

COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO: HISTÓRICA ATENÇÃO AO ARMAZENAMENTO**Fátima Menezes Bento¹****Mariane Rodrigues Lobato²****Sabrina Anderson Beker³****Emily Lamb Gross Brilhante⁴****RESUMO**

A qualidade final dos combustíveis estocados é uma das preocupações dos setores de transporte marítimo, terrestre e aéreo, especialmente por questões de segurança e econômicas. Na aviação brasileira os combustíveis utilizados nas aeronaves para o transporte de passageiros e cargas são a gasolina de aviação (AVGAS) e o querosene de aviação (QAV-A1). Os principais aspectos envolvidos na histórica atenção que os combustíveis da aviação receberam ao longo do tempo, durante o seu armazenamento, tais como a possibilidade de degradação física, química, biológica e as formas de monitoramento e controle, são apresentados. Os combustíveis de aviação apresentam composições distintas de hidrocarbonetos, refletindo nas diferentes estabilidades ao armazenamento. Neste sentido, a contaminação microbiana, principalmente do querosene de aviação, em condições inadequadas de estocagem compromete o atendimento das especificações rígidas exigidas para uso deste combustível. As vantagens e a importância da adoção de combustíveis sustentáveis para a aviação (SAF), são apresentados como uma estratégia de redução dos poluentes gasosos, com a indicação das principais rotas de produção homologadas pela ASTM. Fatores relacionados à estabilidade ao armazenamento como umidade, temperatura, oxidações, aditivação e à contaminação por microrganismos são citados. Ações de monitoramento permitem identificar se o sistema de distribuição e armazenamento de combustíveis encontra-se em condições aceitáveis ou de alerta. Considerando que os combustíveis de aviação apresentam a necessidade de homologação e atendimento às especificações válidas em qualquer parte do mundo, é fundamental o comprometimento com a qualidade desde a fabricação, armazenamento e distribuição dos combustíveis em geral.

Palavras-chave: Querosene de aviação; gasolina de aviação; estocagem; qualidade.

¹ Professora Titular e Pesquisadora da UFRGS, da RBQAV (Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis da Aviação); é coordenadora do LABBIO - Laboratório de Biodeterioração de Combustíveis e Biocombustíveis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: fatima.bento@ufrgs.br

² Bióloga com Doutorado em Microbiologia Agrícola e do Ambiente, na área de Biodeterioração de Querosene e Bioquerosene, pela UFRGS. E-mail: marianelobato88@gmail.com

³ Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia, Mestre em Microbiologia Agrícola e do Ambiente e Doutora em Biologia e Biotecnologia Aplicada; Bolsista de Pós-Doutorado do CNPq no LABBIO. E-mail: sabrinabeker@gmail.com

⁴ Acadêmica do Curso de Odontologia-UFRGS, atualmente é bolsista de Iniciação Científica - CNPq. E-mail: emilygbrilhante@gmail.com

AVIATION FUELS: HISTORICAL FOCUS ON STORAGE

ABSTRACT

The quality of stored fuels is a concern for maritime, land, and air transportation sectors, particularly regarding safety and economic factors. In Brazilian aviation, the fuels used are aviation gasoline (AVGAS) and aviation kerosene (QAV-A1), which are supplied to aircraft for transporting passengers and cargo. The objective is to outline the key aspects of historical attention to aviation fuels during storage over time, including potential physical, chemical, and biological degradation, as well as methods for monitoring and control. Aviation fuels have distinct hydrocarbon compositions, which result in varying storage stabilities. Microbial contamination, particularly of aviation kerosene under inadequate storage conditions, can compromise adherence to the stringent specifications required for these fuels. The advantages and importance of adopting sustainable aviation fuels (SAF) are highlighted as a strategy to reduce gaseous pollutants, with a focus on the main production routes approved by ASTM. Key factors affecting storage stability, such as humidity, temperature, oxidation, additives, and microbial contamination, are discussed. Monitoring actions help determine whether the fuel distribution and storage system is in acceptable or alert conditions. Given that aviation fuels must meet global approval and specifications, a commitment to quality throughout manufacturing, storage, and distribution is essential.

Keywords: Aviation kerosene; aviation gasoline; storage; quality.

1 INTRODUÇÃO

A aviação mundial utilizou combustíveis que atenderam as necessidades dos motores adotados ao longo do tempo. No início do século XX, a concepção e desenvolvimento do motor a explosão (Ciclo-Diesel e Ciclo-Otto), marcou a passagem da era “vapor para a motorizada”. Com essa transição, ocorreu um grande

impulso no consumo de combustíveis e o estabelecimento das refinarias de petróleo ao redor do mundo.

Em termos históricos podemos destacar o período de (1900-1914) como a *era pioneira* da aviação, com a realização do primeiro voo motorizado da história, com um aparelho mais pesado que o ar e com propulsão independente (sem catapultas). No entanto, existe uma controvérsia em torno do pioneirismo, devido ao fato dos irmãos aviadores americanos, Orville e Wilbur Wright, não terem deixado registros quanto às tentativas de voos, decolagens e pousos preliminares do voo realizado em 1903 (USA)(OGSTON, 1981; KERLEY, 1981) (Figura 1). O brasileiro Alberto Santos Dumont realizou um voo em 1906 (Paris), com o 14 BIS, um avião motorizado (motor Antoinette de 50 HP, que utilizava gasolina como combustível). O reconhecimento desse brasileiro na aviação, foi um reflexo de sua conduta, pois as demonstrações públicas dos voos, sempre foram acompanhadas pela imprensa e por registros detalhados, tanto de suas experiências acertadas, quanto aos alertas dos erros cometidos.

A *segunda era* ficou marcada pela utilização dos aviões em missões de defesa e ataque, no período da Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e pelo aumento da tecnologia com relação à concepção das aeronaves. Um aumento do espaço interno e da aerodinâmica que permitiram velocidades de 110 km/h para 230 km/h. A terceira era conhecida como *era de ouro* da aviação (1918-1939), se caracterizou pelo grande crescimento socioeconômico mundial com a demanda pelo uso de transporte aéreo para o deslocamento de cargas e passageiros (GUNSTON,1999; HANGAR 33). Neste período da Segunda Guerra Mundial, a aviação é amplamente utilizada nos campos de batalha, atingindo seu maior período de destaque, utilizando o motor a pistão e um propulsor (PETRESCU *et al.* 2017). Atualmente, a indústria da aviação tem participado do esforço global em reduzir as emissões de gases do efeito estufa (liberação de CO₂), produzidos durante o processo de combustão dos combustíveis (JOHNSON, 2018; LEE *et al.*, 2021).

Segundo DUONG e colaboradores (2020), a União Europeia implementou a diretiva 101/2008/EC em 2012, com a missão de reduzir a emissão de CO₂. Desse modo, os voos que não reduzissem a emissão de gases do efeito estufa, dentro da Área Econômica Europeia, seriam obrigados a pagar uma taxa sobre o CO₂. A abordagem

que trata da Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation - CORSIA) é um programa da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) que define padrões voluntários de redução de carbono durante a fase 1 (até 2026), e obrigatórios, durante a fase 2 (2027 e além) (UNITED STATES, 2020).

Historicamente, o conhecimento sobre a possibilidade de degradação dos combustíveis na estocagem tanto por processos químicos, quanto físicos e biológicos, exigiram uma maior atenção e conduta da comunidade usuária. Por questões de logística e segurança, o querosene de aviação tem a necessidade de homologação e atendimento às especificações que devem ser válidas em qualquer parte do mundo (PASSMAN, 2013, DUNKEK, 2020). Em condições inapropriadas de estocagem, como a presença de água e um longo tempo de residência dos combustíveis nos tanques, ocorre o desenvolvimento de microrganismos (fungos e bactérias), formando a conhecida borra ou lodo biológico (PASSMAN, 2013, SHAPIRO *et al.*, 2021 a; RADWAN *et al.*, 2023; GÓMEZ-BOLÍVAR *et al.*, 2024). A participação microbiana é reconhecida como um tipo importante de contaminação e degradação, e por essa razão, ações envolvendo o diagnóstico, monitoramento e controle são exigidas e previstas em Normas Padrões Americanas (ASTM), inglesas (IP) e na primeira Norma Brasileira, ABNT 16732, publicada em 2019 (***Combustíveis líquidos e sistemas associados - Requisitos para prevenção, monitoramento e controle de contaminação microbiana***). Para a garantia e manutenção da qualidade final dos produtos armazenados, destaca-se a adoção de práticas com rotinas rígidas que são atualmente cobradas em vários pontos da cadeia de distribuição e armazenamento dos combustíveis.

