

BENHURT GONGORA

DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR GERADOR UTILIZANDO
BIODIESEL DE CÁRTAMO

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2021

BENHURT GONGORA

DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTOR GERADOR UTILIZANDO
BIODIESEL DE CÁRTAMO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Gongora, Benhurt

Desempenho e emissões de motor gerador utilizando biodiesel de cártamo / Benhurt Gongora; orientador(a), Samuel Nelson Melegari de Souza; coorientador(a), Reinaldo Aparecido Bariccatti, 2021.
62 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2021.

1. Carthamus tinctorius L.. 2. Gerador de energia elétrica. 3. Biodiesel de oleaginosas. 4. Emissão de gases. I. Nelson Melegari de Souza, Samuel. II. Aparecido Bariccatti, Reinaldo . III. Título.

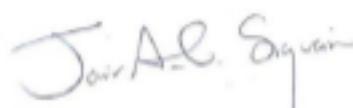
BENHURT GONGORA

Desempenho e emissões de motor gerador utilizando biodiesel de cártamo

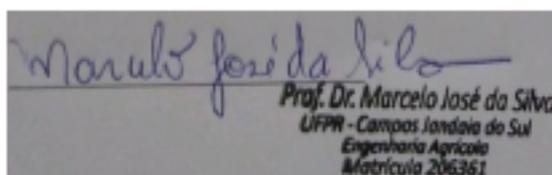
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Prof. Dr. Marcelo José da Silva
UFPR - Campos Jordão do Sul
Engenharia Agrícola
Matrícula 206362

Marcelo José da Silva
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cascavel, 22 de fevereiro de 2021

“Nada no mundo consegue tomar o lugar da persistência. Não o talento; não há nada mais comum do que homens mal sucedidos com talento”.

Não o gênio; o gênio não reconhecido já é quase um provérbio. Não a educação; o mundo está cheio de fracassos educados. Somente a persistência e a determinação são onipotentes.”

Calvin Coolidge

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo apoio financeiro.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pelas orientações e apoio concedido.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti, pela colaboração na pesquisa.

Aos professores doutores Jair Antônio Cruz Siqueira, Marcos Fischborn, Douglas Bassegio e Luciene Kazue Tokura, pelas valiosas contribuições a este estudo.

Ao Centro de Desenvolvimento e Difusão Tecnológico em Energias Renováveis – CDTER, pelo apoio concedido durante as atividades de pesquisa.

Aos demais docentes membros do Programa de Engenharia de Energia na Agricultura – PPGA da Unioeste, pelos ensinamentos enriquecedores.

À minha família, por todo o apoio e, principalmente, ao nosso Deus.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
°C	Graus Celsius
CE	Consumo específico
g	Gramma
Hz	Frequência em hertz
kg	Quilograma
kW	Quilowatts
NBR	Norma Brasileira
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
rpm	Rotações por minuto
V	Volt
W	Watts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da produção de biodiesel (B100) nos anos de 2009 a 2019.....	04
Figura 2 – Reação geral de transesterificação para obtenção de biodiesel.	07
Figura 3 – Floração do cártamo.....	08
Figura 4 – Estágios do motor ciclo diesel	10
Figura 5 – Gerador de quatro pólos.	12
Figura 6 – Produção do biodiesel.....	16
Figura 7 – Limpeza do biodiesel.....	16
Figura 8 – Amostra de biocombustível.....	17
Figura 9 – Amostras dos combustíveis em micro tubos.	18
Figura 10 – Bomba calorimétrica	18
Figura 11 – Banco de cargas resistivas.....	19
Figura 12 – Conjunto motor gerador.	20
Figura 13 – Ensaio da viscosidade cinemática	21
Figura 14 – Multimetro de grandezas elétricas.....	22
Figura 15 – Balança de precisão para o peso dos combustíveis.	23
Figura 16 – Gerador com proveta e mangueira adaptados para desenvolvimento dos ensaios de (janeiro a outubro de 2020)	24
Figura 17 – Proveta graduada.....	24
Figura 18 – Ensaio de densidade com picnômetro.....	25
Figura 19 – Analisador portátil de gases da combustão	26
Figura 20 – Coleta da emissão dos gases.	27
Figura 21 – Diagrama esquemático do sistema utilizado com motor ciclo diesel/ gerador, cargas resistivas e biocombustível.....	27
Figura 22 – Densidade dos combustíveis	29
Figura 23 – Poder calorífico superior dos combustíveis.....	30
Figura 24 – Viscosidade dos combustíveis a 40° C (cSt).....	31
Figura 25 – Carga do motor gerada de acordo com as misturas de diesel/biodiesel de cártamo e diesel/biodiesel comercial com cargas do motor (W).	32
Figura 26 – Consumo específico de acordo com as misturas de biodiesel de Cártamo e comercial com cargas do motor (W).....	33
Figura 27 – Resultado conforme desempenho do biodiesel comercial e emissão de (CO).....	35
Figura 28 – Resultado conforme desempenho do biodiesel de cártamo emissão de (CO).....	35
Figura 29 – Desempenho do biodiesel de cártamo com a emissão do (NOx).....	37
Figura 30 – Desempenho do biodiesel comercial com a emissão do (NOx).....	38
Figura 31 – Temperatura de exaustão dos gases proveniente ao biodiesel de cártamo e comercial conforme cargas do motor (W).....	38
Figura 32 – Temperatura de exaustão dos gases proveniente ao biodiesel de cártamo e comercial conforme cargas do motor (W).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físico-química de biodiesel e diesel.....	06
Tabela 2. Análise das propriedades do diesel S10 tipo A.....	14
Tabela 3. Análise das propriedades do biodiesel comercial B100 tipo B conforme o laudo BSBIOS	15
Tabela 4. Análise das propriedades do óleo de Cártamo	15
Tabela 5. Combustíveis utilizados no experimento.....	17
Tabela 6. Especificações técnicas conjunto motor gerador.....	20
Tabela 7. Características Técnicas do multimedidor.....	22
Tabela 8. Acidez dos combustíveis em porcentagem.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
D100	100 % de diesel
B11	11 % de biodiesel no diesel
B15	15 % de biodiesel no diesel
B30	30 % de biodiesel no diesel
B100	100 % de biodiesel
CDTER	Centro de Desenvolvimento e Difusão Tecnológico em Energias Renováveis
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CNPJ	Cadastro de Pessoa Jurídica
Fundetec	Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico
MME	Ministério de Minas e Energia
ORF	Óleo residual de fritura
RN	Resolução Normativa
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

GONGORA, Benhurt. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2021. **Desempenho e emissões de motor gerador utilizando biodiesel de cártamo.** Professor Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza. Professor Coorientador: Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti.

RESUMO

Para atender aos padrões ambientais e às políticas sustentáveis, oleaginosas como o cártamo e a soja estão sendo pesquisadas para misturas de diesel-biodiesel. O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma oleaginosa apreciada pela sua alta qualidade e elevado rendimento de óleo. As principais vantagens na sua utilização como biodiesel são a redução da emissão de poluentes para a atmosfera e uma melhor lubricidade do propulsor ciclo diesel. No plantio, sua cultura pode crescer em regiões áridas e secas em várias partes do mundo. Este estudo teve como objetivo avaliar as emissões e o desempenho de um motor gerador utilizando-se as misturas de biodiesel de cártamo e biodiesel comercial. Blendas de biodiesel de cártamo e biodiesel comercial (11, 15, 30 e 100%) em diferentes cargas resistivas de potência (500, 1000, 2000 e 3000 W) foram aplicadas ao motor gerador para avaliar o efeito no desempenho e as emissões. A avaliação das emissões dos gases e a eficiência energética dos combustíveis, com o conjunto moto gerador da marca Branco modelo BD 4000, apresentaram variações ao consumo e em emissões de CO, CO₂, NO_x, SO₂ e temperatura, quando aplicado ao biodiesel. As blendas com 15% de biodiesel de cártamo e 85% com diesel S10 apresentaram redução ao consumo de combustível e um bom rendimento do conjunto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

Palavras-chave: Gerador de energia elétrica; *Carthamus tinctorius* L.; Biodiesel de oleaginosas; Consumo de biodiesel; Emissão de gases; Lubricidade.

GONGORA, Benhurt. State University of Western Paraná, February 2021.
Performance and supplied with a generator engine using safflower biodiesel.
Advisor Professor: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza. Professor Co-advisor: Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti.

ABSTRACT

To meet standard standards and sustainable policies, oilseeds such as safflower and soybeans are being researched for diesel-biodiesel blends. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is an oilseed appreciated for its high quality and high oil yield. The main advantages in its use as biodiesel are the reduction of the emission of pollutants into the atmosphere and also a better lubricity of the diesel cycle propellant. When planting, your crop can grow in arid and dry regions in various parts of the world. This study aimed to evaluate how obtained and the performance of an engine generator under mixtures of safflower biodiesel and commercial biodiesel. Blends of safflower biodiesel and commercial biodiesel (11, 15, 30 and 100%) in different resistive power loads (500, 1000, 2000 and 3000 W) were applied to the generator engine to assess the effect on performance and return. Evaluation of gas losses and fuel efficiency, with the generator set of the Branco model BD 4000, consumption dissipation and transfer of CO, CO₂, NO_x, SO₂ and temperature, when applied to biodiesel. Blends with 15% safflower biodiesel and 85% S10 diesel, reduced fuel consumption and a good overall performance.

This work was carried out with the support of the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES)

Keywords: Electricity generator; *Carthamus tinctorius* L.; Oilseed biodiesel; Biodiesel consumption; Emission of gases; Lubricity.

ÍNDICE

RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Biocombustíveis	3
2.1.2 Biodiesel.....	3
2.2 Cártamo.....	8
2.3 Lubricidade.....	9
2.4 Motor Ciclo Diesel	9
2.5 Emissões.....	10
2.6 Gerador Monofásico	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Local do Experimento.....	14
3.2 Caracterização dos Combustíveis.....	14
3.2.1 Produção do Biodiesel	15
3.3 Descrição Geral do Experimento.....	19
3.3.1 Viscosidade Cinemática	20
3.3.2 Analisador de grandezas elétricas	21
3.3.3 Consumo específico.....	22
3.3.4 Método em volume.....	24
3.3.5 Densidade à 20°C	25
3.3.6 Análise das emissões.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Densidade	29
4.2 Poder calorífico	30
4.3 Ensaio de viscosidade	31
4.4 Potência elétrica gerada	32
4.5 Consumo específico dos combustíveis	33

4.6 Emissões de monóxido de carbono (CO).....	33
4.7 Emissões de dióxido de carbono (CO ₂).....	34
4.8 Particulados de Óxidos de Nitrogênio Combinado (NO _x).....	36
4.9 Comportamento da Temperatura de Exaustão	37
5.0 Particulados de dióxido de enxofre (SO ₂).....	39
5.1 Comportamento da temperatura de exaustão.....	39
6 CONCLUSÕES	41
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

Considerando o crescente interesse por plantas com potencial energético e que também sejam tolerantes aos estresses abióticos dos climas tropicais, o cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) tem sido avaliado como uma alternativa viável, principalmente por ser uma espécie que pode ser cultivada no Brasil no período de outono-inverno (SARTO et al., 2018). Trata-se de uma oleaginosa com potencial para produzir óleo de alta qualidade (35-45%), que tem níveis elevados de ácido oleico (30%) e linoléico (70%), podendo ser usada como matéria-prima para a produção de biodiesel (ILKILIÇ et al., 2011).

No Brasil, o cártamo é uma opção para a segunda safra (outono-inverno), quando há ocorrência de chuvas irregulares (SANTOS et al., 2018). Das oleaginosas exploradas no mundo nos últimos anos, o cártamo tem recebido bastante destaque, pois apresenta grande potencial como matéria-prima para a produção de biodiesel, podendo ser uma opção para substituição desse produto a base de soja no Brasil, já que a soja é utilizada em mais de 65% da matéria-prima na produção de biodiesel. O cártamo também tem variados usos na indústria, tais como fins medicinais, consumo humano e nutrição animal (EMONGOR, 2010). O óleo de cártamo é um produto comestível, mas de baixo consumo entre a população; tem características medicinais e está à frente de outras oleaginosas no que diz respeito aos atributos alimentares à produção de biodiesel. Em alguns países, o óleo de cártamo é um importante insumo para a economia, sendo classificado recentemente como matéria-prima crua para produção de biodiesel (YESILYURT et al., 2020).

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP - (2020), nos últimos anos, pesquisas têm sido aplicadas à utilização de blendas e à análise de emissões com biodiesel ao óleo diesel para substituí-lo parcialmente ou totalmente como combustível limpo e reutilizável. Entre os biocombustíveis, a emergência e a utilização do óleo de soja e da gordura animal, conhecido como biodiesel comercial, vêm proporcionando a redução de emissões de poluentes ao meio ambiente. Atualmente, o diesel comercializado no Brasil, nomeado de biodiesel B12, tem uma proporção de 12% de óleo de soja e gorduras na sua composição. A meta brasileira nos próximos anos é que alcance a marca de 15% de biodiesel comercial na mistura com o diesel.

