

Gabriel Farias Alencar

**PROPOSTA DE UM COMBUSTÍVEL AERONÁUTICO SUSTENTÁVEL
VISANDO A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR**

Bauru – SP

2025

Gabriel Farias Alencar

**PROPOSTA DE UM COMBUSTÍVEL AERONÁUTICO SUSTENTÁVEL
VISANDO A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração Projeto Mecânico, da Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Délson Luiz Módolo
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Turra de Ávila

Bauru – SP

2025

Alencar, Gabriel Farias.

Proposta de um combustível aeronáutico sustentável
visando a descarbonização do setor / Gabriel Farias
Alencar. - Bauru, 2025

78 f. : il.

Dissertação (Mestrado - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Délson Luiz Módolo

Coorientador: Márcio Turra de Ávila

1. Combustíveis sustentáveis de aviação. 2.
Biodiesel. 3. Acetona-butanol-etanol. 4. Combustão. 5.
Emissões de gases I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GABRIEL FARIAS ALENCAR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de setembro do ano de 2025, às 9h, no(a) Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GABRIEL FARIAS ALENCAR, intitulada **PROPOSTA DE UM COMBUSTÍVEL AERONÁUTICO SUSTENTÁVEL VISANDO A DESCARBONIZAÇÃO DO SETOR**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. DELSON LUIZ MODOLO (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Pror. Dr. MARCELO VALENTE FEITOSA (Participação Presencial) do(a) Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. DELSON LUIZ MODOLO



*Dedico à minha esposa Iramaia, fonte de
inspiração nessa jornada, aos meus pais e à
minha irmã pelo apoio constante. E à Nina, por
todo carinho e lealdade.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Délson Luiz Módolo e ao meu coorientador, Prof. Dr. Márcio Turra de Ávila, pela confiança depositada em mim, pela paciência e generosidade com que me guiaram, pelo incentivo e apoio constantes e pela orientação precisa e competente ao longo desta jornada.

Agradeço aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FEB pela amizade sincera, pelo apoio mútuo e pela troca de conhecimentos e experiências. Agradeço aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pela acolhida cordial e pela infraestrutura de qualidade disponibilizada. Agradeço também ao técnico do laboratório LAMOBIO, Luiz Eduardo Rodrigues Pereira, pela ajuda no desenvolvimento dos experimentos, troca de conhecimentos e tempo disponibilizado.

Por fim, agradeço à minha família pelo apoio constante durante o curso desta fase da minha vida, em especial, à minha mulher, Iramaia Salomão, também pesquisadora e minha fonte de inspiração e admiração.

Ressalto que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“A terra ensina-nos mais acerca de nós próprios
do que todos os livros. Porque ela nos resiste.”*

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade dentro do setor aeronáutico tem sido crescente devido a aspectos ambientais e econômicos importantes. Pesquisas constataram que a queima de combustíveis fósseis em aeronaves tem contribuído com aproximadamente 5% das emissões globais de gases de efeito estufa. CO₂, NO_x, aerossóis de sulfeto, compostos e partículas estão presentes e, por sua vez, favorecem o aquecimento global. Diante deste cenário, a busca por combustíveis sustentáveis de aviação derivados de biomassa, que possam reduzir o uso dos combustíveis fósseis ou mesmo substituí-los, apresenta-se como uma alternativa econômica viável. Este trabalho visa analisar os efeitos de uma mistura de biodiesel de óleo vegetal de soja, associado a solventes da fermentação ABE e éter dietílico em conjunto com o combustível de aviação convencional (Jet A-1). Para os ensaios, foi utilizado um motor monocilíndrico de ignição por compressão, com concentrações volumétricas de 10, 20, 30, 40 e 50% de biocombustível. Após a coleta de dados foram obtidos diagramas com curvas de pressão, taxa de liberação de calor, integral da taxa de liberação de calor e atraso de ignição, assim como dados referentes ao consumo específico e às emissões de O₂, CO₂, CO, HC e NO_x. Estes dados foram interpretados e comparados em relação ao Jet A-1 e entre si. Foi observado que o aumento da concentração de biocombustíveis, em especial da fração de ABE presente incidiu sobre o número de cetano da mistura, reduzindo seu valor e influenciando no aumento do atraso de ignição. Um forte efeito sobre o processo de combustão foi observado a partir de decréscimos nos valores máximos de pressão, maiores valores de consumo específico, aumento nas emissões de CO₂, CO, HC e diminuição no nível de NO_x para aumentos na fração de ABE, como consequência da diminuição do número de cetano e o consequente início de combustão tardio. Dentre as concentrações, a mistura com teor de 10% em biocombustíveis obteve resultados semelhantes ao Jet A-1, evidenciando seu potencial para estudos futuros.

Palavras-Chave: Combustíveis sustentáveis de aviação; Biodiesel; Acetona-butanol-etanol; Combustão; Emissões de gases.

ABSTRACT

The concern for sustainability within the aviation sector has been growing due to significant environmental and economic factors. Research has found that the burning of fossil fuels in aircraft contributes to approximately 5% of global greenhouse gas emissions. CO₂, NO_x, sulfide aerosols, compounds and particles are present and, in turn, contribute to global warming. In this scenario, the search for sustainable aviation fuels derived from biomass that can reduce the use of fossil fuels or even replace them presents itself as an economically viable alternative. This study aims to analyze the effects of a blend of biodiesel from soybean vegetable oil, associated with solvents from ABE fermentation and diethyl ether, along with conventional aviation fuel (Jet A-1). For the tests, a single-cylinder compression ignition engine was used, with volumetric concentrations of 10, 20, 30, 40, and 50% of biofuel. After data collection, diagrams were obtained with in cylinder pressure curves, heat release rate, cumulative heat release of burned fuel, and ignition delay, as well as data related to specific fuel consumption and emissions of O₂, CO₂, CO, HC, NO_x. These data were interpreted and compared with Jet A-1 and among themselves. It was observed that the increase in biofuel concentration, especially the fraction of ABE present, affected the cetane number of the blends, reducing its value and influencing an increase in ignition delay. A strong effect on the combustion process was observed from decreases in maximum in cylinder pressure values, higher specific fuel consumption values, increased emissions of CO₂, CO, HC, and a decrease in NO_x levels for increases in the ABE fraction, as a consequence of the reduction in the cetane number and the consequent increase in the ignition delay. Among the concentrations, the mixture with a 10% biofuel content achieved results similar to Jet A-1, highlighting its potential for future studies.

Keywords: Sustainable Aviation Fuel; Biodiesel; Acetone-butanol-ethanol; Combustion; Gas Emissions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	A AVIAÇÃO E A QUESTÃO CLIMÁTICA	13
2.2	CENÁRIO ATUAL DOS COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO	15
2.2.1	Querosene Fóssil	15
2.2.2	Biocombustíveis	18
2.3	UMA NOVA PROPOSTA DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO	23
2.3.1	Biodiesel como Combustível de Aviação Sustentável	23
2.3.1.1	<i>Processo de Produção do Biodiesel</i>	<i>26</i>
2.3.2	Mistura ABE (Acetona-Butanol-Etanol)	30
2.3.3	Éter Dietílico como Aditivo Redutor de Ponto de Congelamento	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	35
3.2	BANCADA DE TESTES	36
3.2.1	Grupo Gerador Monocilíndrico de Ciclo Diesel (GGD)	36
3.2.2	Pressão na Câmara de Combustão	38
3.2.3	Temperatura de Funcionamento	38
3.2.4	Emissão de Gases	39
3.2.5	Consumo Específico de Combustível	40
3.2.6	Bancada Resistiva	40
3.3	ENSAIOS	41
3.3.1	Procedimento experimental	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	ATRASO DE IGNIÇÃO DO COMBUSTÍVEL	44

4.2	PRESSÃO NO INTERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO	48
4.3	TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR.....	52
4.4	INTEGRAL DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR.....	55
4.5	CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL.....	58
4.6	EMISSÕES DE GASES.....	60
4.6.1	Emissões de O ₂	61
4.6.2	Emissões de CO ₂	62
4.6.3	Emissões de CO	63
4.6.4	Emissões de HC	64
4.6.5	Emissões de NO _x	65
5	CONCLUSÃO	67
6	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO.....	79

1 INTRODUÇÃO

Prevê-se que a indústria global de aviação continue a crescer nos próximos anos, graças ao papel fundamental do transporte aéreo na sociedade moderna. Segundo a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), em 2016 foram transportados 3,8 bilhões de passageiros e 53,9 milhões de toneladas métricas de mercadorias, com um valor total de quase US\$ 5,5 trilhões. A aviação comercial criou cerca de 67,7 milhões de empregos e contribuiu com US\$ 3,0 trilhões para a economia global no mesmo ano. As projeções indicam que, até 2034, a aviação comercial poderá criar 90 milhões de empregos e gerar atividades econômicas no valor de quase US\$ 6 trilhões anualmente, em comparação com os US\$ 3 trilhões de 2016 (IATA, 2017).

Apesar de todo esse desenvolvimento, há uma ligação direta entre a indústria da aviação e as mudanças climáticas (LEE et al., 2009). Foi observado que a queima de combustíveis fósseis de aeronaves contribui com cerca de 5% das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE) oriundas de atividades humanas (GREWE et al., 2021). Sobre este tema, uma maior conscientização quanto às emissões de GEE e às mudanças climáticas vem se desenrolando internacionalmente, e como uma das iniciativas para contornar este cenário, a IATA propôs a meta de reduzir as emissões de CO₂ em 50% até 2050, em relação ao nível de 2005 (YANG et al., 2019).

Frente ao relativo crescimento do setor, aliado às preocupações com o impacto ambiental e a insegurança para com a diminuição das reservas naturais de combustíveis fósseis, o desenvolvimento de pesquisas com foco em novas tecnologias e no uso potencial de combustíveis alternativos para aviação tornou-se crescente (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011). Nos últimos anos, foi dada atenção à substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis derivados de biomassa, bem como à investigação de novas rotas para a produção destes para aviação (WANG et al., 2019). Mas mesmo diante desses esforços, o consumo de biocombustíveis neste setor, em relação ao consumo de combustíveis fósseis, ainda representa uma pequena parcela do mercado global de combustíveis (PRUSSI; O'CONNELL; LONZA, 2019).

O biodiesel é um biocombustível com potencial para a aviação produzido principalmente a partir de óleos vegetais por meio do processo de transesterificação utilizando metanol (ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018). Ele apresenta um balanço de CO₂ neutro (ou quase neutro) em sua queima, possui alto ponto de fulgor, é não inflamável, não explosivo, biodegradável, tem nenhuma ou pouca quantidade de enxofre, ou compostos aromáticos (SIA

et al., 2020). No entanto, existem limitações que dificultam seu uso, como baixa estabilidade oxidativa, maior viscosidade, maior ponto de congelamento e menor densidade de energia quando comparado aos combustíveis convencionais de aviação como o Jet A-1 (ROCHELLE; NAJAFI, 2019). Diante disso, melhorar as propriedades do biodiesel de modo a estar conforme os padrões de aviação se faz necessário, uma vez que a segurança operacional é um ponto crítico a ser considerado (TALERO et al., 2020). Observa-se na literatura a ausência de estudos que busquem avaliar o desempenho de misturas contendo biodiesel em sua composição como um combustível para a aviação.

Embora muitas pesquisas sobre a utilização de combustíveis alternativos para a aviação tenham sido feitas, existem poucos artigos sobre o uso do biodiesel em turbinas a gás, em contrapartida à aplicação tradicional em motores de combustão interna. Um número também pequeno de trabalhos sobre misturas biodiesel/Jet A-1, acetona-butanol-etanol (ABE)/Jet A-1 ou éter dietílico/Jet A-1 foi relatado. Portanto, este trabalho visa fornecer uma análise sobre as características de combustão e taxas de emissões de gases para um biocombustível líquido desenvolvido a partir de biodiesel de óleo de soja, associado a solventes oriundos da fermentação ABE e ao aditivo éter dietílico, juntamente com o combustível tradicional de aviação, Jet A-1. Entende-se que este estudo acrescentaria uma nova contribuição ao corpo de conhecimento científico existente em matéria de biocombustíveis de baixa emissão de carbono para aviação, conhecidos na literatura como SAF (*Sustainable Aviation Fuel*).

O presente estudo está organizado da seguinte forma: Na seção Referencial Teórico, é disponibilizada uma contextualização pertinente à aviação, questões climáticas e ao cenário atual dos combustíveis de aviação. Em seguida, ainda na mesma seção, é apresentada uma série de estudos realizados a respeito de cada um dos elementos que constituem o biocombustível proposto para estudo. Na seção Materiais e Métodos, são descritas a metodologia adotada e a bancada de testes instrumentalizada disposta no Laboratório de Motores e Biocombustíveis (LAMOBIO) da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP. Simultaneamente, o planejamento experimental e o processamento de dados são explicados nessa mesma seção. Na seção Resultados e Discussão, localizam-se os dados mensurados e suas interpretações para diferentes configurações de operação, levando em conta a carga de potência do motor, pressão interna na câmara de combustão e o teor de biocombustível presente na mistura. Ainda em Resultados e Discussão, argumenta-se sobre a influência do teor de biocombustível no desempenho do motor, no nível de emissões e as propriedades da mistura. Os desafios existentes e as perspectivas futuras sobre o tema são discutidos na seção Estudos Futuros. Por fim, na última seção, algumas conclusões encerram o trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A AVIAÇÃO E A QUESTÃO CLIMÁTICA

Fatores como a industrialização, o crescimento populacional mundial, a globalização e o desenvolvimento urbano contribuem significativamente para uma alta demanda de recursos naturais e energia (HAJJARI et al., 2017). Esse aumento no consumo de energia se estende, principalmente, para os combustíveis fósseis, especialmente o petróleo (BRITISH PETROLEUM, 2019). Os combustíveis líquidos à base de petróleo são amplamente usados no setor de transporte e apresentam um crescimento rápido, com uma expectativa de aumento de 1,3% ao ano até 2030 (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

Sobre este setor, a aviação representa um papel fundamental, tanto para o transporte doméstico, quanto para o internacional. Prevê-se que nas próximas duas décadas o número de passageiros em viagens internacionais continue aumentando a uma taxa média de 3,5% ao ano (IATA, 2018). Globalmente, o transporte aéreo conecta pessoas e economias e seu campo de influência estende-se a atividades importantes como turismo e importação/exportação de mercadorias (IATA, 2017). Em contrapartida, a todo esse desenvolvimento, a indústria da aviação possui ligação direta com as mudanças climáticas provocadas pelo homem (LEE et al., 2009).

O setor contribui com aproximadamente 5% das emissões antropogênicas globais de gases do efeito estufa (GEE), por meio da combustão de combustíveis fósseis em aeronaves (GREWE et al., 2021). Apenas para o dióxido de carbono (CO_2), a indústria foi responsável por cerca de 2,4% de toda a emissão global relacionada à queima de combustível em 2018 (GRAVER; ZHANG; RUTHERFORD, 2019). Além disso, a aviação também emite outros poluentes como óxido de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos não queimados (HC), monóxido de carbono (CO), material particulado e dióxido de enxofre (SO_2), que ocasionam a formação de rastros que contribuem para o aquecimento global (LEE et al., 2009; EASA; EEA; EUROCONTROL, 2019; GREWE et al., 2021; LEE et al., 2021). Ainda, as emissões provindas diretamente das aeronaves são influenciadas, sobretudo, por aspectos ligados à natureza química e propriedades do combustível, tipo de motor utilizado e carga aplicada a este (NOJOUMI; DINCER; NATERER, 2009).

A grande preocupação com a questão climática mundial tem levado cientistas e governos a buscar soluções para limitar as emissões de GEE, visando mitigar e possibilitar a adaptação do mundo frente às mudanças climáticas (IPCC, 2014). Nesse sentido, políticas

globais vêm sendo desenvolvidas para lidar com o impacto ambiental do transporte aéreo. Acordos internacionais acontecem desde o Protocolo de Quioto, que possibilitou a construção de um mercado mundial entre os países da aliança (SOUZA et al., 2010). Desde então, criou-se uma rede de compensação de carbono que, apesar de envolver muitas nações, ainda pode ser considerada pequena diante do seu potencial (IPCC, 2018). As explicações para isso podem estar relacionadas com discordâncias políticas acerca da instabilidade, além da regulação, transparência e eficiência do mercado, o que intimida os investidores (GRIESINGER, 2010; TIETENBERG, 2010; SOUZA; CORAZZA, 2017).

Nessa temática, o Acordo de Paris, de 2015, avançou nessa questão. Esse acordo, formulado para fortalecer a resposta mundial acerca da ameaça climática, favorece o desenvolvimento sustentável e a erradicação da pobreza, ao mesmo tempo que visa manter o aumento da temperatura média do planeta abaixo de 2°C, quando comparada com a temperatura média global pré-industrial. Além disso, também há um esforço para limitá-la a 1,5°C acima da temperatura média global pré-industrial. Sobretudo, o tratado pretende mitigar a emissão de GEE, alcançando um mundo de carbono zero com o pico global de GEE até o ano de 2050 (UNFCCC, 2020).

A exemplo dessas iniciativas, a *International Air Transport Association* (IATA) propôs objetivos importantes nessa direção como: melhoria na eficiência de combustível em 1,5% ao ano entre 2009 e 2020; reduzir as emissões de CO₂ da aviação pela metade até 2050 (em comparação a 2005); e alcançar um crescimento neutro em carbono a partir de 2021 (EASA; EEA; EUROCONTROL; 2019; IATA, 2022a). Além disso, em 2016, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) adotou o “*Carbon Offsetting and Reducing Scheme for International Aviation*” (CORSIA), uma estrutura regulatória cujo objetivo é estabilizar as emissões de CO₂ do setor de aviação civil internacional. Em outubro de 2022, a ICAO definiu que o valor correspondente a 85% das emissões de 2019 seria adotado como linha de base para o CORSIA entre 2024 e o fim do programa em 2035 (IATA, 2022b).

Além das iniciativas políticas, na prática, combustíveis alternativos de baixa emissão, certificação de CO₂ de novas aeronaves e aperfeiçoamentos na eficiência aerodinâmica das aeronaves e de seus sistemas de propulsão são propostas para a redução das emissões de GEE (IATA, 2022a, 2022b).

2.2 CENÁRIO ATUAL DOS COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO

2.2.1 Querosene Fóssil

Desde que foi desenvolvido, a partir do óleo de lamparina, o querosene de aviação evoluiu e mudou de acordo com critérios de segurança e proteção do abastecimento. Na década de 1940, o combustível de corte largo era amplamente utilizado por questões de disponibilidade. Porém, em decorrência da sua alta volatilidade e dos problemas de evaporação e segurança aos quais eram associados, esses combustíveis de aviação de corte largo (JP-4 e Jet B) foram substituídos, na década de 1970, por combustíveis do tipo querosene (Jet A, Jet A-1 e JP-8), os quais são utilizados até os dias atuais (GUIBET; FAURE-BIRCHEM, 1999).

Ainda sobre os combustíveis fósseis de aviação atuais, existem três tipos: os do tipo querosene, os querosenes de alto ponto de fulgor e os de corte largo. A maioria das empresas de aviação civil internacionais utiliza o tipo de querosene Jet A-1, enquanto a aviação militar utiliza alguns combustíveis próximos ao Jet A-1 (TR0 na França, AVTUR no Reino Unido e JP-8 nos Estados Unidos), que incluem diferentes aditivos (GUIBET; FAURE-BIRCHEM, 1999; EDWARDS; MAURICE, 2001; MAURICE et al., 2001). Mais especificamente, o Jet-A é o combustível usado nos Estados Unidos, ao passo que o Jet A-1 é utilizado no restante do mundo, incluindo o Brasil. Sobre eles, uma importante diferença diz respeito ao ponto de congelamento, que ocorre à temperatura de -40°C para o Jet A, e -47°C para o Jet A-1 (GUIBET; FAURE-BIRCHEM, 1999).

De todo modo, as propriedades físicas de todos os combustíveis de aviação devem atender às especificações gerais. No caso do Jet A-1, foi definido, em 1994, um padrão conhecido como Requisito de Qualidade de Combustível de Aviação para Sistemas Operados em Conjunto (AFQRJOS) (GUIBET; FAURE-BIRCHEM, 1999). Segundo esse padrão, a qualidade da combustão deve apresentar requisitos básicos relacionados à volatilidade, ponto de congelamento e viscosidade, densidade, poder calorífico, fator de luminosidade, ponto de fumaça, conteúdo aromático e estabilidade térmica (ASTM D1655) (EDWARDS; MAURICE, 2001). No que diz respeito à formação de partículas de fuligem, característica de motores turbojato, deve-se minimizar essa ocorrência, já que a fuligem pode prejudicar o motor em razão dos depósitos de carbono e da perda de calor radiante que pode gerar pontos quentes ou uma alta temperatura da parede do combustor. Além disso, a fuligem emitida pelos motores a jato afeta a química atmosférica em altitudes mais elevadas e, por último, a fuligem pode facilitar a detecção das aeronaves militares por radares. Visto que combustíveis com um teor mais alto de

aromáticos (em especial os poliaromáticos) produzem mais fuligem, o conteúdo aromático total é limitado a 22-25%, com 3% de volume de naftaleno (EDWARDS; MAURICE, 2001). As propriedades mencionadas, e outras relevantes, do combustível Jet A-1 encontram-se dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas do JET A-1 segundo a ASTM

Propriedade	Unidade	Limite	Valor de Referência
Densidade a 15 °C	kg/m ³		775–840
Viscosidade cinemática a -20 °C	mm ² / s	máx.	8
Ponto de congelamento	°C	máx.	-47
Ponto de fulgor	°C	mín.	38
Ponto de ebulição final	°C	máx.	300
Poder calorífico inferior	MJ/kg	mín.	42,8
Aromáticos	% em vol.	máx.	25
Enxofre total	% em peso	máx.	0,3
Acidez	mg KOH/g	máx.	0,015

Fonte: adaptado de ASTM D1655-21.

Especificamente sobre o querosene, trata-se de um combustível multicomponente, com comprimento de cadeia de carbono de C₈-C₁₆, e uma composição característica, composta por grupos de aromáticos, parafinas e naftenos ou cicloparafinas. As olefinas também estão presentes, em pequenas quantidades (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011).

Em relação às parafinas, 70% a 85% do combustível é composto por elas. A parafina pode estar apresentada como isoparafinas normais de cadeia linear, cadeia ramificada e cicloparafinas ou naftenos, e essa divisão depende da matéria-prima utilizada durante o refino. No caso das n- e iso-parafinas, a alta porção de hidrogênio para carbono oferece uma alta proporção de calor por peso, além de uma queima limpa. Já as cicloparafinas diminuem essa proporção de hidrogênio para carbono, o que restringe a liberação de calor por peso. Isso ajuda a reduzir o ponto de congelamento do combustível, parâmetro este vital para voos em grandes altitudes (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011).

No que se refere aos aromáticos, estes componentes estão presentes em menos de 25%. São hidrocarbonetos cíclicos insaturados que contém uma ou mais estruturas de anel com seis carbonos. Por serem carentes de hidrogênio, os aromáticos possuem um alto teor de calor por unidade de volume, porém com um menor teor de calor por unidade de massa, quando comparados com as parafinas de mesmo número de carbonos (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011).

Além das parafinas e aromáticos, os combustíveis fósseis de aviação também possuem vestígios de outros componentes. Dentre eles, estão presentes os heterátomos, hidrocarbonetos contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio, oriundos do petróleo bruto, encontrados em partes por milhão e influenciam as propriedades antioxidantes e de lubrificação do combustível (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011).