Na Figura 1, resumidamente podemos visualizar os principais eventos no mundo e no Brasil com relação aos combustíveis de aviação, como o uso de gasolina nos modelos pioneiros até o uso de querosene de aviação e a detecção da contaminação microbiana, desde o primeiro registro, com as normas certificadas da Sociedade Americana de Normas Técnicas-ASTM (detecção, monitoramento, controle) e a Associação Internacional de Transporte Aéreo- IATA, até a eventos nacionais e internacionais direcionados à era atual de combustíveis renováveis para a aviação. O objetivo deste artigo é apresentar os principais aspectos relacionados

à estabilidade ao armazenamento que envolve a ocorrência de processos físicos, químicos e biológicos, estratégias de monitoramento e de controle que asseguram a qualidade final dos combustíveis de aviação (Figura 1).

Figura 1 - Principais eventos no mundo e no Brasil relacionados à aviação (os pioneiros) e aos combustíveis de aviação quanto as primeiras detecções dos resíduos de origem microbiana durante a estocagem, Normas da ASTM relacionadas ao tema, criação de Plataforma e Rede Brasileira de apoio aos combustíveis renováveis de aviação e encontros científicos (Brasil e mundo) promovendo a aviação sustentável



ISSN 2763-7697
Fonte: Tecmundo, 2024.

2 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NA AVIAÇÃO

A primeira e a Segunda Guerra Mundial foram determinantes para o desenvolvimento da aviação, pois os aviões que haviam sido projetados inicialmente para fins militares, com a intenção de facilitar o transporte de armamentos e a execução dos longos bombardeios, acabaram revolucionando o setor aéreo. Com o pós-guerra, a aviação civil tomou conta do setor, com a criação de modelos específicos para voos comerciais, de pistas de pouso e decolagem, de terminais de passageiros, o surgimento de companhias aéreas promovendo transporte de pessoas e bens a longas distâncias de modo rápido e seguro (FRANCISCONE & LIMA, 2021). Todo esse potencial econômico aliado às facilidades foi percebido antes mesmo do pleno desenvolvimento técnico das

aeronaves, consagrando o transporte aéreo como meio de transporte destaque do século XXI (MIRANDA, 2014; PEREIRA *et al.*, 2018; FRANCISCONE; LIMA, 2021).

Ao nível mundial, a estabilidade ao armazenamento recebeu especial atenção após a Segunda Guerra Mundial, em função dos interesses governamentais e militares nos estoques de combustível (PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016). Os problemas relacionados à contaminação microbiológica, em combustíveis de aviação, aumentaram quando o querosene começou a ser utilizado nas turbinas das aeronaves. Essas mudanças ocorreram primeiramente na aviação militar (década de 50) e posteriormente na aviação comercial (década de 60) com a designação de Jet A1, ou JP1 (*jet fuel*), que passaram a ser utilizados como novos combustíveis.

Durante os primeiros quarenta anos de desenvolvimento da aviação, apenas os motores de combustão interna (pistão) foram utilizados, sendo que no início da década de 50, os motores a turbina surgiram com grande tendência de substituir o motor convencional (PETRESCU *et al.* 2017; ARAUJO, 2020). Neste sentido, durante muito tempo a gasolina automotiva foi o principal combustível dos motores de aviação, porém com o aprimoramento dos projetos dos motores das aeronaves, combustíveis com melhor qualidade foram necessários, chegando-se a atual gasolina de aviação (AVGAS) e ao querosene de aviação (QAV) (PASSMAN, 2013; SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; JOHNSON, 2018).

O AVGAS é atualmente utilizado em aviões de pequeno porte envolvidos com serviços de transporte, pulverização agrícola, treinamento de pilotos, serviços de propaganda, saltos de paraquedismo e aviação particular. A aviação civil de motor a jato, utiliza o querosene de aviação (JET-A1), que tradicionalmente recebe atenção especial durante a estocagem, devido a impossibilidade de paradas em caso de falhas e pela sua reconhecida suscetibilidade à contaminação microbiana em comparação aos demais combustíveis.

A gasolina de aviação (AVGAS), é uma complexa mistura de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, possuindo como característica marcante a coloração azulada conferida por corante, que a difere dos outros combustíveis. Segundo a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), a gasolina de aviação é definida como um combustível de alta octanagem usada em motores a explosão de aviões a hélice. No Brasil, a Resolução N°

901/2022 da ANP estabelece a especificação para a gasolina de aviação, sendo que não recebe etanol, como a gasolina comercial (atuais 27%) (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; ANAC 2024).

O querosene de aviação é um derivado de petróleo obtido por destilação direta com faixa de temperatura de 150°C a 300°C, com a predominância de hidrocarbonetos parafínicos com número de átomos de carbono de 6 a 16. Nos Estados Unidos o combustível de aviação é chamado de Jet A e na Europa Jet A-1, sendo que a principal diferença é que o Jet A-1 tem um ponto de congelamento máximo mais baixo do que o Jet A (Jet A: -40 ° C, Jet A-1: -47 ° C) (HEMINGHAUS *et al.*, 2006; JOHNSON, 2018). O ponto de congelamento mais baixo torna o Jet A-1 mais adequado para voos internacionais mais longos, especialmente em rotas polares durante o inverno (HEMINGHAUS *et al.*, 2006; LAM *et al.*, 2014; SRIVASTAVA; HANCSÓK, 2014; KUMAR *et al.*, 2020).

No Brasil a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é o órgão regulador responsável pela especificação dos querosenes de aviação para uso na aviação civil conhecidos como JET A, JET A-1 (antigo QAV-1) e JET C (ANP, 2021; 2022). Os combustíveis formulados à base de querosene são conhecidos como: Jet A, Jet A-1, JP-5 e JP-8 e apresentam entre 8 e 18 carbonos. Combustíveis derivados da nafta são Jet B e JP-4, de uso militar, e que possuem entre 5 e 15 carbonos.

Convencionalmente, os combustíveis de aviação comercializados como A/A1, de uso civil e JP-8 de uso militar são derivados do óleo cru (NEULING & KALTSCHMITT, 2015; KLEIN, *et al.*, 2018). Os requerimentos básicos para que um combustível de aviação seja utilizado estão relacionados a um baixo ponto de congelamento, alto poder calorífico e elevada estabilidade térmica (BLAKEY *et al.*, 2011; SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; JOHNSON, 2018).

3 COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS (RENOVÁVEIS) PARA AVIAÇÃO (SAF)

As possibilidades de substituição dos combustíveis fósseis, é uma realidade mundial e o Brasil destaca-se com seu pioneirismo e liderança, com o etanol, nosso primeiro biocombustível (Era do Pró-Álcool), que na década de 70 foi uma tentativa de

contornar a crise do petróleo. Dentro do contexto da “era dos renováveis”, o governo brasileiro através de algumas iniciativas, como a criação da Plataforma Brasileira de Bioquerosene e Renováveis em 2012, tentou reunir vários setores da cadeia produtiva (matéria-prima e multiprocessos) envolvidos na logística necessária para a produção de diesel verde, bioquerosene, biodiesel, etc. Outra medida importante foi a implementação de uma política de estado, conhecida por RENOVABIO (estruturado pelo Ministério de Minas e Energia - Lei N° 13.576/2017), que trata de um programa de incentivo à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação para apoiar a indústria do sustentável. O RENOVABIO também surge como uma forma de adequação do Brasil aos entendimentos firmados no Acordo de Paris (redução de emissão de gases do efeito estufa). Desta forma, a política destaca o papel de todos os biocombustíveis na matriz energética brasileira (etanol, biodiesel, biometano, bioquerosene e combustíveis de 2° geração (UBRABIO, 2017).

Neste mesmo ano de 2017, foi criada a RBQAV- Rede Brasileira de Querosene e Hidrocarbonetos Renováveis para Aviação, com a missão de, através de trabalho conjunto entre os pesquisadores de diferentes instituições, empresas privadas e de instituições governamentais, propiciar o desenvolvimento dos eixos: matéria-prima, rotas tecnológicas, controle de qualidade e certificação, estruturação das refinarias, análises de ciclo de vida e viabilidade da cadeia produtiva. As áreas em desenvolvimento exigem uma demanda qualificada e espaço para outros profissionais atuarem dentro desse novo cenário da matriz energética nacional e internacional. A 3° edição do Congresso da Rede Brasileira de Bioquerosene, que ocorreu de 17-19 de junho de 2024, em Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, com a apresentação de trabalhos científicos e de palestras de diferentes segmentos da aviação (Figura 1).