O uso do óleo do cártamo, transformado em biodiesel, pode trazer benefícios quando aplicado em blendas, reduzindo-se valores junto ao diesel convencional. Em comparação entre o biodiesel de cártamo e biodiesel comercial, a viscosidade é menor para o biodiesel de cártamo, tendo também uma melhor lubricidade no conjunto do motor (OGUZ et al., 2011). Existem poucos estudos que apresentem resultados consistentes na utilização do biodiesel de cártamo, enquanto alguns estudos indicam que os biodieseis proporcionam redução no torque e na potência do motor, tanto para o cártamo quanto para o algodão (H. AYDIN et al., 2010; ILKLIÇ et al., 2010). Outros indicam que o biodiesel aumenta a potência do propulsor, utilizando como exemplo o biodiesel de tabaco (USTA, 2005).

Já no que compete às emissões, com a existência do oxigênio nos biodieseis, houve o aumento da temperatura e da emissão NOx (PATEL et al., 2019; USTA, 2005; ILKLIÇ et al., 2011; YESILYURT et al., 2020). No entanto, com adição de álcool ao biodiesel em blendas, ocorreu um atraso na ignição e uma diminuição da pressão no cilindro do motor. O calor de emissão e a eficiência térmica aumentaram, enquanto as emissões de (NOx) e (CO) foram reduzidas (ZERRAKKI IŞIK, 2020).

Embora existam estudos com os biocombustíveis, é necessário investigar mais detalhadamente as emissões e o desempenho do motor com biodiesel de cártamo como combustível alternativo, pois o cártamo tem apresentado grande potencial para o uso como biocombustível e, conseqüentemente, pode proporcionar maior durabilidade ao sistema mecânico.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar o desempenho energético e as emissões de um motor gerador de eletricidade com potência nominal de 3 kVA operando com biodiesel e misturas diesel e biodiesel, sendo que os biodieseis utilizados são o comercial e de matéria-prima a base de cártamo.

1.2. Objetivos Específicos

1. Avaliar a potência elétrica gerada;
2. Avaliar o consumo de combustível líquido com blendas (biodiesel/diesel);
3. Avaliar as emissões geradas pela combustão no motor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biocombustíveis

Por décadas, combustíveis fósseis e outros derivados do petróleo têm sido usados constantemente em indústrias e aplicações comerciais. No entanto, nos últimos anos, pela crescente preocupação quanto ao uso de produtos que aumentam a poluição do ar e diminuem as reservas naturais, os biocombustíveis vêm adquirindo uma maior atenção a âmbito mundial (MERT; ATILLA, 2017).

Conforme ressalta a ANP (2019), os biocombustíveis são definidos como aqueles que derivam da biomassa renovável, os quais podem substituir parcialmente ou até mesmo totalmente os combustíveis de origem fóssil.

Os biocombustíveis podem ser classificados em duas categorias: primários e secundários. Os primários são biocombustíveis utilizados diretamente em sua forma natural como resíduos da agricultura. Os secundários são os que passaram por um processo de transformação antes de sua utilização, como o biodiesel, que pode ser obtido por meio de óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais de fritura.

O biogás é considerado um biocombustível oriundo da degradação de biomassa sem a presença de oxigênio. Essa biomassa tem a origem em diversas fontes, como os resíduos animais da suinocultura, que são convertidos em biogás por meio de biodigestores instalados nas propriedades. A matéria sólida residual também é aproveitada como fertilizante para agricultura (MYDEEN et al., 2016).

2.1.2. Biodiesel

A resolução CNPE nº 14, de 8 de junho de 2017, da ANP, define o uso dos biocombustíveis na matriz energética. Um dos principais escopos dessa resolução é de criar instrumentos de incentivos à inserção comercial dos novos biocombustíveis, priorizados pela análise de ciclo de vida e suas relações entre eficiência e emissões. Com relação aos combustíveis existentes no mercado, o biodiesel é apontado como uma grande opção, pois é um exemplo de biomassa para produção de energia que apresenta uma série de vantagens em relação ao diesel de petróleo: menor emissão de enxofre, menor emissão de monóxido de carbono e possibilidades do produtor rural obter o combustível em sua propriedade.

Sendo o biodiesel composto pelos ésteres que devem ser tratados conforme a Resolução Normativa nº 07/2008 da ANP, que determina a especificação do produto comercializado no Brasil, em torno de 45% da energia e 18% dos combustíveis consumidos no Brasil já são renováveis. No resto do mundo, aproximadamente 86% da energia vem de fontes energéticas não renováveis.

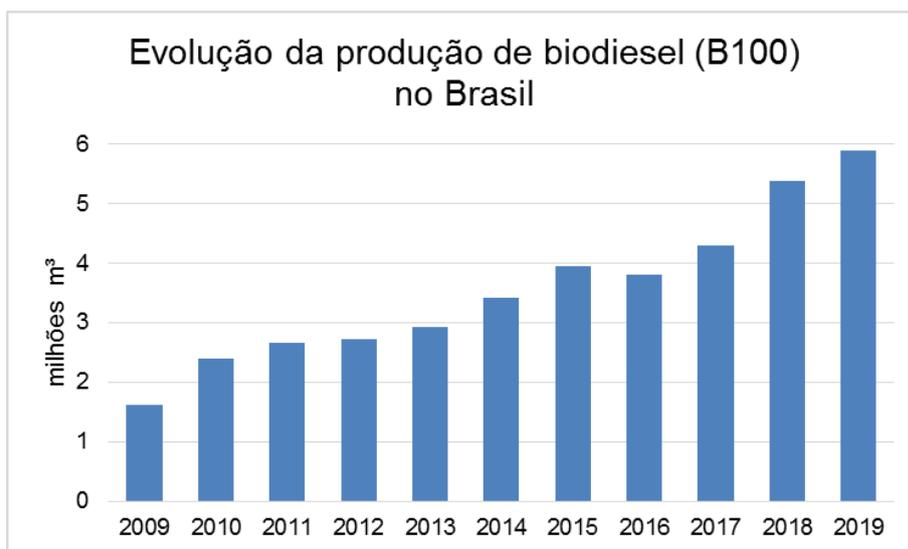


Figura 01. Evolução da produção de biodiesel (B100) nos anos de 2009 a 2019.

Fonte: ANP/SPC (2020).

Em 2019, a produção de B100, que representa 100% de biodiesel, cresceu no país 9,7% em relação ao ano anterior, atingindo o montante de 5,9 milhões de m³. A principal matéria-prima foi o óleo de soja (65%), seguido da gordura animal (12%) (ANP, 2020).

A produção de biodiesel é feita com algumas das principais oleaginosas comercializadas no mercado sudeste da Ásia, por exemplo, a canola e a soja, com uma detalhada investigação química e física, sendo: a viscosidade, o ponto de fulgor, a densidade e outros aspectos, conforme blendas estudadas. As oleaginosas pesquisadas apresentaram uma melhor viscosidade cinemática e densidade no biodiesel produzido (ATABANI et al., 2013).

Estudos com o biodiesel de laranja utilizando blendas de 20% no diesel mineral proporcionaram um desempenho satisfatório em um motor de ciclo diesel. O uso desse biodiesel causou aumento na deposição de carbono nas câmaras de combustão, em comparação ao diesel convencional sem blendas. Quanto ao

desempenho do motor, não houve alterações consideráveis no desgaste das peças internas (DHAR; AGARWAL, 2014).

Nesse contexto, Secco et al. (2012), desenvolvendo estudos com óleo refinado de soja, de girassol, de milho, de canola e de arroz, realizaram análises de densidade, de viscosidade cinemática a 40 °C, de ponto de fulgor, de poder calorífico, de índice de acidez e de rentabilidade do biodiesel. Os autores observaram que, por meio do processo de transesterificação via catálise básica do metanol e hidróxido de potássio (KOH), não houve grandes variações nas propriedades físico-químicas e na rentabilidade do biodiesel.

A utilização de biodiesel da gordura de frango apresenta uma alternativa energética viável, pois, em algumas regiões, há grande produção de aves de abate, como na região do oeste do Paraná, em que existem cooperativas agroindustriais. A produção de biodiesel com gordura residual do processamento de aves pode representar um custo reduzido, comparando-se a outras fontes de energia (BONOMETO, 2009).

Já o biodiesel produzido a partir do Óleo Residual de Fritura (ORF) utilizado com blenda de 50% e diesel fóssil 50% forneceu potência e consumo específico praticamente igual ao diesel tipo A (RABELO, 2001; SANLI, 2015). O biodiesel de ORF, comparado ao diesel fóssil, pode ser adquirido com qualidade e baixo custo, além de trazer benefícios ao meio ambiente (KULKARN; DALAI, 2006).

Trata-se de um subproduto da agroindústria em biocombustível, caracterizado como fonte de energia renovável. Em um estudo realizado por Gomes et al. (2008), o biodiesel da gordura animal foi utilizado em motores de combustão diesel e empregado com blendas de óleo diesel.

Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades físico-químicas dos combustíveis vegetais e animal, relativos a esta pesquisa.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas de biodiesel e diesel.

	Biodiesel Soja	Biodiesel cártamo	Biodiesel de gordura (frango)	Diesel
Viscosidade a 40° C (cSt)	3,8	4,1	4,4	2- 4,5
Densidade (g/cm ³)	0,92	0,95	0,88	0,82-0,85
Ponto de fulgor (°C)	172	148	176	38-60
Poder Calorífico Sup.(kJ/kg)	39.950	38.122	42.530	41.400-43.300
Número de Cetanos	58	50	61	51-56

Fonte: Adaptado de Guerra e Fuchs (2010); Krause (2008); Ilkiliç (2011); Delalibera (2014) e Secco et al. (2012).

A viscosidade, que é uma propriedade química, deve ser levada em consideração na utilização de óleos vegetais como combustível (GONZALEZ et al., 2008). A alta viscosidade faz com que os combustíveis tenham dificuldade de atomização na câmara de combustão para a ignição. O método mais utilizado para correção da viscosidade dos óleos vegetais é o pré-aquecimento desse combustível, melhorando-se as condições de atomização (KNOTHE et al., 2011).

A densidade, por sua vez, é a razão entre o volume e a massa da substância, que, no caso do biodiesel, pode variar entre 0,860 e 0,90 g.cm⁻³ a uma temperatura de 15 °C.

O ponto de fulgor é a temperatura mínima em que um líquido é suficientemente vaporizado para criar uma mistura de vapor e ar, que se inflamará se houver ignição.

Já o poder calorífico do combustível é definido como a quantidade de energia entregue pela unidade de volume ou massa. Uma vez que o combustível é uma medida da quantidade de energia, é desejável ter um alto valor de aquecimento. Além disso, o valor do poder calorífico é proporcional à cadeia de hidrocarbonetos saturados.

Um dos mais importantes indicadores de qualidade do combustível é o número de cetanos. É um parâmetro adimensional usado para correlacionar a ignição tempo de retardo de um combustível após a injeção na câmara de combustão. Um alto número de cetanos implica atraso da ignição e também está correlacionado à exaustão de óxidos de nitrogênio NO_x reduzidos.

Embora o uso de biodiesel em motores de ignição por compressão como um combustível alternativo libere mais emissões de dióxido de carbono, esse é

absorvido pelas plantas no ciclo da fotossíntese. Portanto, os biodieseis não são avaliados como fomentadores do aquecimento global (YESILYURT et al., 2020).

Outra qualidade dos biodieseis é a maior densidade e a menor compressibilidade em comparação ao diesel convencional (ZERRAKKI IŞIK 2020). O biodiesel é constituído de óleos vegetais ou de gorduras animais. Ao produzir matéria-prima, o biodiesel é submetido ao processo químico de transesterificação, ou seja, por meio da reação com metanol ou etanol, transforma os triglicerídeos, que são constituintes dos óleos e da gordura animal, em éster e glicerina. Os principais fatores que afetam a transesterificação são as relações de glicerina para álcool, relação catalítica, pressão e temperatura, reação do tempo e gordura livre, ácidos e água no óleo (TANZER; MURAT, 2016).

A reação de transesterificação tem papel importante na obtenção de biodiesel. Como exemplo de aplicação da transesterificação que consiste na glicerólise de óleos ou gorduras. Nesse caso, o glicerol é coproduto da cadeia produtiva do biodiesel.

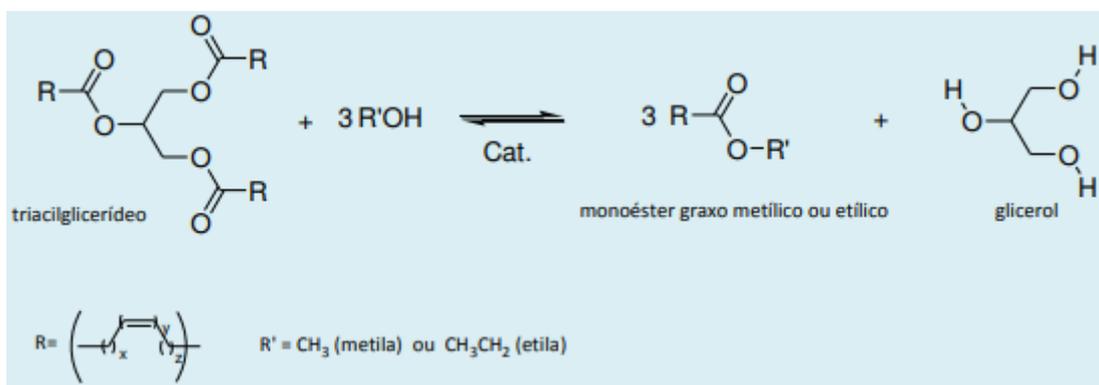


Figura 2. Reação geral de transesterificação para obtenção de biodiesel.

Fonte: Meneghetti (2013).