Por fim, todos os petróleos brutos conhecidos possuem enxofre em sua composição, em quantidades variáveis. Estão presentes, portanto, como mercaptanos, sulfetos, dissulfetos, tiofenos e outros compostos. A porção total de enxofre, atualmente, é limitada a 3.000 ppm, consoante as normas específicas do setor aéreo (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011).

A fórmula química média do querosene (Jet A, Jet A-1, TR0, JP8) pode ser encontrada com diferenças de uma fonte para outra, variando de $C_{10,9}H_{20,9}$ a $C_{12}H_{23}$ (GRACIA-SALCEDO; MCBRIDE; BRABBS, 1988; MARTEL, 1988; GUERET; CATHONNET, 1989; NGUYEN; YING, 1990; EDWARDS; MAURICE, 2001; DAGAUT; CATHONNET, 2006). À vista disso, assim como a maioria das misturas de hidrocarbonetos utilizadas como combustível, a composição do querosene está submetida a variações, podendo sofrer transformações em razão da instabilidade térmica (EDWARDS, 2002). A estabilidade térmica desses combustíveis pode ser melhorada com o acréscimo de aditivos. Ainda, para verificar as especificações referentes aos combustíveis do setor aéreo, vale-se do teste de estabilidade de oxidação térmica, descrito em ASTM D3241 (EDWARDS, 2003; ZABARNICK; WHITACRE, 1998).

Visto a composição dos combustíveis fósseis, é possível ressaltar problemas importantes e urgentes. Além de ser responsável pela maior parte da liberação de poluentes na atmosfera (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021; WORLD ENERGY COUNCIL, 2016), esses combustíveis também são originados de matéria-prima finita, o que pode gerar crises no setor da aviação. Com isso, torna-se essencial a adoção de medidas e estratégias no sentido de diminuir a utilização de combustíveis fósseis na aviação. Para isso, uma alternativa seria a produção de biocombustíveis.

Atualmente, os combustíveis renováveis não são usados de forma exclusiva, dependendo de uma mistura com combustíveis comerciais à base de petróleo. Segundo as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), o máximo de uso permitido para os biocombustíveis é de 50% do volume total do tanque da aeronave a depender do biocombustível utilizado, de forma que os outros 50% seja de combustível fóssil (ZSCHOCKE; SCHEUERMANN; ORTNER, 2012). Porém, o caminho para a descarbonização, com toda certeza, passa pelo aumento de sua produção e melhoria da competitividade frente aos combustíveis tradicionais.

2.2.2 Biocombustíveis

No que diz respeito às alternativas para o setor da aviação, os biocombustíveis são uma das principais opções pensadas para substituir uma parte expressiva dos combustíveis convencionais na aeronáutica (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2018). Os biocombustíveis são qualquer fonte de combustível derivada de matéria orgânica que pode incluir lenha, gordura e óleos animais, carvões, esterco animal e óleos vegetais (GUPTA; REHMAN; SARVIYA, 2010; KNOTHE; RAZON, 2017; ŽIVKOVIĆ et al., 2017; ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018; GARDY et al., 2018; REHAN et al., 2018).

Os combustíveis alternativos podem apresentar variações conforme a sua origem e processo de produção. Ainda assim, todos são produzidos por um sistema limpo e sustentável, sem emissões adicionais de CO₂ (RIDJAN; MATHIESEN; CONNOLLY, 2016). Para essa produção, os dois caminhos principais são a utilização direta do excesso de eletricidade e a conversão termoquímica da matéria-prima bruta.

No primeiro caso, os eletrocombustíveis, neutros em carbono, são sintetizados em forma gasosa ou líquida. Neste processo, é possível alcançar a neutralidade do carbono porque o CO₂ usado é capturado dos gases de exaustão ou diretamente do ar (LESTER; BRAMSTOFT; MÜNSTER, 2020). Os componentes básicos de síntese dos eletrocombustíveis são o hidrogênio (H₂) e o CO₂. Sendo assim, os alvos de produção são os gases de hidrocarbonetos sintéticos como o metano (CH₄) ou butano (C₄H₁₀), ou combustíveis de álcool na forma líquida como, por exemplo, o metanol (CH₃OH) (CRUZ et al., 2018).

Além deste caminho, o segundo, como já mencionado, trata-se da conversão termoquímica da matéria-prima bruta em combustíveis gasosos ou líquidos úteis (WANG; AUSTIN; SONG, 2019). A partir do uso de diferentes tecnologias de conversão de energia, a biomassa torna-se armazenável, programável e pode ser utilizada para atender a uma ampla gama de necessidades energéticas, convertendo diferentes materiais residuais ou matérias-primas em combustíveis alternativos valiosos ou produtos químicos. Neste caso, o maior desafio encontrado é o processo de produção do biocombustível e os custos envolvidos (WANG et al., 2019).

Em se tratando de sua composição, os combustíveis de aviação alternativos incluem biocombustíveis para jatos (combustíveis do “tipo querosene”, produzidos de biomassa), combustíveis sintéticos para jatos (combustíveis do “tipo querosene”, produzidos de gás natural e carvão), gás natural liquefeito, gás metano liquefeito de outras origens que não o gás natural, hidrogênio liquefeito, eletrocombustíveis e eletricidade (HOLMGREN, 2012). Apesar da

existência dos diferentes combustíveis citados anteriormente, muitos deles continuam em fase de estudo para que atendam aos altos padrões de qualidade e segurança exigidos para combustíveis de aviação.

Oficialmente, segundo a ASTM D7566-18, existem cinco tipos diferentes de combustíveis certificados, nomeados de querosenes parafínicos sintetizados (SPK), que podem ser misturados ao combustível tradicional de aviação. Para cada tipo de combustível são definidas composições e propriedades específicas a serem atingidas, e para cada tipo também há uma rota de produção diferente conforme a matéria-prima de origem. Esses combustíveis obtidos são também denominados bioquerosenes de aviação e eles estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos Querosenes Parafínicos Sintetizados

Tipo de Bioquerosene	Rota de Produção	% máx. de mistura	Matérias-primas
FT-SPK	Gaseificação para obtenção de gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$); Processo Fisher-Tropsch (FT) para sintetizar parafinas e olefinas, seguido de hidroprocessamento.	50%	Carvão, gás natural, biomassa e CO_2
FT-SPK/A	Além do FT-SPK, o conteúdo aromático é intencionalmente aumentado pela adição de aromáticos alquilados e de base biológica	50%	Carvão, gás natural, biomassa e CO_2
HEFA-SPK	Desoxigenação de mono/di/triglicerídeos, ácidos graxos livres e ésteres de ácidos graxos, seguido de hidroprocessamento.	50%	Oleaginosas
ATJ-SPK	Hidrólise para obtenção de açúcares fermentáveis; fermentação de açúcares para produção de isobutanol e etanol, seguida de desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento.	50%	Biomassa, CO_2
SIP-SPK	Hidrólise para obtenção de açúcares fermentáveis; fermentação de açúcares para produção de farneseno, seguida de hidroprocessamento e fracionamento.	10%	Biomassa

Fonte: adaptado de Yang et al. (2019); ANP (2020)

O uso de biocombustíveis produzidos a partir de óleos vegetais, gorduras animais e algas possui a vantagem da natureza fechada do ciclo de carbono. Ao utilizar biocombustíveis para a combustão, grande parcela do carbono emitido para o meio ambiente pode ter se originado ali. Dessa maneira, em teoria, haveria uma redução das emissões líquidas de carbono em quase 80% (BASHA; GOPAL; JEBARAJ, 2009; GUPTA; REHMAN; SARVIYA, 2010; MOFIJUR et al., 2013; KNOTHE; RAZON, 2017; ŽIVKOVIĆ et al., 2017; ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018; SAKTHIVEL et al., 2018). Além disso, a mistura de biocombustíveis de aviação com combustível de aviação convencional diminui a toxicidade da exaustão (GAWRON et al., 2020) e, ainda, eles podem ser facilmente armazenados e distribuídos onde forem necessários (WANG et al., 2019).

Outra grande vantagem destes combustíveis alternativos é que o conteúdo de energia (por peso) e outras propriedades dos biocombustíveis são altamente parecidas com as do combustível convencional, o que permite o uso em motores já existentes (STARIK et al., 2018). Para isso, eles devem ser adaptados para reproduzir o desempenho e as características físicas dos combustíveis fósseis (GUPTA; REHMAN; SARVIYA, 2010; KNOTHE; RAZON, 2017; ŽIVKOVIĆ et al., 2017; ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018; GARDY et al., 2018; REHAN et al., 2018).

Apesar dos grandes benefícios da utilização de biocombustíveis, a alternativa também apresenta alguns desafios. Um aspecto importante é o aumento das emissões de vapor de água, NO_x, CO e CO₂ que os biocombustíveis de aviação podem gerar (GASPAR; SOUSA, 2016; SCHRIPP et al., 2019). Ainda, alguns obstáculos técnicos já foram descritos como o encolhimento das vedações, que podem ocasionar o vazamento em tanques de combustível (GRAHAM et al., 2006).

O consumo de energia de uma aeronave também pode significar uma dificuldade, já que é proporcional à massa da aeronave e, por isso, a densidade de energia do combustível e o peso dos componentes do avião são fatores fundamentais (BAUEN et al., 2020). Frente a problemas como estes, um estudo sugeriu a adaptação de motores convencionais ao queimar misturas de biocombustíveis e combustíveis convencionais para jatos, já que os motores e sistemas de propulsão atuais podem não ser 100% compatíveis com os combustíveis alternativos, exigindo ajustes e até mesmo o desenvolvimento de novos sistemas de propulsão (MAIOROVA et al., 2017).

Ainda sobre as adversidades encontradas no cenário dos biocombustíveis, a biomassa, uma fonte importante e apropriada de energia renovável descarbonizada, também gera preocupações, apesar de seus benefícios (MIKULCIC et al., 2019). Nesse sentido, é

imprescindível pensar no fornecimento de biomassa sustentável e na potencial competição pela biomassa bruta entre outros setores (LU, 2018). O mesmo acontece com a energia hidrelétrica. A conversão, por meio de processos químicos que utilizam eletricidade excedente, de insumos em combustíveis sintéticos é uma solução promissora nesse cenário. Contudo, recursos como estes podem ser limitados em algumas regiões e países, de forma que seu uso desmedido pode ser insustentável (MIKULCIC et al., 2019).

Porém, talvez um dos maiores contratempos na área de biocombustíveis esteja relacionado aos seus custos de produção. Essa é uma grande preocupação, já que se trata de um dos maiores desafios para uma adoção mais ampla no setor aéreo, pois, em geral, não se consegue uma competitividade de preços com o combustível convencional para aviação (BANN et al., 2017).

O custo de produção de um biocombustível está diretamente associado à sua matéria-prima, e o valor da fonte de produção pode ser bastante variável. Algumas das melhores opções para a redução desses custos relacionados à matéria-prima compreendem a eliminação de óleo de cozinha usado e gorduras animais. Em compensação, o excesso de impurezas acabam comprometendo o menor custo da fonte com requisitos de processamento mais elaborados ou obtendo um combustível de pior qualidade (PEARLSON; WOLLERSHEIM; HILEMAN, 2013; LANE, 2017; NAYAK et al., 2017; NAYLOR; HIGGINS, 2017; ŽIVKOVIĆ et al., 2017).

Além da produção dos combustíveis sustentáveis terem um custo maior em relação ao combustível fóssil, outras questões complicam ainda mais o quadro. A diferença de preço entre o biocombustível e o combustível fóssil, no setor da aviação, é maior do que essa diferença de preço em outros setores de transportes, como o rodoviário, por exemplo. Para agravar ainda mais a situação, os combustíveis para a aviação, em geral, são isentos de impostos, o que difere dos combustíveis para estradas. Dessa forma, a introdução de combustíveis renováveis nesse setor e a competição entre combustíveis sustentáveis e fósseis se torna ainda mais penosa (CHIARAMONTI, 2019).

De todo modo, frente à necessidade urgente de ações para a preservação ambiental e à utilização de recursos naturais de maneira mais consciente e responsável, torna-se essencial o estudo e as pesquisas acerca dos biocombustíveis. É fundamental levar em consideração as vantagens e desvantagens da adoção dessas alternativas no setor aéreo a fim de desenvolver medidas resolutivas para os problemas atuais, permitindo a utilização em larga escala de combustíveis menos poluentes.

2.3 UMA NOVA PROPOSTA DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO

Diferentemente de outros setores, a aviação enfrenta desafios significativos ao considerar o uso de combustíveis alternativos. Isso, em parte, resulta das condições extremas em que a combustão deve ocorrer de forma segura e confiável, o que restringe a diversidade de potenciais combustíveis líquidos. Outro fator relevante é que para evitar problemas logísticos em aeroportos que precisam lidar com vários tipos de combustíveis, qualquer novo produto proposto precisa ser intercambiável com o combustível de aviação atual. A longa vida útil de um jato comercial também requer que qualquer combustível alternativo seja compatível com as tecnologias de motores existentes e adequado para uso em versões anteriores (BLAKEY; RYE; WILSON, 2011).

Neste contexto, o desenvolvimento de combustíveis “drop-in” tem sido foco de interesse científico para muitos estudos, assim como este. A seguir, há uma breve revisão de pesquisas sobre o uso do biodiesel, da mistura ABE e do éter dietílico em combustíveis alternativos.

2.3.1 Biodiesel como Combustível de Aviação Sustentável

Dentre os combustíveis do tipo bioquerosenes definidos pela ASTM D7566-18 como componentes de mistura para o combustível de aviação tradicional, encontra-se o querosene parafínico sintetizado de ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA-SPK). Podendo ser misturado em até 50% com o querosene fóssil, o HEFA-SPK é um derivado do biodiesel produzido por meio de tecnologias de hidroprocessamento a partir de óleos vegetais e gorduras animais (YANG et al., 2019).

Apesar de contribuir para a redução das emissões de GEE, a tecnologia de hidroprocessamento utilizada para a síntese deste biocombustível, a hidrodessoxigenação, exige que o processo ocorra a alta temperatura e alta pressão em um ambiente com alta concentração de gás hidrogênio e na presença de catalisadores de metais nobres (KIM et al., 2019). Por conseguinte, o processo de produção do HEFA-SPK dispende grande quantidade de energia e recursos, uma vez que o gás hidrogênio produzido pelo processo de reforma a vapor provém de fontes não renováveis, especialmente gás natural (JUNG et al., 2021a). Somado a isto, os catalisadores de metais nobres são materiais de alto custo no mercado. Assim, buscar por biocombustíveis de aviação mais sustentáveis que possam ser produzidos por processos mais simples e acessíveis economicamente é uma das linhas de pesquisa atuais (JUNG et al., 2021b).

Diante deste cenário, por ser um combustível com alto teor de oxigênio, emissões líquidas de carbono próximas a zero e apresentar uma densidade energética correspondente a cerca de 90% em relação aos combustíveis de aviação, a utilização do biodiesel como combustível alternativo aeronáutico tem sido objeto de discussão há alguns anos (JUNG et al., 2021b). Contudo, certas características ainda restringem o seu uso único como um combustível alternativo neste setor (MENG et al., 2021). Dentre elas:

- Níveis menores de eficiência de combustão, em relação às opções fósseis.
- Dificuldade de partida do motor em altas altitudes devido ao seu atraso de ignição ser maior do que o do combustível de aviação tradicional.
- Falha do sistema de abastecimento de combustível como consequência da cristalização do biodiesel em baixas temperaturas, resultando em obstrução de filtros e alta carga na bomba de combustível.
- Baixa estabilidade oxidativa, dificultando seu armazenamento por longos períodos.

Desse modo, alguns estudos têm sugerido que o uso parcial de biodiesel em conjunto com o querosene fóssil, bem como a adição de outros biocombustíveis e aditivos, pode levar a melhorias significativas nas características de combustão, ignição e fluxo, resultando em ganhos na eficiência do processo de combustão (BOTERO et al., 2012; YANG et al., 2019; MENG et al., 2021). A seguir, são apresentadas algumas publicações interessantes de trabalhos experimentais que investigam os efeitos do uso de biodiesel em motores turbojato sobre as características de desempenho e emissões.

Ali e Ibrahim (2017) investigaram o uso de biodiesel produzido a partir de óleos vegetais de algodão e milho em um motor Olympus E-start HP. Para isso, foram utilizadas diferentes concentrações de biodiesel (10%, 20% e 50%) e Jet A-1 e medidos os parâmetros de desempenho do motor e as emissões, comparando-os com o uso exclusivo do Jet A-1. Os resultados obtidos indicaram que a utilização de misturas de biodiesel e Jet A-1 em motores de turbojato é possível, com melhoria no desempenho do motor e significativa redução nas emissões. Foi verificado que a mistura de 50% de biodiesel apresentou aumento de 2% no empuxo estático em baixas e médias velocidades, e redução de 11% em altas rotações. Além disso, o consumo de combustível específico de empuxo para as misturas de biodiesel foi menor que o do Jet A-1 puro, e a eficiência do motor aumentou em 14% com a mistura de 50% de biodiesel de óleo de algodão. Com relação às emissões, foi observado que a concentração de O₂ aumentou com o aumento da mistura de biodiesel, com um acréscimo de 6% na mistura de

50%. As emissões de CO e HC diminuíram em 5% e 37%, respectivamente, enquanto as emissões de CO₂ e NO_x aumentaram em 11% e 27%, respectivamente. Por outro lado, as emissões de SO₂ diminuíram em 75%.

Um estudo diferente buscou avaliar o impacto do uso de misturas de biodiesel derivado de óleo de soja e combustível de aviação JP-8 nas emissões de gases e partículas de um motor turbojato T63. O experimento analisou três configurações de potência: marcha lenta, cruzeiro e decolagem. As emissões de partículas foram analisadas levando em consideração sua densidade, distribuição de tamanho e massa total. Os resultados mostraram que o uso de biodiesel tem o potencial de reduzir as emissões de fuligem do motor sem prejudicar seu desempenho. No entanto, essa redução foi observada apenas em configurações de potência mais elevadas, com concentrações relativamente altas de biodiesel. Durante as condições de cruzeiro e decolagem, uma redução de 15% na densidade de partículas foi registrada com o uso de uma mistura contendo 20% de biodiesel. Em marcha lenta, observou-se um ligeiro aumento na densidade de partículas devido à condensação do biodiesel não queimado. A maioria das emissões gasosas não foi afetada em todas as configurações de potência, e o uso de biodiesel teve um impacto mínimo na formação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (CORPORAN et al., 2005).

Um estudo realizado por Talero et al. (2019) examinou um motor turbojato J69-T-25A em escala real de 640 kW, utilizando misturas de biodiesel de óleo de palma (concentrações de 0% a 10%) e Jet A-1 em diferentes cargas. Os resultados indicaram que a força de empuxo e a temperatura dos gases de escape permaneceram inalteradas com a utilização de até 10% de biodiesel em volume, em todos os regimes de operação. No entanto, foi observado um aumento máximo de 36% no consumo de combustível e 11% na pressão de injeção durante a operação em marcha lenta, quando comparado com Jet A-1 puro. Além disso, no regime de cruzeiro (80% RPM), foi observada uma redução máxima de 25% e 58% nas emissões de CO e HC, respectivamente. Isso sugere que o motor J69 ao atuar com 10% de biodiesel apresentou uma combustão mais completa e sustentável.

Em um estudo posterior, Talero et al. (2020) relataram os resultados de testes realizados com o mesmo motor turbojato e misturas, mas desta vez com concentrações de 0% a 50% em volume de biodiesel. A substituição do querosene fóssil por biodiesel em até 50% reduziu a força de empuxo em 26,6% e aumentou o consumo de combustível em 10,8%, resultando em uma queda de eficiência de aproximadamente 76,3%. Embora tenha sido observada uma atomização deficiente, o aumento do excesso de ar de combustão, assim como no estudo anterior, diminuiu as emissões de CO e HC. Um valor ótimo de 15,8% de volume de biodiesel

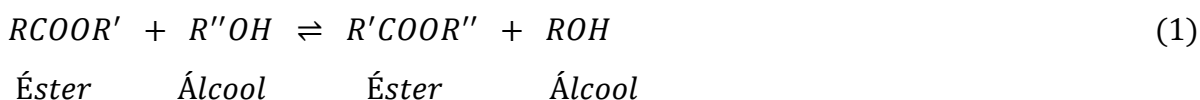
foi encontrado para evitar uma redução significativa da eficiência e do tempo de aceleração, o que levou a uma ligeira redução nas emissões de GEE e um aumento de 25% nos custos de combustível. Concentrações de biodiesel acima de 30% mostram-se prejudiciais para a ignição no processo de partida do motor e favoreceram o desenvolvimento de turbidez nos gases de escape durante o desligamento.

À vista disso, o biodiesel tem se mostrado uma alternativa promissora e sustentável como um combustível alternativo de aviação. Sua utilização pode trazer benefícios ambientais, operacionais e econômicos. No entanto, é importante serem realizados mais estudos e pesquisas para compreender suas rotas de produção e o uso desse biocombustível em aviões. Sendo assim, a próxima seção aborda o processo de produção do biodiesel, desde a escolha da matéria-prima até a obtenção do produto final.

2.3.1.1 *Processo de Produção do Biodiesel*

Atualmente, a indústria faz uso de diferentes processos químicos de conversão de biomassa para a obtenção de biocombustíveis líquidos. Como exemplo, têm-se os processos de conversão catalítica, gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação (ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018).

Na transesterificação ou processo de alcoolização, visa-se obter um éster a partir de outro éster quando este reage com um álcool, na presença de catalisadores enzimáticos, ácidos ou alcalinos. Desta reação resulta também como subproduto um novo álcool (RAMADHAS; JAYARAJ; MURALEEDHARAN, 2005). A reação química descrita pode ser observada na Equação 1:



Neste processo são utilizados como insumos lipídios e óleos ou gorduras de origem animal, ou vegetal, ricos, em sua maioria, de moléculas triglicerídeas (triésteres de glicerina), e álcool (AGARWAL; DAS, 2001). Normalmente, os álcoois metanol e etanol são mais utilizados para estes fins, entretanto, existem outros como o propanol e o butanol (MARCHETTI; MIGUEL; ERRAZU, 2007; YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011). Por meio da transesterificação, certas questões problemáticas dos óleos vegetais puros relativas à

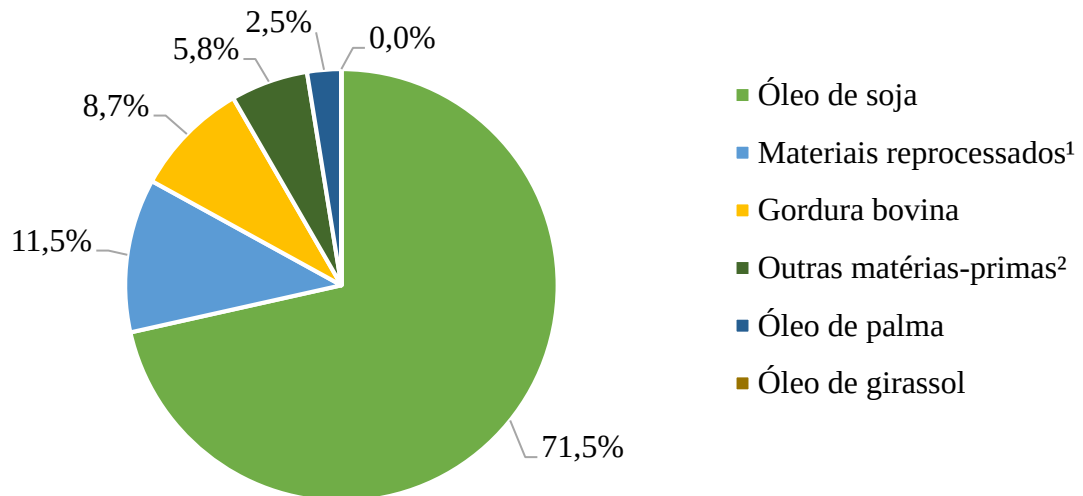
estrutura poli-insaturada, baixa volatilidade e baixa viscosidade são minimizadas (AGARWAL; DAS, 2001).