Os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) têm recebido atenção especial na indústria da aviação como uma alternativa sustentável e renovável ao fóssil tradicional. O SAF possui diversas vantagens ambientais sobre o querosene de aviação convencional. É menos poluente pela redução da emissão dos gases do efeito estufa, tais como: CO₂, óxido nitroso e metano (ILHA *et al.* 2019; WEI *et al.*, 2019; LIN *et al.*, 2020; DUONG *et al.*, 2020; DOLIENTE *et al.*, 2020; PETERS *et al.*, 2023). De acordo com uma estimativa da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) em 2022, a capacidade de produção de SAF, incluindo o bioquerosene, ultrapassaram 300 milhões litros (79.2 milhões galões) (IATA, 2023; PETERS *et al.*, 2023). As alternativas

energéticas para aviação estão focadas principalmente no desenvolvimento e abastecimento com combustíveis alternativos que cumpram as especificações dos combustíveis de aviação convencionais conhecidos como combustíveis “drop-in” (WISE *et al.*, 2017; JOHNSON, 2018; NEULING & MARTIN, 2018; ILHA *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2019; DOLIENTE *et al.*, 2020).

Os combustíveis “**drop in**” são combustíveis totalmente miscíveis e compatíveis com os combustíveis de aviação convencional, permitindo que possa ser empregado a mesma infraestrutura de abastecimento (RYE *et al.*, 2010; ILHA *et al.*, 2019; DOLIENTE *et al.*, 2020). Várias rotas para obtenção desses combustíveis sustentáveis da aviação (SAF), vêm sendo desenvolvidas, bem como análises técnico econômicas e de ciclo de vida (Tabela 1). Alguns combustíveis de aviação alternativos podem ser utilizados puros, ao passo que outros precisam ser misturados ao querosene de origem fóssil. Os combustíveis utilizados na aviação devem ter alta densidade energética para minimizar a quantidade de volume necessário para voos de longa duração e boa qualidade de combustão que permita seu uso de maneira eficiente. Além dessas características os combustíveis alternativos para aviação devem ter disponibilidade global, atender a numerosos requisitos de segurança e serem transportados, armazenados e bombeados com facilidade (NEULING & KALTSCHMITT, 2018; KLEIN *et al.*, 2018; DOLIENTE *et al.*, 2020).

O aumento do preço do querosene de aviação, juntamente com as inevitáveis emissões durante o processo de combustão, tem apontado os SAF como uma possível fonte de energia. Com a possibilidade de serem obtidos a partir de diferentes potenciais da biomassa vegetal (1°, 2° e 3° geração), que pelo seu ciclo produtivo ao capturarem o CO₂ reduziriam o dano ambiental de forma compensatória (JOHNSON, 2018; DOLIENTE *et al.*, 2020; PETERS *et al.*, 2023). Desta forma, os SAFs atendem ao apelo de serem menos poluentes, minimizando a emissão de gases do efeito estufa (GEE) do setor de aviação (JOHNSON, 2018; KOSIR *et al.*, 2020). Sob a pressão de tornar os voos ecologicamente corretos foram desenvolvidas diferentes vias para a produção de combustíveis sustentáveis para aviação (SAF) também chamados de bioquerosene (quando derivados de biomassa renovável) ou combustíveis de aviação alternativos (NEULING & KALTSCHMITT, 2018; Agência Nacional de Aviação Civil, 2021) (Tabela 1).

As especificações de combustível de aviação são definidas pela Norma ASTM D1655, sendo que as etapas para qualificação e aprovação de novos combustíveis para turbinas de aviação seguem a ASTM D4054 (American Society for Testing and Materials, 2019^a, b). Um combustível alternativo (SAF) deve fundamentalmente atender às especificações descritas na Norma ASTM D7566 (American Society for Testing and Materials, 2019 c) (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, 2021). Ao contrário do uso de combustíveis alternativos em outros setores, a aviação apresenta uma restrição muito maior a qualquer combustível candidato devido a vários fatores, como as condições extremas na qual a combustão acontece, com combustíveis líquidos limitados. O combustível “*drop in*” deve ser um hidrocarboneto renovável, líquido com funcionalidade equivalente aos combustíveis fósseis e compatível com a infraestrutura existente, ou seja, o combustível deve ser livre de compostos oxigenados, ter alto poder calorífico e baixa solubilidade em água. A vida longa de um jato comercial exige que o combustível seja compatível e adequado para uso em motores com a tecnologia existente (YANG *et al.*, 2019).

Atualmente, existem cerca de sete vias alternativas para a produção de SAF certificadas pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM). Na Tabela 1 é possível visualizar, os combustíveis alternativos de aviação que são qualificados para uso comercial (apresentados em ordem cronológica de aprovação, conforme a **ASTM D7566**), representando vários processos de conversão associados a vários tipos de matéria-prima (DOLIENTE *et al.*, 2020; Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, 2021; PETERS *et al.*, 2023). Dentre as várias rotas certificadas, destacamos neste artigo a rota de hidroprocessamento de açúcares fermentados para a produção de isoparafinas sintéticas. A fermentação de açúcares por fungos leveduriformes transgênicos que produzem terpenos, mais especificamente isoprenoides, de onde derivam uma gama de produtos, como querosene, óleo diesel e outros produtos químicos. Essa conversão direta de açúcares para farneseno foi objeto de uma patente da empresa Amyris, Inc. que chegou a produzir esse biocombustível em escala comercial (13 milhões de galões, 49,2 milhões de litros por ano em 2015), sendo utilizado em um voo experimental em 2012 (NEULING & KALTSCHMITT, 2014; PETERS *et al.*, 2023). Este bioquerosene é formado por hidrocarbonetos parafínicos ramificados

contendo 15 carbonos, que pode ser utilizado em até 10% da mistura com querosene de aviação convencional (PEREIRA *et al.*, 2018; WEI *et al.*, 2019; ILHA *et al.*, 2019). O bioquerosene (2,6,10 trimetil dodecano: farnesano) produzido pela Amyris (Rota SIP-Isoparafinas sintetizadas) foi avaliado no Brasil quanto a variação de importantes propriedades físicas (densidade, viscosidade e poder calorífico) em misturas, puro e de 5 a 95%, com QAV em temperaturas aproximadas de 20°-120°C, em estudo conduzido por pesquisadores do Instituto Tecnológico da Aeronáutica-ITA de São José dos Campos, SP (ILHA *et al.*, 2019). Um outro grupo de pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABBIO), avaliou o impacto do bioquerosene (produzido pela Amyris) na estabilidade do armazenamento quanto a contaminação microbiana (ver seção 2.5) (LOBATO *et al.*, 2020; 2023).

Tabela 1 – Resumo das rotas de produção de Combustíveis Sustentáveis para a Aviação (SAF) e ano de certificação pela ASTM

Nome da rota - Plataforma	Ano da certificação ASTM
Fischer Tropsch FT-SPK (FT-SPK) (Querosene parafínico sintético hidroprocessado por Fischer- Tropsch)	2009
Ésteres e ácidos graxos hidroprocessados – Querosene parafínico sintético (HEFA-SPK)	2011
Hidroprocessamento de açúcares fermentados – isoparafinas sintetizadas (HFS-SIP)	2014
Fischer Tropsch FT-SPK/A (Querosene parafínico sintético hidroprocessado por Fischer- Tropsch)+ Aromáticos	2015
Álcool para querosene parafínico sintético , ATJ (Alcohol to jet),	2016
Querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ)	2020
Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPKHC- HEFA).	2020

Fonte: Adaptado de Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative, 2021; YANG *et al.*, 2019; DOLIENTE *et al.*, 2020; PETERS *et al.*, 2023).

4 ESTABILIDADE AO ARMAZENAMENTO DOS COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO

A estabilidade no armazenamento dos combustíveis é dependente de fatores que vão desde a origem do petróleo, de procedimentos utilizados nos processos de refino e principalmente das práticas (rotinas rígidas) utilizadas na estocagem. O processo de degradação natural, como o envelhecimento durante a estocagem, é a

resposta de reações químicas catalisadas pela temperatura, oxigênio, umidade, presença de metais e outros compostos, que repercutirão em alterações da qualidade do combustível ao longo do tempo (BROWN *et al.*, 2010; PASSMAN, 2013; SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; BENTO *et al.*, 2016; JOHNSON, 2018; KNEZEVIC, 2020). Trata-se, portanto, de alterações esperadas e designadas como de origem abiótica, por não contar com a participação microbiana direta (degradação biótica). A seguir, apresentaremos os principais fatores que contribuem para o comprometimento da estabilidade dos combustíveis dentro da cadeia produtiva, de distribuição e armazenamento dos combustíveis de aviação.

