p. 1905-1914, Apr. 2011.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura.** São Paulo: EPU, 1980. 2v.

MOHEBBI, A. *et al.* Use of waste cooking oil biodiesel in a tractor DI diesel engine. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Berlin, v. 10, n. 2, p. 1290-1297, Apr. 2012.

NOGUEIRA, G. R.; BEBER, J. **Proposta de metodologia para o gerenciamento de óleo vegetal residual oriundo de frituras.** Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, Irati, 2009.

ORDOÑEZ, R. Hospital usado para tratar coronavírus terá energia gerada a partir de gás de cozinha. **Jornal Globo**, São Paulo, 26 maio 2020. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/hospital-usado-para-tratar-coronavirus-tera-energia-gerada-partir-de-gas-de-cozinha-24445915#:~:text=Desde%20a%20Guerra%20do%20Golfo,consumidos%20no%20pa%C3%ADs%20eram%20importados.> Acesso em: 20 out. 2020.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado.** Fortaleza: Tecbio, 2003. 66 p.

PETROBRAS. Gás Liquefeito de Petróleo. **Informações Técnicas**, Brasília, dez. 2019. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/manual-tecnico-gas-liquefeito-petrobras-assistencia-tecnica-petrobras.pdf>. Acesso em: 4 maio 2020.

SAHOO, B. B.; SAHOO, N.; SAHA, U. K. Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 13, p. 1151-1184, 2009.

SANLI, H. *et al.* Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. **Fuel**, London, v. 159, p. 179-187, Nov. 2015.

SILVA, T. A. R. **Biodiesel de óleo residual**: produção através da transesterificação por metanólise e etanólise básica, caracterização físico-química e otimização das condições reacionais. 2011. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SOLDAGEM. **Famabras**, São Paulo, n. 3, p. S11-12, abr. 2012.

VOLPATO, C. E. S. *et al.* Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125-1130, jul./ago. 2009.

VON MITZLAFF, K. **Engines for biogas**. [S.l.]: GTZ, 1988. 133 p.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1993. 318 p.

CAPÍTULO 3 - EFICIÊNCIA AMBIENTAL DO MOTOR, UTILIZANDO MISTURAS DE BIODIESEL DE ÓLEO RESIDUAL E GLP

1 INTRODUÇÃO

Um dos nossos maiores feitos, na era pós revolução industrial, foi consumir grande quantidade de combustível proveniente de fontes não renováveis, em um tempo curto, assim esse uso desenfreado gerou um novo desafio de mensurar os gases lançados na atmosfera e propor soluções para mitigá-los. Diversos países ainda possuem aversão em diminuir as suas emissões e uma alternativa a essa premissa é a utilização de biocombustíveis renováveis em substituição aos de origem fóssil. Sendo assim, o presente capítulo vem para mensurar os gases de escape de um motor diesel alimentado com porcentagens crescentes de biodiesel de óleo residual e GLP. Foram mensurados os valores dos gases CO, CO₂ e HC para 4 cargas aplicadas ao motor e 2 rotações. Foram feitos testes Tukey a fim de verificar qual dos combustíveis apresentava os menores valores de gases de combustão, para as rotações nominal e intermediária, os combustíveis que apresentaram a melhor eficiência ambiental foram B50 GLP e B20 onde ambos apresentaram níveis menores médios dos gases expelidos à atmosfera em relação aos combustíveis estudados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gases de escape

Segundo Brunetti (2012b), a análise dos produtos de combustão, no motor de combustão interna, é importante no estudo dos combustíveis, pois avalia a eficiência no processo de combustão e determina a concentração dos gases.

2.1.1 Monóxido de carbono (CO)

O gás monóxido de carbono (CO) é emitido pela combustão de combustíveis ricos em carbono, como o caso do diesel e GLP. Ferreira (2021) destaca que o monóxido de carbono é um gás de aparência incolor, sem sabor e sem cheiro, caracterizado como um asfixiante químico, impedindo a utilização biológica do oxigênio sendo extremamente tóxico. Na escala industrial, o monóxido de carbono é utilizado na produção de metais, como ferro e níquel, retirando o oxigênio por oxirredução de seus respectivos minerais. Seu ponto de fusão é de $-205,07^{\circ}\text{C}$ e ebulição de $-191,55^{\circ}\text{C}$, já a densidade é de $1,25\text{ kg/m}^3$.