Obtido a partir da transesterificação, o biodiesel é um éster monoalquílico de ácidos graxos cujas propriedades específicas podem variar a depender de sua matéria-prima de origem (HOEKMAN et al., 2012). Para a produção deste biocombustível, plantas oleaginosas como soja, camelina, canola, mamona, coco, jatropha, palma, amendoim, colza e girassol são geralmente utilizadas. Além dos óleos vegetais, pode-se produzir biodiesel também a partir de graxa amarela (óleo vegetal usado), gorduras animais (sebo bovino, banha de porco, gordura de frango, entre outros) e por meio dos lipídios de algas marinhas, apesar de ainda existirem desafios econômicos quanto ao cultivo, colheita eficiente de biomassa e extração de óleo (GUO; SONG; BUHAIN, 2015).

Conforme o *Observatory of Economic Complexity* (OEC), em 2022, os principais exportadores internacionais de soja foram Paraguai (US\$ 1,23 bilhões), Canadá (US\$ 2,68 bilhão), Argentina (US\$ 3,25 bilhões), Estados Unidos (US\$ 34,6 bilhões) e, em primeira posição no ranking totalizando US\$ 47,2 bilhões, Brasil. Neste mesmo ano, a soja foi considerada o 26º produto mais comercializado no mundo, rendendo US\$ 93,8 bilhões; deste valor, 50,3% correspondiam às exportações brasileiras (OEC, 2022). Dados também divulgados pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) demonstraram que, na safra de 2022/2023, o comércio de soja representou 15,7% das exportações totais do país, sendo o produto mais exportado de 2023 (MDIC, 2023).

Nesse sentido, a soja, principal cultura agrícola brasileira, apresenta grande relevância também no cenário de biocombustíveis no país. Conforme a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), dos 6,4 Mm³ de biodiesel produzidos somente no ano de 2020, 71,5% teve sua origem a partir do óleo de soja (Figura 1). Desse modo, a soja e o óleo de soja em si configuram-se como matérias-primas relevantes para a matriz energética nacional de combustíveis renováveis.

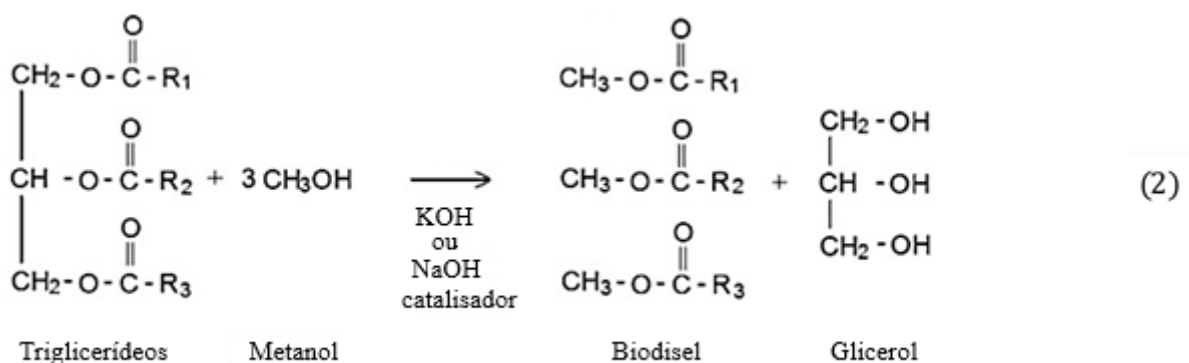
Figura 1 - Percentual volumétrico de biodiesel produzido no Brasil em 2020



Fonte: ANP (2023).

Nota: ¹ O termo contempla misturas de matérias-primas de subprodutos gerados na produção do biodiesel para reprocessamento. ² Fazem parte: gordura de frango e porco; óleo de algodão, colza/canola, milho e palmiste.

Entre os combustíveis líquidos estudados para utilização em motores sem modificações, chegou-se à conclusão de que os ésteres metílicos de ácidos graxos ou biodiesel produzidos por meio do processo de transesterificação envolvendo metanol são os mais viáveis. Esta opção se assemelha muito ao diesel fóssil em características físicas (KOHSE-HÖINGHAUS et al., 2010; KURJI et al., 2016; MAHMUDUL et al., 2017; ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018). Na Equação 2, correspondente à reação química mencionada, são utilizados como catalisadores agentes alcalinos, hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) (RAMADHAS; JAYARAJ; MURALEEDHARAN, 2005):

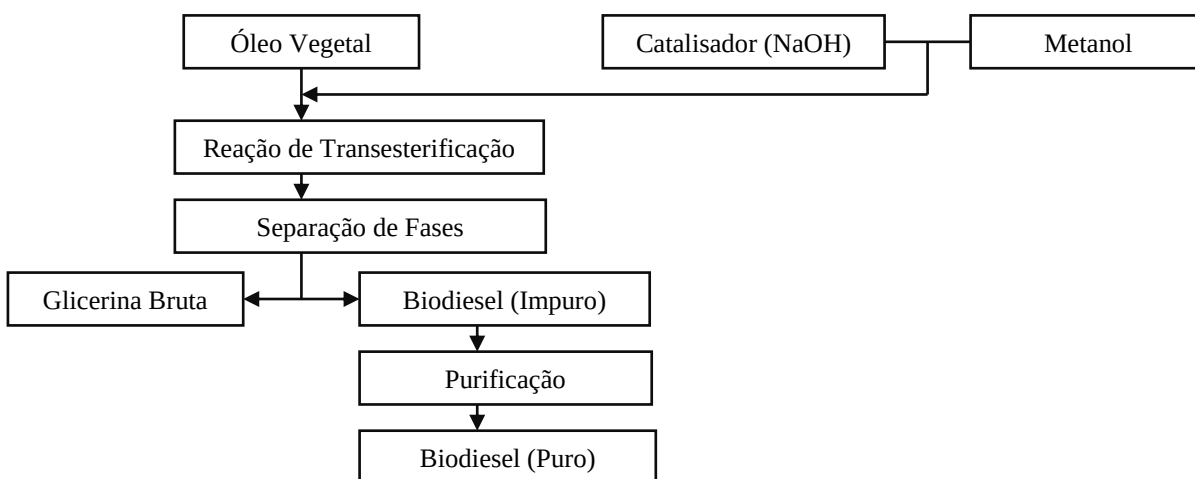


Para reação de transesterificação do biodiesel, a produção industrial catalisada é o método tradicional com maior velocidade de conversão e maior eficiência. Contudo, a presença de alguns subprodutos indesejados, como sais de ácidos graxos e ácidos graxos livres, exigem medidas para a purificação, separação e recuperação de reagentes e catalisadores não reagidos

(SALVI; PANWAR, 2012; AL-ATTAB et al., 2017). Salienta-se que tais operações influenciam, de forma incisiva, o rendimento e a qualidade final do biodiesel produzido. Mas de modo usual, o volume primário (quantidade de óleo encontrado na matéria-prima) equivale ao volume final de biocombustível produzido na reação de transesterificação (GUO; SONG; BUHAIN, 2015).

Algumas considerações sobre o processo industrial de produção do biodiesel (Figura 2): primeiramente, o óleo vegetal isento de umidade é pré-aquecido a uma temperatura entre 50-60 °C. Em seguida, para dar início à transesterificação em um reator químico, é adicionada ao óleo vegetal uma mistura de metóxido de metanol e hidróxido de sódio, com proporções respectivas de 20% do volume do óleo e 5g/L de óleo. Perpassadas 2h de reação sob agitação mecânica e temperatura constante, a mistura permanece em descanso, decantando, à temperatura ambiente, durante um tempo de 2 a 12h. Após este período, duas fases líquidas bem definidas estarão presentes na mistura. Mediante um funil de drenagem, a camada inferior líquida de glicerol, comercialmente chamada de glicerina, é separada da camada superior de biodiesel. Ainda presente no biodiesel encontram-se impurezas em pequenas quantidades (metanol, glicerol e mono/di/triglicerídeos), sendo necessária sua purificação. Nesta última etapa, utiliza-se comumente o procedimento de lavagem com água e secagem (ATADASHI et al., 2011). Outro procedimento também utilizado é o método de refino por membrana. Capaz de aumentar a eficiência dos processos de mistura e separação, o uso de membranas assegura uma maior pureza ao biodiesel, visto que facilita a purificação e evita que ocorram reações colaterais (ENAGI; AL-ATTAB; ZAINAL, 2018).

Figura 2 – Processo industrial de produção do biodiesel



Fonte: adaptado de Guo, Song e Buhain (2015).

2.3.2 Mistura ABE (Acetona-Butanol-Etanol)

No cenário mundial, os combustíveis alcoólicos também ganharam destaque como potenciais combustíveis alternativos. Entre eles, por apresentar propriedades físico-químicas relevantes, o biobutanol, um álcool de cadeia carbônica longa, é considerado um candidato favorável (HARVEY; MEYLEMANS, 2011; KUMAR; KARMAKAR; CHONG, 2023). Misturas de butanol e combustível de aviação e butanol e óleo diesel foram analisadas por Dziegielewski et al. (2014). De tais análises pode-se afirmar que as misturas contendo a concentração de 10% de butanol resultaram em boa compatibilidade para ambos os casos. Também foi observado que a condutividade do combustível de aviação sofreu alteração devido à redução de seu ponto de inflamação. Já Kumar e Karmakar (2020) avaliaram misturas contendo butirato de butila, butanol e Jet A-1 em um queimador estabilizado por redemoinho. Com processos combustivos superiores, a mistura com 50% de butanol levou a uma redução de 10% na taxa emissão de CO e 3% na emissão de NO_x em comparação ao combustível Jet A-1 puro.

Tradicionalmente, o butanol é obtido pela manipulação de bactérias anaeróbias a partir de biomassa como matéria-prima, preferencialmente biomassa lignocelulósica. Nestas circunstâncias, as bactérias atuam realizando a fermentação para produção da mistura acetona-butanol-etanol (ABE). Como produtos da fermentação, além de butanol, estão presentes etanol e acetona, alto teor de água e impurezas (ABDEHAGH; TEZEL; THIBAUT, 2014). Para alcançar uma concentração de butanol de alta pureza, o etanol e a acetona, além de outros elementos, precisam ser necessariamente removidos da mistura. Entretanto, em escala industrial, este processo de separação envolve um alto custo, restringindo a produção de biobutanol (ABDEHAGH; TEZEL; THIBAUT, 2014). Como solução alternativa, tem-se procurado utilizar como combustível para uma queima limpa a mistura ABE. Ni e Sun (2009) declaram em seu estudo que a utilização da mistura ABE como combustível alternativo para motores de combustão de interna poderia ocasionar uma redução no custo de produção em torno de 50%, em vista do custo de produção do biobutanol.

Rao, Karmakar e Som (2017) desenvolveram pesquisas a respeito do comportamento da combustão de gotículas em misturas contendo butanol e Jet A-1, mistura ABE e Jet A-1 e mistura ABE pura. Foi verificado por eles que a probabilidade de microexplosão em gotículas com misturas ABE foi maior do que nas misturas de butanol. Outro estudo sobre misturas ABE foi realizado por Chang et al. (2014). Nele, testes com misturas ABE contendo água, diesel e biodiesel em motores diesel resultaram em boas perspectivas para

o uso desses combustíveis alternativos. Com relação às misturas de biodiesel-diesel e diesel puro, a mistura com 25% de solução ABE teve uma eficiência energética 7,88% maior. Além disso, as taxas de emissões de NO_x, material particulado e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos foram menores, respectivamente, 30,7%, 63,1% e 67,6%.

Tendo como base os estudos anteriormente mencionados, é perceptível o potencial da mistura ABE juntamente a outros combustíveis a fim de proporcionar energia mais limpa e a um menor custo. Na Tabela 3, podem ser observadas algumas das principais propriedades de cada um dos elementos presentes na mistura ABE.

Tabela 3 – Propriedades da mistura ABE

Propriedades	Acetona	Butanol	Etanol
Fórmula molecular	C ₃ H ₆ O	C ₄ H ₉ OH	C ₂ H ₅ OH
Número de cetano	–	25	8
Densidade a 15 °C (kg/m ³)	0,79	0,81	0,80
Teor de oxigênio (%)	27,60	21,60	34,80
Viscosidade cinemática a 40 °C (mm ² /s)	0,35	2,63	1,08
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	29,60	33,10	26,80
Ponto de inflamação (°C)	17,65	34,85	7,85
Ponto de ebulição (°C)	56,07	117,73	78,65
Temperatura crítica (°C)	234,95	289,90	240,77
Calor latente de vaporização (kJ/kg)	523,00	585,00	862,00

Fonte: adaptado de Han et al. (2017).

2.3.3 Éter Dietílico como Aditivo Redutor de Ponto de Congelamento

Combustíveis, sejam eles alternativos ou não, precisam ser analisados sob diferentes perspectivas de viabilidade para poderem ser utilizados com segurança. Logo, ao avaliar um biocombustível de aviação, além de levar em consideração a disponibilidade de matéria-prima, a infraestrutura necessária para sua produção, sua aceitação e comercialização no mercado, é importante analisar suas características de desempenho, estabelecendo relações com sua estrutura química, bem como com suas propriedades físico-químicas. Dentre as várias existentes, Yang et al. (2019) citam seis relevantes características de desempenho dos biocombustíveis para aviação: propriedades de caráter combustivo; estabilidade de oxidação térmica; fluidez em baixa temperatura; volatilidade; compatibilidade com o sistema de aviação atual (conceito de combustível *drop in*); medição de combustível e alcance de aeronave.

Já Blackey, Rye e Wilson (2011) defendem que um combustível alternativo ideal para a aviação, além de ser um produto economicamente competitivo frente aos tradicionais

combustíveis, precisa reunir uma série de requisitos específicos. Entre eles, os autores destacam a necessidade de possuir estabilidade química, boa atomização, rápida evaporação, ponto de congelamento muito baixo, viscosidade cinemática apropriadamente pequena e elevada densidade de energia, entre outras propriedades.

No que se refere a fluidez de um biocombustível sob condições de baixa temperatura, as propriedades de ponto de congelamento e viscosidade cinemática influem, de modo significativo, no desempenho deste, sendo ressaltadas como características das mais importantes a serem levadas em consideração no desenvolvimento de biocombustíveis, em vista das grandes altitudes de voo nas quais as aeronaves se encontram durante seus trajetos (ROCHELLE; NAJAFI, 2019). Nessas altitudes, a temperatura observada no tanque de combustível é muito baixa; assim, para haver fluidez adequada do combustível para o motor e demais componentes, o ponto de congelamento e a viscosidade cinemática precisam ser suficientemente baixos (YANG et al., 2019).

Sobre a influência que as estruturas químicas têm sobre o ponto de congelamento, foi verificado que a concentração de isoparafinas e elementos aromáticos alquilados e o comprimento da cadeia carbônica das bioparafinas tinham a capacidade de modificar o valor do ponto de congelamento para diferentes biocombustíveis de aviação (CATALUÑA et al., 2018; CORPORAN et al., 2011; HONG et al., 2013; LI et al., 2018; ROBOTA; ALGER; SHAFER, 2013). Em seu artigo, Yang et al. (2019) corroboram os achados mencionados, afirmando que o baixo ponto de congelamento pode ser atribuído à presença de alto teor de isoparafinas, aromáticos alquilados e cadeias de carbono pequenas. Sia et al. (2020) apresentam também esses e outros fatores que afetam as propriedades de fluxo a frio, fixando seu olhar sobre o biodiesel.

A ASTM D7566-18 define para o FT-SPK, FT-SPK/A, HEFA e ATJ o valor máximo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, e para o SIP, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nota-se que, em comparação aos tradicionais pontos de nuvem (-15 a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$) e pontos de fluidez (-35 a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) utilizados para avaliar o diesel/biodiesel, os pontos de congelamento são bem menores. Ainda, a ASTM especifica que qualquer biocombustível que seja misturado com o Jet A-1 deve possuir um ponto de congelamento menor ou igual ao próprio, $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Em relação aos combustíveis de elevada viscosidade e sua utilização em aeronaves, Chuck e Donnelly (2014) alegam que pode haver desafios, tais como a atomização inadequada e a queima incompleta, dificuldades de bombeamento e, em situações mais graves, obstrução dos injetores de combustível. Ainda que a norma ASTM D7566-18 não estabeleça um limite de viscosidade cinemática para os combustíveis SPKs, é recomendável que seja mantido um

valor de viscosidade menor que o do combustível Jet A-1 para misturas de combustível de aviação, isto é, abaixo de 8 mm²/s a -20 °C (YANG et al., 2019).

Vários métodos estão sendo empregados para melhorar as propriedades de fluxo sob condições de baixa temperatura dos combustíveis. Dentre eles, o uso de aditivos químicos, como melhoradores de fluxo a frio, tem se mostrado o método mais eficiente e econômico (DWIVEDI; SHARMA, 2014; SRIKANTH et al., 2019).

Para o interesse deste estudo, foi abordado o uso do éter dietílico como aditivo em misturas que contenham biodiesel, pois a cristalização dos ácidos graxos saturados presentes em abundância no biodiesel exibe propriedades ruins em baixa temperatura. Contudo, na literatura, encontram-se presentes estudos que também se utilizam de outras classes de aditivos como álcoois, diluentes, solventes, polímeros e copolímeros (DWIVEDI; SHARMA, 2014; SRIKANTH et al., 2019).

No caso do biodiesel, sua fração saturada, apesar de causar um efeito benéfico na estabilidade do componente, pode comprometer o desempenho do combustível em temperaturas baixas. Os ésteres saturados (em especial os de cadeia longa) possuem um ponto de fusão muito alto, de forma que promovem uma inclinação à cristalização, quando em condições de baixa temperatura. Dessa maneira, é possível que o biodiesel com altos níveis de componentes saturados de cadeia longa não tenha um desempenho satisfatório (WANG; LI; LI, 2020). Em contrapartida, uma solução para este problema pode estar na utilização de um aditivo oxigenado como o éter dietílico. Esse elemento, quando usado em uma mistura com combustível diesel-biodiesel, pode melhorar as propriedades de fluxo a frio, densidade, acidez e reduzir as emissões de NO_x (ALI et al., 2014, 2016; RAKOPOULOS, 2013; SRIKANTH et al., 2019).

Ali et al. (2014) aferiram a influência da adição de éter dietílico, etanol e butanol juntamente ao biodiesel de óleo de palma nas propriedades de fluxo a frio e outras características. Nos ensaios com inserção de 5% de aditivo, quedas percentuais de viscosidade cinemática de 16,5%, 12%, 7% foram verificadas quando feita adição de éter dietílico, etanol e butanol, na devida ordem. Ademais, o ensaio com 5% de éter dietílico distinguiu-se do restante, pois resultou numa redução máxima de 5 °C no ponto de fluidez do biodiesel.

Num estudo posterior, Ali et al. (2016) avaliaram as propriedades da mistura de diesel/biodiesel de óleo de palma com éter dietílico, nas proporções de 2%, 4%, 6% e 8% v/v. Seus achados, por meio de análises das variações cíclicas em motores Diesel, mostram-se positivos quanto à utilização do aditivo em questão. Em relação à mistura não aditivada, com o aumento da concentração de éter dietílico para 8%, benefícios foram vistos não somente para o

ponto de fluidez e ponto de névoa da mistura que diminuiram 4 °C e 3 °C, respectivamente, mas também para a viscosidade reduzida em 26,5%. Pequenas melhoras na densidade e acidez também foram percebidas, entretanto, houve uma diminuta queda na taxa energética do biodiesel, próxima de 4%, com o aumento da taxa de aditivo em 8%.

Já Srikanth et al. (2019) investigaram a utilização de dois solventes, acetona e éter dietílico com biodiesel sintetizado a partir de resíduos biológicos industriais, obtidos de uma fábrica de laticínios, por meio de calorimetria exploratória diferencial em diferentes volumes (0, 5, 10, 15 e 20% v/v). Como resultado, para ambos os aditivos nas concentrações de 20%, ocorreu uma diminuição de 12 °C no ponto de nuvem e 7 °C no ponto de fluidez do biodiesel, visto que a adição destes solventes reduz a concentração de ésteres metílicos de ácidos graxos de alto ponto de fusão. Tanto a acetona (-95 °C) quanto o éter dietílico (-116 °C) possuem pontos de congelamento muito baixos e atuam como diluentes, deslocando os pontos de cristalização do biodiesel para temperaturas mais baixas e, por conseguinte, resultando em pontos de congelamento menores para as misturas na totalidade.

Capaz não somente de diminuir do ponto de congelamento, o éter dietílico também pode reduzir a atraso de ignição, pois possui um alto número de cetano, estimado entre 86 e 96, indicando sua elevada capacidade de autoignição, em comparação com combustíveis como diesel e biodiesel, cujo número de cetano varia entre 40 e 55, (ERGEN, 2024). Em razão disto e por possui um maior teor de oxigênio em comparação com outros álcoois, elevada eficiência na melhoria do processo de atomização do combustível e no processo de combustão, o éter dietílico tem se mostrado como um aditivo promissor para o biodiesel (JOSHI; THIPSE, 2019; SELVARAJ; THANGAVEL, 2019; CHANDRAN, 2020). Algumas investigações experimentais indicam que a adição de éter dietílico em teores entre 5% e 15% ao biodiesel podem proporcionar avanços significativos na qualidade da combustão e na redução de emissões. Essas misturas apresentam menor liberação de material particulado e opacidade da fumaça, além de otimizações na eficiência térmica de freio, na taxa de liberação de calor e na pressão do cilindro (BARIK; MURUGAN, 2016; TAMILVANAN et al., 2021).

Fundamentado nos estudos anteriormente mencionados, a utilização do éter dietílico como aditivo para misturas de biocombustíveis demonstra-se vantajosa, sobretudo para melhorar as propriedades de fluxo a frio, promover o aumento do número de cetano e reduzir as emissões de poluente atmosféricos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Motores e Biocombustíveis (LAMOBIO), da Faculdade de Engenharia de Bauru, pertencente à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. No LAMOBIO, encontram-se instalados o grupo gerador estacionário do ciclo Diesel e os equipamentos utilizados nas medições elétricas e mecânicas. Além disso, o laboratório também dispõe de todas as vidrarias e instrumentos necessários para a preparação das misturas de combustíveis que foram testadas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Antes de entrar em detalhes sobre cada equipamento e os combustíveis utilizados, torna-se importante, para fins elucidativos, comentar o porquê da utilização de um motor de ignição por compressão em testes de combustíveis aeronáuticos, ao invés de realizar os ensaios em uma turbina a gás.

Tanto o ciclo termodinâmico Brayton, modelo ideal para turbinas a gás, quanto o ciclo Diesel, modelo ideal para motores de ignição por compressão, são ciclos termodinâmicos que envolvem a compressão, combustão, expansão e exaustão de um fluido de trabalho, existindo uma semelhança crucial entre esses ciclos: o fornecimento de calor é realizado a pressão constante.