Diferentes condições operacionais e de processo, como tempo e temperatura de reação, proporção de álcool e a concentração do catalisador, estão entre os fatores importantes que afetam a produção de biodiesel (LEUNG; GUO, 2006).

2.2. Cártamo

O cártamo, que é um membro da família Compositae/Asteraceae, tem um ciclo de produção que varia entre 90 a 150 dias. Ademais, é adaptável a regiões de clima seco e tolerante ao frio, à seca e à salinidade (LUBBE; VERPOORTE, 2011).

O cártamo é chamado de pseudo-açafrão, sendo uma importante planta industrial altamente resistente a condições áridas. Tem cor amarela, vermelha, laranja e creme, além de flores e formas espinhosas e íngremes. Também, tem um potencial produtivo eficiente em áreas áridas e pobres que são utilizadas na produção de óleo comestível e biocombustível em várias partes da Turquia (GALAVI; ROMROUDI; TAVASSOLI, 2012).



Figura 3. Floração do cártamo.

Fonte: Rivas; Matarazzo (2009).

O uso do óleo do cártamo, transformado em biodiesel, com poder calorífico de 38.122 (kJ kg⁻¹), pode trazer benefícios quando aplicado em blendas, com valores reduzidos junto ao diesel convencional. Os estudos demonstraram que o uso do biodiesel de cártamo, com blendas de 5, 10 e 50%, respectivamente, resultou em redução no torque e na potência do motor de ciclo diesel. Por outro lado, houve uma redução significativa nos poluentes e particulados (ILKILIÇ et al., 2011).

O cártamo é uma fonte de matéria-prima para a alimentação e setores de óleo vegetal em todo o mundo. Pode ser cultivado em áreas alternativas e também entrar em alternância, não representando um risco significativo para problemas como encolhimento de áreas de cereais, ameaçando, dessa forma, a segurança alimentar. É um planta que precisa ter um destaque maior, já que seu custo de produção

agrícola é vantajoso, considerando suas propriedades genéticas altamente resistentes a doenças e pragas (SABZALIAN; SAEIDI; MIRLOHI, 2008).

O preço do cártamo cultivado em 2010 foi de aproximadamente 14€ (Euros)/Kg. Os custos de produção por hectare representaram aproximadamente 750€ (LUBBE; VERPOORT, 2011).

O desempenho da cultura do cártamo em Manitoba, Canadá, em função da época de semeadura e do controle da irrigação, foi o suficiente para obter maior produtividade de grãos entre: 2000 a 3500 $kg.ha^{-1}$ (RIVAS; MATARAZZO, 2009).

2.3. Lubricidade

O alto teor de ácido sulfúrico em combustíveis pode trazer prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente; outro fator do ácido sulfúrico é a causa de aumento do SO^2 e emissões de particulados (ppm). Além disso, há aumento no depósito de impurezas nos reservatórios e danos às peças dos motores. Porém, o ácido sulfúrico, com todas as suas propriedades, possibilita uma melhor lubricidade (YESILYURT et al., 2020).

A falta de lubrificação causa a redução da performance e da vida útil dos motores. Conforme as normas de proteção ambiental da Environmental Protection Agency (EPA), a redução de emissão de particulados foi estabelecida abaixo de 10 ppm em 2010. Enquanto a redução de SO^2 traz benefícios quanto às emissões, por outro lado, causa problemas com relação à má lubrificação em peças de atrito de motores à combustão. Em uma investigação do desempenho da lubrificação de biodieseis produzidos a partir de óleo de cártamo, óleo de semente de algodão, óleo de soja, óleo de girassol e euro-diesel, auxiliado por um dispositivo de teste pino sob disco de carga constante, com diferentes velocidades de deslizamento, concluiu-se que o menor diâmetro da faixa de desgaste no pino foi obtido com óleo de cártamo, com velocidades de deslizamento variável. Logo, a lubrificação é outra característica superior do biodiesel de óleo de cártamo (OGUZ et al., 2011).

2.4. Motor ciclo Diesel

Para Pimenta (2008), o motor ciclo diesel tem um sistema mecânico que

transforma um movimento linear em rotação. O movimento linear é conduzido pelo aumento da pressão proveniente da combustão, mistura de ar e combustível no interior do cilindro, impulsionando o pistão. O movimento linear é transmitido para o sistema de biela-manivela, em movimento de rotação. Segundo Moran et al. (2013), no motor de quatro tempos, o pistão executa quatro estágios: admissão, compressão, potência e exaustão.

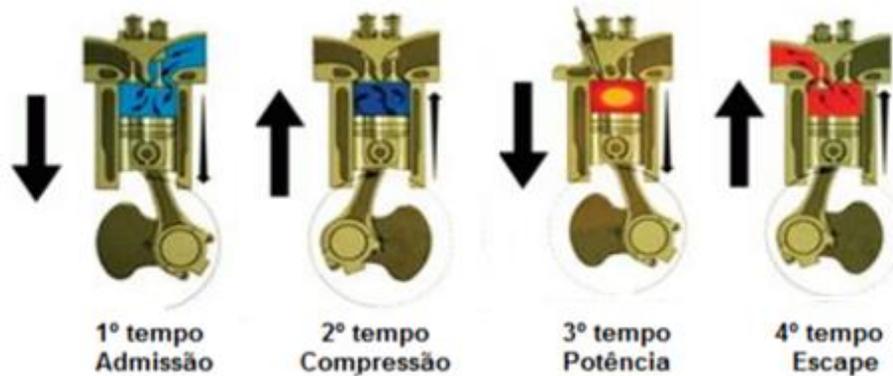


Figura 4. Estágios do motor ciclo diesel.

Fonte: Adaptado Moran et al. (2013).

Com os referidos processos é transformada a energia química do combustível em energia mecânica, por meio de sua combustão, que gera, conseqüentemente, a potência.

Para Volpato et al. (2009), o uso de biodiesel de soja (B100) em um motor diesel é viável, mas foram observadas perdas de até 10,7% no torque e diminuição na potência reduzida de 6,1%, quando comparadas ao funcionamento do motor com o óleo diesel.

2.5. Emissões

As emissões gasosas em motores diesel são caracterizadas por emitirem poluentes e particulados. A fim de eliminar os efeitos negativos dos combustíveis biodiesel nas emissões de NO_x e CO_2 , alguns aditivos estão sendo estudados para aumentarem a qualidade dos combustíveis biodieseis. Um deles é o éter dimetílico, que tem um alto número de cetano em comparação ao combustível diesel convencional, o que melhora a qualidade da combustão e reduz as emissões de

escapamento (KUMAR et al., 2018).

Para Özer (2020), o efeito da adição de tolueno com blendas ao diesel e biodiesel de soja apresentou alterações na temperatura de exaustão dos gases em um motor ciclo diesel. Essa temperatura é associada à queima do combustível no cilindro do motor. Conforme o aumento da carga no eixo do motor, a temperatura de exaustão aumenta proporcionalmente, corroborando com as pesquisas de Anh (2018).

Em outro estudo com motor diesel, adicionando-se pressurizado e mantendo o combustível acima de 200 psi, um com diesel puro e outro com blendas, os resultados indicaram reduções de particulados em até 80%, porém, as emissões de NOx e CO aumentaram significativamente (EIRICH et. al., 2013).

A variação da emissão de particulados e opacidade da fumaça dos combustíveis é diminuída conforme o aumento de biodiesel na mistura diesel/biodiesel. Em um experimento com biodiesel de cártamo e diesel comercial, os melhores resultados em emissões de particulados e menor opacidade da fumaça foram verificados em blendas de 50% de biodiesel.

O principal motivo para as reduções de emissão de particulados com o uso de biodiesel pode ser o conteúdo de oxigênio na molécula de biodiesel que permite uma melhor combustão e promove a oxidação da fuligem. A vantagem do oxigênio-combustível é considerada uma consequência da sua maior acessibilidade à chama, que leva a mais completa combustão. Outra razão é a diferente estrutura das partículas de fuligem entre o biodiesel e o óleo diesel, que também pode favorecer a oxidação da fuligem do biodiesel. Particulados de diesel consistem principalmente de material carbonáceo gerado pela combustão, isso é o que se denomina fuligem, termo geral que se refere ao carbono impuro restrito às partículas residuais de combustível pirolisado, resultado da combustão incompleta de um hidrocarboneto. A oxidação da fuligem no biodiesel é até seis vezes maior do que a do diesel. Também, a menor quantidade de enxofre e teor de biodiesel derivado de cártamo impede a formação de sulfato, sendo um componente significativo de particulados no diesel (ILKILIÇ et al., 2011).

2.6. Gerador monofásico

Motogeradores são utilizados na indústria e no meio agrícola. Esses

equipamentos fornecem energia elétrica, podendo ser acionados continuamente e movidos por motor à combustão ciclo diesel.

Seus componentes principais são o rotor e o estator, constituídos por suas armaduras, sendo seus enrolamentos utilizados com ímãs permanentes ou autoexcitados (FITZGERALD, 2014).

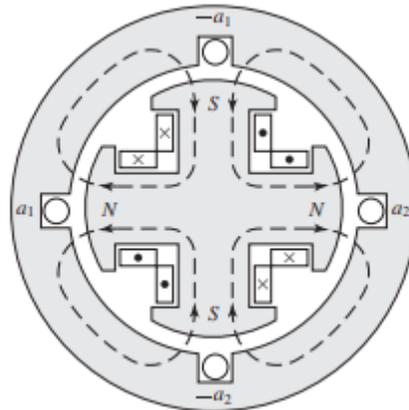


Figura 5. Gerador de quatro polos.

Fonte: Fitzgerald (2014).

Com uma velocidade constante, pode trabalhar a uma frequência de 60Hz, fornecendo tensão e corrente elétrica conforme o dimensionamento dos cabos do enrolamento e da armadura. O rotor do gerador é movido por uma força motriz primária e, com o seu movimento de rotação, produz campos magnéticos girantes alternados, induzindo as tensões geradas.

A frequência e a tensão geradas por um gerador CA dependem da intensidade do campo e da velocidade do rotor. O valor da força eletromotriz (f.e.m) induzida ou tensão gerada é controlada por meio da excitação do campo. A frequência da f.e.m gerada depende do número de polos do campo e da velocidade do rotor, como mostra a Equação 1 (CHAPMAN, 2013).

$$f = \frac{p.n}{120}$$

Equação (1)

Em que:

f → frequência da tensão gerada, Hz

$p \rightarrow$ número total de polos da máquina

$n \rightarrow$ velocidade do rotor, rotações por minuto (rpm)

Como exemplo, um alternador monofásico com dois polos e velocidade de 3600 (rpm) resultará em uma frequência relativa de 60 Hz.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Gaseificação de Biomassa e Micro geração de Eletricidade, localizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), latitude 24°59'20.8"S e longitude 53°26'58.8"W, com altitude média de 781m. O biodiesel de óleo de cártamo foi produzido no laboratório do Centro de Desenvolvimento e Difusão Tecnológico em Energias Renováveis (CDTER).

3.2. Caracterização dos combustíveis

O presente trabalho avaliou os parâmetros de desempenho operacional de um conjunto motor gerador de potência nominal de 3.000 W, utilizando-se biodieseis a base de óleo de soja/gordura animal e cártamo. Os combustíveis foram misturados em diferentes proporções com o óleo diesel puro (D100), sendo que o diesel S10 comum tipo (A) é produto comercializado na distribuidora de combustível Estrada, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Análise das propriedades do diesel D100 S10 tipo A.

Ensaio	Resultados
Aspectos	Límpido e Isento de Impurezas
Cor	Amarela
Massa Específica	834,2 kg/m ³ a 20 °C
Ponto de Fulgor	58 °C
Condutividade Elétrica	94 pS/m
Teor de Água por K.F.	149,3 mg/kg
Água Sedimentos % (BSW)	Ausente

Fonte: Adaptado de Poollab (2020).

O funcionamento do conjunto motor gerador se dá sob diferentes níveis de cargas resistivas, quantificando-se a potência ativa (resistência elétrica) fornecida ao sistema, acionando, por meio de quadro elétrico, quatro cargas elétricas: (500, 1.000, 2.000 e 3.000W) e nove concentrações de combustíveis distintas.

3.2.1. Produção do biodiesel

O biodiesel comercial foi adquirido na empresa BS Bios, localizada na cidade de Marialva, Estado do Paraná. Suas características estão apresentadas conforme o laudo da empresa na Tabela 3.

Tabela 3: Análise das propriedades do biodiesel comercial B100 tipo B, conforme o laudo BSBIOS.

Ensaio	Resultados
Aspectos	Amarelo claro e Isento de Impurezas
Ponto de Congelamento	Faixa de -4 °C a 2 °C.
Ponto de Ebulição	Entre 344,7 °C e 354,3 °C
Ponto de Fulgor	Mínimo 100 °C (ASTM D 93)
Inflamabilidade	261 °C
Pressão de vapor	4,20 hPa a 25 °C
Viscosidade Cinemática	4,06 a 4,20 mm ² /s

Fonte: Adaptado de BSBIOS (2019).

Já para o biodiesel de cártamo, primeiramente foi adquirido o óleo de cártamo da Indústria de Óleos Vegetais Pazze de Panambi (RS). Suas características estão apresentadas conforme o laudo da empresa na Tabela 4.

Tabela 4: Análise das propriedades do óleo de Cártamo, referente ao mês de dezembro de 2019.