4.1 Temperatura

A estabilidade térmica dos combustíveis é uma propriedade importante uma vez que os motores a jato modernos empregam o combustível em várias funções (WEBSTER *et al.*, 2015; JOHNSON, 2018). Na aeronave, o querosene de aviação atua tanto como combustível quanto como fluido lubrificante, hidráulico e de arrefecimento. Pelas trocas térmicas realizadas, a temperatura do querosene de aviação pode atingir temperaturas iguais ou acima de 150°C, que ao retornar ao tanque de armazenamento pode favorecer a degradação térmica do combustível armazenado, iniciando reações de auto-oxidação, que são conhecidas por contribuir para a formação de gomas, sedimentos e outras espécies insolúveis (WEBSTER *et al.*, 2015; PETROBRAS, 2021; JOHNSON, 2018; JIA *et al.*, 2021).

4.2 Oxidações

As mudanças químicas que podem ocorrer na estocagem são uma fonte significativa de contaminação e podem resultar na formação de particulados, lamas e outros tipos de depósitos no combustível (JOHNSON, 2018). A instabilidade do combustível de aviação durante o armazenamento pode não ser considerado um problema, uma vez que o combustível é utilizado em semanas ou meses após sua produção na refinaria. A auto-oxidação do combustível de aviação pode ser dividida em três etapas: a formação de hidroperóxidos, a formação de produtos oxidados solúveis

e a formação de depósitos (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; JOHNSON, 2018; JIA *et al.*, 2021).

4.3 Água

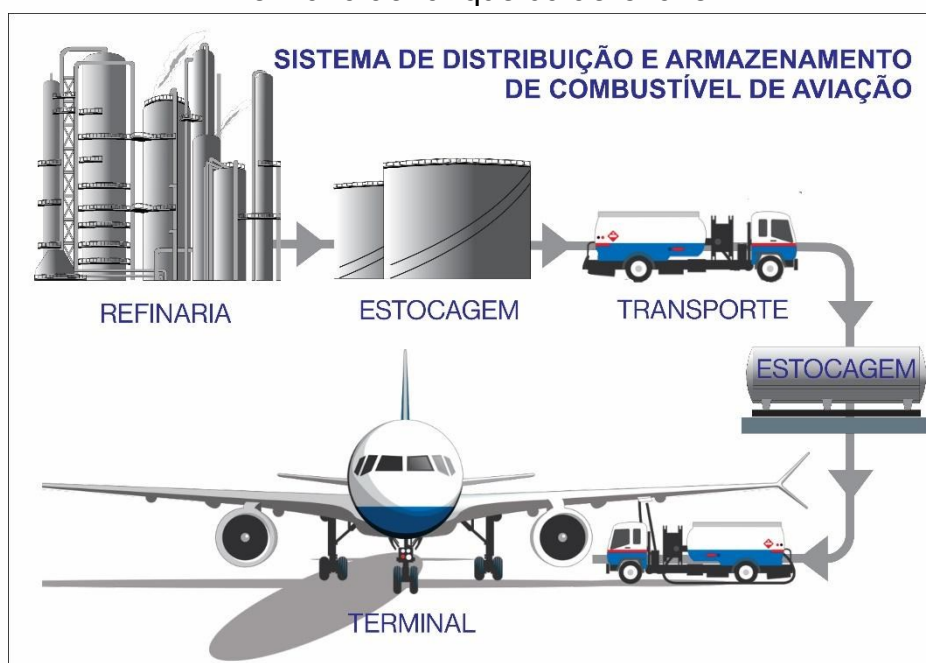
A água é um contaminante muito comum em todos os combustíveis e devemos considerar quais são as fontes e os efeitos da água durante o armazenamento. Um querosene saturado contém entre 40 e 80 ppm de água dissolvida a 20°C. As variações de temperatura promovem uma maior condensação da umidade do ar no interior dos tanques de estocagem em solo e na aeronave, produzindo maior acúmulo de água, no fundo dos tanques. Outra fonte importante é a entrada de água pelas aberturas conhecidas como “boca de visita” e “bocal de respiração”, formando água livre (GAYLARDE *et al.*, 1999; HEMINGHAUS *et al.*, 2006; RAIKOS *et al.*, 2012; BAENA-ZAMBRANA *et al.*, 2013; BENTO *et al.*, 2016; JOHNSON, 2018; MATVYEYEVA *et al.*, 2021).

Quanto aos efeitos da água no combustível, devemos considerar que a solubilidade se torna maior com o aumento da temperatura e varia consideravelmente com a composição do combustível. Quanto maior o conteúdo de hidrocarbonetos aromáticos, maior a solubilidade em água (HEMINGHAUS *et al.*, 2006; NAYA *et al.*, 2013; BAENA-ZAMBRANA *et al.*, 2013; JOHNSON, 2018; MATVYEYEVA *et al.*, 2021). A presença de água pode produzir falha temporária de um motor a jato, causada pela extinção da chama na câmara de combustão. No entanto, na forma de gelo, a água pode também interromper o fluxo de combustível para os filtros e tubulações de combustível do motor, aumentando o risco de acidentes (NAYA *et al.*, 2013; JOHNSON, 2018). A formação de gelo nos tanques de combustível pode ocorrer em temperaturas muito baixas encontradas em grandes altitudes. A maioria das aeronaves comerciais tem aquecedores em seus principais filtros de combustível para derreter o gelo que for coletado (HEMINGHAUS *et al.*, 2006). Os inibidores de congelamento do sistema de combustível (FSII) funcionam combinando-se com qualquer água livre que se forma e diminuindo o ponto de congelamento da mistura para que nenhum cristal de gelo seja formado. O único FSII atualmente aprovado para

Jet A, Jet A-1 e combustíveis militares dos EUA é o dietilenoglicol éter monometílico (di-EGME) (HEMINGHAUS *et al.*, 2006; JOHNSON, 2018).

Na Figura 2 é possível visualizar os diferentes momentos da cadeia de produção, distribuição e armazenamento do combustível de aviação, destacando-se a importância das práticas de rotina e manutenção (drenagem da água formada) nos distintos tempos de estocagem (da refinaria à aeronave).

Figura 2 - Sistema de armazenamento e distribuição de combustíveis de aviação, da refinaria ao tanque da aeronave



Fonte: BENTO, 2024.

4.4 Aditivção

O combustível de aviação recebe aditivos para principalmente reduzir o risco de congelar ou explodir em altas temperaturas. Em muitos casos, a presença de alguns elementos químicos residuais afetam a química dos combustíveis e a adição de aditivos, reduzem a reatividade e aumentam a estabilidade ao armazenamento (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; REPETTO *et al.*, 2016; JOHNSON, 2018).

Com relação ao querosene de aviação (QAV), são utilizados aditivos com a função de antioxidantes, desativadores de metal, inibidores da formação de gelo, dissipadores de cargas estáticas, detectores de vazamento e melhoradores de

lubricidade (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; JOHNSON, 2018; PETROBRAS, 2019). Com o manejo dos combustíveis do petróleo pode ocorrer a geração de cargas eletrostáticas, que devem ser evitadas durante o movimento, transferência ou o abastecimento das aeronaves (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014).

Os aditivos antiestáticos, dissipador de cargas estáticas poderá ser utilizado também para aumentar a condutividade elétrica do querosene de aviação. O aditivo desativador de metal pode ser utilizado para melhorar a estabilidade térmica enquanto os de lubrificação (geralmente ácidos carboxílicos), são usados para compensar a baixa lubricidade do combustível de aviação severamente hidrotratado. Esses aditivos contêm um grupo polar que adere às superfícies de metal, formando uma fina película superficial, atuando como um lubrificante, limitando que duas superfícies de metal entrem em contato (HEMINGHAUS *et al.*, 2006; SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; REPETTO *et al.*, 2016; PETROBRAS, 2019).

A gasolina de aviação (AVGAS) apresenta em sua composição características relacionadas à volatilização (mais volátil), ponto de fulgor (baixo ponto) e capacidade detonante que diferem do querosene de aviação (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014). O AVGAS demanda a peculiaridade da octanagem mais elevada, de forma que maiores taxas de compressão possam ser empregadas para atender os motores mais potentes dos aviões, diferente dos motores de veículos terrestres, que utilizam a gasolina comercial e não necessitam de octanagem tão elevada. Esta característica é obtida em parte, pelas frações de isoparafinas e pelo emprego de aditivos à base de chumbo (PRAUCHNER *et al.*, 2023). No Brasil, a gasolina de aviação não recebe etanol, porém recebe a adição de tetraetila de chumbo (0,56%), um aditivo que aumenta a octanagem e que é reconhecido por ser altamente tóxico e cancerígeno, levando a sua proibição em combustíveis automobilísticos desde 2002 (KUMAR *et al.*, 2018).