No ciclo Diesel, o ar é comprimido isentropicamente até uma alta temperatura e, em seguida, é injetado combustível. Durante a expansão do ar, ocorre a queima do combustível a pressão constante, sendo realizado parte do trabalho motor. Por outro lado, no ciclo Brayton, o ar é comprimido isentropicamente e aquecido a pressão constante pela queima de combustível na câmara de combustão. Esse ar aquecido é, então, expandido através de uma turbina, gerando trabalho, e, em seguida, exaustão a pressão constante.

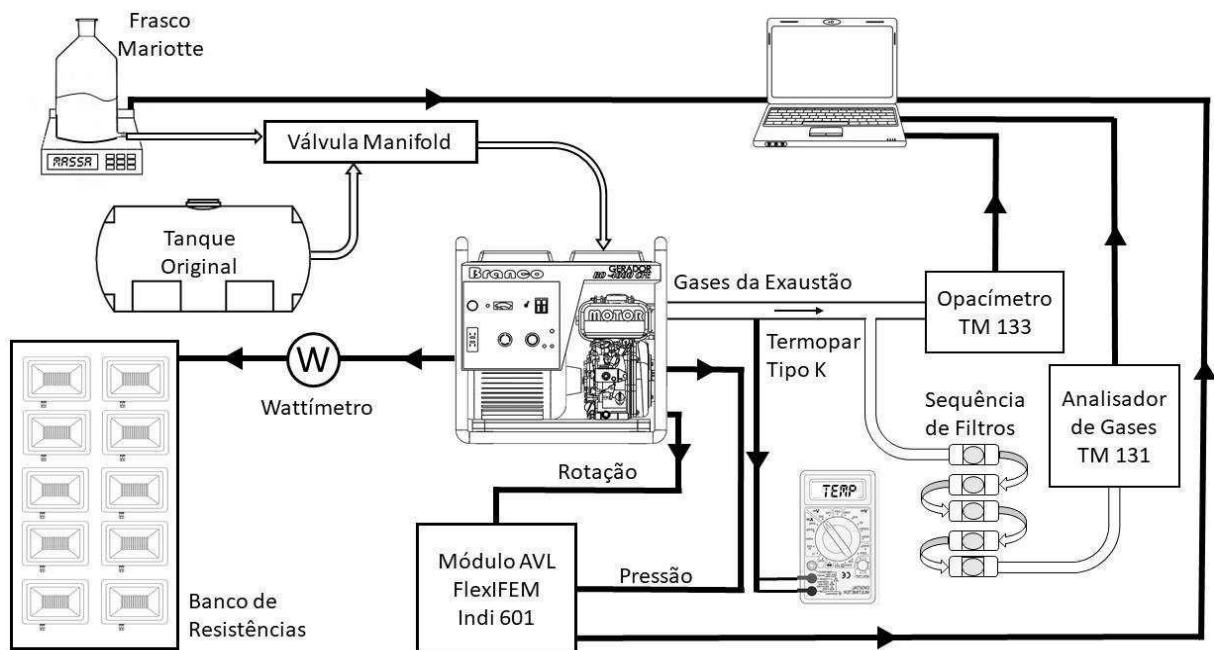
Portanto, em ambos os ciclos, os processos de combustão se dão à pressão constante. Essas similaridades de operação entre ciclos justificam, a priori, a utilização de uma bancada experimental de baixo custo e devidamente instrumentada para estudo do processo de combustão e emissões de combustíveis de aviação, tendo em vista o elevado custo de uma turbina, uma vez que, de modo geral, combustíveis para ciclo Brayton apresentem uma “queima satisfatória” em ciclo Diesel.

A seguir, mais detalhes são mostrados sobre a metodologia proposta.

3.2 BANCADA DE TESTES

A bancada de testes, onde foram realizados os procedimentos experimentais, é composta por dois grandes equipamentos instrumentalizados: um Grupo Gerador Monocilíndrico de ciclo Diesel de 4 tempos (GGD), formado por um motor e um gerador acoplados, e uma bancada resistiva. Além disso, ela também contém sensores e outros instrumentos que podem ser visualizados na Figura 3:

Figura 3 - Bancada de Ensaio LAMOBIO.



Fonte: Ribeiro (2021).

3.2.1 Grupo Gerador Monocilíndrico de Ciclo Diesel (GGD)

A marca do GGD é Branco, modelo BD 4000 CFE, equipado com sistema de partida manual e elétrica, arrefecido a ar, com injeção direta e 7,0 CV (5,12 kW) de potência nominal. Sobre o motor, o equipamento possui deslocamento volumétrico de 0,296 L, com pistão de 72 mm de diâmetro, virabrequim de 62 mm de curso, biela com comprimento de 102 mm (medida do centro do pino do pistão até o centro do colo do virabrequim) e razão de compressão 20:1. Ainda, a instrumentalização do motor permite a aquisição dos dados referentes a pressão no interior da câmara de combustão, temperatura de funcionamento, emissões e consumo específico de combustível.

Acoplado ao motor existe um gerador do tipo monofásico, com tensão de saída de 127/220V, frequência de 60 Hz, potência máxima de 3300 W (3,3 kVA) e potência nominal de 3000 W (3,0 kVA). A rotação nominal do conjunto (motor + gerador) é de 3600 rpm, mantida para todo regime de carga aplicado ao gerador. O nível de ruído do GGD é igual a 77 dB, a 7 m de distância. Na Figura 4 é possível visualizar o gerador utilizado nos experimentos, e a Tabela 4 apresenta as especificações do motor.

Figura 4 - Gerador monocilíndrico do ciclo diesel, Branco BD 4000 CFE.



Fonte: Branco (2020).

Tabela 4 - Especificações Técnicas do Gerador

Propriedades	Especificação
Modelo	BD - 7.0
Eixo	Horizontal
Combustível	Diesel
Potência máxima	7,0 CV a 3600 rpm
Potência contínua	6,0 CV a 3600 rpm
Código comercial (Partida Elétrica)	90311801
Diâmetro x Curso	78 mm x 62 mm
Cilindrada (cm ³)	296
Razão de compressão	20:1
Torque máximo	1,50 kgfm a 2000 rpm
Sistema de lubrificação	Bomba de Óleo
Peso (kg)	33/38
Sistema de alimentação	Injeção
Ângulo de injeção	21° ± 1° apms
Folga da válvula de admissão	0,15 mm
Folga da válvula de escape	0,15 mm
Tipo de óleo para o motor	SAE 15W40
Capacidade de óleo do cárter (L)	1,10
Capacidade do tanque de combustível	3,5
Consumo (L/h)	1,4 a 1500 W

Fonte: Branco (2010).

3.2.2 Pressão na Câmara de Combustão

Um transdutor de pressão piezoelétrico da marca AVL, modelo GH12DK, foi utilizado para adquirir os dados de pressão na câmara de combustão. Este instrumento, instalado internamente no cabeçote do motor, colhe medidas dinâmicas entre 0 e 300 bar, com sensibilidade de 19 pC/bar, para temperaturas de operação superiores a 400 °C. Ainda, ele se conecta ao “AVL Indicating Data Acquisition”, modelo FlexIFEM Indi 601, dispositivo completo para aquisição de dados e amplificação de sinais.

Além disso, o motor também possui uma roda fônica do tipo 60-2 (GM 94.700.203), com um sensor indutivo (MTE-THOMSON 7033) instalado a 1 mm de distância entre ambos. Assim, os dados referentes à rotação do motor e à localização do PMS (ponto morto superior) são enviados ao “AVL Indicating Data Acquisition”. Essa capacidade de localizar o PMS é fundamental, pois é assim que o “software” pode medir os dados de pressão, possibilitando a análise das curvas de pressão, calor liberado e atraso de ignição. Para isso, foi usado o “AVL Pulse Conditioner Box 389”, um dispositivo que converte o sinal analógico gerado pelo sensor indutivo da roda fônica em sinais digitais para a interação com o “software”.

3.2.3 Temperatura de Funcionamento

Para medir a temperatura dos gases gerados pelo motor, foi usado um termopar do tipo K (Cromel/Alumel) instalado no começo do duto de exaustão, junto à válvula de escape. Os valores adquiridos foram registrados por meio de um multímetro digital automotivo da marca Instrutherm, modelo MDA 232 com resolução de 1 °C. A Figura 5 mostra o local da instalação.

Figura 5 - Termopar do tipo K instalado no duto de escape do motor.



Fonte: Ribeiro (2021).

3.2.4 Emissão de Gases

Um analisador de gases TM 131, da marca Tecnomotor, forneceu a análise dos gases de exaustão. Para o funcionamento correto do equipamento, foram feitas recentemente sua manutenção e sua calibração, com certificação do INMETRO (Anexo). Uma amostra dos gases emitidos é colhida por meio de uma válvula na derivação instalada no coletor de escape do motor. Essa amostra consiste em NO_x , CO, CO_2 , O_2 e HC (hidrocarbonetos não queimados). Os gases passam por uma sequência de 5 filtros (segundo recomendação do fabricante) que retém o material particulado, a fim de evitar danos ao analisador. Para observação dos dados, o equipamento faz uso de um “software” próprio denominado SofGas, também do fabricante Tecnomotor. A Figura 6 apresenta o analisador de gases e o dispositivo de coleta de gases para o analisador. A Tabela 5 apresenta as especificações do analisador de gases TM 131, bem como a exatidão e resolução apresentadas pelo fabricante.

Figura 6 - Analisador de gases Tecnomotor - TM 131 e derivação do coletor de escape



Fonte: Tecnomotor (2020a); Ribeiro (2021).

Tabela 5 - Especificações Analisador de gases TM131

Gás	Faixa de Medição		Exatidão	Resolução
	Mínima	Máxima		
HC	0	20.000 ppm vol	4 ppm vol HC	1 ppm vol
	0	40.000 ppm vol		
CO	0	10% vol	0,02% vol CO	0,01% vol
CO ₂	0	20% vol	0,3% vol CO ₂	0,1% vol
O ₂	0	25% vol	0,1% vol O ₂	0,01% vol
NO _x	0	5.000 ppm vol	25 ppm vol ou 0,4% vol	1ppm vol
			8% vol	

Fonte: Tecnomotor (2011).

3.2.5 Consumo Específico de Combustível

Para medir o consumo específico de combustível pelo motor, foi utilizada uma balança digital de bancada da marca DIGI-TRON de resolução igual a 0,001 kg (1 g) e com capacidade para 10 kg, que possibilitou a obtenção da vazão mássica de combustível consumido pelo motor. Optou-se pelo método mássico em razão da dificuldade em manter-se constante a temperatura no interior do laboratório, consequentemente do combustível ensaiado.

Ainda, um frasco Mariotte foi abastecido com o combustível experimental e posicionado na bandeja da balança (aço inoxidável), que era conectada a um computador. O combustível chega até o motor por meio de um duto, posicionado na saída do mesmo frasco. Por meio do computador conectado à balança, os dados medidos foram registrados a uma taxa de 1,5 Hz, e a data e hora da realização do ensaio também foram armazenadas. Dessa forma, foi possível mensurar o consumo mássico de cada ensaio, que foi feito a cada 2 minutos. Após obter o consumo mássico de combustível (kg/s) em conjunto com a potência mensurada em cada ensaio, foi possível calcular o consumo específico de combustível do motor ao longo do ensaio de cada amostra.

3.2.6 Bancada Resistiva

O outro grande componente da bancada de testes é a bancada resistiva (Figura 8). Ela é importante, pois simula as condições reais de funcionamento e carga do motor. A bancada é constituída por 10 lâmpadas de halogênio de 500 W cada uma, instaladas em holofotes

adequados, ligados em paralelo. Estes holofotes são fixos em uma placa de madeira ligada a uma estrutura tubular de metal, soldada sob medida, e com rodízios que facilitam seu transporte. A bancada resistiva possui capacidade de dissipar uma potência nominal de até 5 kW, sendo que cada uma das lâmpadas pode ser operada de maneira independente.

Figura 7 - Bancada resistiva



Fonte: Ribeiro (2021).

3.3 ENSAIOS

Foram realizados ensaios para avaliar as características e a aplicabilidade de uma proposta inédita de biocombustível para aviação. Éster metílico de óleo de soja, mistura ABE e éter dietílico são os elementos que integraram este biocombustível. Além disso, o combustível tradicional de aviação, Jet A-1, também foi utilizado nos ensaios. Desse modo, o biocombustível e o Jet A-1 foram misturados em diferentes concentrações. Vale lembrar que a quantidade máxima de mistura renovável permitida atualmente para biocombustíveis de aviação pela ASTM é de 50% para a maioria dos SPKs. Assim, os ensaios avaliaram as diferentes concentrações visando descobrir qual delas poderia resultar em melhores características de desempenho.

3.3.1 Procedimento experimental

A partir de um volume fixo de 1000 mL, foram misturados 135 mL de acetona, 270 mL de butanol e 45 mL de etanol, respeitando a proporção 3:6:1; em seguida, foram adicionados 450 mL de éster metílico de óleo de soja; e, por fim, acrescentaram-se 100 mL de éter dietílico.

Preparado o biocombustível, este foi adicionado ao combustível de aviação, Jet A-1, em concentrações de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em volume. Ensaios também foram realizados com Jet A-1 puro, como referência para as avaliações. Na Tabela 6, mais detalhes sobre as misturas são apresentados. Na última coluna da Tabela 6, encontra-se a denominação utilizada na sequência do trabalho para se fazer referência às misturas.

Tabela 6 – Composição das misturas de combustíveis para testes

Biocombustível		Jet A-1		Ref.
(%)	(ml)	(%)	(ml)	
0	0	100	1000	Jet A-1
10	100	90	900	B10
20	200	80	800	B20
30	300	70	700	B30
40	400	60	600	B40
50	500	50	500	B50

Fonte: Autor.

Ressalta-se que a etapa de mistura dos combustíveis foi realizada em uma sala à parte do laboratório LAMOBIO. A cada elemento (éster metílico, mistura ABE, éter dietílico e Jet A-1) foi designado um recipiente específico para seu armazenamento. Para cada mistura preparada segundo a Tabela 6, foi utilizada a balança de precisão e vidrarias próprias. Ao final, para cada mistura preparada, designou-se um frasco apropriado para sua armazenagem e uma etiqueta rotulada identificando sua composição.

Posteriormente, a amostra da solução de biocombustível e Jet A-1 foi inserida no frasco Mariotte, posicionado na balança que mediu o consumo mássico. Em seguida, foi dada a partida do motor e, logo após a estabilização da temperatura, foi testado o GGD conectado à bancada resistiva. Isso foi possível energizando-se o número de lâmpadas necessárias para cada potência (1500, 2000 e 2500 W). Feito isso, o procedimento foi esperar novamente o GGD atingir seu estado de regime permanente e, então, reiniciar as medições.

Concomitantemente a esses procedimentos, a aquisição dos dados foi feita. A válvula que direciona a amostra dos gases de escape para o analisador de gases foi aberta, o que

possibilitou o registro dos gases de exaustão pelos *softwares* responsáveis. Os dados foram registrados separadamente em tabelas.

Paralelamente a isso, por meio do computador, foram catalogados os dados do AVL IndiCon e da balança, assim como os valores de potência e corrente elétrica medidos na saída do GGD. Ainda, o sensor de pressão forneceu uma média (baseada em 200 ciclos consecutivos do motor durante o ensaio), aferida e programada no *software* AVL IndiCon. Já o analisador de gases realizou 5 aferições em cada ensaio, por meio de seu *software* SoftGas.

Por fim, ao término do ensaio de cada amostra, os dutos de combustíveis foram drenados, e o frasco Mariotte passou por um processo de lavagem e secagem, antes do ensaio seguinte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção aborda os resultados da pesquisa e suas implicações no contexto dos objetivos estabelecidos neste estudo. Para uma melhor compreensão, os dados coletados foram organizados do seguinte modo: inicialmente, são apresentados os resultados oriundos do transdutor de pressão, seguidos pelos valores de consumo específico dos combustíveis medidos e, por último, os resultados obtidos a partir da análise dos gases de exaustão.

Foi atestado êxito no procedimento de preparação das amostras, conforme definido na seção 3.3.1. Contatou-se que eram misturas homogêneas e monofásicas, isentas de características inesperadas, depósitos ou sedimentações indesejadas.

Contudo, é pertinente mencionar o funcionamento irregular do motor durante os ensaios das misturas contendo valores volumétricos superiores a 30% de biocombustíveis. Temperaturas e níveis de vibração acima do normal, maiores dificuldades de dar a partida, oscilações de potência de maneira intermitente e “engasgos do motor” foram observados com maior frequência com o acréscimo da concentração de biocombustíveis. Uma vez revisado o motor antes do início dos ensaios e este encontrando-se em bom estado, pode-se supor que a presença de tais irregularidades advenha de problemas relacionados à combustão. Cabe lembrar que se trata de um equipamento originalmente concebido pelo fabricante para ser alimentado com diesel/biodiesel, e que para o desenvolvimento desta pesquisa, não foram realizadas modificações internas em seu sistema de injeção, apenas pequenas adaptações no que diz respeito à instrumentação para construção da bancada de testes.

Mesmo diante desse imprevisto, os ensaios foram realizados para avaliar, da melhor maneira possível, o comportamento das misturas de biodiesel, solventes ABE, éter dietílico e combustível de aviação Jet A-1. Nas seções subsequentes, serão analisados os principais resultados obtidos para concentrações de biocombustíveis de 10%, 20%, 30% e 40% testados. Ademais, os dados referentes à mistura B50 não serão apresentados devido à inconsistência decorrente da operação extremamente irregular do motor.

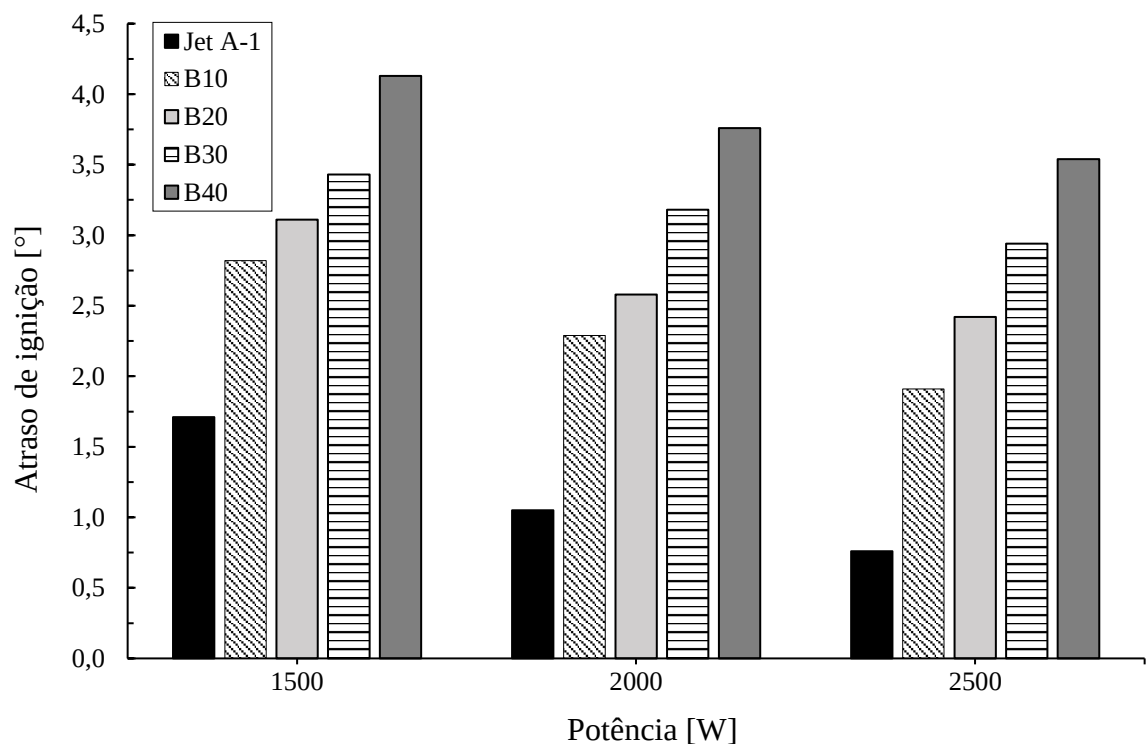
4.1 ATRASO DE IGNIÇÃO DO COMBUSTÍVEL

A aquisição do sinal de pressão interna na câmara de combustão desempenha um papel crucial para a análise do início do processo de combustão. Conforme indicado no manual do “software” AVL IndiCon, a identificação do momento em que a curva de integral da taxa de liberação de calor torna-se crescente, correspondendo também à interseção com o eixo x da

curva de taxa de liberação de calor, define de maneira precisa o início da combustão no ciclo Diesel. Uma vez conhecido o instante de injeção de combustível e o instante de início da combustão, a análise destes dados proporciona a avaliação do parâmetro nos motores de ciclo Diesel conhecido como atraso de ignição.

Ao final do curso de compressão, o combustível é injetado na câmara de combustão, mistura-se com o ar circundante, sofre vaporização e, subsequentemente, passa a existir uma mistura inflamável. Consecutivamente, reações de natureza química ocorrem entre a formação da mistura inflamável e o início da combustão. O atraso de ignição é compreendido como o intervalo de tempo entre o início da injeção de combustível e o início do processo de combustão. Por pressuposto, é perceptível a existência de um tempo mínimo de preparação da mistura ar/combustível no motor diesel (SUBRAMANIAN, 2018, p. 172-173). A Figura 8 e a Tabela 7 apresentam os valores de atraso de ignição para as cargas aplicadas de 1500, 2000 e 2500 W, respectivamente, oferecendo uma visão clara das variações deste parâmetro para as diferentes misturas de combustíveis investigadas.

Figura 8 - Efeito da adição de biocombustível no atraso de ignição



Fonte: Autor.

Tabela 7 – Atrasos de ignição			
Atraso de ignição [°]			
	Carga aplicada ao motor		
Misturas	1500 W	2000 W	2500 W
Jet A-1	1,71	1,05	0,76
B10	2,82	2,29	1,91
B20	3,11	2,58	2,42
B30	3,43	3,18	2,94
B40	4,13	3,76	3,54

Fonte: Autor.

A partir da Figura 8 e dos dados contidos na Tabela 7, pode-se verificar que o período de atraso de ignição diminui conforme a carga aplicada ao motor se eleva, para análises dos ensaios de iguais concentrações sob condições de carga diferentes; com o aumento da carga aplicada, a temperatura média da câmara de combustão cresce, pois a temperatura residual do gás e a temperatura da parede do cilindro aumentam. Como resultado, uma temperatura mais alta durante a injeção de combustível é observável, ocasionando a redução do período de atraso de ignição (GUPTA, 2013, p. 266).

No entanto, quando os ensaios são analisados sob uma mesma condição de carga, nota-se que o período de atraso de ignição aumenta à medida que a concentração de biocombustível nas misturas se eleva. Para as três condições de carga estabelecidas, os testes com Jet A-1 obtiveram os menores valores de atraso de ignição, seguidos dos testes com B10, B20, B30 e B40. Como foram preservadas as configurações operacionais do motor e demais equipamentos entre um ensaio e outro, pode-se afirmar que os dados apresentados são resultantes da influência das características dos combustíveis. Nesse caso específico, a ação do número de cetano sobre o atraso de ignição deve ser mencionada.