Ensaio	Resultados
Aspecto	Isento de Impurezas
Ponto de névoa	-2°C
Densidade (25°)	0,913 g.cm ³
Viscosidade	A (Máximo)
Acidez	1,5%
Ácido Palmítico	4,2%
Ácido Esteárico	2,8%
Ácido Oléico	69,5%
Ácido Linoléico	22,8%
Ácido Linolênico	0,2%

Fonte: Adaptado de Ilkiliç (2011) e Pazze (2019).

A produção do biodiesel de cártamo ocorreu no laboratório do CDTER, localizado em Cascavel (PR). Para a produção, foram utilizados álcool metílico (CH_3OH) e hidróxido de potássio (KOH) como catalizadores; posteriormente, foi realizada limpeza residual com água. Para reação de transesterificação, o hidróxido de potássio foi dissolvido no álcool metílico e depois adicionado ao béquer de vidro com o óleo de cártamo, aquecidos a 50°C (Figura 6).



Figura 6. Produção do Biodiesel

Fonte: O Autor.

Após o término da reação, o misturador foi desligado para a decantação da glicerina. Retirada a glicerina, o biodiesel foi lavado com água em funil de separação (Figura 7).



Figura 7. Limpeza do Biodiesel de cártamo

Fonte: O Autor.

Com a produção do biodiesel foram feitas as blends de combustível líquido, com as seguintes nomenclaturas: B11 (11% de biodiesel e 89% de diesel comum);

B15 (15% de biodiesel e 85% de diesel); B30 (30% de biodiesel e 70% de diesel comum); B100 (biodiesel puro) e D100 (100% de diesel comum, puro) (Tabela 5).

Tabela 5: Combustíveis utilizados no experimento.

Nome	Composição
SG11D89	Mistura de 11% de biodiesel comercial e 89% diesel
SG15D85	Mistura de 15% de biodiesel comercial e 85% diesel
SG30D70	Mistura de 30% de biodiesel comercial e 70% diesel
C11D89	Mistura de 11% de biodiesel de cártamo e 89% diesel
C15D85	Mistura de 15% de biodiesel de cártamo e 85% diesel
C30D70	Mistura de 30% de biodiesel de cártamo e 70% diesel
B100 SG	100% de biodiesel comercial
B100 C	100% de biodiesel de cártamo
D100	100% de óleo diesel S10



Figura 8. Amostra de Biocombustível

Fonte: O Autor.

As misturas (Figura 9) foram submetidas a um teste do poder calorífico superior (PCS), utilizando uma bomba calorimétrica E2K (Figura 10), localizada no Laboratório de Biocombustíveis da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Toledo (PR).



Figura 9. Amostras dos Combustíveis em microtubos

Fonte: O Autor.



Figura 10. Bomba Calorimétrica.

Fonte: O Autor

O poder calorífico foi determinado a partir do poder calorífico superior (PCS) (kJ/kg). Esse valor é apresentado pelo visor da bomba calorimétrica, no momento do ensaio.

3.3. Descrição geral do experimento

Para o desenvolvimento da pesquisa, houve a necessidade de se utilizar: um analisador de Gases, um multímetro digital, um analisador de grandezas elétricas, um viscosímetro, equipamentos do laboratório de química, um motor gerador e um banco de resistências.

Para simular o consumo de energia elétrica, utilizou-se o banco de cargas resistivas composto por oito resistências (1 de 250 W, 2 de 500 W, 2 de 1000 W e 3 de 2000 W), com tensão de alimentação de 220 V em corrente alternada.

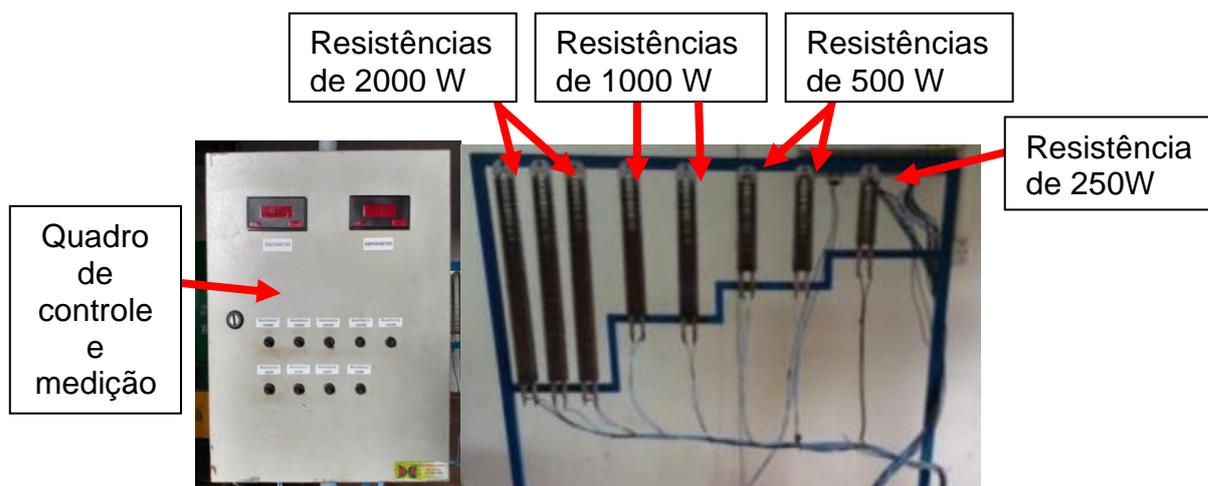


Figura 11. Banco de cargas resistivas, sendo à esquerda o quadro com instrumentação para medição das grandezas elétricas e, à direita, as diversas resistências.

O Gerador utilizado foi da marca Branco, que operou com as seguintes proporções volumétricas entre o óleo diesel mineral com biodiesel: (D100) 0% (B0), 11% (B11), 15% (B15), 30% (B30) e 100% de biodiesel (B100). Para o ensaio utilizou motor de 7,0 HP, com gerador elétrico acoplado de 3 kW (Figura 12).



Figura 12. Conjunto Motor Gerador

Fonte: (BRANCO, 2020).

Tabela 6: Especificações técnicas do conjunto motor gerador Branco, modelo BD 4000.

Motor	
Tipo	Monocilíndrico, refrigerado a ar, 4 tempos, diesel
Potência máxima	7Hp, 3600 rpm
Combustível	Diesel
Capacidade do tanque	11 litros
Gerador	
Tipo	Monofásico
Frequência	60 Hz
Potência máxima	3,3 kW
Potência nominal	3,0 kW
Tensão	220V

Fonte: Catálogo Branco Geradores (2020).

3.3.1. Viscosidade cinemática

Para a medição da viscosidade cinemática dos combustíveis, foi utilizado um viscosímetro capilar Cannon-Fenske. No ensaio, o viscosímetro de 75 ml foi mantido imerso em água com uma temperatura de 40°C (Figura 13), com um cronômetro e registro do tempo de escoamento do combustível, conforme o menisco superior ao menisco inferior. Nas amostras de combustíveis, manteve-se o padrão de triplicata.



Figura 13. Ensaio da viscosidade cinemática

Para a viscosidade cinemática:

O valor da viscosidade cinemática será expresso em $\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$ ou cSt (centistoke).

$$v = C.t$$

Equação (2)

Em que:

v = viscosidade cinemática em $\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$ ou cSt (centistoke);

C = 0,008 - Constante de calibração do viscosímetro ($\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$);

t = Tempo de escoamento do combustível (s).

A viscosidade e a densidade são propriedades físico-químicas que se alteram mediante variações de temperatura. Segundo Schlosser et al. (2007), o aquecimento de combustível a 68°C proporciona o aumento da viscosidade e apresenta valores médios de torque e potência superiores a temperaturas mais baixas, em ensaios utilizando óleo diesel e óleo de soja e suas blendas.

3.3.2. Analisador de grandezas elétricas

Para determinar a potência gerada, foi utilizado um analisador de grandezas elétricas da marca Sultech modelo ST 9250R. Com auxílio desse equipamento foram encontradas as grandezas elétricas: corrente elétrica (A), tensão elétrica (V),

potência ativa (W) e a frequência (Hz).



Figura 14. Multimetro de grandezas elétricas

Fonte: O Autor

Tabela 07: Características Técnicas do multimetro.

Descrição	
Tensão de alimentação	80 a 270 VAC
Precisão Tensão	0,5%
Precisão Corrente	0,5%
Fator de Potência	1%
Tensão de medição	127V, 220V, 380V
Frequência	50/60Hz

Fonte: Manual Sultech (2019).

Conforme o aumento das cargas elétricas, foi registrada a variação da potência ativa em watts. Essa potência é o valor que o gerador mantém conforme a carga que é acionada no quadro de resistências elétricas.

3.3.3. Consumo específico

Conforme a NBR ISO 3046/1, o consumo específico de combustível é caracterizado pelo consumo por unidade de energia ($\text{gkW}^{-1}\text{h}^{-1}$). O consumo específico de cada combustível ensaiado pode ser determinado mediante a determinação previa do consumo mássico (g), que é obtido pelo peso da carga, com auxílio de uma balança de precisão.



Figura 15. Balança de precisão com o display para o peso dos combustíveis

Fonte: Alfa Instrumentos (2020).

A balança, segundo o fabricante, tem uma capacidade de 5 kg e medição de até quatro casas após a vírgula, podendo ter variação de 0,5% do peso medido.

O consumo nas distintas condições de carga resistivas fornecem o consumo específico do combustível (C_e) em $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$. A equação (3) informa o consumo específico de cada amostra de combustível referente aos ensaios.

$$C_e = (m_i - m_f) / \text{Potência} \cdot t \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

C_e = consumo específico do combustível, $\text{g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$;

m_i = massa de combustível no início do ensaio, g;

m_f = massa de combustível no término do ensaio, g;

Potência = potência gerada, kW;

t = tempo de consumo (h).

Conforme descrito por Barbosa et al. (2008), o consumo de blendas é obtido por meio de um medidor volumétrico, constituído por uma proveta graduada acoplada ao bico injetor por meio de uma mangueira. O tempo de cada teste foi cronometrado por aparelho digital, obtendo-se o consumo em (mL) dos combustíveis (Figura 16).

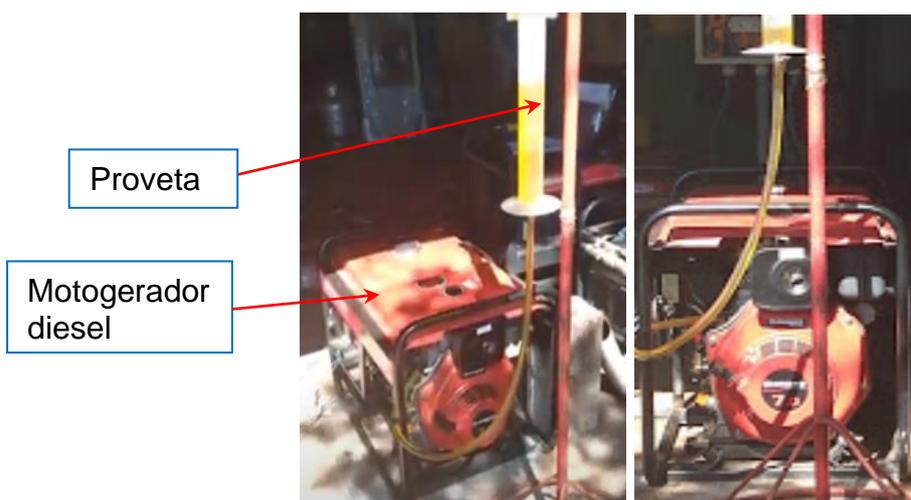


Figura 16. Gerador com proveta e mangueira adaptados para desenvolvimento dos ensaios de (janeiro a outubro de 2020).

Fonte: O Autor.

3.3.4. Método em volume

Para mensurar o consumo de combustível na alimentação do motor, utiliza-se uma proveta graduada para fornecer diretamente o valor inicial e o valor final do combustível consumido por unidade de tempo.



Figura 17. Proveta graduada

Fonte: Labor Quimi (2020).

Com o uso da proveta e de um cronômetro, registrou-se o volume (V_c)

consumido pelo tempo (t).

3.3.5. Densidade a 20°C

Para encontrar a massa específica das amostras de biocombustíveis a 20°C, foi utilizado o método do picnômetro, com um medidor volumétrico ideal para determinar a densidade de substâncias líquidas. O medidor tem uma capacidade volumétrica de 10,0 ml e uma tolerância de $\pm 0,02$ ml a 20°C. Primeiramente, o picnômetro é pesado para subtrair o valor da sua massa das amostras dos biocombustíveis. Para medição da massa das amostras, usou-se uma balança de precisão da marca Sartorius, modelo BP221, com resolução de 0,0001g (Figura 18).

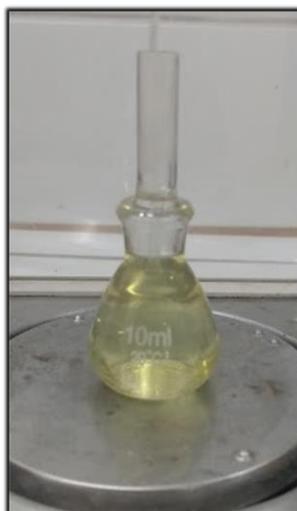


Figura 18. Ensaio de densidade com picnômetro

Com as amostras mantidas a uma temperatura de 20°C, imersas em água, as massas das amostras foram determinadas a partir da equação 4, descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), para calcular a densidade a 20°C.

$$V_p = \frac{\Delta m}{d}$$

Equação (4)

Em que:

V_p = Massa das amostras;

Δm = diferença de massa do picnômetro vazio e cheio;

d = densidade da água.