A característica marcante do AVGAS brasileiro é a coloração azulada, conferida por corante, que a difere dos outros combustíveis (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014). O único corante azul autorizado para este fim é o 1,4 dialquilamino antraquinona o qual deve ser adicionado no limite máximo de 2,7 mg/L. (RESOLUÇÃO ANP N° 901-2022). Para o atendimento de algumas exigências e especificações, o AVGAS recebe outros aditivos como antioxidantes,

antidetonantes, anticongelantes, anticorrosivos (SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; PRAUCHNER *et al.*, 2023).

4.5 Contaminação por microrganismos

Os primeiros estudos e a percepção sobre a natureza microbiana do resíduo formado durante o armazenamento de combustível foram com o querosene de aviação, sendo o registro em 1958 nos Estados Unidos (BAKANAUKAS, 1958) e no Brasil por Gutheil em 1966 (Figura 1). Um combustível degradado pode provocar principalmente mau funcionamento dos motores e saturação prematura de filtros, como uma consequência direta da formação de material particulado (que pode ter origem química ou biológica) (RAUCH *et al.*, 2006; BROWN *et al.*, 2010; PASSMAN, 2013; ONUORAH *et al.*, 2015; KRIVUSHINA *et al.*, 2019, 2020; KROHN *et al.*, 2021; SHAPIRO *et al.*, 2021 ab; RADWAN *et al.*, 2022, 2023).

Ao contrário dos demais combustíveis que receberam importantes alterações na sua composição ao longo do tempo, como o óleo diesel, com redução no teor de enxofre e a adição crescente de biodiesel (14%), e a gasolina automotiva que recebeu a adição de etanol (27%), já o querosene e a gasolina de aviação não sofreram mudanças significativas. Neste sentido, a complexidade química dos combustíveis ao longo do tempo, refletem na sua biodegradabilidade, tanto dentro dos tanques quanto em caso de acidentes ambientais (PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2022; LOBATO *et al.*, 2023; HIDALGO *et al.*, 2023).

4.5.1 Mas como ocorre a contaminação de combustíveis por microrganismos?

O combustível após o processo de destilação fracionada, devido a altas temperaturas utilizadas podem ser consideradas estéril, ou seja, livre de qualquer microrganismo (HEMINGHAUS *et al.*, 2006; MCCOMBE, 2009; BROWN *et al.*, 2010; PASSMAN, 2013; KNEZEVIC, 2020). No entanto, assim que é estocado, inicia o processo de colonização por microrganismos presentes no ambiente. Contudo, dependendo do tempo de permanência do combustível (dias a semanas, conforme a frequência dos voos) e a presença de água livre no fundo dos tanques, pode ocorrer a formação do conhecido lodo biológico (RAIKOS *et al.*, 2011, 2012; PASSMAN, 2013;

RADWAN *et al.*, 2022; 2023; LOBATO *et al.*, 2023). Uma vez armazenado em condições impróprias (presença de água e lodo biológico) nos tanques, o combustível contaminado passa a ser um dos principais veículos de microrganismos, devido aos esporos de fungos e de algumas bactérias (estados de dormência destes grupos microbianos). O combustível contaminado ao circular ao longo da cadeia de distribuição (da refinaria até a aeronave) pode-se contaminar ainda mais, rastreando outros microrganismos (MCCOMBE, 2009; BENTO *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2021).

O lodo de origem biológica se forma na medida em que condições físicas, químicas (água; temperatura; pH; nutrientes minerais; oxigênio) e competências fisiológicas dos microrganismos (densidade; enzimas degradadoras; biossurfactantes) se estabeleçam (RAUCH *et al.*, 2006; BROWN *et al.*, 2010; RAIKOS *et al.*, 2012; HU *et al.*, 2020; SHAPIRO *et al.*, 2021; MATVYEYEVA *et al.*, 2021; RADWAN *et al.*, 2022; 2023).

A presença de **água** é o pré-requisito para o desenvolvimento microbiano (RAUCH *et al.*, 2006; BROWN *et al.*, 2010; RAIKOS *et al.*, 2012; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; HU *et al.*, 2020; SHAPIRO *et al.*, 2021; MATVYEYEVA *et al.*, 2021; RADWAN *et al.*, 2022; 2023; LOBATO *et al.*, 2023). Apesar de esporos de fungos e bactérias permanecerem viáveis no combustível, eles apenas se desenvolvem na presença de água. Segundo Siegert (2009), apenas 100 ppm de água são suficientes para a proliferação de microrganismos, enquanto 5 a 80 ppm de água são suficientes para a sobrevivência dos esporos (RAIKOS *et al.*, 2012). Com a presença de água livre no fundo do tanque, o desenvolvimento microbiano se concentrará principalmente na interface combustível-água, formando um biofilme. Os microrganismos podem crescer na fase aquosa (fase livre) e nas gotículas de água dispersas na fase combustível (fase dissolvida) (RAIKOS *et al.*, 2012; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; JOHNSON, 2018; RADWAN *et al.*, 2022; 2023).

A disponibilidade de **oxigênio** no tanque de armazenamento, pode estar dissolvido no combustível, na água de lastro e estar presente na parte superior do tanque (ROBBINS & LEVY, 2005; RAJASEKAR *et al.*, 2012). O oxigênio dissolvido é prontamente utilizado pelos microrganismos (bactérias aeróbias e fungos) que naturalmente estão presentes no sistema de estocagem. No entanto, ambientes anaeróbios (sem oxigênio) podem se formar principalmente dentro de um tanque

contaminado com microrganismos. Os microrganismos que formam o biofilme, consomem oxigênio para produzir energia. Desta forma, em algumas regiões no interior do biofilme podem se formar áreas anóxicas (ausência de oxigênio), que permitirão o desenvolvimento de bactérias anaeróbias obrigatórias, conhecidas como bactérias redutoras de sulfato (BRS) (ROBBINS & LEVY, 2005; RAJASEKAR *et al.*, 2012; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016). As bactérias redutoras de sulfato (BRS), são anaeróbias obrigatórias e são consideradas, deteriogênicas ao combustível estocado, devido a produção do ácido sulfídrico (H_2S) como produto de seu desenvolvimento. Este ácido sulfídrico é considerado um metabólito potencialmente corrosivo para a superfície dos tanques (formação de pites-pontos de corrosão localizada), podendo alterar a especificação final do combustível (HILL, 2012, 2012, 2003; BENTO *et al.*, 2005; YEMASHOVA *et al.*, 2007; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016).

Quanto aos **nutrientes (fonte de carbono, macro e micronutrientes)**, os microrganismos durante a estocagem podem utilizar os hidrocarbonetos (alifáticos lineares e ramificados, aromáticos) que compõem os combustíveis da aviação (querosene e gasolina de aviação), como fonte de carbono. A degradação microbiana de hidrocarbonetos alifáticos é preferencialmente utilizada pela maioria dos microrganismos que podem colonizar um tanque de estocagem (PASSMAN, 2013). Embora os microrganismos possam utilizar os hidrocarbonetos (alifáticos, aromáticos e ou policíclicos aromáticos), como fonte de carbono e energia, a fração de cadeias curtas presente no AVGAS (misturas de alcanos lineares e ramificados, cicloalcanos (31–55%); alcenos (2–5%) e aromáticos (20–50%)), pode ser tóxica devido ao efeito do solvente sobre membranas celulares para muitos microrganismos (GAYLARDE *et al.*, 1999; MARCHAL *et al.*, 2010; PASSMAN, 2013; SHAPIRO *et al.*, 2021a). Muitas vezes os aditivos (compostos orgânicos e inorgânicos) utilizados, dependendo de sua composição química, poderão ser utilizados como fonte de carbono, macro e micronutrientes pelos microrganismos (HILL, 2012, 2003; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016). Os principais macronutrientes inorgânicos necessários para o crescimento e metabolismo microbiano incluem nitrogênio, enxofre e fósforo. Dentre os micronutrientes, muitos são cofatores enzimáticos, ou seja, promovem o ideal funcionamento das enzimas, que são os catalisadores

biológicos. Temos como exemplos: potássio, magnésio, cálcio, ferro, cobre, manganês, molibdênio, selênio e zinco (HILL & HILL, 2003, 2008; RAIKOS *et al.*, 2012; SHKILNIUK & BOICHENKO, 2019; MATVYEYEVA *et al.*, 2021). Estes micronutrientes inorgânicos podem estar dissolvidos e disponíveis nos sedimentos (oriundos da degradação química) dos tanques, na água ou no ar que circula nos tanques (ROBBINS & LEVY, 2005; HIEN *et al.*, 2007, YEMASHOVA *et al.*, 2007). De acordo com HILL (2012), os nutrientes para o crescimento microbiano podem ser fornecidos pelo combustível, aditivos ou carregados em qualquer traço de água, sendo que particularmente compostos de nitrogênio e fósforo, pode influenciar significativamente a extensão do crescimento microbiano.