O número de cetano está relacionado à temperatura de autoignição e à energia de ativação. Um número de cetano elevado corresponde a uma menor temperatura de autoignição, o que implica que o combustível é mais suscetível a se inflamar em temperaturas mais baixas. Em contrapartida, um número de cetano reduzido está associado a uma temperatura de autoignição mais elevada, resultando em um intervalo prolongado até a ignição ou em temperaturas mais altas para iniciar o processo de combustão (SUBRAMANIAN, 2018, p. 172-173).

Na prática, o número de cetano pode ser entendido como uma medida do atraso de ignição de um combustível. Combustíveis com baixo número de cetano apresentam um período de atraso da ignição mais prolongado, promovendo a injeção excessiva de combustível no

cilindro antes do ponto ideal de início da combustão. Esse cenário provoca um aumento indesejado na pressão inicial do cilindro, gerando uma força excepcional na face do pistão e induzindo um ciclo de operação irregular no motor (PULKRABEK, 2014, p. 314). Este comportamento, como já mencionado, foi observado de forma crescente com a elevação da concentração de biocombustível nos ensaios.

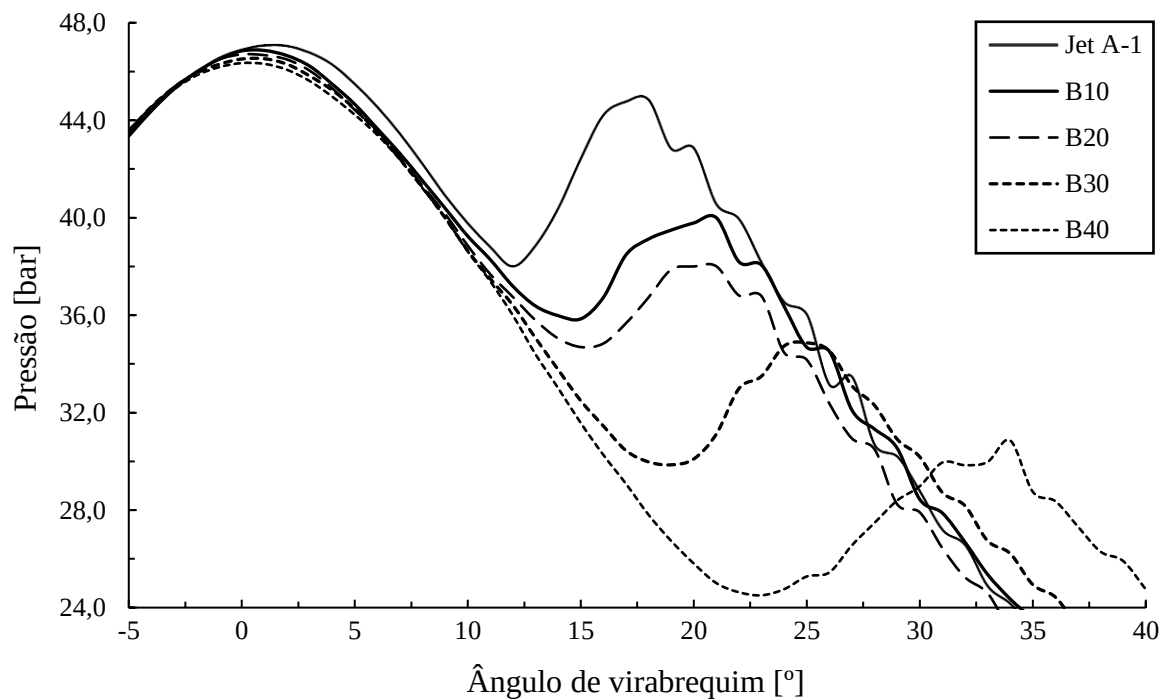
Acredita-se que o aumento do atraso de ignição observado nos testes esteja associado à elevada concentração da mistura ABE. Em seu estudo sobre os efeitos da adição de misturas ABE e diesel (frações de 5 e 10% em volume de ABE) em um motor diesel, Veza et al. (2023) reforçam que a sua adição provoca uma queda no número de cetano do combustível e retarda significativamente o início da combustão. Embora o butanol possua um número de cetano mais favorável em comparação ao etanol e à acetona, seu valor é inferior ao do biodiesel e, também, do Jet A-1, diminuindo o número de cetano total da mistura. Esta associação é corroborada por diversos estudos. Kuszewski et al. (2023), por exemplo, investigaram as propriedades de autoignição de misturas de biodiesel e butanol (frações de 5–25% em volume de butanol) sob diferentes condições de temperatura em um motor diesel, analisando o atraso de ignição e outros parâmetros de combustão. De suas análises, verificaram que a cada acréscimo de 5% na percentagem de butanol, uma diminuição média de 4,2% era observada no número de cetano da mistura. Reduções no número de cetano também foram observadas nas pesquisas de Jeevahan et al. (2018) e Killol et al. (2019) com misturas de biodiesel e butanol sob diferentes condições de carga e concentrações volumétricas. Respectivamente, foi percebida uma diminuição média do número de cetano de 3,6 e 2,24 unidades para cada aumento de 10% e 5% na fração de butanol. Contudo, o comportamento de aumento do atraso de ignição observado é primariamente atribuído à presença dos compostos com baixo índice de cetano, etanol e acetona, que agem como potentes supressores de ignição. O etanol, em particular, intensifica esse efeito devido ao seu alto calor latente de vaporização, o que promove um arrefecimento localizado na câmara de combustão, desacelerando, por sua vez, as reações químicas essenciais para a autoignição (VEZA et al., 2023). Portanto, é plausível que com o aumento na fração de mistura ABE durante os ensaios, as propriedades de autoignição do combustível tenham se deteriorado.

Nas próximas seções do trabalho, é dada continuidade à discussão sobre influência do percentual de mistura ABE, bem como dos atrasos de ignição observados nos experimentos. Os dados a seguir das curvas de pressão no interior da câmara de combustão, taxa de liberação de calor e integral da taxa de liberação de calor vêm corroborar os argumentos anteriormente expostos.

4.2 PRESSÃO NO INTERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

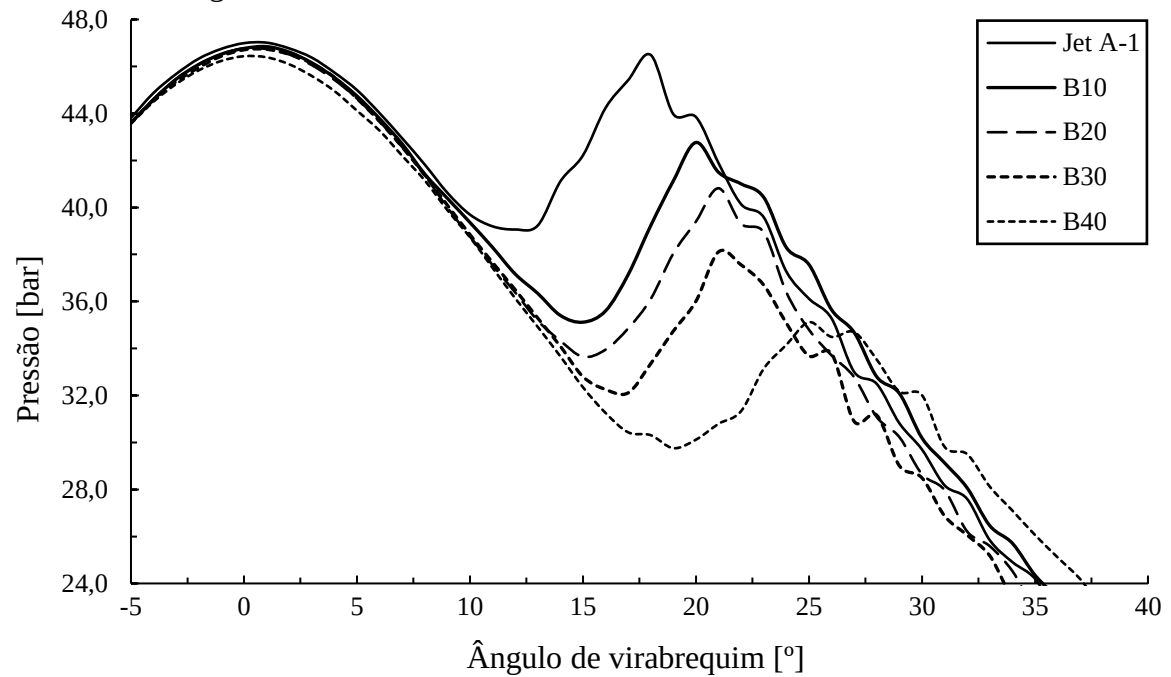
Durante a operação do motor, a aquisição de sinais de pressão dentro da câmara de combustão possibilita a representação gráfica da variação da pressão em relação à posição angular do virabrequim. Os dados empregados na construção desses diagramas foram obtidos diretamente através do “software” AVL IndiCon. Esses resultados permitiram uma avaliação abrangente do comportamento da pressão ao longo do ciclo de operação do motor. Para uma análise mais detalhada do comportamento da pressão durante o processo de combustão, foram gerados diagramas que abrangem o intervalo de ângulos entre -5° e 40° , respectivamente antes do ponto morto superior (APMS) e após o ponto morto superior (DPMS). As Figuras 9 a 11, presentes nesta seção, apresentam tais curvas para os diferentes combustíveis testados, conforme a carga aplicada ao motor: 1500, 2000 e 2500 W.

Figura 9 - Pressão no interior da câmara de combustão a 1500 W



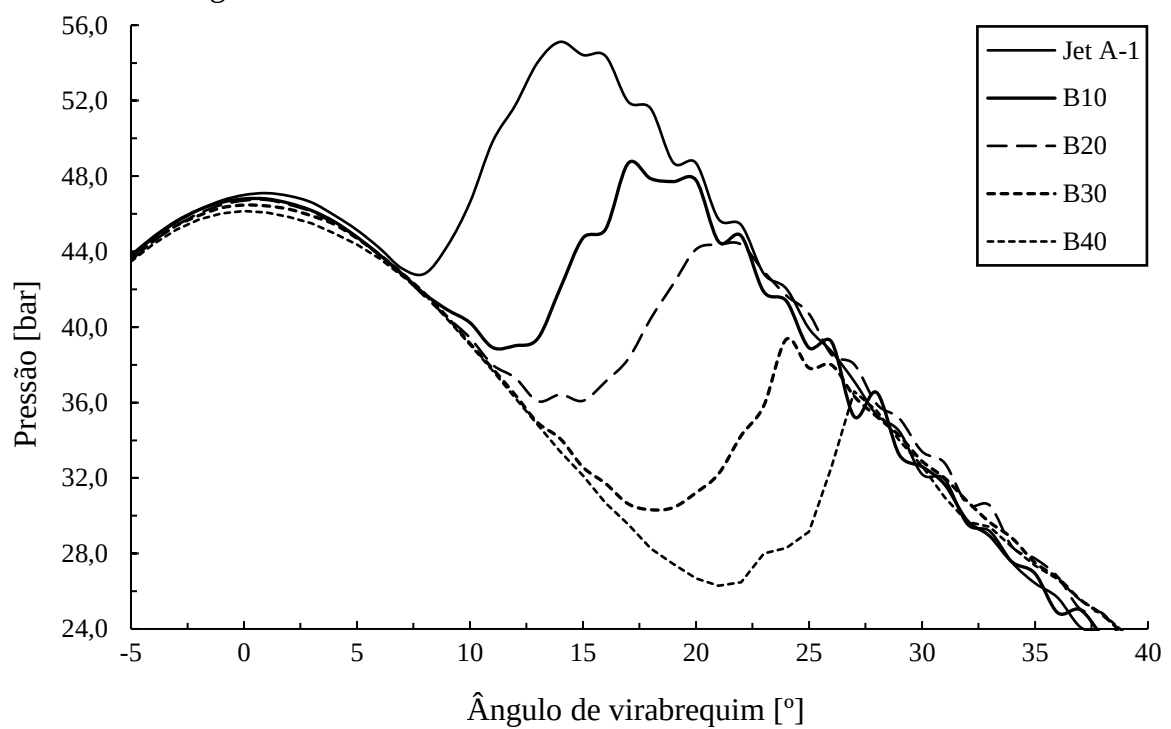
Fonte: Autor.

Figura 10 - Pressão no interior da câmara de combustão a 2000 W



Fonte: Autor.

Figura 11 - Pressão no interior da câmara de combustão a 2500 W



Fonte: Autor.

Para as três condições de carga impostas, ao analisar as curvas de pressão das misturas foi identificado que o ponto de injeção do combustível não era o adequado para os ensaios. É de conhecimento que o sistema de injeção atua de modo significativo sobre as características de pulverização e o processo de formação da mistura ar-combustível em motores Diesel (SUBRAMANIAN, 2018, p. 172-173). Tanto o avanço quanto o retardo da injeção influenciam o período de atraso de ignição. Avançando a injeção, obtêm-se maiores valores de pressão máxima e inclinação da referida pressão, pois ao iniciar a injeção mais cedo no curso de compressão, o combustível encontra condições desfavoráveis de pressão e temperatura, prolongando o atraso de ignição. Isso leva a uma injeção adicional de combustível, induzindo a combustão espontânea de uma maior quantidade de mistura (ÁLVAREZ; AGRAMUNT, 2005, p. 193). Por outro lado, um início tardio da injeção resulta em condições iniciais ligeiramente mais altas de temperatura e pressão, que eventualmente diminuem devido ao aumento das perdas térmicas à medida que o atraso de ignição prossegue (GUPTA, 2013, p. 264). Assim, as condições mais propícias para a ignição estão situadas dentro do intervalo entre esses dois cenários, o que exige controle preciso dos parâmetros operacionais do sistema de injeção de combustível.

Logo, é reconhecida uma defasagem acentuada nos diagramas, caracterizando a injeção de combustível tardia, ou seja, próximo ao PMS. Isto pode ser constatado graficamente observando que mesmo as curvas do combustível Jet A-1, cujos valores de atraso de ignição são os menores, encontram-se com um deslocamento indesejável para a direita, refletindo uma combustão por demasiado prolongada e resultando em perdas de potência e desempenho. Este mesmo comportamento também é visível para as demais curvas. Portanto, pode-se argumentar que tanto o retardo do ponto de injeção quanto a fração excessiva de mistura ABE presente nos combustíveis conduziram ao aumento do atraso de ignição durante os ensaios.

Outro aspecto importante é o processo de combustão em motores de ignição por compressão. Trata-se de um fenômeno heterogêneo e controlado pela taxa de mistura ar-combustível. Sua dinâmica é classificada em quatro fases distintas: atraso de ignição, combustão pré-misturada, combustão controlada por mistura e combustão tardia. Sobre a fase de combustão pré-misturada, esta tem início após o período de atraso de ignição, quando as regiões já totalmente homogêneas em torno do jato de combustível entram em ignição espontânea ao atingirem sua temperatura de autoignição, induzindo a subsequente combustão das regiões vizinhas (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016, p. 215-217).

A quantidade de combustível queimado durante a fase pré-misturada deriva das condições da fase anterior: quantidade de combustível injetado, a parcela de combustível

injetado que vaporiza e a parcela de combustível vaporizado que se encontra com o oxigênio (ÁLVAREZ; AGRAMUNT, 2005, p. 186). Por conseguinte, não somente aspectos operacionais do motor/sistema injetor são relevantes, mas também o tipo de combustível utilizado.

Com a diminuição do índice de cetano mediante o acréscimo de mistura ABE, dificultou-se o início da combustão. Consequentemente, o período de atraso da ignição foi prolongado e a quantidade de combustível injetado nesta fase foi maior. Este fato, por sua vez, deveria promover, durante a fase pré-misturada, uma maior pressão máxima na câmara de combustão como resultado das elevadas taxa de variação de pressão e taxa de liberação de calor, entretanto isto não é percebido. Devido à injeção de combustível acontecer de maneira tardia, o atraso de ignição tende a aumentar ainda mais, com parte da fase de combustão pré-misturada acontecendo no curso de expansão do ciclo. Apesar da taxa de combustão aumentar rapidamente durante esta fase, com o movimento descendente do pistão, temperatura e pressão diminuem, sendo seus efeitos visíveis pelos menores picos de pressão observados (Tabela 8) e menores velocidades de combustão (Figuras 12 a 14). Além disso, em razão de menores velocidades de combustão, o tempo de duração da combustão pré-misturada também foi maior, contudo isto é mais fácil de ser compreendido quando observados os diagramas de taxa liberação de calor e integral da taxa de liberação de calor apresentados nas próximas seções.

Tabela 8 – Valores de pressão máximos			
	Pressão [bar]		
	Carga aplicada ao motor		
Misturas	1500 W	2000 W	2500 W
Jet A-1	44,82	46,49	55,12
B10	40,00	42,77	48,68
B20	38,01	40,82	44,37
B30	34,87	38,11	39,36
B40	30,86	35,12	36,59

Fonte: Autor.

Durante o ciclo, a maior proporção do combustível é queimada na fase de combustão controlada por mistura, o que impacta diretamente a potência produzida pelo motor. Todavia, o seu desenvolvimento depende, em grande parte, da forma como foi realizada a fase anterior (ÁLVAREZ; AGRAMUNT, 2005, p. 188). Consumida a mistura de ar-combustível formada durante o atraso de ignição, as temperaturas na câmara de combustão atingem níveis elevados no final da fase de combustão pré-misturada, promovendo a queima imediata de qualquer

combustível injetado posteriormente que entre em contato com o oxigênio (GUPTA, 2013, p. 260). Esse combustível, ao adentrar o cilindro, não se mistura completamente com o ar antes da combustão, mas queima no que é denominado chama de difusão. Nesta fase, a combustão é controlada pela taxa de injeção, bem como pelos processos de mistura e difusão (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016, p. 215-217).

Com base nos diagramas de pressão, pode-se verificar que a duração da combustão controlada por mistura diminuiu com o aumento da concentração de mistura ABE. Como já mencionado, o considerável atraso de ignição induz a combustão pré-misturada durante o curso de expansão, resultando em velocidades de combustão mais baixas e estendendo o seu tempo de duração. Consoante a teoria, o fim da combustão pré-misturada e o início da combustão controlada por mistura correspondem ao ponto de valor máximo de pressão e este ocorre em ângulos de virabrequim progressivamente maiores nos ensaios. Assim, enquanto o tamanho relativo da fase pré-misturada aumentou, a fase controlada por mistura diminuiu, pois para um mesmo ponto de início e fim da injeção, houve uma menor quantidade de combustível sendo injetado na fase controlada por mistura, e mesmo havendo uma maior quantidade de combustível injetado durante a fase de pré-mistura, esta independe da duração da injeção segundo Ferguson e Kirkpatrick (2016, p. 222).

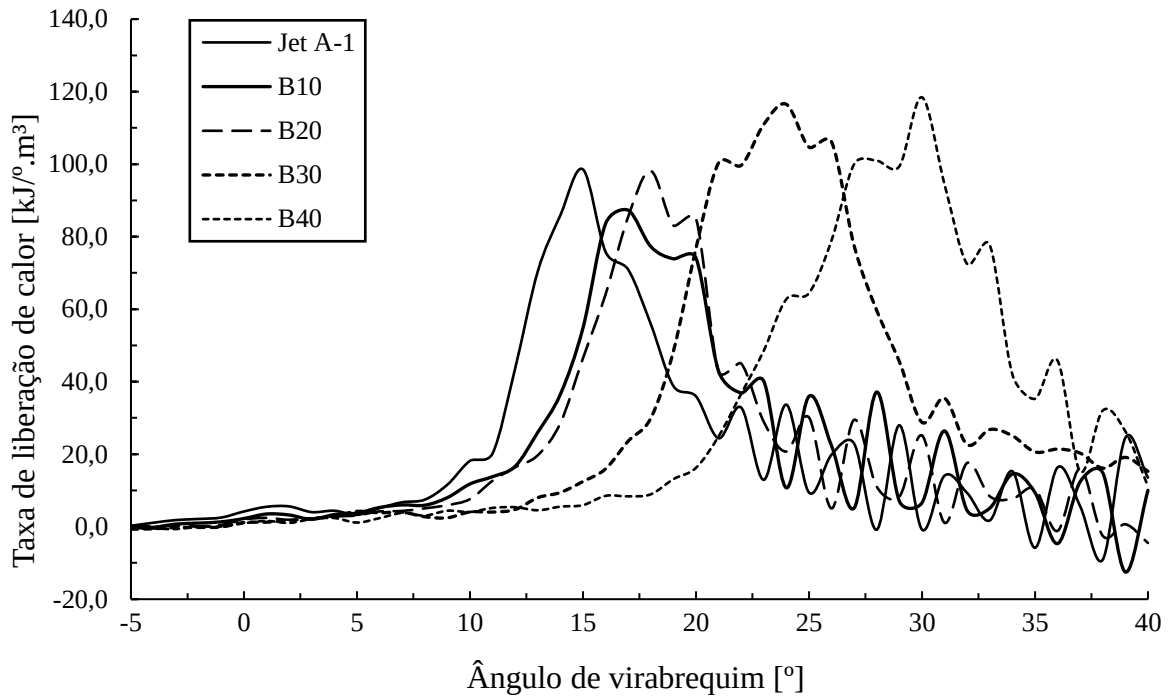
Por fim, ao avaliar o comportamento das curvas de pressão em relação à variação da carga imposta ao motor, foi observado que o aumento da carga aplicada redundou em uma diminuição do atraso de ignição e uma maior duração da combustão para as misturas de mesma concentração. Por conseguinte, nota-se que a fase de combustão pré-misturada diminuiu e a fase de combustão controlada por mistura aumentou (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016, p. 215-217). Ademais, um maior tempo de injeção de combustível se faz necessário mediante um aumento de carga; por consequência, mais combustível é injetado no ciclo, resultando em maiores picos de pressão ao final da fase de pré-mistura (Tabela 8).

4.3 TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR

Os diagramas de liberação de calor possibilitam uma interpretação mais aprofundada do processo de combustão, sob a perspectiva da taxa de energia liberada durante a queima do combustível. Esses dados são úteis, pois contribuem para determinar o instante de início da combustão, avaliar a taxa de queima de combustível, identificar os picos de liberação de energia e compreender melhor as fases de combustão com o intuito de maximizar a eficiência energética e minimizar as emissões de poluentes. As Figuras de 12 a 14 demonstram os diagramas de

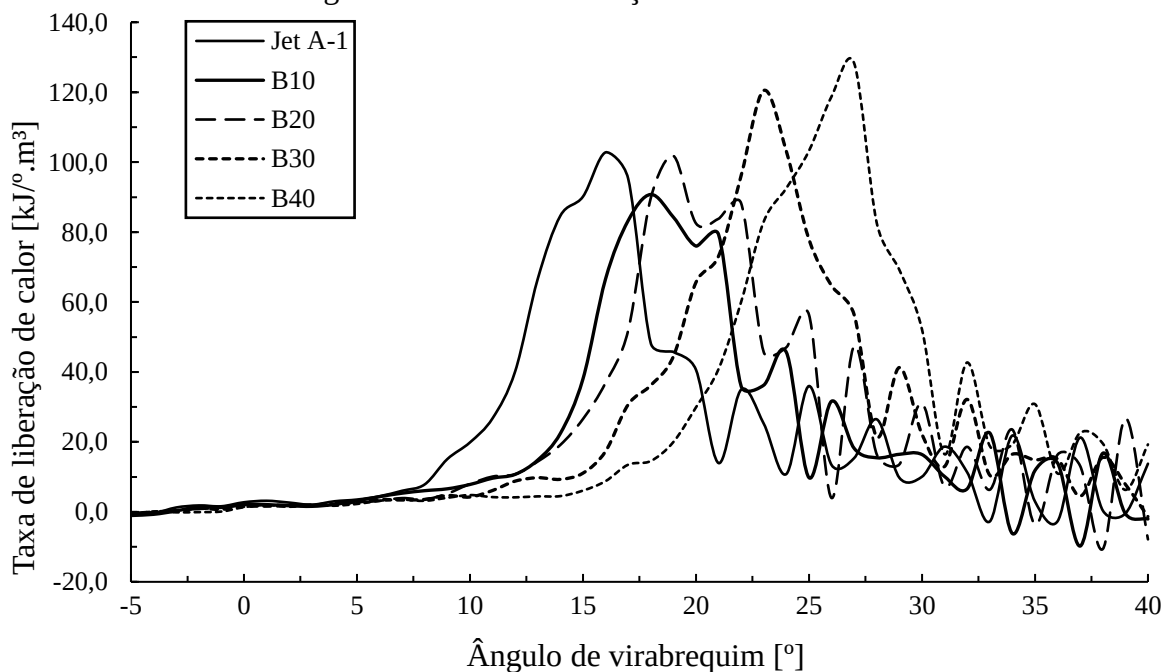
liberação de calor obtidos sistema de aquisição de dados AVL IndiCon para os diferentes testes realizados segundo a carga aplicada ao motor. De modo a facilitar sua visualização, foram incluídos nos diagramas somente o conjunto de dados que estão compreendidos entre o intervalo angular de -5° e 40° .