É um gás inflamável e tóxico até em baixas concentrações. O monóxido de carbono é um dos produtos formados na combustão incompleta de compostos que possuem carbono em sua fórmula. Quando ocorre a queima desses compostos (geralmente combustíveis como gasolina e diesel), com quantidade insuficiente de gás oxigênio, a reação não se processa como é esperado de uma queima total, que libera dióxido de carbono. Outros produtos, como o monóxido de carbono e o carbono sólido (fuligem), são formados nessas condições. Esse tipo de reação ocorre, em maior proporção, nas indústrias e nos automóveis.

As emissões de CO crescem com a combustão incompleta, ocasionada pela falta de oxigênio e independem de parâmetros, como razão de compressão, carga de operação, ponto de ignição e sistema de injeção de combustível, motores de ignição por compressão tendem a emitir menores quantidades de CO que motores de ignição por centelha, pois trabalham com misturas pobres, possuindo mais oxigênio disponível na câmara de combustão (VAN BASSHUYSEN; SCHÄFER, 2004). Assim, nos motores ciclo diesel, que funcionam com excesso de ar, a quantidade de CO emitido tende a ser menor, pois ele é oxidado é transformado em CO_2 .

Valente (2007) relata que altas temperaturas também favorecem as emissões de CO, mesmo com quantidade suficiente de oxigênio, por maiores velocidades das reações.

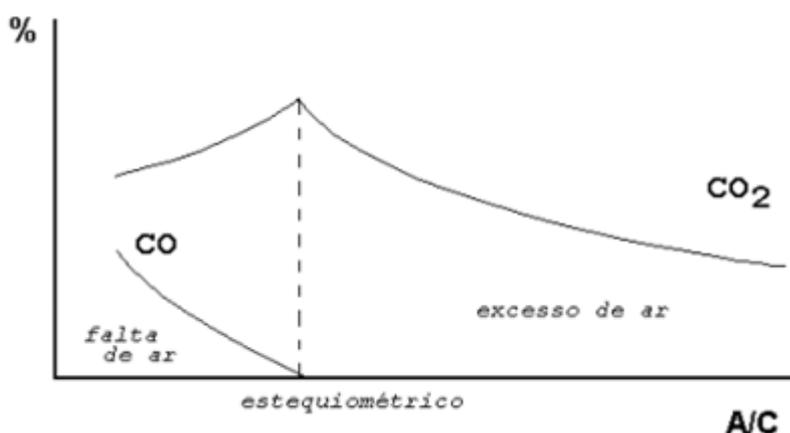
2.1.2 Dióxido de carbono (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) é um produto derivado da reação de diferentes processos, tais como: a combustão de combustíveis, a fermentação dos líquidos e a respiração dos seres humanos e dos animais. A estrutura do dióxido de carbono é constituída por moléculas de geometria linear e de caráter apolar. Por isso, as atrações intermoleculares são muito fracas, tornando-o, nas condições ambientais, um gás que tem um odor ligeiramente irritante, é incolor e mais pesado que o ar e é conhecido como gás carbônico. Esse gás é usado em bebidas gasosas, em cirurgias, em estruturas metálicas, em extintores e no controle do pH da água e é responsável pela temperatura do planeta e pelo efeito estufa. O dióxido de carbono é importante pelo fato de ser um composto essencial para a realização da fotossíntese, mas torna-se prejudicial quando é liberado de forma excessiva (SOUZA, 2020).

Por ser um produto natural da combustão de hidrocarbonetos, a concentração de CO₂ tende a aumentar com o aumento da carga aplicada ao motor, em razão do aumento do consumo de combustível (OLIVEIRA; SODRÉ, 2016). Perdas de eficiência de combustão, seguidas do aumento de emissões de CO, podem ocasionar na redução da emissão desse poluente (HEYWOOD, 1988).

Segundo Bizzo (2003), a medida do teor de CO₂, no gás de exaustão seco (uma medição simples e comum), propicia uma medida útil do rendimento da combustão de um determinado combustível. A proporção máxima de CO₂, nos produtos de combustão, será encontrada, quando a relação ar/combustível for estequiométrica, Figura 1. Observemos que em relações abaixo da estequiométrica, o teor de CO₂ também cai, porém há o aparecimento de monóxido de carbono.