3.3.6. Análise das emissões

Para o estudo das emissões de gases e particulados, foi utilizado o analisador portátil de gases de combustão (Figura 19) da marca Bacharach modelo PCA3. Esse aparelho tem sensores eletroquímicos capazes de realizar a medição de emissões de oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxido de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2), além de realizar a leitura da temperatura dos gases de exaustão. O limite de erro é de $\pm 5\%$ para a leitura de emissões e $\pm 0,5\%$ para a medição de temperatura.



Figura 19. Analisador portátil de gases da combustão

Fonte: Manual técnico Bacharach (2010).

Durante os ensaios, a sonda de amostragem dos gases de exaustão foi inserida na ponteira do escape do conjunto motor gerador (Figura 20).



Figura 20. Coleta da emissão dos gases

Fonte: O Autor.

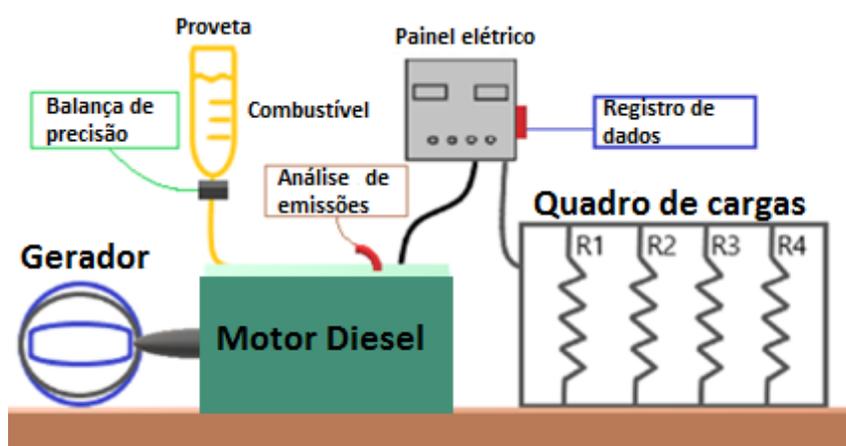


Figura 21. Diagrama esquemático do sistema utilizado com motor ciclo diesel/ gerador, cargas resistivas e biocombustível.

Fonte: O Autor.

As figuras apresentadas foram realizadas com o auxílio do software Sigma Plot 11.0 (Jandel Scientific, Sausalito, CA). Os dados de consumo dos combustíveis e emissões foram tabulados em planilha eletrônica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Acidez

Os ensaios de acidez foram desenvolvidos conforme o método da *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists Society - A.O.C.S. - (AOCS - Ca 5a40)*, no laboratório de química localizado na Universidade Federal do Paraná, Campus de Palotina (PR).

Esse ensaio determina o grau de acidez de um biodiesel dado pela medida do teor de ácidos graxos livres. As amostras foram mantidas homogêneas e completamente líquidas, adicionando gotas do indicador fenolftaleína em frascos Erlenmeyer, titulando em solução hidróxido de sódio até o aparecimento da coloração rósea. Após ensaios, foram lançados os valores em planilha eletrônica com cálculo padronizado (Tabela 8).

Tabela 08: Acidez dos combustíveis, porcentagem em massa

Combustíveis	Porcentagem em massa (%)
SG11D89	0,2534
SG15D85	0,2529
SG30D70	0,3035
B100 SG	0,2528
C11D89	0,1518
C15D85	0,1266
C30D70	0,2025
B100 C	0,2024
D100	0,0759

O índice de acidez mede o teor de ácidos graxos livres que estão contidos em óleos residuais e biodiesel, sendo esses oriundos do processo de produção ou degradação do biodiesel. O alto índice de acidez pode causar deposição de sedimentos no motor e desgaste da bomba e do filtro de combustível (VAN et al., 2004).

Para o biodiesel de cártamo B100 C, foi registrado o menor índice de acidez entre os biodieseis.

4.2. Densidade

Os resultados de densidade demonstram que os biodieseis 100% estão dentro da faixa padronizada para biocombustíveis, com seus valores resultantes próximos de $0,88 \text{ g.cm}^{-3}$. Utilizando-se a equação 04, os resultados de viscosidade estão apresentados na Figura 22.

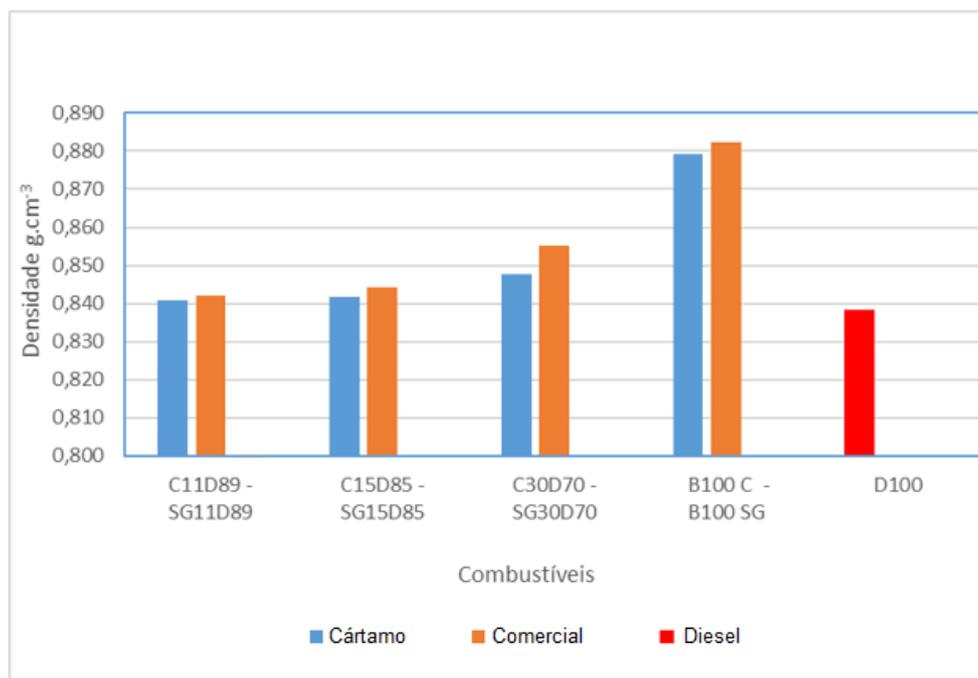


Figura 22. Densidade dos combustíveis

Já para o diesel D100 e blendas com biodiesel, as resultantes dos valores ficaram entre $0,830$ e $0,86 \text{ g.cm}^{-3}$. A alta densidade com base no volume significa energia de alto potencial. Embora o conteúdo energético do biodiesel seja baixo em relação ao óleo diesel, a densidade do biodiesel é maior que o óleo diesel e, portanto, a diferença do conteúdo de energia é baixa. A alta densidade é uma indicação de que o glicerol não pôde ser removido suficientemente na reação de transesterificação. Alta densidade fornece um combustível a ser pulverizado em grandes quantidades e forma uma mistura rica nas câmaras do motor. Nesse caso, a mistura rica leva a um aumento na temperatura da parede da câmara de combustão e o atraso de ignição diminui (YESILYURT et al., 2020).

4.3. Poder calorífico superior dos combustíveis

O valor calorífico ou calor de combustão é obtido por método de calorímetro de bomba de oxigênio ou bomba calorimétrica, pois o calor latente no produto de combustão é recuperado. O *Heating Value* (HV) é uma das propriedades mais imperativas de um combustível, e para o biodiesel sua medida ficou com o valor inferior ao do diesel padrão (MURUGESAN et al., 2016).

Com o ensaio na bomba calorimétrica, o valor mensurado do poder calorífico superior do biodiesel (B100) de cártamo foi em 39630 kJ.kg^{-1} , e do biodiesel (B100) comercial foi mensurado em 39580 kJ.kg^{-1} , inferiores ao do diesel S10, que apresentou o valor de 43595 kJ.kg^{-1} . Na Figura 23 encontram-se dispostos os demais valores.

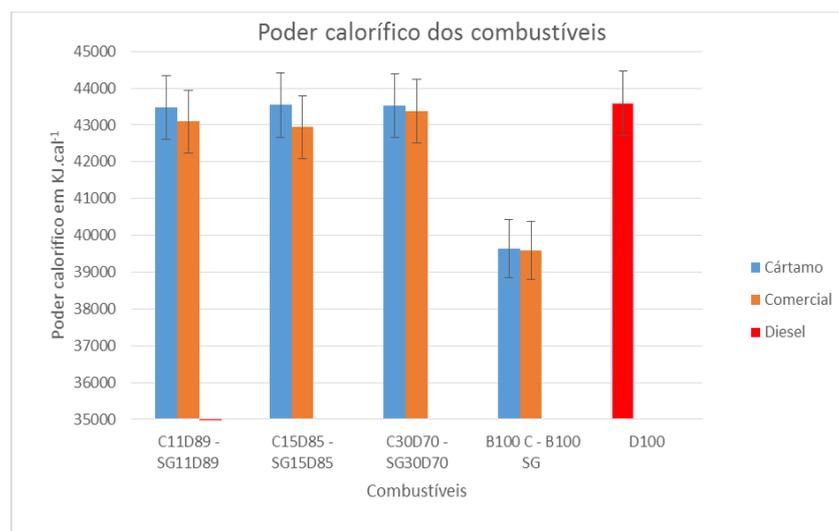


Figura 23. Poder calorífico superior dos combustíveis. (As barras superiores do desvio padrão demonstram os níveis de tolerância para mais e para menos).

Observa-se que os menores poderes caloríficos são dos biocombustíveis de cártamo (B100 C) e comercial 100% (B100 SG), obtendo um leve diferencial positivo para o biodiesel de cártamo (B100 C). O desvio padrão na parte superior correspondente de cada barra demonstrando os níveis para um desempenho na amplitude indicada de 2% para mais e para menos.

4.4. Ensaio de viscosidade

Sendo uma importante propriedade do combustível, a viscosidade cinemática é a resistência ao fluxo de um fluido por meio do orifício do equipamento (LAPUERTA et al., 2010). A norma que determina sobre a viscosidade a 40° C é a ASTM D445, que prioriza o valor mínimo de 1,9 mm²/s e o valor máximo de 6,0 mm²/s. Valores acima do máximo que podem ser apresentados por óleo vegetal apresentam eventualmente problemas no funcionamento de motores (SCHLOSSER et al., 2007).

Com os ensaios de viscosidade, foi observado que a menor viscosidade é a do diesel S10 (D100) - 2,3 mm²/s -, e as maiores viscosidades são dos biodieseis de cártamo (B100 C) - 4,0 mm²/s - e comercial (B100 SG) - 3,8 mm²/s -. Esses valores estão dentro da faixa dos níveis admissíveis, como indicado na Figura 24.

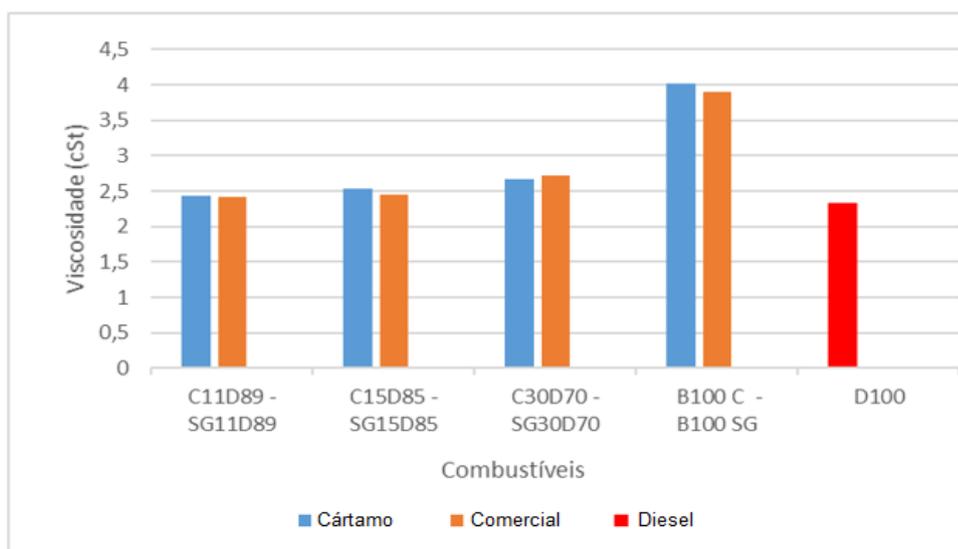


Figura 24. Viscosidade dos combustíveis a 40° C (cSt)

Em 75% das amostras com biocombustível, o Cártamo apresentou maior viscosidade, comparando-se ao biodiesel de soja.

4.5. Potência elétrica gerada

As potências produzidas pelo motor gerador apresentaram proximidades nos valores com um comportamento linear, sem apresentar queda acentuada para o biodiesel de cártamo e suas blends. Nos combustíveis comerciais, houve leve redução da potência gerada em comparação ao diesel D100 (Figura 25).