Figura 12 - Taxa de liberação de calor a 1500 W



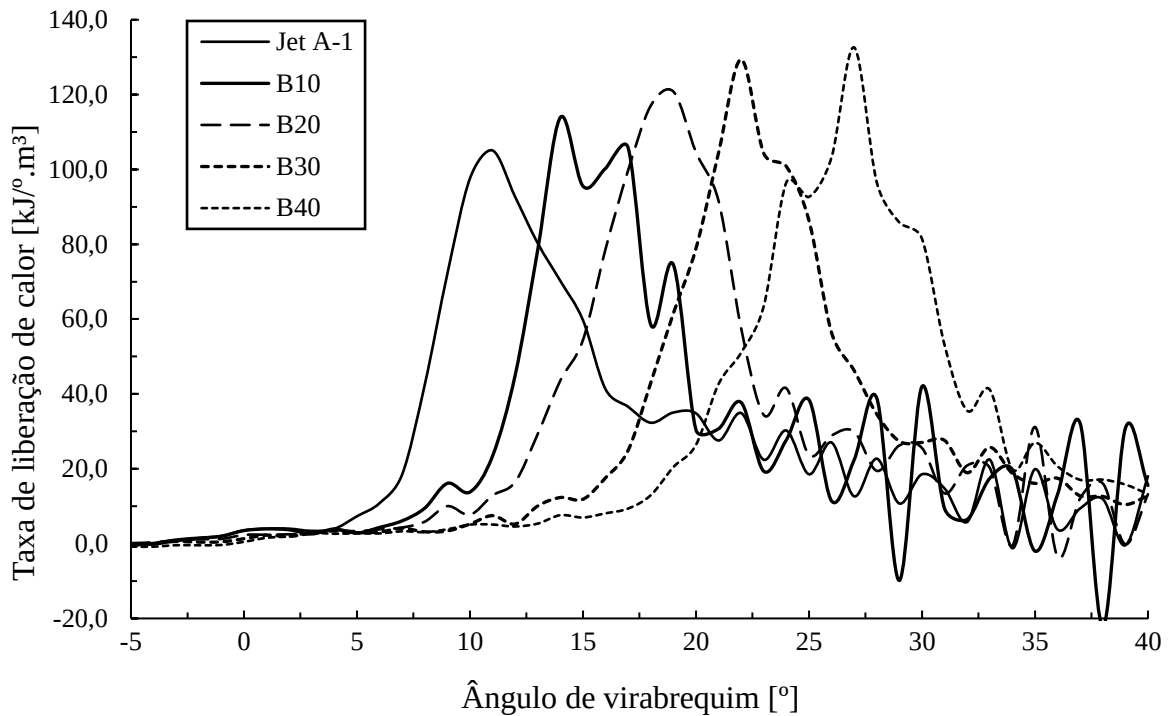
Fonte: Autor.

Figura 13 - Taxa de liberação de calor a 2000 W



Fonte: Autor.

Figura 14 - Taxa de liberação de calor a 2500 W



Fonte: Autor.

Os perfis de taxa de liberação de energia em motores de ignição por compressão tipicamente apresentam dois valores de máximos. O primeiro é observado durante a fase de combustão pré-misturada resultante da velocidade das reações químicas provenientes da queima da mistura ar-combustível formada durante o atraso de ignição. Já o segundo surge durante a fase de combustão controlada por mistura e é diretamente influenciado pela duração da injeção de combustível (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016, p. 222).

Os diagramas de taxa de liberação de calor vêm para complementar os achados mencionados nas seções anteriores. A análise dos dados contidos nos diagramas, para as três condições de carga, novamente evidenciou que com o aumento da concentração de ABE presente nos combustíveis, o atraso de ignição foi prolongado, posto que as curvas de taxa liberação de calor também se apresentam com um deslocamento progressivo para direita. De fácil identificação, os valores máximos de taxa de liberação de calor durante a fase de combustão pré-misturada também aumentaram com acréscimo de ABE (Tabela 9). Isto, por sua vez, pode ser justificado como consequência do aumento de consumo específico de combustível (Figura 18) e da diminuição do número de cetano, que leva ao aumento do atraso de ignição. Logo, há uma maior quantidade de mistura ar-combustível formada neste período que, na fase seguinte, entra em combustão produzindo altas taxas de calor. Além disso, apesar do butanol

possuir um baixo número de cetano, seu poder calorífico é relativamente alto, contribuindo para maior liberação de calor.

Tabela 9 – Valores máximos de taxa de liberação de calor

Taxa de liberação de calor [kJ/°.m³]			
Carga aplicada ao motor			
Misturas	1500 W	2000 W	2500 W
Jet A-1	98,55	102,79	105,06
B10	85,49	90,76	113,91
B20	98,11	101,81	120,81
B30	116,51	120,49	129,40
B40	118,44	128,27	132,61

Fonte: Autor.

Quando os diagramas são analisados individualmente, nota-se que a variação da velocidade de queima dos combustíveis no início da fase pré-misturada difere de um combustível para o outro. Os combustíveis com maiores concentrações de mistura ABE queimaram de forma mais lenta ao serem verificadas inclinações menores nas curvas, pelo menos momentaneamente. Supõe-se que esse processo de combustão mais lento venha de menores valores de pressão e temperatura pelo seu desenvolvimento no curso de expansão do ciclo, diminuindo o potencial de ignição das regiões vizinhas dentro da câmara de combustão. Com velocidades menores de combustão é natural que a duração desta fase também aumente.

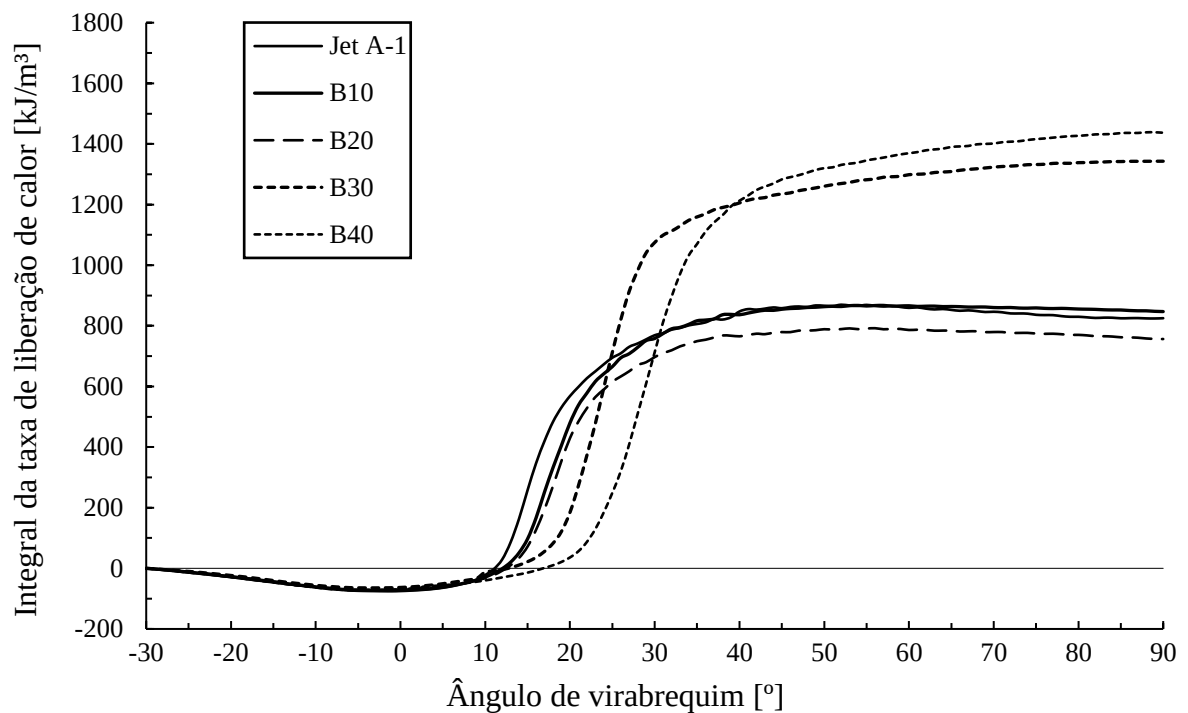
Sobre a fase de combustão controlada por mistura, pode-se argumentar que diante do aumento da duração da injeção para atender ao incremento de carga, a quantidade de combustível injetado também aumentou, ocasionando um acréscimo em sua magnitude e na duração da liberação de energia nessa fase específica. O aumento de carga também proporcionou a redução do atraso de ignição e menor duração da fase de pré-mistura, reflexo de maiores velocidades de queima proporcionadas por um ambiente com temperaturas mais altas. Ainda que a duração das fases de atraso de ignição e pré-mistura tenham diminuído, a duração total da combustão foi maior com o aumento de carga devida a fase de combustão controlada por mistura.

4.4 INTEGRAL DA TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR

As curvas integrais da taxa de liberação de calor representam a liberação incremental de calor ao longo do processo de combustão. Por meio delas, a identificação do início e término da combustão permiti-se mediante a definição de um parâmetro para o fim da mesma. As

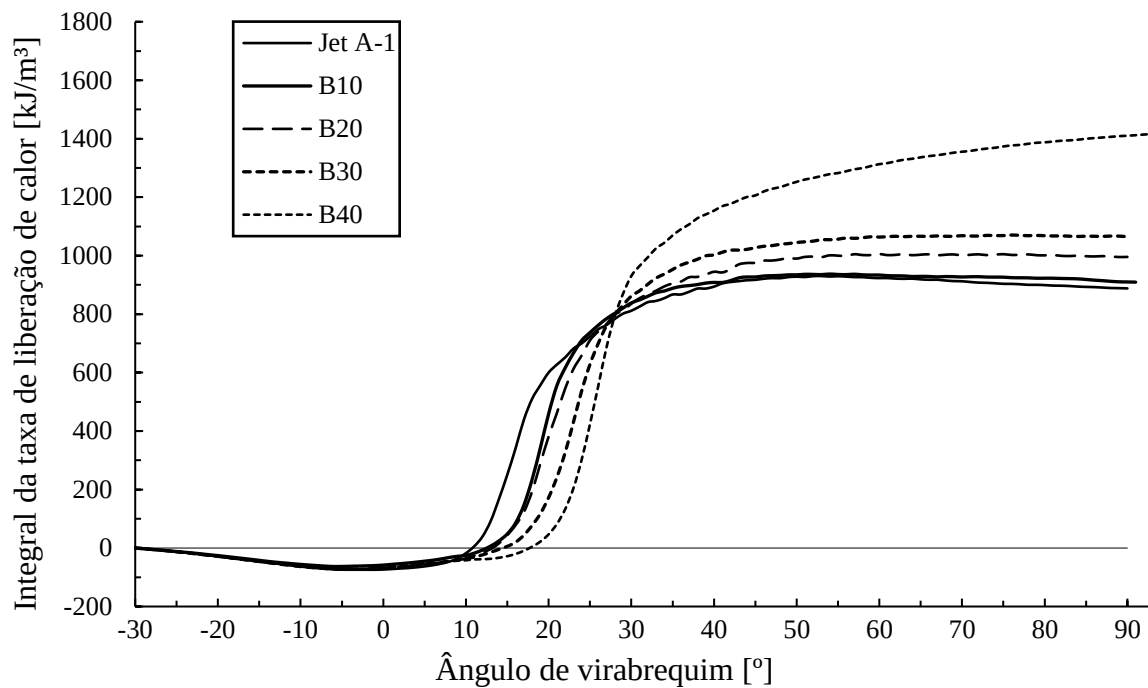
Figuras 15 a 17 ilustram os diagramas obtidos por meio do sistema de aquisição de dados AVL IndiCon para as curvas integrais da liberação de calor. Os diagramas abrangem a faixa de -30° a 90° , conforme estabelecido pelo conjunto original de cálculos do “software”. Adicionalmente, foi incorporada uma linha indicativa representando o eixo x ($y=0$), a qual se configura como uma referência para auxiliar a análise dos dados.

Figuar 15 - Integral da taxa de liberação de calor a 1500 W



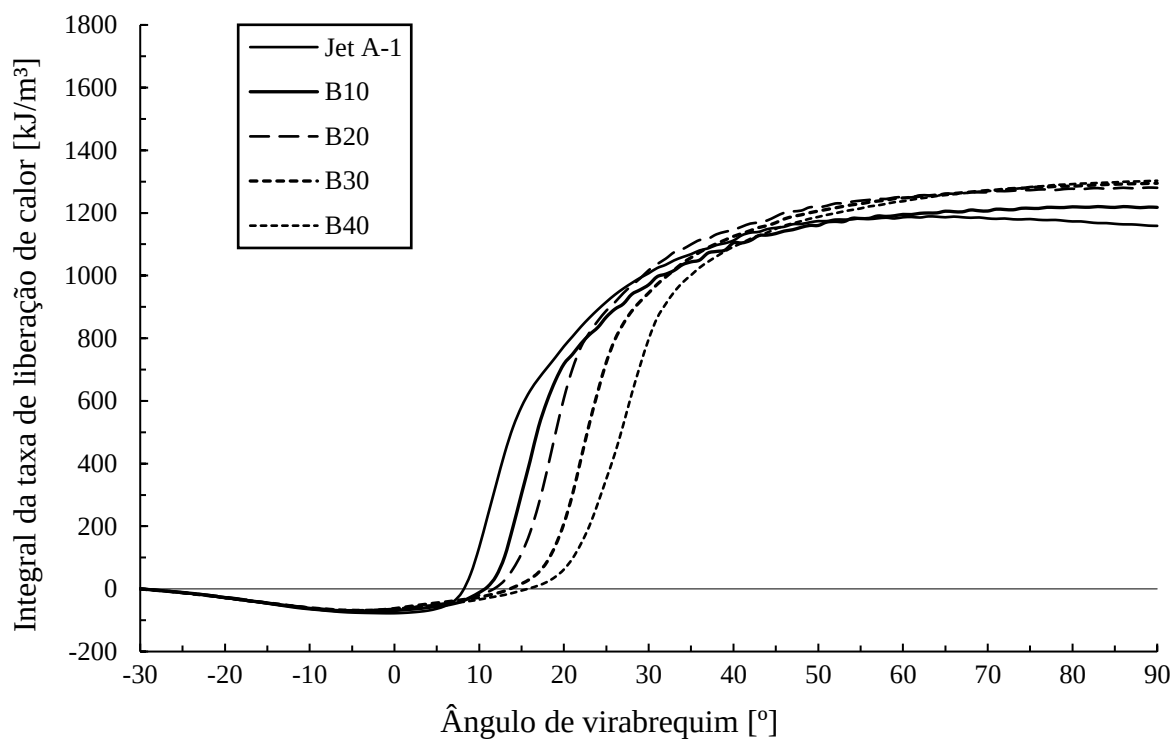
Fonte: Autor.

Figura 16 - Integral da taxa de liberação de calor a 2000 W



Fonte: Autor.

Figura 17 - Integral da taxa de liberação de calor a 2500 W



Fonte: Autor.

Ao observar os diagramas, suas curvas inicialmente demonstram uma tendência negativa. Este fato corresponde ao efeito da injeção de combustível na câmara de combustão, absorvendo calor dos gases contidos no cilindro para o consequente processo de vaporização. Este fenômeno contribui para a homogeneização da mistura ar-combustível. O instante em que cada uma das curvas atinge seu ponto mínimo e inicia sua ascensão caracteriza o início da combustão no ciclo Diesel, entretanto tais diagramas não são adequados para observação do momento de início da combustão. Através deles, a velocidade das reações no início da fase pré-misturada e o total de energia liberada durante a combustão são mais fáceis de serem distintas.

O comportamento com relação à velocidade das reações observado nos diagramas de integral da taxa de liberação de calor corrobora o que foi discutido na seção anterior. Para as três condições de carga, quando são avaliadas as velocidades de início da combustão dos combustíveis entre si, foram percebidas diferenças. O combustível Jet A-1 se apresentou com a maior velocidade de reação e, em seguida, os combustíveis B10, B20, B30 e B40, exatamente nesta ordem. É simples verificar isso ao observar as curvas quando estas cruzam o eixo x, uma vez que a reta tangente a cada uma delas tende a diminuir sua inclinação neste ponto. Nestes diagramas também é visível o deslocamento das curvas para a direita pelo aumento do atraso de ignição com o acréscimo de mistura ABE, sendo que para um aumento de carga, este mesmo parâmetro tende a diminuir.

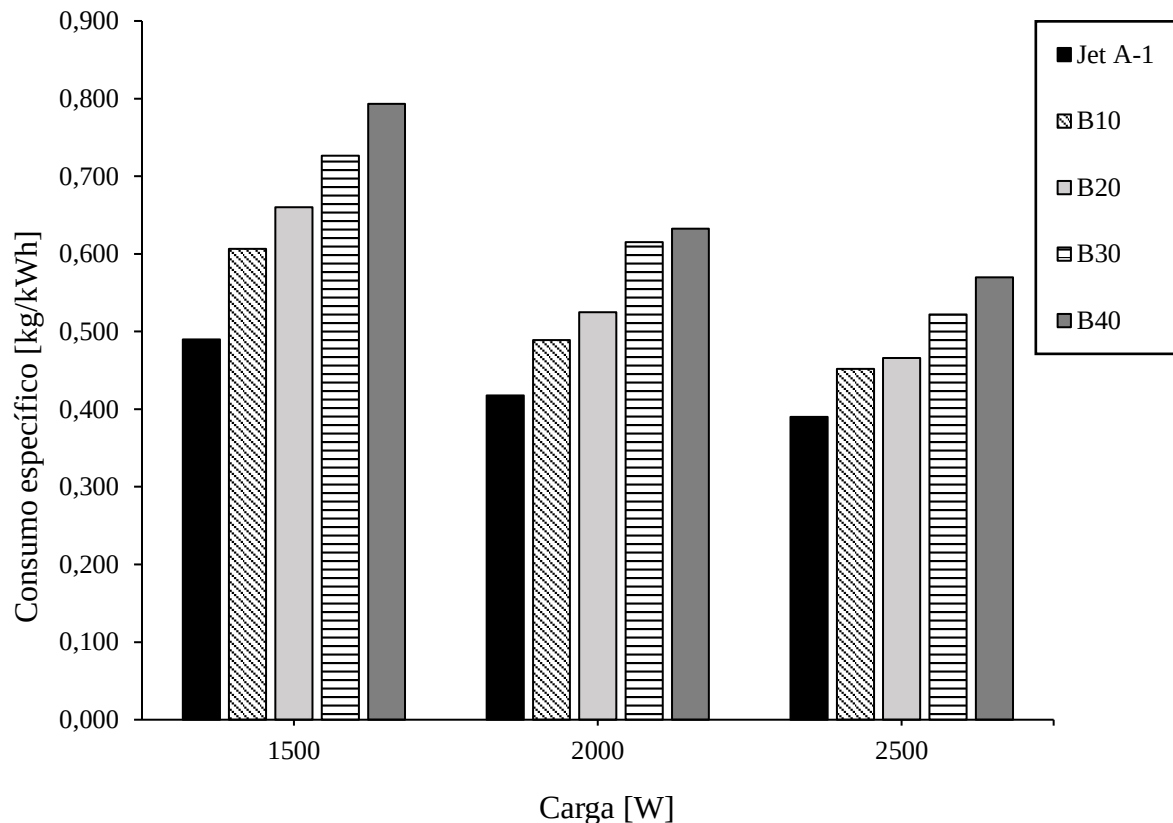
Quanto ao total de energia liberada durante a combustão, para a carga aplicada de 1500 W, a mistura B20 resultou na menor liberação de calor. Os maiores valores de liberação de energia ficaram a cargo da mistura B40 e depois B30. Já o combustível Jet A-1 e a mistura B10 apresentaram valores intermediários e muito semelhantes entre si. Nas cargas de 2000 W e 2500 W, Jet A-1 e B10 reproduziram valores sensivelmente próximos, contudo as misturas B20, B30 e B40 liberaram quantidades maiores de calor. Sob esta perspectiva, vê-se que as maiores concentrações de biocombustíveis proporcionaram maiores liberações de calor, o que é interessante em termos de produção de energia. Na próxima seção, será discutido o quão bem essas quantidades de energias foram aproveitadas.

4.5 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL

Parâmetro relevante para avaliação do desempenho de combustíveis em motores, o consumo específico de combustível pode ser entendido como uma medida da eficiência de conversão da energia química do combustível em trabalho produzido pelo motor, em outras palavras, a relação entre fluxo mássico de combustível e a potência de saída no eixo do motor.

Embora combustíveis que liberem mais calor possam, teoricamente, proporcionar mais potência, é importante avaliar também a eficiência na transformação desse calor em trabalho útil no motor. Assim, a Figura 18 apresenta o diagrama dos valores de consumo específico em função da condição de carga.

Figura 18 - Consumo específico sob diferentes condições de ensaio



Fonte: Autor.

Na análise dos ensaios submetidos a carga de 1500 W, o Jet A-1 consumiu a menor quantidade de combustível, e à medida que a concentração de biocombustíveis presente nas misturas se tornava maior, valores mais altos de consumo específico foram observados. Esta análise também é válida para as cargas de 2000 e 2500 W, como demonstra o diagrama.

Valores maiores de consumos específicos estão associados às maiores concentrações de biocombustíveis em razão do seu menor poder calorífico e do aumento do atraso de ignição. Com o aumento dos atrasos de ignição, menores valores de picos de pressão foram observados nos diagramas de pressão, resultando em menor geração de potência. Entretanto, como a carga aplicada impõe uma solicitação constante de potência, mais combustível precisa ser consumido a fim de manter tal condição. Logo, apesar dos elevados níveis de calor liberados notados nos

diagramas de taxa de liberação de calor, parte desse calor não é transformado em trabalho útil, mas provavelmente transferido ao meio em razão das altas temperaturas dos gases de exaustão constatadas. Portanto, pode-se alegar que os efeitos da concentração excedente de mistura ABE também repercutiram no consumo de combustível.