Figura 1 - Teor de CO₂ no gás de exaustão.



Fonte: Bizzo (2003).

Na prática, as concentrações de CO_2 devem ser mais baixas que a estequiométrica pela necessidade de se usar ar em excesso a fim de se atingir a combustão completa. A quantidade de excesso de ar necessária decresce com o aumento da capacidade e com o rendimento maior no equipamento de combustão (BIZZO, 2003).

2.1.3 Hidrocarbonetos (HC)

De acordo com Brunetti (2021b), a presença de hidrocarbonetos, nos gases de escapamento do motor Diesel, é uma das responsáveis pelo aparecimento de fumaça branca ou azul e é dez vezes menor que nos motores ciclo Otto pelo fato de os motores Diesel funcionarem com excesso de ar. Nos motores ciclo Otto, as misturas ricas aumentam a concentração de CO e HC. Mesmo com a mistura estequiométrica, a concentração desses poluentes é alta, em razão da falta de homogeneidade da mistura e de sua distribuição para os cilindros. A maior estabilidade é atingida, quando o motor está próximo de sua estequiometria, quando próximo a esse ponto, a concentração de HC cai, entretanto, nessa situação, a concentração de CO aumenta.

2.2 Analisador de gases

O analisador de gases é um equipamento capaz de determinar o volume percentual de CO, CO_2 e HC em ppm dos gases que são emitidos pela combustão dos combustíveis nos motores de combustão interna. Tais gases, fluindo por uma sonda, são captados pelo duto de descarga do motor, sendo, em seguida, separados da água, por meio de filtros e direcionados a um banco de medição em que um fecho de luz de raios infravermelho, gerado por um transmissor, é enviado por intermédio dos filtros óticos para os elementos de medição. Tais gases, no banco de medição, absorvem o fecho de luz, em diversos comprimentos de onda, segundo sua concentração. Os gases H_2 , N_2 e O_2 , por suas composições, não são capazes de absorver os raios emitidos e, portanto não possibilitam que suas concentrações sejam medidas pelo sistema infravermelho. Entretanto os gases CO, CO_2 e HC, contidos nesses gases, absorvem os raios infravermelhos em comprimentos de onda específicos (ALFATEST, 2021).

2.3 Pesquisas relacionadas

Aydin, Irgin e Çelik (2018) utilizaram porcentagens crescentes de injeção de GLP, num motor diesel e verificou que os valores de HC aumentaram com o aumento da carga imposta ao motor, contudo houve redução dos valores de HC, quando injetado GLP, em aproximadamente 25%; já os valores de CO apresentaram aumento com o aumento da carga imposta ao motor e redução de aproximadamente 35%, quando utilizado o GLP junto ao diesel.

Barbosa (2016), ao estudar os gases de escape, quando um motor utilizava biodiesel de óleo de macaúba, verificou que, em rotação nominal à plena carga, os níveis de HC aumentaram em aproximadamente 314%; já para rotação intermediária à plena carga, o aumento foi na faixa de 35%. Para CO, o autor mostrou que o combustível B80 obteve os maiores valores, nas condições utilizadas, já o B100 apresentou valor semelhante ao diesel. Já para CO₂, o autor verificou que há aumento da emissão com o aumento da carga imposta ao motor, contudo, em plena carga, as emissões foram semelhantes entre os combustíveis estudados.

Dittrich, Beroun e Zvolsky (2018) utilizaram um sistema, para injeção de GLP no cilindro do motor. Verificaram que a substituição do diesel por GLP não modificou os valores CO₂, contudo houve aumento na emissão com o aumento da carga imposta ao motor.

Kolip (2011) estudou a emissão dos gases, quando o motor é submetido a cargas crescentes e aumento na porcentagem do GLP injetado. O autor verificou que os níveis de CO, em altas rotações, tendem a serem iguais; já para os valores de HC, o aumento da rotação tende a diminuir esses valores.

Silva (2014) estudou o comportamento de um gerador, utilizando misturas crescentes de biodiesel de óleo residual e verificou que houve um aumento dos níveis de CO do B100 de aproximadamente 29%, se comparado ao diesel, entretanto os valores de CO₂ foram semelhantes entre o diesel comercial e o B100.