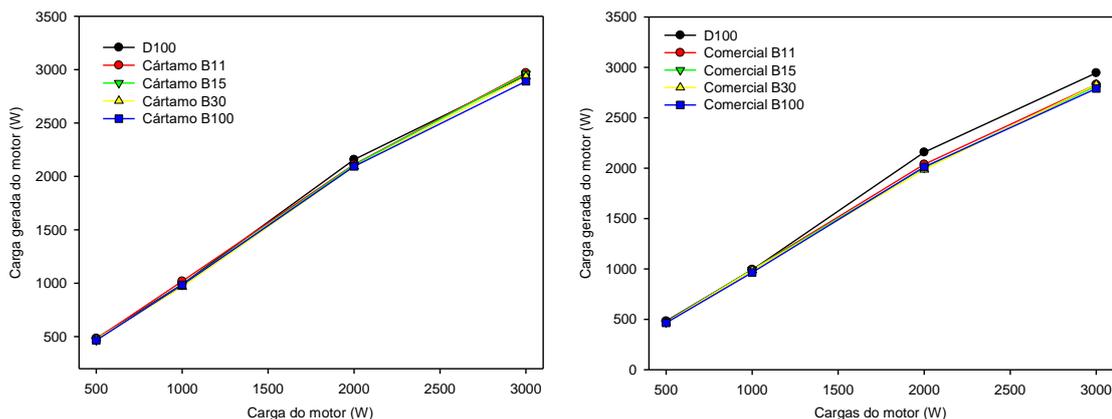


Figura 25. Carga do motor gerada de acordo com as misturas de diesel/biodiesel de cártamo e diesel/biodiesel comercial com cargas do motor (W).

Em virtude da proximidade dos valores de geração de energia e consequentemente da dificuldade da discussão de resultados com a literatura existente, foi aplicado o teste de Tukey, comparação entre amostras, que avaliou a diferença significativa entre os biocombustíveis ensaiados e o diesel.

Analisando o p-valor dos combustíveis, não se rejeita a hipótese de igualdade entre as médias de geração para os níveis com p-valor superior a 0,05. Nessa direção, os combustíveis diesel, o cártamo e o biodiesel comercial, nas cargas de potência aplicada de 500 e 1000W, representaram estatisticamente a igualdade entre os valores médios de geração de energia destes combustíveis.

Já para a carga de 2000W, os três combustíveis obtiveram diferença de valores, sendo aceita a hipótese nula de igualdade. O diesel teve a maior geração, seguido pelo biocombustível de cártamo e, por último, o biocombustível comercial. Na carga de 3000W, o biocombustível de cártamo e o diesel obtiveram igualdade, e o biodiesel comercial ficou com o valor inferior em aproximados 5%.

As potências elétricas, de modo geral, obtiveram uma leve redução nas cargas de 2000 a 3000 W, podendo ser baseadas na lei de Lenz. Quando aplicada a carga nominal, a indução eletromagnética e uma força eletromotriz induzida fizeram

com que uma corrente circulasse no circuito, em um sentido que seu efeito magnético se opôs à variação que a produziu, necessitando uma maior aceleração do motor a combustão para conservação do momento angular (HIRSCH, 2007).

4.6. Consumo específico dos combustíveis

O consumo específico de combustível apresentou maior resultado com biodiesel comercial em 500W e 2000W em comparação ao cártamo. Os aumentos médios foram de 10, 6 e 12%, operando com os combustíveis (B11), (B30) e (B100), respectivamente (Figura 26).

O maior consumo específico do biodiesel puro (B100) pôde ser atribuído por conter menor poder calorífico em relação ao diesel (D100). É possível observar que a carga aplicada no sistema em 2000W promoveu pontos de redução no consumo específico nos combustíveis com cártamo, obtendo um melhor consumo (ILKILIÇ et al., 2011). Entretanto, quando atingida a potência de 3000W, os valores obtiveram um aumento em até 33% em relação à carga que antecede.

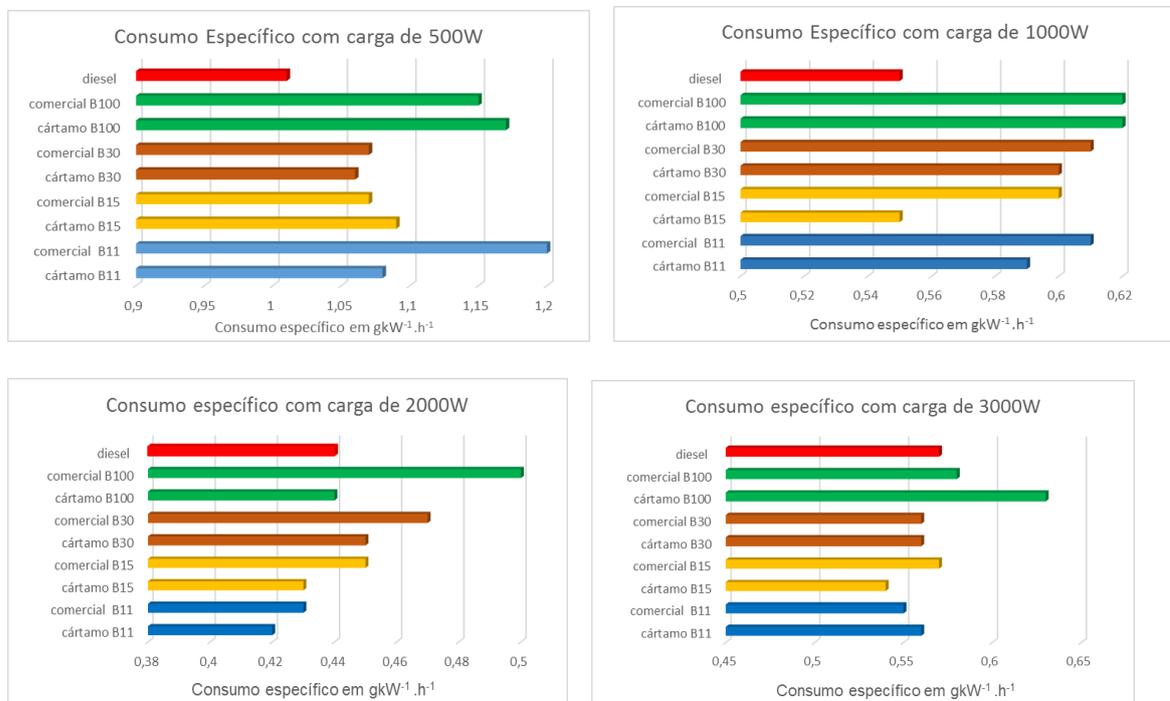


Figura 26. Consumo específico de acordo com as misturas de biodiesel de cártamo, comercial e diesel com cargas do motor (W).

O diesel (D100) obteve menor consumo específico nas cargas de 500W e 1000W (KUL; KAHRAMAN, 2016). Para a carga de 2000W, o biodiesel de cártamo (B100) apresentou valores aproximados ao diesel, com aumento no consumo para os biodieseis comercial (B100) nessa mesma potência. Os biodieseis (B100), tanto de cártamo quanto o comercial, apresentaram maior consumo, com acréscimos em até 19% na carga de 500W. Esse resultado foi atribuído ao menor poder calorífico dos biodieseis (ILKILIÇ et al., 2011).

4.7. Emissões de monóxido de carbono (CO)

Na avaliação dos gases emitidos pelos diferentes percentuais de biodiesel e cargas solicitadas no grupo gerador, observou-se que as emissões de monóxido de carbono diminuíram com a elevação da concentração de biodiesel. A redução na emissão do biodiesel de cártamo (B100), comparando-se ao diesel, foi em mais de 100% na carga de 3000W.

A emissão de CO na exaustão dos gases representa a perda química de energia que não foi totalmente utilizada pela combustão, podendo atribuir a uma queima incompleta do combustível nas cargas mais altas (AKALAM, et al., 2003). Quando o biodiesel de cártamo e comercial foram utilizados no lugar do diesel comum, houve uma tendência de redução do CO pela quantidade de oxigênio na câmara de combustão (YESILYURT et al., 2020). As emissões de CO foram alteradas em razão da carga aplicada no sistema para as misturas de biodiesel de cártamo e biodiesel comercial. As emissões de CO variaram levemente para as misturas dos biodieseis de ambos nas cargas de 500, 1000 e 2000W. No entanto, o aumento da carga para 3000W, resultou na elevação das emissões de CO, principalmente para o diesel convencional (Figuras 27 e 28).

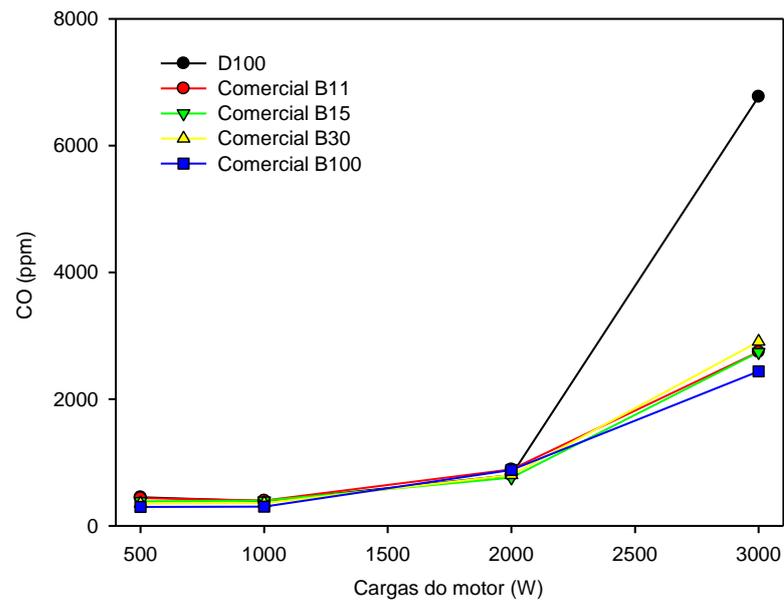


Figura 27. Resultado conforme desempenho do biodiesel comercial emissão de (CO).

As reduções nas emissões específicas de monóxido de carbono observadas nos biocombustíveis podem ser explicadas pela presença de oxigênio na molécula de biodiesel, uma vez que, na câmara de combustão, a reação desloca a queima do combustível no sentido de produzir maiores quantidades de CO_2 . Foi observada menor emissão de CO pelos biocombustíveis, quando comparada ao diesel comum (MAZIEIRO et al., 2006).

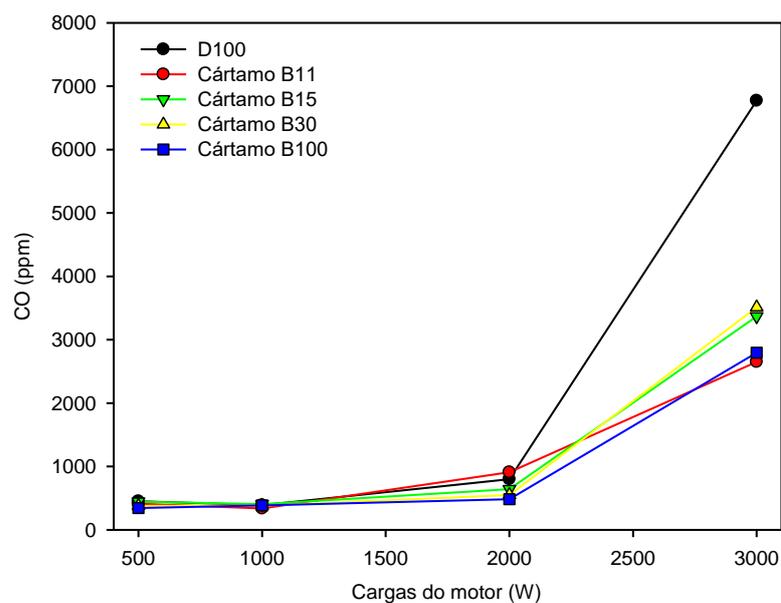
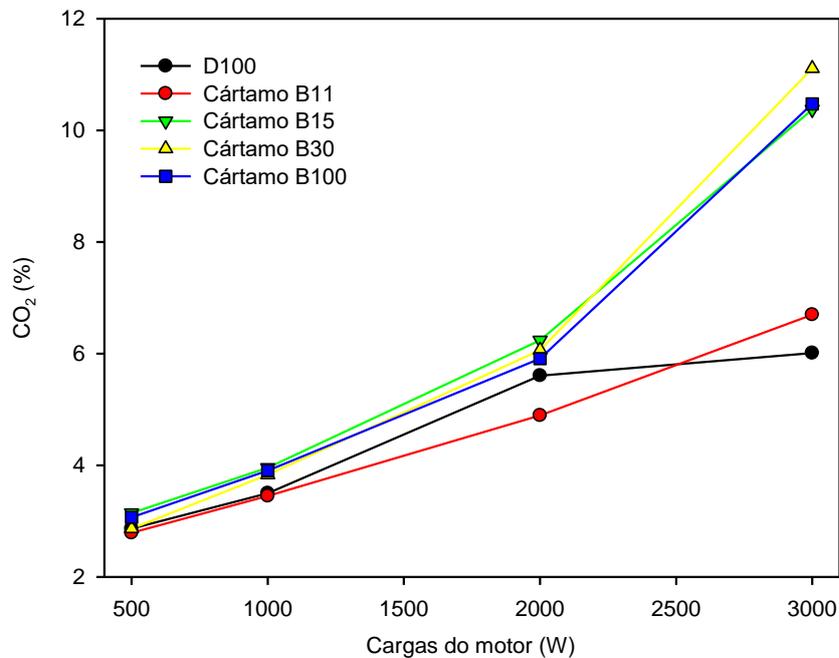


Figura 28. Resultado conforme desempenho do biodiesel de cártamo emissão de (CO).