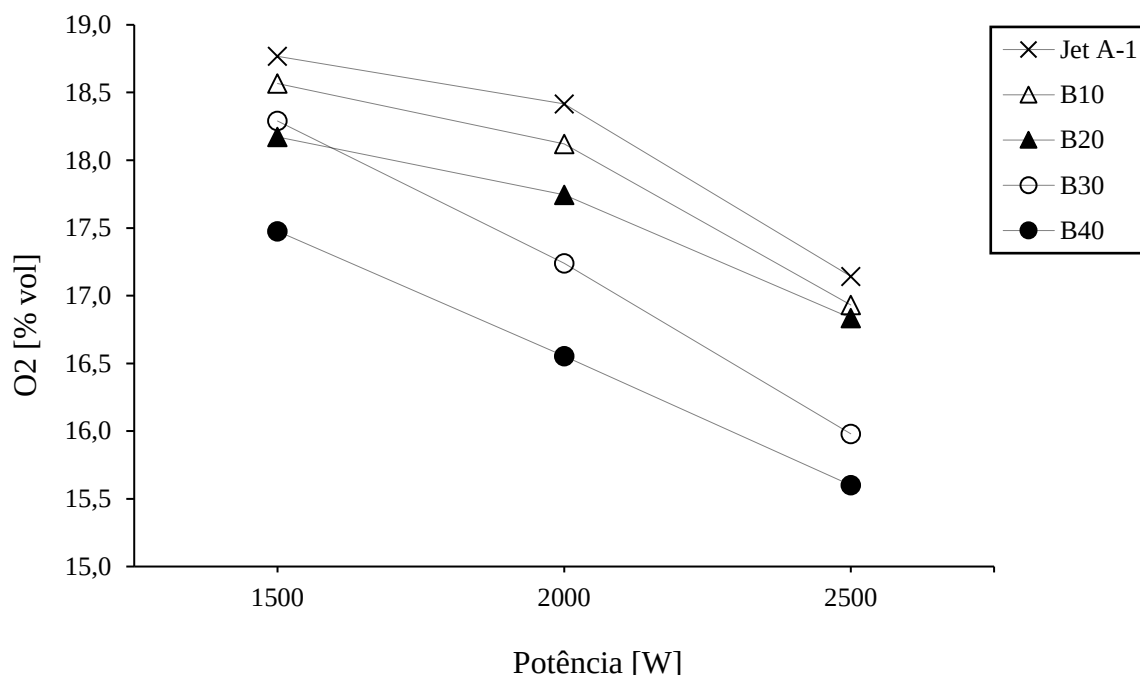
Outra constatação a partir do diagrama diz respeito aos desempenhos dos combustíveis quanto à variação de carga. Para cargas menores, o consumo específico foi mais elevado, mesmo para valores menores de consumo mássico. Esta conduta se mostra coerente, porquanto o motor não se encontrar operando em sua potência nominal de trabalho de 3 kW. Por pressuposto, conforme a carga aplicada se aproxima da potência nominal, o consumo mássico aumenta e o consumo específico diminui, visto que o rendimento do motor se altera com o regime de funcionamento. Deste modo, na carga de 2500 W, mais trabalho útil é entregue pelo motor se comparado com os ensaios realizados para cargas inferiores.

4.6 EMISSÕES DE GASES

Os diagramas desta seção foram elaborados com base nos resultados advindos do “software” SoftGas em conjunto com analisador de gases TM 131. As Figuras 19 a 23 apresentam, respectivamente, os níveis emissivos dos gases O₂, CO₂, CO, HC (hidrocarbonetos não queimados) e NO_x em função da carga aplicada ao motor.

4.6.1 Emissões de O₂

Figura 19 - Variação de emissão de O₂ em função da potência



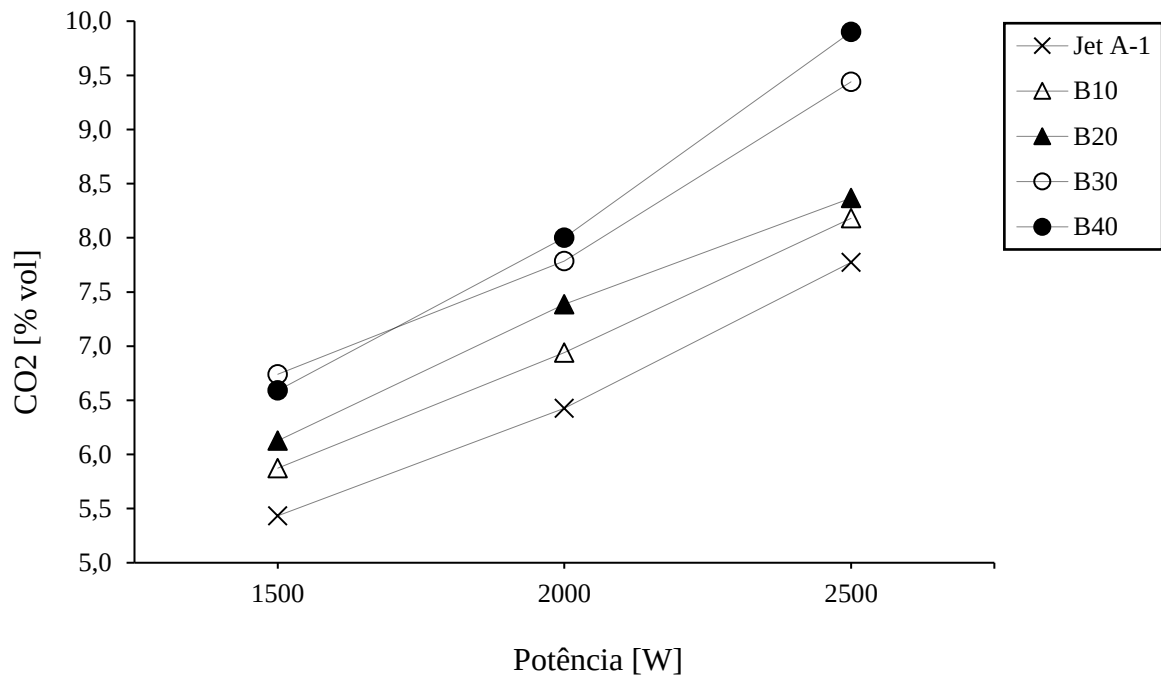
Fonte: Autor.

No diagrama da Figura 19, observa-se a diminuição do volume de O₂ nos gases de escape em correlação direta com o aumento da potência exercida sobre o motor. Tal comportamento atende às expectativas, considerando que a potência é obtida através da oxidação do combustível durante sua queima e que a quantidade de combustível injetado no ciclo passa a ser maior com o acréscimo de carga, implicando, portanto, na necessidade de maior consumo de oxigênio admitido para sua completa combustão. Correlações também podem ser feitas sobre a concentração de biocombustíveis e a emissão de O₂, visto que com exceção do Jet A-1, os demais combustíveis presentes na mistura são ditos oxigenados. De modo geral, o nível emissivo de oxigênio nas amostras de gases de escape foi reduzido com o aumento da proporção de biocombustíveis, o que a princípio indicaria uma combustão mais completa; No entanto, é importante destacar que, devido ao baixo número de cetano dos biocombustíveis e ao consequente maior atraso na ignição, a vazão mássica de combustível se torna elevada. Isso ocorre porque a bomba injetora fornece uma quantidade maior de combustível para atender às demandas de carga mais altas. Como resultado, há a queima de misturas ricas, que consomem mais oxigênio que as misturas ar-combustível estabelecidas na

combustão do Jet A-1. Conforme será apresentado posteriormente, sob essas condições, os níveis de emissão de CO e HC se elevaram.

4.6.2 Emissões de CO₂

Figura 20 - Variação de emissão de CO₂ em função da potência

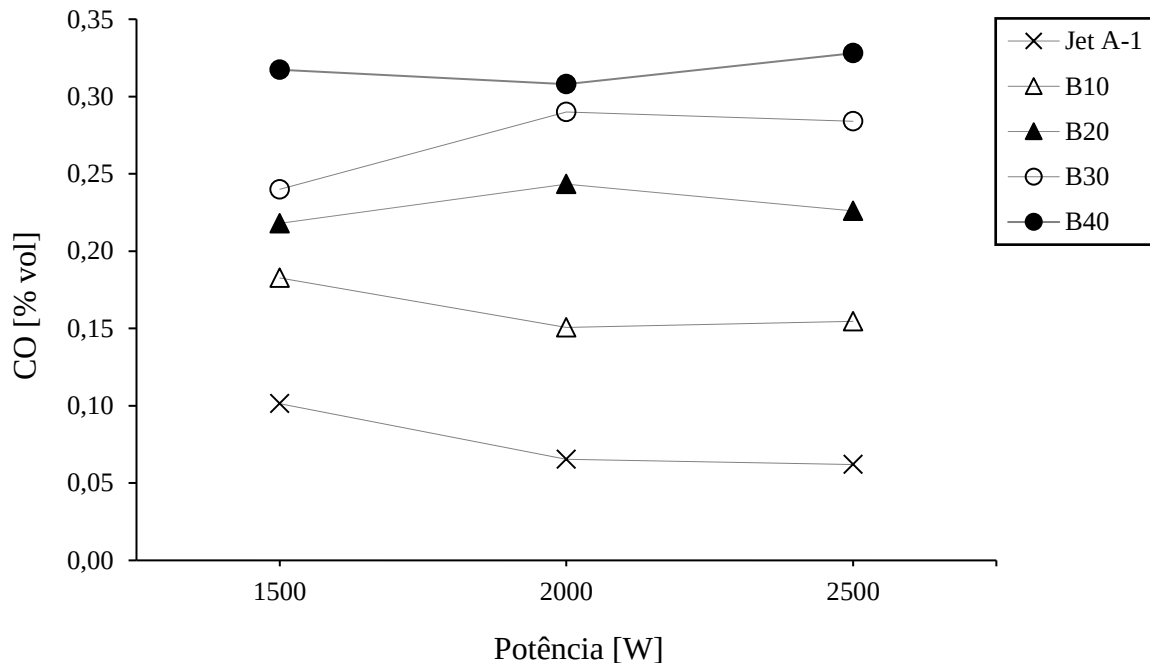


Fonte: Autor.

As emissões de CO₂ ilustradas na Figura 20 acompanham a variação de carga aplicada. Durante a combustão, o carbono encontrado na estrutura molecular dos combustíveis reage com o O₂, levando à formação de CO₂ e vapor de água, juntamente com outros subprodutos menores. Logo, para um aumento de carga, há maior injeção de combustível e consumo de O₂; como consequência, mais CO₂ é formado. Sobre as emissões de CO₂ em relação ao percentual de biocombustíveis, estas se mostraram crescentes à medida que o percentual de biocombustíveis foi elevado. Deve ser apontado também que, para a carga de 2500 W, os combustíveis B30 e B40 emitiram níveis significativos de CO₂ em relação aos outros. Apesar do maior atraso de ignição determinado pelas misturas com maiores teores de biocombustíveis sempre oxigenados, sua combustão tende a conduzir à oxidação de grande parte do carbono a dióxido de carbono e maior emissão deste gás.

4.6.3 Emissões de CO

Figura 21 - Variação de emissão de CO em função da potência

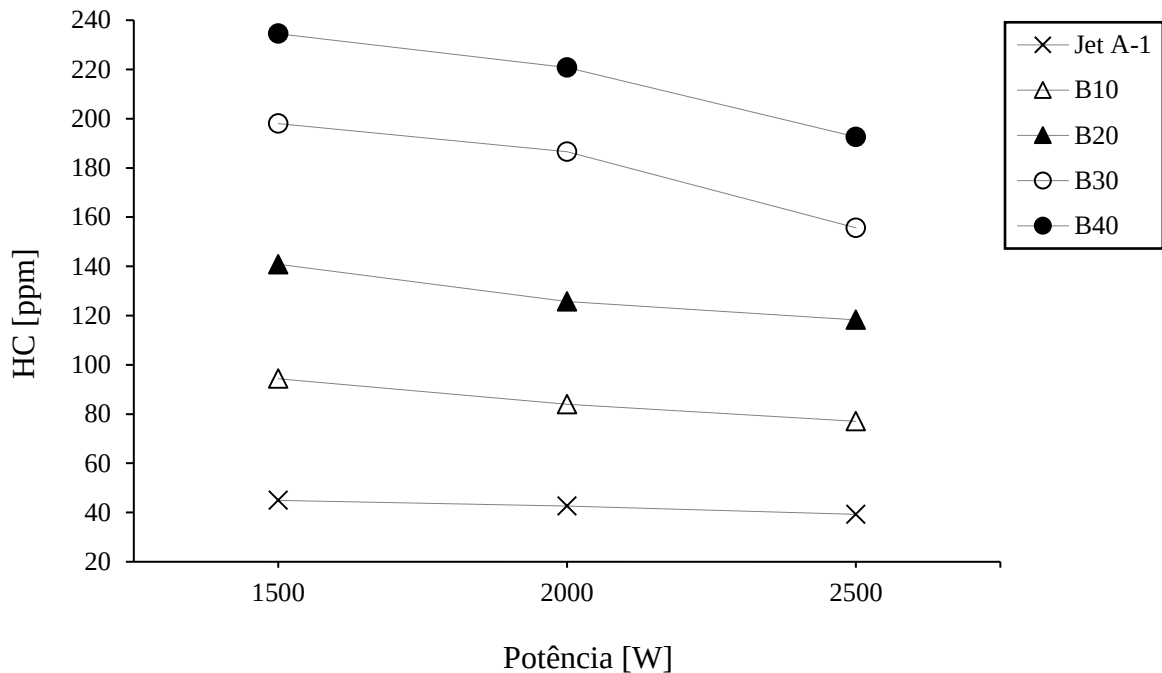


Fonte: Autor.

O CO é gerado em um motor quando não há oxigênio suficiente para converter todo o carbono em CO₂, consequência de uma combustão incompleta em que parte do combustível não é queimado totalmente e termina como CO. Como motores de ignição por compressão operam naturalmente em relações ar-combustível pobres, a probabilidade de combustão completa é alta e as emissões de CO são pequenas. Apesar das baixas emissões de CO, ao analisar a Figura 21 compreende-se que as mudanças nas concentrações de biocombustíveis influenciaram os volumes percentuais emitidos de CO. Maiores níveis de emissões de CO foram verificados conforme a concentração de biocombustíveis foi elevada. Ao aumentar a concentração de biocombustíveis, a fração de mistura ABE também se eleva, diminuindo o número de cetano da mistura na totalidade e induzindo a um período de atraso de ignição maior. Como consequência, a combustão se inicia mais tarde durante o curso de expansão. Em virtude de condições inadequadas de pressão e temperatura durante a queima dos combustíveis, o processo de combustão resultante ocorre de modo incompleto, levando a uma maior presença de CO nas amostras de gases de exaustão. Quanto aos efeitos da variação de carga sobre as emissões de CO, pouco pode ser argumentado, posto que as variações não foram significativas.

4.6.4 Emissões de HC

Figura 22 - Variação de emissão de HC em função da potência



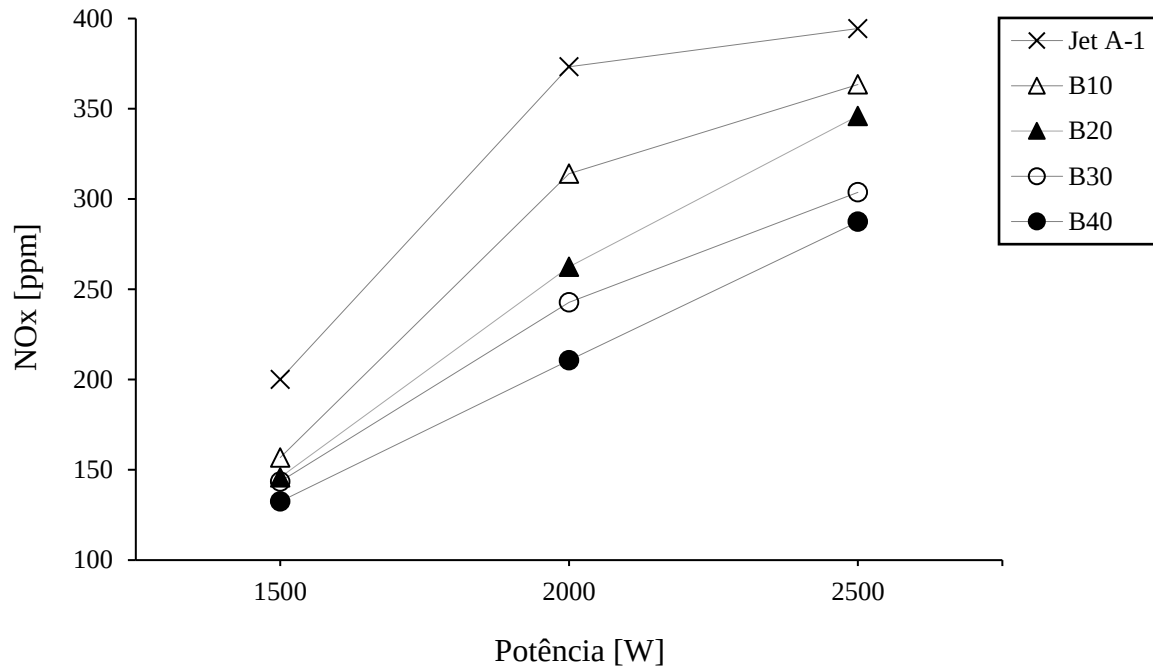
Fonte: Autor.

Analisando o diagrama da Figura 22, percebe-se que o aumento na concentração de biocombustíveis resultou em maiores emissões de HC. As fontes dessas emissões de HC são variadas, mas têm sua origem principalmente nos hidrocarbonetos provenientes de combustão parcial, recombinada ou não queimada (KASAB; STRZELEC, 2020, p. 33). As emissões de CO e HC estão relacionadas, uma vez que ambas são majoritariamente formadas devido à ocorrência de combustão incompleta. Por conseguinte, o raciocínio aplicado na seção anterior pode ser estendido, visto que a diminuição da temperatura no interior da câmara ao longo do curso de expansão conduz a uma combustão incompleta. Consequentemente, em um ambiente com condições menos favoráveis para a queima, ou seja, com temperaturas menores, foi observado um aumento na concentração de HC nas amostras de gases coletadas.

Ao aplicar variações de carga ao motor, de 1500 W para 2000 W, uma pequena diminuição da emissão de HC foi constatada. Esta redução pode ser atribuída à diminuição do atraso de ignição que favorece a realização do processo de combustão em pressões e temperaturas maiores, melhorando relativamente a queima dos combustíveis.

4.6.5 Emissões de NO_x

Figura 23 - Variação de emissão de NO_x em função da potência



Fonte: Autor.

Estão incluídos como NO_x o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). Destes, o NO é a espécie predominantemente produzida durante a combustão. Tem-se conhecimento também que as reações de formação dos NO_x, são influenciadas pela temperatura, disponibilidade de oxigênio, diluentes e tempo de reação. Se qualquer um ou a combinação destes for alta, a emissão de NO_x será alta (SUBRAMANIAN, 2018, p. 175). Isto posto, pelo diagrama da Figura 23 pode-se verificar que à medida que a carga aplicada ao motor aumentou, foram obtidos maiores níveis emissivos de NO_x. Correlacionando este diagrama com os diagramas de taxa de liberação de calor, é possível argumentar que as maiores taxas de liberação de calor observadas sob condições mais altas de carga tenham, até certo ponto, refletido em maiores temperaturas de combustão e induzido a maiores emissões de NO_x. Em consonância com os dados da Figura 23, têm-se os resultados apresentados na Figura 19, pois um maior consumo de oxigênio incide também na formação de mais NO_x.

Outro comportamento observado diz respeito à diminuição da emissão de NO_x para aumentos nas concentrações de biocombustíveis. Para compreender melhor tais ocorrências é preciso correlacionar este diagrama com os resultados dos diagramas de pressão no interior da câmara de combustão. Como já mencionado, a injeção tardia de combustível e o baixo número de cetano conduziram ao prolongamento do atraso de ignição, culminando em um início de

combustão também tardio observado ao longo do curso de expansão, o que resultou em valores máximos de pressão proporcionalmente menores.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi avaliado o processo de combustão de uma mistura de biodiesel, solventes ABE (acetona, butanol e etanol) e éter dietílico adicionados em concentrações de 10, 20, 30 e 40% ao combustível de aviação Jet A-1. A partir de ensaios experimentais, foi possível analisar os diagramas de pressão no interior da câmara de combustão, taxa de liberação de calor, integral da taxa de liberação de calor, consumo específico, atraso de ignição e as emissões de O_2 , CO_2 , CO , HC e NO_x quando submetidos às cargas de 1500 W, 2000 W e 2500 W. Assim, os resultados dos experimentos permitem expressar as seguintes conclusões:

- O motor apresentou funcionamento irregular para os ensaios com B40 e B50, inviabilizando a análise dos dados do último. Acredita-se que caso fosse possível o ajuste do ponto de injeção, isto poderia ter sido evitado, viabilizando uma otimização na queima.
- O ponto de injeção tardio induziu a altos atrasos de ignição.
- A fração de mistura ABE presente teve um forte efeito sobre o processo de combustão, influenciando também o aumento do atraso de ignição.
- O aumento da fração de ABE incidiu sobre o número de cetano da mistura, reduzindo seu valor e prejudicando as suas propriedades de autoignição.
- Foram constatados decréscimos dos valores máximos de pressão com o aumento da fração de ABE, em função de um início de combustão tardio.
- A velocidade das reações durante a fase de combustão pré-misturada diminuiu com o acréscimo de mistura ABE.
- Apesar do aumento da liberação de energia, o trabalho útil produzido durante o ciclo diminuiu, visto que maiores valores de consumo específico foram observados para maiores concentrações de biocombustíveis.
- Houve diminuição nas emissões de O_2 e aumento nas emissões CO_2 à medida que a concentração de combustíveis oxigenados foi elevada.
- Foi constatado aumento nos níveis de CO , HC e diminuição no nível de NO_x , consequência de condições de pressão e temperatura inadequadas durante a combustão.
- O aumento de carga resultou em menores valores de atraso de ignição e consumo específico, proporcionando maiores taxas de liberação de calor e picos de pressão e melhor eficiência de combustão para todos os ensaios.

- O Jet A-1, quando isento de biocombustíveis, apresentou os melhores resultados, contudo o combustível B10 obteve resultados semelhantes, evidenciando seu potencial para estudos futuros.

6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Dado que o intuito desta pesquisa seja viabilizar o uso de biocombustíveis oxigenados no setor de aviação promovendo a sua descabornização, torna-se interessante avaliar as propriedades de combustão e os níveis de poluentes emitidos com o emprego do combustível em questão em uma turbina aeronáutica ou protótipo em escala, como os utilizados para testes em aeromodelos. Assim, resultados mais assertivos poderiam ser alcançados.

Sugere-se também que, caso novas investigações sejam realizadas em motores de ignição por compressão, os ensaios sejam feitos em bancadas instrumentalizadas mais versáteis, havendo a possibilidade do ajuste adequado do ponto de injeção de combustível. Isto não só melhora o processo de combustão como também poderia abrir novas possibilidades de estudo quanto ao comportamento das propriedades de combustão em função de variações do tempo de injeção, bem como do atraso de ignição.

Como forma de melhorar o número de cetano final da mistura, modificações também se mostram necessárias nas concentrações de biocombustíveis. Mais especificamente, seria interessante reduzir a fração de mistura ABE para não haver prejuízo às propriedades de autoignição do combustível, e/ou aumentar com cautela a fração de éter dietílico, dado que ele possui um número de cetano bastante elevado. Essas modificações muito provavelmente refletiriam em menores atrasos de ignição e, conseqüentemente, em maiores picos de pressão.