Yoon e Lee (2011) estudaram o comportamento dos gases de escape, quando o motor utilizava a combinação de 3 combustíveis, diesel de baixo teor de enxofre, biodiesel e biogás. Mostrando que os níveis de CO₂ foram semelhantes entre os combustíveis, mas aumentando com o acréscimo de carga imposta ao motor. Para CO, houve aumento de aproximadamente 250%, quando houve a utilização do biogás concomitantemente aos combustíveis líquidos; para os valores de HC, ao injetar o biogás no motor, os valores ficaram muito superiores, se

comparados aos valores encontrados nos combustíveis líquidos, ficando na faixa de 1000% acima.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Análise dos gases

Os ensaios de emissões foram realizados baseados na norma NBR 14489 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2000) - Motor Diesel - Análise e Determinação dos Gases e do Material Particulado Emitidos por Motores do Ciclo Diesel - Ciclo de 13 pontos. Para assegurar a representatividade estatística dos resultados, foram realizadas 3 repetições para cada combustível e calculada sua média. O motor é submetido a 5 cargas e 2 rotações, para o Ciclo de 13 pontos. As cargas correspondem aos percentuais de 10%, 25%, 50%, 75% e 100 % do torque máximo. Na presente pesquisa, foram aplicadas as cargas de 20%, 50%, 80% e 100% do torque máximo. Para cada condição de operação, foram determinados os níveis de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂).

Os gases foram coletados, em duas rotações denominadas nominal e intermediária. É denominada rotação nominal a rotação máxima de plena carga permitida pelo regulador, ou seja, quando o acelerador está na posição de rotação máxima do motor, conforme especificado pelo fabricante. Já a rotação intermediária é a rotação do torque máximo, se estiver entre os limites de 60% e 75% da rotação nominal, caso contrário, considera-se o limite de 60%. Uma outra definição importante citada pela norma é a de regime constante, que se define como sendo aquele no qual o motor é submetido à ação de torque e rotação constantes, dentro de mais ou menos 50 rpm, o motor fica em equilíbrio dinâmico com o dinamômetro. O ensaio foi realizado, primeiramente estabilizando o motor à carga analisada, após atingir a estabilização, as concentrações dos 3 gases (HC, CO e CO₂) foram coletadas simultaneamente pela sonda do analisador multigás. O motor ciclo diesel produz fuligem, como produto de combustão. Para não haver dano aos sensores do analisador de gases, foi instalado um filtro de partículas, na saída do escapamento, retendo as partículas maiores e analisarmos apenas os gases. O filtro é demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Filtro utilizado para filtrar os gases.



Fonte: Do autor (2021).

Os dados foram mensurados pelo analisador multigás Discovery G4 da marca ALFATEST, que tem a capacidade de medir os gases HC, CO e CO₂. Ele é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Analisador de gases.



Fonte: Alfatest (2021).

Os campos de medições do Analisador de Gases Discovery G4 ALFATEST são os seguintes:

- a) HC: de 0 a 2000 ppm vol. (hexano);
- b) HC: de 0 a 4000 ppmvol (propano);
- c) CO: de 0 a 15% vol.;
- d) CO₂: de 0 a 20% vol.

3.1.1 Ciclo 13 pontos

O ciclo 13 pontos se faz estabilizando a rotação do motor e aplicar cargas ao dinamômetro de forma crescentes e assim coletar os gases num ciclo de 13 pontos. São utilizadas 3 rotações, a mínima para estabilização do sistema, intermediária e nominal do motor e submetido a 5 porcentagens do torque máximo, variando de 0% a 100%, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Ciclo 13 pontos.

Ponto do ciclo	Rotação	Porcentagem de torque ¹⁾	Tempo ²⁾ em regime	Tempo acumulado
i	rpm	%	Min	min
1	Marcha lenta	0	6,0	6,0
2	Intermediária	10	6,0	12,0
3	Intermediária	25	6,0	18,0
4	Intermediária	50	6,0	24,0
5	Intermediária	75	6,0	30,0
6	Intermediária	100	6,0	36,0
7	Marcha lenta	0	6,0	42,0
8	Nominal	100	6,0	48,0
9	Nominal	75	6,0	54,0
10	Nominal	50	6,0	60,0
11	Nominal	25	6,0	66,0
12	Nominal	10	6,0	72,0
13	Marcha lenta	0	6,0	78,0

Fonte: ABNT (2000).