O aumento das emissões (CO) na carga de 3000W é relativo ao maior consumo de combustível nessa carga (KUL; KAHRAMAN, 2016).

4.8. Emissões de dióxido de carbono (CO₂)

As Emissões de CO₂ são o resultado da queima de combustíveis de hidrocarbonetos, que é o sinal da combustão completa, sendo um gás que causa o aquecimento global. Com isso, o CO₂ presente nos produtos de exaustão é um parâmetro importante, uma vez que representa a combustão completa (YESILYURT et al., 2020).



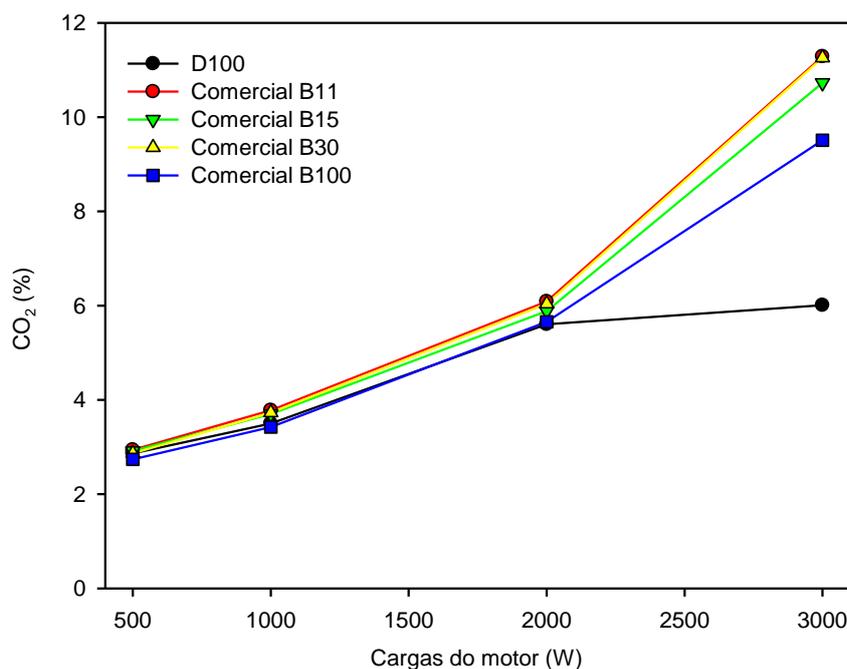


Figura 29. Desempenho do biodiesel de cártamo e comercial com a emissão do (CO_2).

A emissão de dióxido de carbono do biodiesel ou a mistura de biodiesel com diesel é maior do que no óleo diesel, com um acréscimo em até 100% quando aplicado à carga de 3000W ao gerador (Figura 29). Por exemplo, ocorreu o aumento de emissão dos valores de CO_2 decorrentes do uso de biodiesel, sendo o valor da emissão de CO_2 maior que ao combustível diesel (ORS, 2016).

4.9. Particulados de óxidos de nitrogênio combinado (NO_x)

A emissão dos particulados NO_x dos biodieseis de cártamo e comercial apresentou semelhança no comportamento conforme o aumento da carga nos combustíveis (B100), resultando em elevação das emissões; contudo, ficou reduzida a emissão do biodiesel de cártamo comparada ao diesel (D100) na carga nominal em 3000W.

Nas Figuras 30 e 31, as emissões de NO_x para o combustível Cártamo (B15) chegaram a valores acima de 160 ppm na carga nominal, valor superior ao do diesel (D100). A formação imediata de NO_x aumenta com uma razão de equivalência

crescente, em seguida, atinge um pico e diminui devido à falta de oxigênio (FERNANDO et al., 2006).

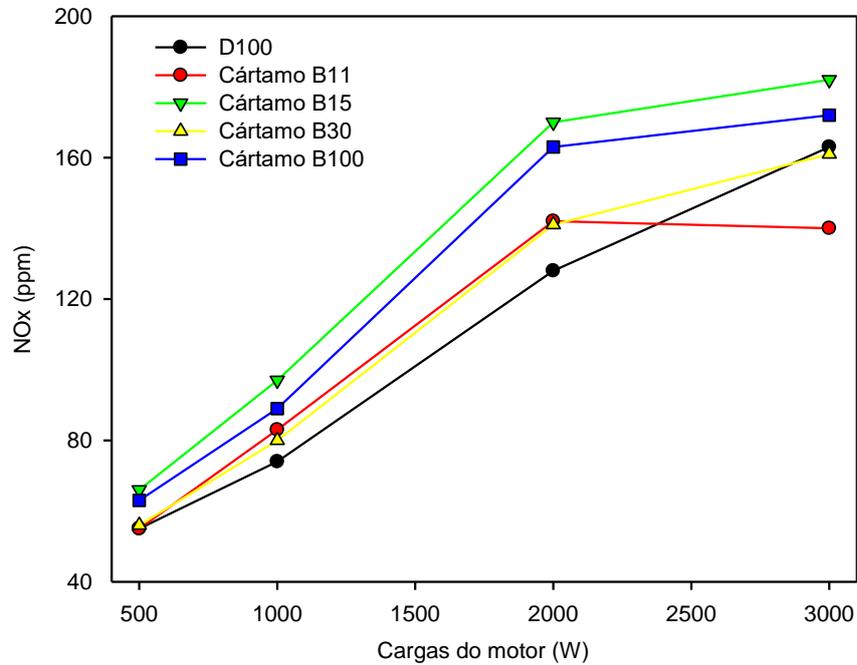


Figura 30. Desempenho do biodiesel de cártamo com a emissão do (NO_x).

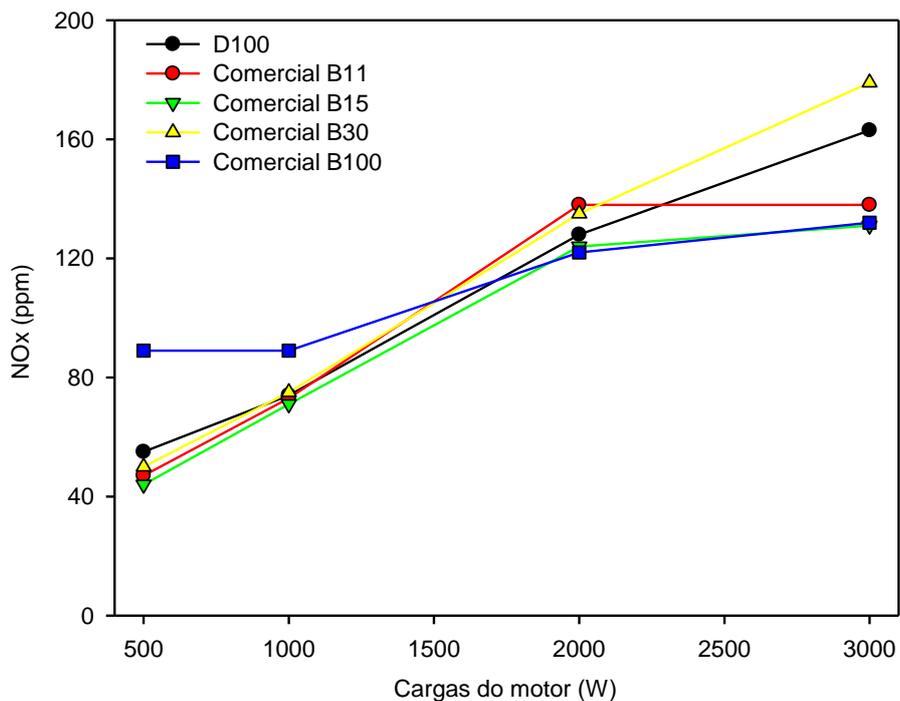


Figura 31. Desempenho do biodiesel comercial com a emissão do (NO_x). Na avaliação de um gerador alimentado por biocombustível de cártamo

(B100), houve redução de monóxido de carbono (CO), no entanto, uma maior emissão de (NO_x) (YESILYURT et al., 2020). Essas emissões aumentam quando o motor é alimentado por biocombustível, por características ao ponto de fulgor mais elevado dos biocombustíveis (PENTEADO et al., 2007).

5.0. Particulados de dióxido de enxofre (SO₂)

Com a ausência de enxofre na composição do biodiesel, os índices de emissão de dióxido de enxofre (SO₂) foram nulos. Já o diesel S10, combustível emissor de dióxido de enxofre, emite uma fumaça com 10 partes de enxofre em cada milhão de partículas (ANP, 2020). Nesse caso, apresentou valor aproximado de 2 (ppm) na carga nominal, ao passo que os demais combustíveis providos de misturas de diesel e os biodieseis de cártamo e comercial (B100) não apresentaram valores significativos nas emissões.

5.1. Comportamento da temperatura de exaustão

A temperatura de exaustão aumentou quase linearmente com o aumento da velocidade do motor para todos os combustíveis de teste. Com relação aos valores mais altos de temperatura obtidos para combustíveis de mistura de biodiesel, o mais significativo foi observado para o combustível B15 de cártamo, podendo ser atribuído à combustão mais completa para o uso do biodiesel por conta do oxigênio contido na composição (ILKILIÇ et al., 2011).

Os resultados da temperatura de exaustão dos gases, tanto para o biodiesel de cártamo quanto para o biodiesel comercial, apresentaram uma elevação gradativa na carga de 3000W, representando um aumento de até 100% na temperatura de exaustão (Figura 32).

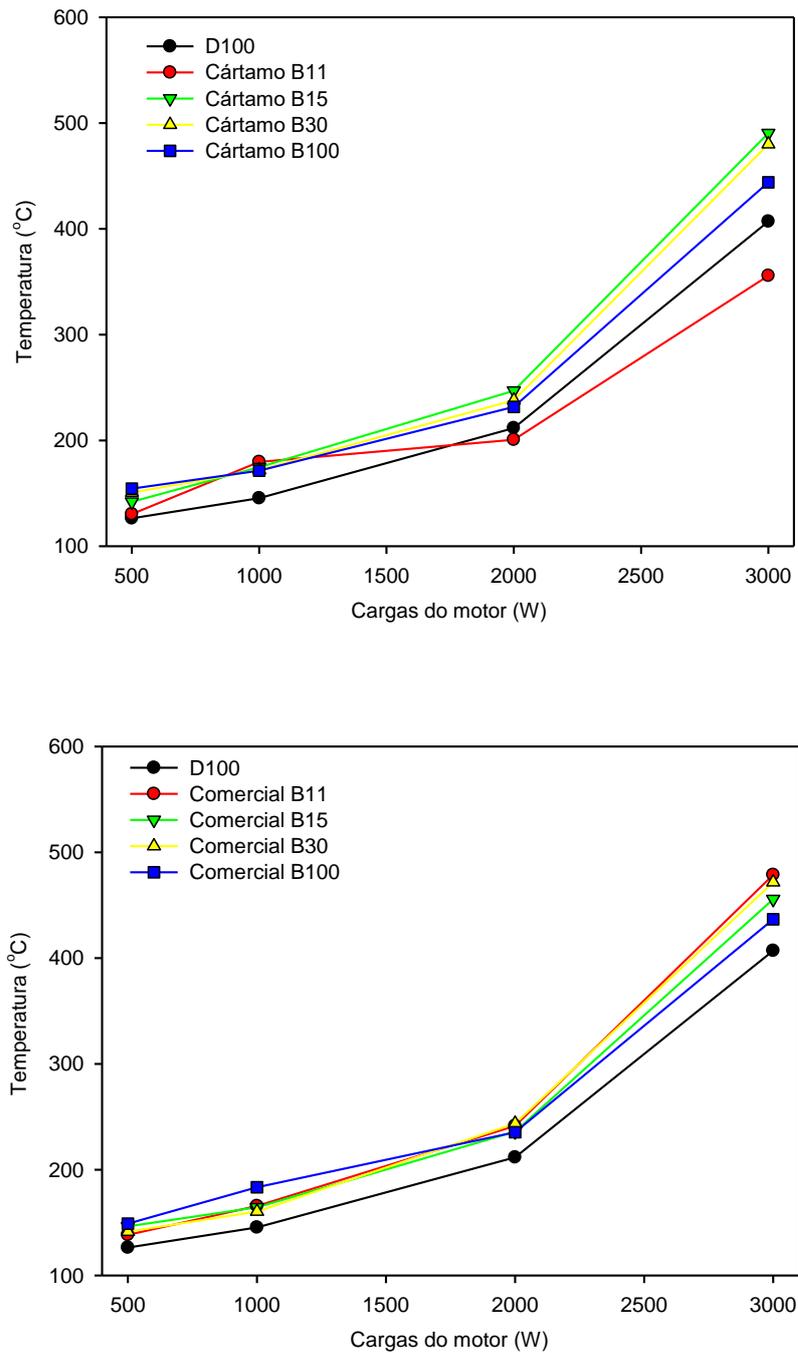


Figura 32. Temperatura de exaustão dos gases proveniente ao biodiesel de cártamo e comercial conforme cargas do motor (W).

O diesel (D100) apresentou menor temperatura de exaustão em comparação aos biodieseis, tanto nas blendas com cártamo quanto nas blendas com biodiesel comercial e biodieseis (B100). Apenas a blenda com biodiesel de cártamo 11% apresentou valores reduzidos nas cargas de 2.000 e 3.000W, contrastando-se ao diesel (ANH, 2018).

6. CONCLUSÕES

1. Houve aumento no consumo de combustível em decorrência do aumento da concentração de biodiesel na mistura e da carga aplicada no sistema.