Outro fator limitante para o desenvolvimento microbiano é a **temperatura**. O crescimento da maioria dos microrganismos ocorre na faixa de 25° a 30°C, sendo que a média da temperatura em um tanque de combustível, dependendo do local e estação do ano, pode estar entre 20°C a 30°C (ROBBINS & LEVY, 2005; RAIKOS *et al.*, 2012; RAJASEKAR *et al.*, 2012; MATVYEYEVA *et al.*, 2021). O fungo *Hormoconis resinae* (mais deteriorogênico de combustível de aviação) pode se desenvolver entre 5-40°C, porém a temperatura ótima de crescimento está em torno de 30°C (RAFIN & VEIGNIE, 2019). A adaptação do fungo *H. resinae* pode conferir uma grande tolerância ao estresse térmico, permitindo sua sobrevivência em vários nichos ecologicamente diferentes, em temperaturas altas e baixas. Essa adaptação pode explicar o motivo deste fungo ser encontrado em combustíveis utilizados em voos de elevadíssima altitude (RAFIN & VEIGNIE, 2019). De acordo com Shkilniuk e Boichenko (2019), algumas cepas de *H. resinae*, são capazes de se desenvolver no combustível a uma temperatura de 50°C e algumas cepas de *Aspergillus fumigatus* sobrevivem em querosene de aviação a temperaturas em torno de 80°C.

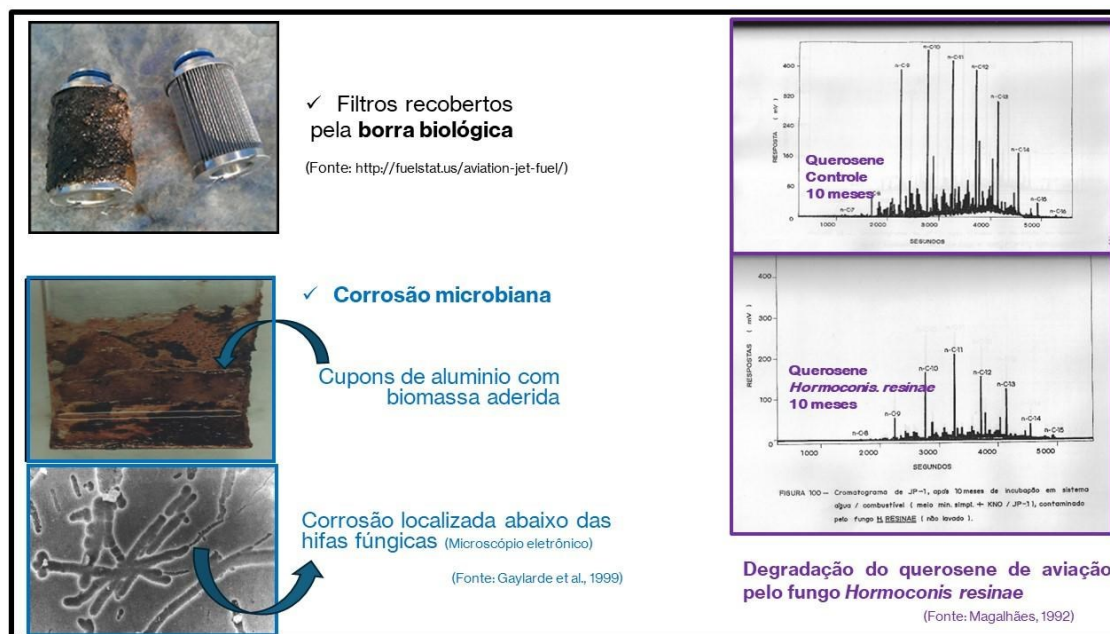
Quanto ao **pH**, os microrganismos presentes em combustíveis podem sobreviver a uma variação de pH entre 4 e 9 (BOSZCZYK-MALESZAK *et al.*, 2006; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; RAFIN & VEIGNIE, 2019). Os fungos se desenvolvem preferencialmente em ambientes mais ácidos (4-6,5) e a atividade metabólica de alguns fungos nos tanques de estocagem, pode reduzir o pH da água do fundo do tanque, devido a produção de ácidos orgânicos (MAGALHÃES, 1991; HILL, 2012, 2000; BENTO *et al.*, 2005; 2016; BOSZCZYK-MALESZAK *et al.*, 2006). A

condição ácida do ambiente pode definir a sucessão de microrganismos bem como a instalação de comunidades de microrganismos diferentes dentro de tanques (PASSMAN, 2013). O fungo *H. resinae* cresce na faixa de pH entre 2-10, sendo que o desenvolvimento ideal ocorre na parte mais ácida do intervalo (RAFIN & VEIGNIE, 2019).

4.5.2 Consequências do crescimento microbiano

A presença de água no tanque de combustível é a condição fundamental para o crescimento de microrganismos com capacidade de se desenvolver utilizando principalmente os hidrocarbonetos, como fonte de carbono. Esse desenvolvimento microbiano pode ocorrer durante a estocagem de combustíveis fósseis, biocombustíveis e misturas, e é visualmente percebido por um biofilme (biomassa) na interface combustível-água. Essa biomassa é formada principalmente pelos fungos (filamentosos e leveduriformes) e bactérias (aeróbias e anaeróbias), que formam consórcios microbianos (diferentes espécies), degradando o combustível ou seus aditivos, removendo o oxigênio, e solubilizando compostos (PASSMAN, 2013; SHAPIRO *et al.*, 2021 a, b; RADWAN *et al.*, 2022; 2023; LOBATO *et al.*, 2023). Como consequências diretas o lodo microbiano, pode promover o entupimento e saturação prematura de filtros do combustível, produção de biossurfactantes (agentes tensoativos) e de metabólitos (ácidos orgânicos e inorgânicos), criando uma ambiente propício para a corrosão dos tanques e a degradação das frações de hidrocarbonetos (RAUCH *et al.*, 2006; MCCOMBE, 2009; BROWN *et al.*, 2010; RAIKOS *et al.*, 2012; PASSMAN, 2013; SHKILNIUK E BOICHENKO, 2019; HU *et al.*, 2019; 2020; ZHANG *et al.*, 2021; SHAPIRO *et al.*, 2021 a, b; RADWAN *et al.*, 2022; 2023; LOBATO *et al.*, 2023). Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas imagens que ilustram as consequências do crescimento microbiano durante a estocagem de combustíveis.

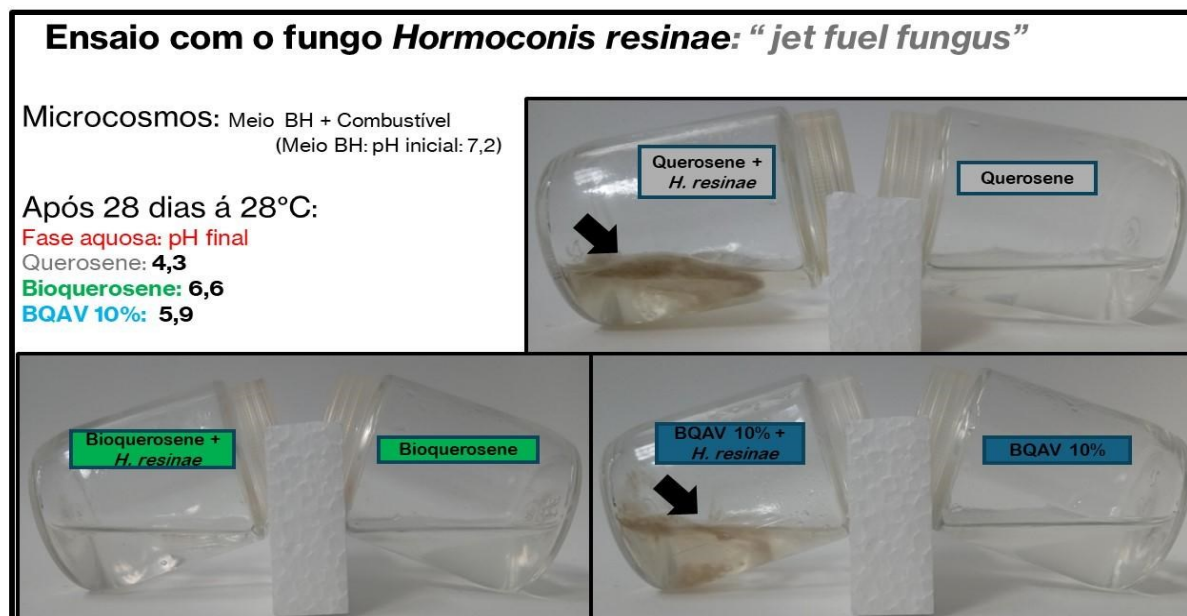
Figura 3 - Imagens mostrando as principais consequências do crescimento microbiano em filtros em condições inapropriadas de estocagem com querosene de aviação, cupons de alumínio com biomassa fúngica aderida e resultados de cromatografia mostrando a degradação de frações de hidrocarbonetos na presença do fungo *Hormoconis resiniae*



Fonte: Valle, 1991.