Como o objetivo do estudo foi verificar os produtos de combustão, para combustíveis distintos, usamos uma adaptação da Norma ABNT 14489. Foram coletados os gases nas acelerações nominal (2400 rpm) e intermediária (1400 rpm) do motor e ajustados no dinamômetro porcentagens de torque máximo de 20%, 50%, 80% e 100%, a média dos valores da porcentagem de torque foi calculada para simular o uso real do motor.

3.2 Parâmetros experimentais

Foram estudados 5 diferentes tipos de combustíveis líquidos, sendo diesel, B20, B50, B80 e B100 e substituição de 40% da massa do combustível líquido por GLP de cada um dos combustíveis em 3 repetições para cada. Para o teste, foram utilizadas as rotações nominal e intermediária, os valores de CO, CO₂ e HC foram mensurados e suas médias estudadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade num total de 180 dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados os testes de análise dos gases, em duas rotações; para cada rotação, foram mensurados os valores de CO, CO₂ e HC para 10 combustíveis.

4.1 Análise dos gases de escape em rotação nominal

Para a quantificação dos gases CO, CO₂ e HC, quando o motor estava em rotação nominal (2400 rpm), foi utilizado o teste Tukey a 5% de significância para comparar a média dos valores e analisar quais combustíveis emitiam as menores quantidades dos gases ao meio ambiente.

4.1.1 Análise da emissão de CO

O resultado do tratamento estatístico da quantificação de CO está descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise dos dados da emissão de CO para cada combustível.

Combustíveis	Média de CO (%)	Resultado		
B80	0,0300	A		
Diesel	0,0325	A	B	
B50	0,0350	A	B	
B100	0,0350	A	B	
B20	0,0500	A	B	
B50 GLP	0,1650	A	B	C
B80 GLP	0,1850		B	C
B100 GLP	0,2400			C
Diesel GLP	0,2450			C
B20 GLP	0,2725			C

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

Os combustíveis sem substituição por GLP obtiveram os menores volumes de CO não diferenciando estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de significância. Os combustíveis com as maiores porcentagens de CO foram os em que o combustível líquido fora substituído por GLP; outro fato é que estatisticamente os combustíveis B50 GLP e B80 GLP foram iguais às emissões do diesel. Barbosa (2016), estudando misturas crescentes de

biodiesel óleo de macaúba, constatou que os maiores valores de CO se davam, quando o motor utilizava B80. O autor constatou que, apesar de serem iguais estatisticamente, o combustível que obteve o menor índice de CO foi o B80. Aydin, Irgin e Çelik (2018) avaliaram a injeção crescente de GLP, num motor ciclo diesel e verificaram que há diminuição de aproximadamente 20% das emissões de CO, quando se utilizada a substituição de uma parcela de diesel por GLP. Neste trabalho cuja substituição de 40% em massa de GLP aumentou, em média, os valores de CO em 300%.

4.1.2 Análise da emissão de CO₂

O resultado do tratamento estatístico da quantificação de CO₂ está descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise dos dados da emissão de CO₂ para cada combustível.

Combustíveis	Média de CO ₂ (%)	Resultado
Diesel GLP	1,875	A
B20	2,450	A
B100	2,450	A
B80	2,675	A
B50 GLP	2,700	A
B50	2,875	A
Diesel	2,875	A
B80 GLP	3,050	A
B20 GLP	3,650	A
B100 GLP	3,775	A

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

Os valores de CO₂ não diferiram estatisticamente, mostrando que a substituição de GLP ao diesel se julga viável. O B100 teve redução de 15%, se comparado ao diesel, já o B100 GLP aumentou em 50% em relação ao diesel GLP. Dittrich, Beroun e Zvolsky (2018) estudaram porcentagens crescentes da injeção de GLP, num motor diesel, onde a concentração de CO₂ se mostrou semelhante, em mesma carga imposta ao motor, fato corroborado pelo autor, Barbosa (2016) que, também, mostrou que os valores de CO₂ têm correlação positiva à porcentagem de biodiesel ao diesel, fato contrário ao encontrado pelo autor, em que o diesel obteve o maior valor de CO₂ entre os combustíveis líquidos.