2. As emissões do óxido de nitrogênio (NOx) apresentaram maiores valores quando utilizado o biodiesel na mistura. Comportamentos diferentes foram observados com as emissões dos gases CO, e CO₂, sendo maiores quando utilizado o diesel (D100) em relação aos outros combustíveis avaliados.

3. As emissões de SO₂ foram anuladas quando utilizadas concentrações de 100% de biodiesel.

4. Verificou-se que, com o aumento da concentração de biodiesel na mistura, ocorreu aumento na temperatura de exaustão.

Os resultados apresentados revelam que o biodiesel de cártamo B100 tem melhor desempenho tanto nos aspectos da potência elétrica gerada quanto no consumo específico e na densidade, apresentando, inclusive, menor temperatura de exaustão no B11 em comparação ao biodiesel comercial.

Já para os resultados de consumo específico, houve uma alteração na carga de 3000W, sendo que todos os combustíveis tiveram o acréscimo, logo, o consumo não foi homogêneo.

Os valores de SO₂ e CO foram reduzidos com a utilização dos biodieseis. Assim, as reduções nas emissões ocorreram com o aumento do percentual de biodiesel na mistura.

Esses dados indicam que a utilização de blends de biocombustíveis, diesel/biodiesel de cártamo e diesel/biodiesel comercial, em diversas composições é uma opção para a substituição parcial do diesel fóssil na geração de energia elétrica. Também o percentual de biodiesel comercial em 15% adicionado ao diesel, que será comercializado nos postos de combustível nos próximos anos, apresentaram valores similares em relação às variáveis, em comparação aos 11%, percentual que foi utilizado até o ano de 2019.

A diminuição das emissões de dióxido de carbono pode ser aceita como o passo mais significativo na luta contra o aquecimento global. No entanto, é muito difícil dizer que os biodieseis de cártamo e comercial alcançaram isso. Como indicado na Figura 29, o combustível biodiesel, ou combustível biodiesel-diesel, aumenta as emissões de dióxido de carbono, mas as emissões de CO₂ geradas pelo

uso de biodiesel e liberado na atmosfera estão envolvidas no ciclo de fotossíntese das oleaginosas utilizadas na produção de biodiesel.

Com relação ao poder calorífico encontrado do biodiesel de cártamo, esse foi de 39630 kJ.kg⁻¹, e do biodiesel B100 comercial 39580 kJ.kg⁻¹, nas blends de B11, B15 e B30, com valores menores em 2% ao diesel comercial.

A utilização de um motor gerador ciclo diesel com o objetivo de geração de eletricidade possibilitou resultados técnicos eficientes, tanto com o uso de diesel/biodiesel de cártamo e de diesel/biodiesel comercial. É possível afirmar com o uso dos biodieseis que o motor gerador apresentou uma leve vantagem para os resultados com o biodiesel de cártamo. Assim, a sua capacidade de geração de eletricidade, consumo específico e as emissões foram vantajosos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANH, T. H. **Waste heat recovery from diesel engines based on organic rankine cycle**. Applied Energy, v. 231, P.138–166, 2018.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

Biocombustíveis. Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/?pg=33972&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1298634452218>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3046/1: – **Motores de Combustão Interna Alternativos** – Desempenho – Parte 1: Condições, Padrão de Referência e Declarações de Potência e de Consumos de Combustível e Óleo Lubrificante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 15-16 p.

ATABANI, A. E. et al. **A comparative evaluation of physical and chemical properties of biodiesel synthesized from edible and non-edible oils and study on the effect of biodiesel blending**. Energy v. 58, p. 296–304, 2013.

AYDIN, H., BAYINDIR, H. **Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine**, Renewable Energy 35 (2010) 588–592.

DHAR, A.; AGARWAL, A. K. **Effect of Karanja biodiesel blend on engine wear in a diesel engine**, Science direct, Article, Fuel Elsevier v. 134, p. 81-89, 2014.

BARBOSA, R. L. et al. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel**. Revista Ciência e Agrotecnologia, v.32, p.1588-1593, 2008.

BONOMETO, R. P. **Análise energética do processo experimental de produção de biodiesel a partir de óleo de frango**. Botucatu: UNESP, 2009. 45p. Dissertação Mestrado.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Ministério de Minas e Energia (Org.). **Balanco energético nacional**. Rio de Janeiro, 2016. 60-62 p.

BRASIL. Lei 11.097, de 13 de Janeiro de 2005. **Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira**; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20042006/2005/lei/l11097.htm>. Acesso em: 17 nov. 2019.

BRASIL. Lei 13.263, de 23 de Março de 2016. **Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/L13263.htm>. Acesso em: 17 nov. 2019.

BRIZI, F. et al. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas**. Renewable

and Sustainable. Energy Reviews, v. 38, p. 193-211, 2014.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas.** 5. ed. Nova Iorque: Mcgraw-hill, p. 697-698, 2013.

CORREA, I. M. et al. **Desempenho de Motor Diesel com Misturas de Biodiesel de Óleo de Girassol.** Revista Ciência e Agrotecnologia, v.32, p.923-928, 2008.

EIRICH, J. et. al. **Development of a dimethyl ether (DME)-fueled shuttle bus.** SAE transactions. p. 348-360, 2013.

EMONGOR, V. **Safflower the Underutilized and Neglected Crop: A Review,** Asian Journal of Plant Sciences, 2010.

FERNANDO, S.; HALL, C.; JHA, S. **NOx reduction from biodiesel fuels.** Energy Fuels, v. 20, p. 376-382, 2006.

FITZGERALD; KINGSLEY; STEPHEN D.U. **Máquinas elétricas – Bookman.** 7ª ed. p. 194-195, 2014.

GALAVI, M.; ROMROUDI, M.; TAVASSOLI, A. **Effect of micronutrientes foliar application on yield and seed oil content of safflower (Carthamus tinctorius).** Agric Res. v. 7, p. 482- 6, 2012.

GUERRA, E. P.; FUCHS, W. Biocombustível renovável: **Uso de óleo vegetal em motores.** Revista Acadêmica, Curitiba, v. 8, n. 1, p.103-112, jan. 2010. Trimestral.

GOMES, L. F. S.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A. **Biodiesel produzido com óleo de frango.** Revista Acta Scientiarum Technology, v.30, p.57-62, 2008

GONZALEZ, W. A. et al. **Biodiesel e óleo vegetal in natura.** Ministério de Minas e Energia, 22ª ed. p. 146, 2008.

HIRSCH, J. E. **Do superconductors violate Lenz's law? Body rotation under field cooling and theoretical implications.** Article Physics Letters A, v. 366, p. 615-619, 2007.

ILKILIÇ, C., et al. **Biodiesel from safflower oil and its application in a diesel engine.** Fuel processing technology, p.92, 356-362, 2011.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos,** 1. ed. digital, São Paulo: IMESP, 2008. p. 600, 601. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/nutricao/bromatologia/files/2013/07/NormasADOLFOLUTZ.pdf> Acesso em 21 junho 2020, 16:20.

KALAM, M. A.; HUSNAWAN, M.; MASJUKI. H. **Exhaust emission and combustion evaluation of coconut oil-powered indirect injection diesel engine.** Renewable Energy, v.28, p. 2405-2415, 2003.

KNOTHE, G. et al. **Manual do biodiesel.** São Paulo: Editora Blucher, p. 320-325

2011.

KULKARMI, M. G.; DALAI, A. K. **Waste cooking oil – an economical source for biodiesel: a review**. Industrial & Engineering Chemistry Research, v.45, p.2901-2913, 2006.

KUL, BS.; KAHRAMAN, A. **Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with biodiesel-diesel blends containing 5% bioethanol**. Entropy, v.18, p. 387, 2016.

KUMAR, M. V.; BABU, A. V. and KUMAR, P. R. **The impacts on combustion, performance and emissions of biodiesel by using additives in direct injection diesel engine**. Alexandria Engineering Journal v. 57 p: 509–16, 2016.

LAPUERTA, M. et al. **Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol-diesel blends**. Energy and Fuels, v. 24, n. 8, p. 4497–4502, 2010.

LEUNG, D. Y. C.; GUO, Y. **Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production**. Fuel Processing Technology, v. 87, p. 883-890, 2006.

LUBBE, A.; VERPOORTE, R. **Cultivation of medicinal and aromatic plants for specialty industrial materials**. Crops and Products, v. 34, p. 785 - 801, 2011.

MAZIEIRO, J. V. G. et al. **Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol**, R. Bras. Agrobiologia, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 249-255, abr-jun, 2007.

MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI S, M. R.; BRITO, Y. C. Rev. Virtual Quim. **A Reação de Transesterificação, Algumas Aplicações e Obtenção de Biodiesel** p.63-73. Rev. Virtual Quim, 2013.

MERT, G.; ATILLA B. **Measurements and empirical correlations in predicting biodiesel-diesel blends viscosity and density**, Department of Mechanical Engineering Karadeniz Technical University, Turkey, 2017.

MORAN, MICHAEL J. et al. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc. p. 947, 2014.

M. ZERRAKKI, IŞIK. **Comparative experimental investigation on the effects of heavy alcohols- safflower biodiesel blends on combustion, performance and emissions in a power generator diesel engine**, Journal, Applied Thermal Engineering, 2020.

MURUGESAN, A.; SUBRAMANIAM, D.; AVINASH, A. **Heating value of biodiesel: An empirical and theoretical exploration**. Energy Source, Part A, v.38, p. 1293 - 1298, 2016.

MYDEEN, M. A. et al. **Self - Circulating Biogas Generation for Swine Waste**. Environmental Sciences, v. 35, p. 790-800, 2016.

OGUZ, H; DUZCUKOGLU, H; EKINCI, S. **The investigation of lubrication properties performance of euro-diesel and biodiesel.** Tribology, p. 449–56, 2011.

ORS, I., B., V. **An experimental and ANNs study of the effects of safflower oil biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine.** Int J Adv Eng Technol p.125–35, 2016.

ÖZER, S. **The effect of adding toluene to increase the combustion efficiency of biodiesel,** Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/ueso20>, Energy Sources, p. 2-15, 2020.

PATEL, C.; TIWARI, N.; AGARWAL, A. K. **Experimental investigations of Soyabean and Rapeseed SVO and biodiesels on engine noise, vibrations, and engine characteristics.** Fuel p.86-97, 2019.

RABELO, I. D.; HATAKEYAMA, K.; CRUZ, C. M. G. **Estudo de desempenho de combustíveis convencionais associados a biodiesel obtido pela transesterificação de óleo usado em fritura.** Artigo, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia do CEFET, Curitiba, 2001.

RIVAS, J.; MATARAZZO, R. **Producción de cartamo: consideraciones generales. Boletín de Divulgación.** Boletim de divulgação agrônômica, Buenos Aires. v.20, p.12, 2009.

SABZALIAN, M. R; SAEIDI, G.; MIRLOHI, A. **Oil content and fatty acid composition in seeds of three safflower species.** Oil Chem, v. 85, p.717- 21, 2008.

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, 2015.

SARTO, M.V.M. et al. **Safflower root and shoot growth affected by soil compaction,** Bragantia, v.77, n.2, p.348-355, 2018.

SCHLOSSERL, J. F.; MACHADOLL P. R. M.; CAMARGO M. N. **Ciência Rural, Desempenho de misturas pré-aquecidas de óleo de soja cru e diesel como combustível para motores agrícolas.** Santa Maria, v.37, n.5, p.1329-1335, set-out, 2007 ISSN 0103-8478.

SANTOS, R. F.; BASSEGIO, D. **Cártamo alternativa de cultivo para o Brasil.** Edunioeste, 167 p. 2018.

SECCO, D.; FERREIRA S. R.; ROSA A. H. et al. **Rentabilidade e propriedades físico-químicas do biodiesel de cinco espécies vegetais,** Cultivando o saber, Cascavel, v.5, n.3, p.22-32, 2012.

SILVA, F. N.; PRATA, A.S.; TEIXEIRA, J.R. **Technical feasibility assessment of oleic sunflower methyl ester utilization in diesel bus engine,** Energy Conversion & Management, v.44, p.2347-2365, 2003.

TANZER, E.; MURAT K. Y. **Influence of blending ratio on the physicochemical properties of safflower oil methyl ester-safflower oil, safflower oil methyl ester-diesel and safflower oil-diesel.** Departamento Biosystems Engineering, University of Bozok, Turkey. Science direct, Article, Fuel Elsevier Ltd. 2016.

USTA, N. **An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester,** Energy Conversion and Management v.46, p. 2373–2386, 2005.

YUNUS, S., et al. **An overview of palm, jatropha and algae as a potential biodiesel feedstock in Malaysia.** Article 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research ICMER, 2013.

BRANCO. **Catálogos de Produtos.** São José dos Pinhais, 2020. (catálogo comercial).

YESILYURT, M.K.; et al. **The production of biodiesel from safflower (Carthamus tinctorius L.) oil as a potencial feedstock and is usage in compression ignition engine.** Energy Reviews, p. 30, 2020.

VAN, J.G. et al. **Biodiesel Production Technology.** Report, Iowa State University, National Renewable Energy Laboratory, 2002-2004. Disponível em: <http://www.fischer-tropsch.org/DOE/DOE_reports/NREL/SR-510/SR-510-36244/SR-510-36244.pdf> Acesso em: 08 fev. 2021.

VOLPATO, C. E. S.; et al. **Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B 100).** Revista Ciência Agrotecnológica, v.33, p.1125-1130, 2009.