O comportamento do fungo filamentosso, *H. resiniae* reconhecido na literatura como importante deteriogênico de querosene de aviação (HU *et al.*, 2019; 2020; ZHANG *et al.*, 2021; SHAPIRO *et al.*, 2021 a, b; RADWAN *et al.*, 2022; 2023; LOBATO *et al.*, 2023), foi avaliado na mistura com 10% de bioquerosene (farnesano produzido pela Amyris) em querosene de aviação; com querosene puro e bioquerosene puro, durante estocagem simulada (LOBATO *et al.*, 2020; 2023). O fungo produziu biomassa significativa após 28 dias na condição com querosene de aviação e na mistura com 10% de farnesano (Figura 4). Não foi observado produção de biomassa na condição com farnesano puro. No entanto, outro fungo contaminante isolado do querosene de aviação, a *Exophiala phaeomuriformis* (UFRGS Q4.2) mostrou capacidade de crescimento no bioquerosene (farnesano) (LOBATO *et al.*, 2023). Neste sentido, até o momento, de acordo com os resultados obtidos, a presença de bioquerosene (produzido pela rota SIP-hidroprocessamento de açúcares fermentados) ao querosene de aviação no futuro próximo, continuará exigindo da comunidade usuária, a manutenção das rotinas rígidas durante a estocagem do combustível.

Figura 4 - Aspecto dos microcosmos utilizados na estocagem simulada, COM e SEM o fungo filamentoso *Hormoconis resinae*, em uma fase aquosa (meio mineral Bushnell-Haas); querosene de aviação, biquerosene (BQAV- farnesano) e a mistura de 10% de BQAV com querosene, após 28 dias de incubação a 28 °C



* Destaque para a biomassa formada na interface água/combustível (seta preta) e valores (ácidos) de pH da fase aquosa após o crescimento fúngico.

Com relação a gasolina de aviação (AVGAS), conforme levantamento bibliográfico utilizando as Bases de Buscas Pubmed, Scopus, Web of Science, Embase e Compendex, não foi encontrado nenhum artigo científico de investigação sobre contaminação microbiana durante o armazenamento (BRILHANTE *et al.*, 2024). Em trabalho inicial de investigação sobre esse assunto, a equipe da UFRGS, avaliou amostras coletadas em frascos estéreis de AVGAS de um tanque de estocagem aéreo e do tanque de uma aeronave do aeroclube (Rio Grande do Sul, Brasil).

Na Figura 5 é possível observar as etapas adotadas neste estudo preliminar. Inicialmente, foi realizada a prospecção dos microrganismos (Norma ASTM D 6974-03) e avaliação da capacidade de crescimento de microrganismos no AVGAS. As amostras foram filtradas usando membranas de 0,22 µm de porosidade, em condições assépticas, utilizando uma bomba a vácuo em um sistema Kitassato com objetivo de reter os microrganismos presentes no AVGAS. Em seguida, as respectivas membranas foram depositadas em diferentes meios de culturas em

placas de Petri e os sedimentos visíveis das amostras foram coletados com suabes estéreis e inoculados em meios de cultura. Foi possível realizar o isolamento de microrganismos (bactérias e fungos) de AVGAS coletada, utilizando os métodos de filtração e cultivo em meios de cultura. Após o isolamento e purificação dos isolados microbianos foram obtidas 18 bactérias e 6 fungos filamentosos.

O teste de degradabilidade preliminar realizado em frascos com meio mineral e AVGAS utilizando dois isolados fúngicos do gênero *Penicillium*, mostrou a mudança de cor do indicador redox em 8 dias, sendo a biomassa média quantificada de 12,8 mg, após 84 dias de incubação (Figura 5).

Figura 5 - Etapas de avaliação da prospecção microbiana de amostras de gasolina de aviação (AVGAS), com o isolamento, caracterização dos microrganismos e capacidade preliminar do crescimento de fungos do gênero *Penicillium* sp. em microcosmos com meio mineral e AVGAS



Fonte: BRILHANTE *et al.*, 2023.

Os resultados obtidos até o momento indicaram o potencial de 2 fungos prospectados de crescerem na presença de AVGAS (mudança de cor do indicador redox e biomassa produzida), alertando também para a atenção às Boas Práticas durante o armazenamento deste combustível.

5 MONITORAMENTO DA CONTAMINAÇÃO MICROBIANA

A estratégia de monitoramento permitirá informar se o sistema de estocagem com relação à presença de microrganismos encontra-se em condições aceitáveis ou de alerta, exigindo uma ação de remediação (PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016). O monitoramento da contaminação microbiana para combustíveis pode ser conduzido com metodologias que estimam o número de microrganismos, tanto na fase combustível ou na fase aquosa, seguindo normas internacionais (IP 385; ASTM D6974; ASTM D7687; ASTM 7978) (Figura 6). A primeira Norma Brasileira ABNT 16732-19 (**Combustíveis líquidos e sistemas associados - Requisitos para prevenção, monitoramento e controle de contaminação microbiana**) foi homologada em 2019. A contaminação microbiana requer avaliação em todas as fases de distribuição e uso de combustíveis, no entanto os laboratórios de análises não estão disponíveis no mundo inteiro, já que a indústria precisa de testes “*in situ*” para o monitoramento microbiológico. Além disso, alguns testes podem ser apropriados para o uso na análise de amostras da fase aquosa e não adequados para o uso em combustíveis, ou vice-versa (Figura 6).

A Associação do transporte Aéreo (IATA), o Instituto do Petróleo (IP) no Reino Unido e a American Society of for Testing and Materials (ASTM) nos Estados Unidos, estabeleceram metodologias e valores para a detecção de condições aceitáveis e situações de alerta de contaminação microbiana em combustíveis (Figura 6). De acordo com HU *et al.*, (2020), como medida de atenção e para determinar e extensão da proliferação de microrganismos em tanques de combustível de aviação, a Associação do Transporte Aéreo Internacional (IATA), recomenda a testagem tanto da fase aquosa quanto da fase combustível. Vários testes microbiológicos e bioquímicos têm sido utilizados para acessar a contaminação microbiana nos combustíveis de aviação, tais como: contagem de bactérias heterotróficas em placas, ensaios de imunoabsorção enzimática (ELISA) (ASTM-D6974), ensaios utilizando o trifosfato de adenosina (ATP) e a técnica de reação em cadeia da polimerase (PCR) (ASTM-D7463-16; ASTM-D7687-17) (RAUCH *et al.*, 2006; BROWN *et al.*, 2010) (Figura 6). Quando a fase amostrada é o combustível, adota-se a norma da ASTM D6974 ou a Norma do Instituto do Petróleo-IP 385/99 que consiste na filtração à vácuo de um volume conhecido de uma amostra de combustível através de uma membrana de 0,45 µm de porosidade, com quantificação

pelo microscópio. No entanto, a American Society for Testing and Materials (ASTM) vem desenvolvendo orientações para avaliar testes que não utilizem o cultivo de microrganismos, como método de referência em amostras de combustíveis e de água associada a combustíveis. A Norma ASTM 7978 descreve o método que utiliza os laminocultivos, que pode ser limitado, pois pode subestimar a contaminação microbiana, especialmente em amostra oleosa, onde a absorção do combustível à superfície do ágar pode ser errônea e a sensibilidade numérica inadequada. Neste sentido, agentes surfactantes precisam ser utilizados para a solubilização adequada da fase combustível e estimativa microbiana correta (BARBOSA *et al.*, 2020). O cultivo ainda tem sido muito utilizado na exploração da contaminação microbiana em combustíveis de aviação, havendo três níveis a serem considerados, como demonstrado a seguir:

*UFC - unidades formadoras de colônia.