4.1.3 Análise da emissão de HC

O resultado do tratamento estatístico da quantificação de HC está descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise dos dados da emissão de HC para cada combustível.

Combustível	Média de HC (ppm)	Resultado		
Diesel	3,75	A		
B20	4,00	A		
B100	5,25	A		
B80	6,00	A		
B50	11,50	A	B	
B50 GLP	375	A	B	C
B80 GLP	410,25	A	B	C
Diesel GLP	510,25		B	C
B20 GLP	575,50			C
B100 GLP	637			C

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

No presente estudo, não houve diferença significativa entre os combustíveis líquidos, contudo, ao substituímos o combustível líquido por GLP, os valores de HC foram superiores, entretanto os combustíveis B50 GLP e B80 GLP foram iguais estatisticamente aos combustíveis apenas líquidos. Barbosa (2016) mostrou que há diminuição dos valores de HC, em relação ao diesel, quando o motor era alimentado com B50 e B20. Encontrou o maior valor de HC para o combustível B50. Kolip (2011) mostrou que, em rotação nominal, a utilização de GLP obteve valores semelhantes, utilizando diesel, fato corroborado por Aydın, Irgin e Çelik (2018), que em seus estudos, mostraram que houve diminuição de aproximadamente 20% dos valores de HC, com o aumento da porcentagem de GLP injetada no motor. O autor obteve valores muito superiores de HC, quando o motor era alimentado por combustíveis líquidos que foram substituídos por GLP.

4.2 Análise dos gases de escape em rotação intermediária

Foi realizada a quantificação dos gases CO, CO₂ e HC, quando o motor estava em rotação intermediária (1400 rpm) e foi usado o teste Tukey a 5% de significância para

comparar a média dos valores e analisar quais combustíveis emitiam as menores quantidades dos gases ao meio ambiente.

4.2.1 Análise da emissão de CO

O resultado do tratamento estatístico da quantificação de CO está descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise dos dados da emissão de CO para cada combustível.

Combustíveis	Médias de CO (%)	Resultados		
B50	0,0275	A		
Diesel	0,0400	A		
B20	0,0425	A		
B100	0,0425	A		
B80	0,0625	A	B	
B100 GLP	0,1700		B	C
Diesel GLP	0,1925			C
B20 GLP	0,2150			C
B50 GLP	0,2350			C
B80 GLP	0,2400			C

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

Semelhante à rotação nominal, na rotação intermediária, os menores valores de CO, estatisticamente, ocorreram, quando não houve a substituição de GLP, ficando os combustíveis líquidos não possuindo diferença estatística entre si. Kolip (2011) mostrou que, em rotações intermediárias, há aumento da emissão de CO com o aumento da quantidade de GLP injetada, fato compartilhado pelo autor. Aydin, Irgin e Çelik (2018) mostraram que há ligeira diminuição da emissão de CO, quando o GLP é injetado no cilindro, fato contrário ao encontrado pelo autor. Já Barbosa (2016) corroborou com os dados, mostrando que, em rotações intermediárias, os valores CO são semelhantes com o aumento da porcentagem de biodiesel ao diesel.

4.2.2 Análise da emissão de CO₂

O resultado do tratamento estatístico da quantificação de CO₂ está descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise dos dados da emissão de CO₂ para cada combustível.

Combustível	Média de CO ₂ (%)	Resultado
B50 GLP	2,150	A
B20 GLP	2,300	A
Diesel	2,300	A
Diesel GLP	2,475	A
B80 GLP	2,525	A
B50	2,600	A
B100	2,700	A
B100 GLP	2,875	A
B80	3,075	A
B20	3,100	A

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

Não houve diferença significativa para valores de CO₂ a 5% de probabilidade. Barbosa (2018) mostrou que, com o aumento da porcentagem de biodiesel, há uma tendência de aumento dos valores de CO₂, já Dittrich, Beroun e Zvolsky (2018) mostraram que a utilização de GLP junto a um combustível líquido não teve diferença significativa, em rotação intermediária, corroborando com os resultados deste trabalho.

4.2.3 Resultado da análise dos dados da emissão de HC

O resultado do tratamento estatístico da quantificação de HC está descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise dos dados da emissão de HC para cada combustível.