Finalmente, seria pertinente o desenvolvimento de ensaios que permitam uma caracterização mais profunda das misturas obtidas como análises do ponto de congelamento, viscosidade, curvas de destilação, termogravimetria, entre outros. Estas análises contribuiriam para compreensão das propriedades finais do combustível, bem como para a avaliação da necessidade de inserção de novos componentes, posto que os padrões de qualidade para combustíveis de aviação são rigorosamente elevados.

REFERÊNCIAS

- ABDEHAGH, N.; TEZEL, F. H.; THIBAUT, J. Separation techniques in butanol production: Challenges and developments. **Biomass and Bioenergy**, v. 60, p. 222–246, jan. 2014.
- AGARWAL, A. K.; DAS, L. M. Biodiesel Development and Characterization for Use as a Fuel in Compression Ignition Engines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 123, n. 2, p. 440–447, abr. 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biocombustíveis de aviação**. 2020. Disponível em: < <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis-de-aviacao>>. Acesso em: 11 out. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel dinâmico de produtores de biodiesel**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel>>. Acesso em: 27 fev. 2023.
- AL-ATTAB, K. et al. Biodiesel production from waste cooking oil in Yemen: a techno-economic investigation. **Biofuels**, v. 8, n. 1, p. 17–27, jan. 2017.
- ALI, A. H. H.; IBRAHIM, M. N. Performance and environmental impact of a turbojet engine fueled by blends of biodiesels. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 6, p. 1253–1266, jun. 2017.
- ALI, O. M. et al. Influence of Chemical Blends on Palm Oil Methyl Esters' Cold Flow Properties and Fuel Characteristics. **Energies**, v. 7, n. 7, p. 4364–4380, jul. 2014.
- ALI, O. M. et al. Analysis of blended fuel properties and cycle-to-cycle variation in a diesel engine with a diethyl ether additive. **Energy Conversion and Management**, v. 108, p. 511–519, 15 jan. 2016.
- ÁLVAREZ, J. A.; AGRAMUNT, I. C. **Motores alternativos de combustión interna**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. p. 186, 188 e 193.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1655-21**: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. West Conshohocken: ASTM, 2021.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7566-18**: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. West Conshohocken: ASTM, 2018.
- ATADASHI, I. M. et al. Refining technologies for the purification of crude biodiesel. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 4239–4251, dez. 2011.
- BANN, S. J. et al. The costs of production of alternative jet fuel: A harmonized stochastic assessment. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 179–187, mar. 2017.
- BAK, Debabrata; MURUGAN, S. Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of Karanja methyl ester (KME)–biogas fueled dual fuel diesel engine, **Fuel**, v. 164, p. 286–296, 2016.
- BASHA, S. A.; GOPAL, K. R.; JEBARAJ, S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p.

1628–1634, ago. 2009.

BAUEN, A. et al. Sustainable Aviation Fuels: Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation. **Johnson Matthey Technology Review**, v. 64, p. 263–278, 2020.

BLAKEY, S.; RYE, L.; WILSON, C. W. Aviation gas turbine alternative fuels: A review. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 33, n. 2, p. 2863–2885, jan. 2011.

BOTERO, M. L. et al. Synergistic combustion of droplets of ethanol, diesel and biodiesel mixtures. **Fuel**, v. 94, p. 342–347, abr. 2012.

BRANCO. **Manual de serviço - Motores 2 Tempos e 4 Tempos Diesel**. Branco Produtos de Força e Energia. 2010.

BRANCO. **BD-4000**. Disponível em: <https://www.branco.com.br/la/pt_br/catalogo-de-produtos/geradores/bd4000-e.html>. Acesso em: 13 jan. 2023.

BRANDON, G.; ZHANG, K.; RUTHERFORD, D. **CO2 emissions from commercial aviation, 2018**.

BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy 2019**. Londres: BP p.l.c., 2019. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2022.

CATALUÑA, R. et al. Production process of di-amyl ether and its use as an additive in the formulation of aviation fuels. **Fuel**, v. 228, p. 226–233, 15 set. 2018.

CHANDRAN, Davannendran. Compatibility of diesel engine materials with biodiesel fuel. **Renewable Energy**, v. 147, p. 89–99, 2020.

CHANG, Y.-C. et al. Use of water containing acetone–butanol–ethanol for NO_x-PM (nitrogen oxide-particulate matter) trade-off in the diesel engine fueled with biodiesel. **Energy**, v. 64, p. 678–687, 1 jan. 2014.

CHIARAMONTI, D. Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization. **Energy Procedia**, v. 158, p. 1202–1207, fev. 2019.

CHUCK, C. J.; DONNELLY, J. The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene. **Applied Energy**, v. 118, p. 83–91, abr. 2014.

CORPORAN, E. et al. Impacts of Biodiesel on Pollutant Emissions of a JP-8-Fueled Turbine Engine. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 55, n. 7, p. 940–949, jul. 2005.

CORPORAN, E. et al. Chemical, Thermal Stability, Seal Swell, and Emissions Studies of Alternative Jet Fuels. **Energy & Fuels**, v. 25, n. 3, p. 955–966, 17 mar. 2011.

CRUZ, M. R. M. et al. A comprehensive survey of flexibility options for supporting the low-carbon energy future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 338–353, 1 dez. 2018.

DAGAUT, P.; CATHONNET, M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 32, n. 1, p. 48–92, 2006.

- DWIVEDI, G.; SHARMA, M. P. Impact of cold flow properties of biodiesel on engine performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 650–656, mar. 2014.
- DZIEGIELEWSKI, W. et al. BUTANOL/BIOBUTANOL AS A COMPONENT OF AN AVIATION AND DIESEL FUEL. **Journal of KONES. Powertrain and Transport**, v. 21, n. 2, p. 69–75, 23 maio 2014.
- EASA; EEA; EUROCONTROL. **European Aviation Environmental Report 2019**. Colônia, Alemanha: EASA, 2019.
- EDWARDS, T. “Kerosene” Fuels for Aerospace Propulsion - Composition and Properties. **38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit**, p. 3874, 7 jul. 2002.
- EDWARDS, T. Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003. **Journal of Propulsion and Power**, v. 19, n. 6, p. 1089–1107, nov. 2003.
- EDWARDS, T.; MAURICE, L. Q. Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels. **Journal of Propulsion and Power**, v. 17, n. 2, p. 461–466, mar. 2001.
- ENAGI, I. I.; AL-ATTAB, K. A.; ZAINAL, Z. A. Liquid biofuels utilization for gas turbines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 43–55, jul. 2018.
- ERGEN, Gokhan. Comprehensive analysis of the effects of alternative fuels on diesel engine performance combustion and exhaust emissions: Role of biodiesel, diethyl ether, and EGR. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 47, p. 102307, 2024.
- FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. **Internal Combustion Engines**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. p. 215–217 e 222.
- GARDY, J. et al. A magnetically separable SO₄/Fe-Al-TiO₂ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 234, p. 268–278, 15 out. 2018.
- GASPAR, R. M. P.; SOUSA, J. M. M. Impact of alternative fuels on the operational and environmental performance of a small turboprop engine. **Energy Conversion and Management**, v. 130, p. 81–90, dez. 2016.
- GAWRON, B. et al. Exhaust toxicity evaluation in a gas turbine engine fueled by aviation fuel containing synthesized hydrocarbons. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 92, n. 1, p. 60–66, 6 jan. 2020.
- GRACIA-SALCEDO, C. M.; MCBRIDE, B. J.; BRABBS, T. A. Experimental verification of the thermodynamic properties of a Jet-A fuel. **Prepr. Pap., Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.; (United States)**, v. 33:4, 1 jan. 1988.
- GRAHAM, J. L. et al. Swelling of Nitrile Rubber by Selected Aromatics Blended in a Synthetic Jet Fuel. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 2, p. 759–765, 31 jan. 2006.
- GRAVER, B.; ZHANG, K.; RUTHERFORD, D. **CO₂ emissions from commercial aviation, 2018**. International Council on Clean Transportation, 2019. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercial-aviation-2018_20190918.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.
- GRIESINGER, W. **Death to the Chicago Climate Exchange (\$7.40 to a nickel per CO₂ ton, the market has spoken)**. Master Resource, 2010. Disponível em:

<<https://www.masterresource.org/chicago-climate-exchange/death-chicago-climate-exchange/>>. Acesso em: 30 nov. 2022.

GREWE, V. et al. Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 3841, 22 jun. 2021.

GUERET, C.; CATHONNET, M. **Elaboration d'un modèle cinétique pour l'oxydation du kerosene et d'hydrocarbures représentatifs**. 1989. Dissertação (Mestrado em Química) - Université d'Orléans, Orléans.

GUIBET, J. C.; FAURE-BIRCHEM, E. **Fuels and Engines: Technology, Energy, Environment**. Paris, FR: Technip, 1999.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 712–725, fev. 2015.

GUPTA, H. N. **Fundamentals of internal combustion engines**. 2. ed. Delhi: Phi Learning Private Limited, 2013. p. 260, 264 e 266.

GUPTA, K. K.; REHMAN, A.; SARVIYA, R. M. Bio-fuels for the gas turbine: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2946–2955, dez. 2010.

HAJJARI, M. et al. A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 445–464, maio 2017.

HAN, K. et al. An experimental study of the burning characteristics of acetone–butanol–ethanol and diesel blend droplets. **Energy**, v. 139, p. 853–861, nov. 2017.

HARVEY, B. G.; MEYLEMANS, H. A. The role of butanol in the development of sustainable fuel technologies. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 86, n. 1, p. 2–9, 2011.

HOEKMAN, S. K. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 143–169, jan. 2012.

HOLMGREN, J. From mill to wing: How waste materials could become the next green aviation fuel. **Hydrocarbon Processing**, v. 91, p. 37–37, 2012.

HONG, T. D. et al. A study on developing aviation biofuel for the Tropics: Production process—Experimental and theoretical evaluation of their blends with fossil kerosene. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 74, p. 124–130, 1 dez. 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Chapter 4: Strengthening and implementing the global response**. In: GLOBAL WARMING OF 1.5 °C. IPCC, 2018. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-4/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. IPCC, 2014. Disponível em: <https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Annual Review**. 2017. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2017.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2023.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Fact Sheet: TAXES & THE ENVIRONMENT**. 2022a. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet--taxes-environment/>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Fact Sheet: CORSIA**. 2022b. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---corsia/>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **IATA Forecast Predicts 8.2 Billion Air Travelers in 2037**. 2018. Disponível em: <<https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2018-press-releases/2018-10-24-02/>>. Acesso em: 16 nov. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics 2021**. Paris: IEA, 2021. 80 p. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

JEEVAHAN, J. et al. Experimental investigation of the suitability of 1-butanol blended with biodiesel as an alternative biofuel in diesel engines. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 15, p. 72–77, 2018.

JUNG, S. et al. Upgrading biogas into syngas through dry reforming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, p. 110949, jun. 2021a.

JUNG, S. et al. Biodiesels from non-catalytic transesterification of plant oils and their performances as aviation fuels. **Energy Conversion and Management**, v. 244, p. 114479, 15 set. 2021b.

KASAB, J. J.; STRZELEC, A. **Automotive emissions regulations and exhaust aftertreatment systems**. Warrendale: Sae International, 2020. p. 33

KILLOL, A. et al. Experimental studies of a diesel engine run on biodiesel n-butanol blends. **Renewable Energy**, v. 135, p. 687–700, 2019.

KIM, S. et al. Recent advances in hydrodeoxygenation of biomass-derived oxygenates over heterogeneous catalysts. **Green Chemistry**, v. 21, n. 14, p. 3715–3743, 2019.

KNOTHE, G.; RAZON, L. F. Biodiesel fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 58, p. 36–59, 2017.

KOHSE-HÖINGHAUS, K. et al. Biofuel Combustion Chemistry: From Ethanol to Biodiesel. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 49, n. 21, p. 3572–3597, 2010.

KUMAR, M.; KARMAKAR, S. Combustion characteristics of butanol, butyl butyrate, and Jet A-1 in a swirl-stabilized combustor. **Fuel**, v. 281, p. 118743, 2020.

KUMAR, M.; KARMAKAR, S.; CHONG, C. T. Investigation on combustion characteristics of acetone-butanol-ethanol/Jet A-1 mixture in a Swirl-stabilized combustor for its potential application in gas turbine engines. **Fuel**, v. 340, p. 127610, 2023.

KURJI, H. et al. Combustion characteristics of biodiesel saturated with pyrolysis oil for power generation in gas turbines. **Renewable Energy**, v. 99, p. 443–451, dez. 2016.

KUSZEWSKI, H. et al. The investigation of auto-ignition properties of 1-butanol–biodiesel blends under various temperatures conditions. **Fuel**, v. 346, 2023.

LANE, J. Ethanol and biodiesel: Dropping below the production cost of fossil fuels.

Retrieved May, v. 30, p. 2019, 2017.

LEE, D. S. et al. Aviation and global climate change in the 21st century. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 22-23, p. 3520–3537, jul. 2009.

LESTER, M. S.; BRAMSTOFT, R.; MÜNSTER, M. Analysis on Electrofuels in Future Energy Systems: A 2050 Case Study. **Energy**, v. 199, p. 117408, maio 2020.

LI, F. et al. Catalytic cracking of triglycerides with a base catalyst and modification of pyrolytic oils for production of aviation fuels. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 2, n. 6, p. 1206–1215, 2018.

LU, C. When will biofuels be economically feasible for commercial flights? Considering the difference between environmental benefits and fuel purchase costs. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 365–373, abr. 2018.

MAHMUDUL, H. M. et al. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 497–509, maio 2017.

MAIOROVA, A. I. et al. The atomization and burning of biofuels in the combustion chambers of gas turbine engines. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 891, p. 012221, 10 nov. 2017.

MARCHETTI, J. M.; MIGUEL, V. U.; ERRAZU, A. F. Possible methods for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 6, p. 1300–1311, ago. 2007.

MARTEL, C. R. Molecular weight and average composition of JP-4, JP-5, JP-8, and Jet A. **AFWAL/POSF Report**, 1988.

MAURICE, L. Q. et al. Advanced aviation fuels: a look ahead via a historical perspective. **Fuel**, v. 80, n. 5, p. 747–756, abr. 2001.

MENG, K. et al. Experimental understanding on combustion and micro-explosion characteristics of mixed droplets of aviation fuel, biodiesel and ethanol. **Journal of the Energy Institute**, v. 97, p. 169–179, 1 ago. 2021.

MIKULČIĆ, H. et al. Flexible Carbon Capture and Utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109338, out. 2019.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Comex Stat**. 2023. Disponível em: < <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>>. Acesso em: 18 mar. 2024.

MOFIJUR, M. et al. A study on the effects of promising edible and non-edible biodiesel feedstocks on engine performance and emissions production: A comparative evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 391–404, jul. 2013.

NAYAK, S. K. et al. Biodiesel vs diesel: A race for the future. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 14, p. 1453–1460, 18 jul. 2017.

NAYLOR, R. L.; HIGGINS, M. M. The political economy of biodiesel in an era of low oil prices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 695–705, set. 2017.

NGUYEN, H.; YING, S.-J. . Critical evaluation of Jet-A spray combustion using propane

chemicalkinetics in gas turbine combustion simulated by KIVA-II. **26th Joint Propulsion Conference**, p. 2439, 16 jul. 1990.

NI, Y.; SUN, Z. Recent progress on industrial fermentative production of acetone–butanol–ethanol by *Clostridium acetobutylicum* in China. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 83, n. 3, p. 415–423, jun. 2009.

NOJOUMI, H.; DINCER, I.; NATERER, G. Greenhouse gas emissions assessment of hydrogen and kerosene-fueled aircraft propulsion. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 3, p. 1363–1369, fev. 2009.

OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY. **Soya beans - OEC**. 2022. Disponível em: <<https://oec.world/en/profile/hs/soya-beans>>. Acesso em: 18 mar. 2024.

PEARLSON, M.; WOLLERSHEIM, C.; HILEMAN, J. A techno-economic review of hydroprocessed renewable esters and fatty acids for jet fuel production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 7, n. 1, p. 89–96, jan. 2013.

PRUSSI, M.; O'CONNELL, A.; LONZA, L. Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28. **Biomass and Bioenergy**, v. 130, p. 105371, nov. 2019.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. 2. ed. London: Pearson, 2014. p. 314.

RAKOPOULOS, D. C. Combustion and emissions of cottonseed oil and its bio-diesel in blends with either n-butanol or diethyl ether in HSDI diesel engine. **Fuel**, v. 105, p. 603–613, mar. 2013.

RAMADHAS, A.; JAYARAJ, S.; MURALEEDHARAN, C. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. **Fuel**, v. 84, n. 4, p. 335–340, mar. 2005.

RAO, D. C. K.; KARMAKAR, S.; SOM, S. K. Puffing and Micro-Explosion Behavior in Combustion of Butanol/Jet A-1 and Acetone-Butanol-Ethanol (A-B-E)/Jet A-1 Fuel Droplets. **Combustion Science and Technology**, v. 189, n. 10, p. 1796–1812, jun. 2017.

REHAN, M. et al. Waste to biodiesel: A preliminary assessment for Saudi Arabia. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 17–25, fev. 2018.

RIBEIRO, F. N. B. S. **Análise do processo de combustão e emissões em motores de ignição por compressão utilizando misturas de farneseno e diesel comercial e d-limoneno como aditivo**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)—Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 2021.

RIDJAN, I.; MATHIESEN, B. V.; CONNOLLY, D. Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3709–3720, jan. 2016.

ROBOTA, H. J.; ALGER, J. C.; SHAFER, L. Converting Algal Triglycerides to Diesel and HEFA Jet Fuel Fractions. **Energy & Fuels**, v. 27, n. 2, p. 985–996, fev. 2013.

ROCHELLE, D.; NAJAFI, H. A review of the effect of biodiesel on gas turbine emissions and performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 129–137, maio 2019.

SAKTHIVEL, R. et al. A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2970–2992, fev. 2018.

SALVI, B. L.; PANWAR, N. L. Biodiesel resources and production technologies – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3680–3689, ago. 2012.

SCHRIPP, T. et al. Particle emissions of two unblended alternative jet fuels in a full scale jet engine. **Fuel**, v. 256, p. 115903, nov. 2019.

SELVARAJ, Krishnamani ; THANGAVEL, Mohanraj. The experimental study on the performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine using diesel – biodiesel – diethyl ether blends. **Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects**, v. 43, n. 2, p. 145–159, 2019.

SIA, C. B. et al. Evaluation on biodiesel cold flow properties, oxidative stability and enhancement strategies: A review. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 24, p. 101514, mar. 2020.

SOUZA, A. L. R. et al. **Protocolo de kyoto e mercado de carbono: estudo exploratório das abordagens contábeis aplicadas aos créditos de carbono e o perfil de projetos de MDL no Brasil**. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 6., 2010, Niterói. Anais... Niterói: 2010. p. 5.

SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, 2017.

SRIKANTH, H. et al. Acetone and Diethyl ether: Improve cold flow properties of Dairy Washed Milkscum biodiesel. **Renewable Energy**, v. 130, p. 446–451, jan. 2019.

STARIK, A. M. et al. Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels. **International Journal of Green Energy**, v. 15, n. 3, p. 161–168, 2018.

SUBRAMANIAN, K. A. **Biofueled reciprocating internal combustion engines**. Boca Raton: Crc Press, Taylor & Francis Group, 2018. p. 172–173 e 175.

TALERO, G. et al. Experimental Methodology and Facility for the J69-Engine Performance and Emissions Evaluation Using Jet A1 and Biodiesel Blends. **Energies**, v. 12, n. 23, p. 4530, 1 jan. 2019.

TALERO, G. et al. Biodiesel substitution in a J69 aeronautic turbine engine: An experimental assessment of the effects on energy efficiency, technical performance and emissions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, p. 100746, ago. 2020.

TAMILVANAN, Ayyasamy et al. Effect of diethyl ether and ethanol as an oxygenated additive on Calophyllum inophyllum biodiesel in CI engine. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 33880–33898, 2021.

TECNOMOTOR. "TM 131 - Analisador de Gases". 2020a. Disponível em: <<https://tecnomotor.com/conheca-a-tecnomotor/produtos/inspecao/analizador-de-gas-tm131/>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

TECNOMOTOR. **Manual de instruções - Analisador de gases TM131**. 2011.

TIETENBERG, T. Cap-and-Trade: The Evolution of an Economic Idea. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 39, n. 3, p. 359–367, out. 2010.

TRANSPORT & ENVIRONMENT. **Roadmap to decarbonizing European aviation**. Bruxelas: Transport & Environment, 2018. 33 p. Disponível em:

<https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2018_10_Aviation_decarbonisation_paper_final.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2022.

UNFCCC. **Ovais Sarmad Sets Out Expectations for 2020, Highlights Business Climate Action**. UNFCCC, 2020. Disponível em: <https://unfccc.int/news/ovais-sarmad-sets-out-expectations-for-2020-highlights-business-climate-action>. Acesso em: 26 dez. 2022.

VEZA, I. et al. Effects of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) addition on HCCI-DI engine performance, combustion and emission. **Fuel**, v. 333, 126377, 2023.

WANG, A.; AUSTIN, D.; SONG, H. Investigations of thermochemical upgrading of biomass and its model compounds: Opportunities for methane utilization. **Fuel**, v. 246, p. 443–453, 15 jun. 2019.

WANG, M. et al. Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 74, p. 31–49, 1 set. 2019.

WANG, W.; LI, F.; LI, Y. Effect of biodiesel ester structure optimization on low temperature performance and oxidation stability. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 2727–2736, maio 2020.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resources**: 2016. Londres: World Energy Council, 2016. ISBN: 978-0-946121-58-8. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

YANG, J. et al. An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. **Fuel**, v. 237, p. 916–936, 1 fev. 2019.

YUSUF, N. N. A. N.; KAMARUDIN, S. K.; YAAKUB, Z. Overview on the current trends in biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 7, p. 2741–2751, jul. 2011.

ZABARNICK, S.; WHITA CRE, S. D. Aspects of Jet Fuel Oxidation. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 120, n. 3, p. 519–525, 1 jul. 1998.

ŽIVKOVIĆ, S. B. et al. Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 222–247, 1 nov. 2017.

ZSCHOCKE, A.; SCHEUERMANN, S.; ORTNER, J. **High Biofuel Blends in Aviation (HBBA)**. Lufthansa & WiWEB, 2012. 156 p. Disponível em: <https://aireg.de/wp-content/uploads/2015/03/20150327_studie.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2022.

ANEXO

		MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO		Doc. 19	
		CERTIFICADO DE VERIFICAÇÃO:		16047495	
Instrumento Medidor de Gases de Exaustão Veicular		Marca TECNOMOTOR		Executor 104	Número do Imetro 0039961-2
Dados Complementares Marca de Selagem: H107778-4 Classe de Exatidão: Classe 0 Marca de Verificação: 878034-6 Nº PEF: 0,500 Validade até: 27/11/2022 Data de Emissão: 03/06/2022		Código Serviço 0226		Valor R\$ 425,55	
		Número do Documento de Arrecadação 294103213002190042			
		CNPJ ou CPF		48.031.918/0030-69	
Nome/Razão Social UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO		Data Verificado em 31/05/2022 conforme Portaria 155/2005 sendo APROVADO			
Endereço ENGENHEIRO LUIZ EDMUNDO CARRUJO COUBE - 14-01		Agente Metrologico J. 360 - VALMIR DITOMASSO			
Bairro VARGEM LIMPA		CEP 17033-360			
Município Bauru		U.F. SP	Telefone		