Combustível	Média de HC (ppm)	Resultado
Diesel	3,75	A
B20	4,00	A
B100	5,25	A
B80	6,00	A
B50	11,50	A
B50 GLP	375	B
B80 GLP	410,25	B
Diesel GLP	510,25	B
B20 GLP	575,50	C
B100 GLP	637	C

Fonte: Do autor (2021).

Médias seguidas de letras diferentes na linha, não diferem entre si estatisticamente a 5% de significância.

Na rotação intermediária, os menores valores de HC mensurados foram, quando o motor era alimentado apenas por combustível líquido, contudo os valores de B80 GLP e B50 GLP não foram diferentes estatisticamente dos combustíveis líquidos. Aydin, Irgin e Çelik (2018) mostraram que a utilização de GLP concomitantemente ao diesel proporciona diminuição de aproximadamente 20%, nos valores de HC, fato contrário à essa pesquisa em questão, pois, com o uso do GLP, os valores de HC foram muito superiores ao combustível líquido. Barbosa (2016) mostra que, com a utilização do B50, o valor de HC diminuiu em torno de 40%, se comparado ao diesel, fato não compartilhado com o presente trabalho, visto que as emissões proporcionadas pelo combustível B50 foram aproximadamente 300% maiores se comparado ao diesel.

5 CONCLUSÃO

Para os valores médios de CO e HC, os combustíveis líquidos proporcionaram os menores valores desses gases, se comparados ao combustível substituído por GLP, já os valores de CO₂ foram iguais estatisticamente. A substituição do diesel por GLP se mostrou justificável com relação ao CO₂, mas a quantidade de HC liberado à atmosfera foi significativamente maior quando se substituiu o combustível líquido pelo gasoso.

REFERÊNCIAS

ALFATEST. Disponível em: https://www.alfatest.com.br/atualizacao/anal_gases_dg4_pt_es.pdf. Acesso em: 12 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14489**: motor diesel - análise e determinação dos gases e do material particulado emitidos por motores do ciclo diesel - ciclo de 13 pontos. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 41 p.

AYDIN, M.; IRGIN, A.; ÇELIK, M. B. The Impact of Diesel/LPG Dual Fuel on Performance and Emissions in a Single Cylinder Diesel Generator. **Applied Sciences**, London, v. 8, n. 5, p. 825, Apr. 2018.

BARBOSA, R. L. **Análise de gases de combustão de um motor de ignição por compressão utilizando biodiesel de óleo de Macaúba**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: UNICAMP, 2003. 17 p. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>. Acesso em: 5 maio 2020.

DITTRICH, A.; BEROUN, S.; ZVOLSKY, T. Diesel gas dual engine with liquid LPG injection into intake manifold. *In*: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT, 17., 2018, Jelgava. **Proceedings** [...]. Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2018. p. 1978-1983.

FERREIRA, V. R. Monóxido de carbono. **Brasil Escola**, Brasília, 2021. Disponível em: <https://brasilescuela.uol.com.br/quimica/monoxido-carbono.htm>. Acesso em: 12 abr. 2021.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

KOLIP, A. Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with LPG. **International Journal of the Physical Sciences**, London, v. 6, n. 8, p. 1905-1914, Apr. 2011.

OLIVEIRA, A.; SODRÉ, J. R. Características da combustão de um motor diesel com injeção direta de misturas de óleo diesel e etanol e injeção indireta de etanol. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, 24., 2016, São Paulo. **Proceedings** [...] São Paulo: Blucher, 2016. p. 551-566.

SILVA, T. A. F. **Análise da eficiência de geradores de energia com biodiesel obtido de óleos de fritura usados**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SOUZA, L. A. Dióxido de carbono. **Brasil Escola**, Brasília, 2020. Disponível em: <https://brasilescuela.uol.com.br/quimica/dioxido-de-carbono.htm>. Acesso em: 5 maio 2020.

VALENTE, O. S. **Desempenho e emissões de um motor-gerador de energia elétrica operando com biodiesel.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

VAN BASSHUYSEN, R.; SCHÄFER, F. **Internal combustion engine handbook-basics, components, systems and perspectives.** Michigan: SAE International, 2004. 811 p.

YOON, S. H.; LEE, C. S. Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 92, p. 992-1000, 2011.