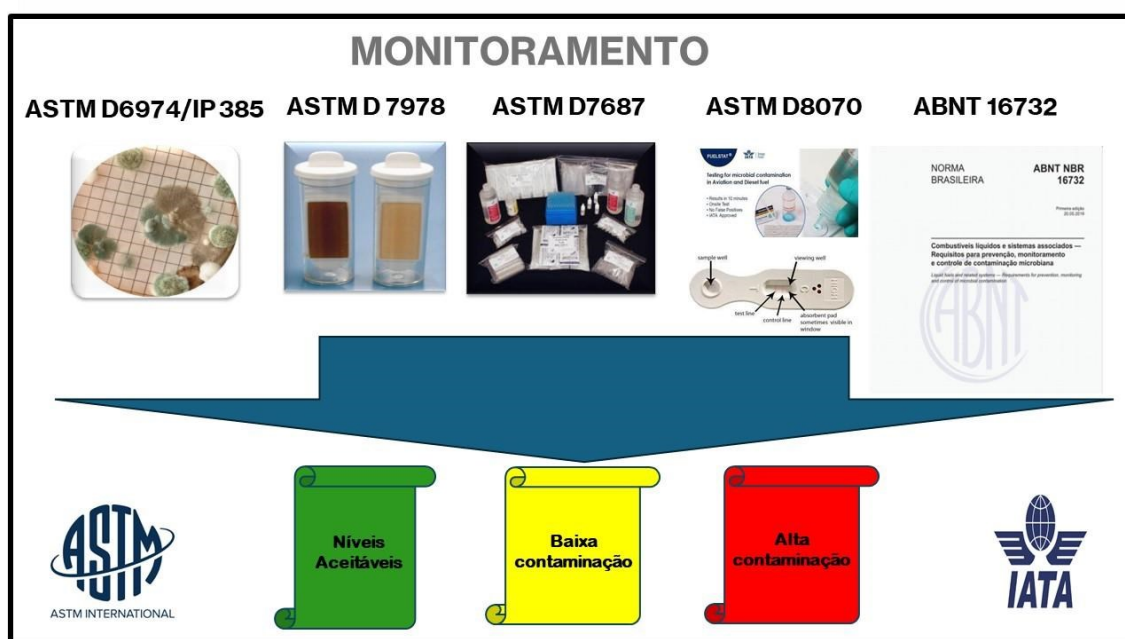
BAIXO: $<10^4$ UFC L⁻¹ **MODERADO:** $10^4 - 10^5$ UFC L⁻¹ **ALTO:** $> 10^5$ UFC L⁻¹

Os padrões preconizados pelo Joint Inspection Group (JIG), estão relacionados com o controle de qualidade dos combustíveis e com procedimentos operacionais, que consistem em metodologias acordadas internacionalmente para o manuseio de combustíveis de aviação em aeroportos e instalações de estocagem e transporte (RUAMCHAT *et al.*, 2017).

O teste mais moderno de detecção de contaminação microbiana em querosene foi homologado como norma ASTM D6974-16. Trata-se de uma primeira geração do teste, abordando a detecção de composto produzido pelo fungo *H. resinae* durante seu crescimento no querosene. Uma segunda versão do teste, também detecta a presença de outros microrganismos, como fungos e bactérias. Esse teste manifesta grande acurácia, com resultados rápidos (10 minutos) e não exige treinamento por parte da equipe nem equipamentos especiais. Já o teste para combustíveis The HY-LiTE® Jet A-1, que é um teste quantitativo bioluminescente, indica a presença de microrganismos aeróbicos e anaeróbicos no combustível e na água associada ao combustível através da quantificação do trifosfato de adenosina (ATP) (Norma ASTM D 7687) presente na amostra teste. O teste fica pronto em menos de 10 minutos e é diretamente proporcional à quantidade de ATP microbiano

presente na amostra (PASSMAN, 2013; LI *et al.*, 2018; KNEZEVIC, 2020). Na Figura 6 é apresentado um resumo das metodologias de monitoramento da contaminação microbiana em combustíveis de aviação.

Figura 6 - Metodologias padrões certificadas (IP; ASTM) pela Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA) de monitoramento da contaminação microbiana em combustíveis de aviação e valores médios orientativos da densidade de microrganismos em amostras coletadas no tanque (da distribuidora, do caminhão-tanque ou da aeronave) da fase combustível e fase água livre, se presente



*UFC: Unidade Formadora de Colônia

BAIXO: $< 10^4$ UFC L⁻¹ **MODERADO:** 10^4 a 10^5 UFC L⁻¹ **ALTO:** $> 10^5$ UFC L⁻¹

6 MÉTODOS DE CONTROLE DA CONTAMINAÇÃO MICROBIANA

O manuseio e o controle da qualidade do combustível de aviação são considerados procedimentos críticos que exigem muita segurança e confiabilidade. Na medida que não é possível manter o combustível livre de microrganismos, as Boas Práticas, que envolvem medidas simples e eficazes como drenagens regulares da água formada nos lastros e a limpeza (remoção dos biofilmes formados na parede dos tanques), são consideradas ações estratégicas que protegem e evitam a formação da indesejada borra biológica, que pode provocar saturação prematura de filtros e desgastes prematuros no sistema de injeção das aeronaves.

A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) juntamente com a

Associação Internacional de Transportes Aéreos e o “Joint Inspection Group” estão mobilizados na prevenção da contaminação microbiana em combustíveis de aviação. A OACI emitiu a diretiva DOC 9977, que é um guia para o fornecimento de combustível de aviação na aviação civil, e a IATA emitiu o padrão EI/JIG 1530, que define os requisitos de garantia de qualidade para a fabricação, armazenamento e distribuição de combustíveis de aviação para aeroportos. Neste sentido, exige-se que ao longo da cadeia tenha-se a garantia do controle de qualidade nas fases de produção, fornecimento e estocagem do combustível de aviação (PASSMAN, 2013; SHKILNIUK & BOICHENKO, 2019; KNEZEVIC, 2020; YAN *et al.*, 2023).

O controle da contaminação microbiana em tanques de combustíveis envolve a adoção de métodos físicos e químicos preconizados nas normas e na literatura (PASSMAN, 2013; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2009; BENTO *et al.*, 2016; SRIVASTAVA & HANCSÓK, 2014; ZIMMER *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2022). Se ações preventivas (drenagem dos tanques e filtragens) se mostrarem insuficientes, métodos como desinfecção de tanques de combustível e utilização de compostos antimicrobianos (aditivos biocidas) ao combustível deverão ser considerados (KNEZEVIC, 2020; MATVYEYEVA *et al.*, 2021; YAN *et al.*, 2023).

6.1 Métodos físicos de controle

Como forma de controle e prevenção, são indicados procedimentos que envolvem a drenagem regular da água que pode acumular no fundo dos tanques armazenadores (refinaria, distribuidora e aeroporto, na aeronave e nas asas), limpeza dos tanques e procedimentos envolvendo a filtragem do querosene de aviação ou do AVGAS (Normas **ABNT NBR 15.512; 15.216-10; 16732-19**).

6.2 Métodos químicos de Controle

A utilização de compostos antimicrobianos ou biocidas como forma de controle da contaminação microbiana em querosene de aviação ocorre desde a década de 60 (PASSMAN, 2013). Os biocidas compreendem uma classe de amplo espectro de produtos com componentes e estruturas químicas diversas (compostos

orgânicos e inorgânicos) (GAYLARDE, 1995; BENTO *et al.*, 2005, 2016; ZIMMER & BENTO, 2020; KNEZEVIC, 2020; YAN *et al.*, 2023). Os biocidas são comumente classificados, de acordo com os seus organismos alvos, como: fungicidas, bactericidas ou com um espectro de ação que considera ambos os grupos (GAYLARDE, 1995; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; ZIMMER & BENTO, 2020). Os fabricantes de biocidas recomendam tratamentos que cubram dosagens preventivas (manutenção) e dosagens de “choque” (BENTO & GAYLARDE, 2001; RAJASEKAR *et al.*, 2012; PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; ZIMMER & BENTO, 2020; YAN *et al.*, 2023). Dependendo do nível de contaminação microbiana, apontada pelo monitoramento, pode haver a indicação da adição de baixas concentrações do biocida como uma abordagem preventiva. Altas concentrações de biocida são indicadas como uma abordagem curativa, quando o nível da contaminação microbiana é indicado como alto (PASSMAN, 2013; BENTO *et al.*, 2016; ZIMMER & BENTO, 2020; YAN *et al.*, 2023).

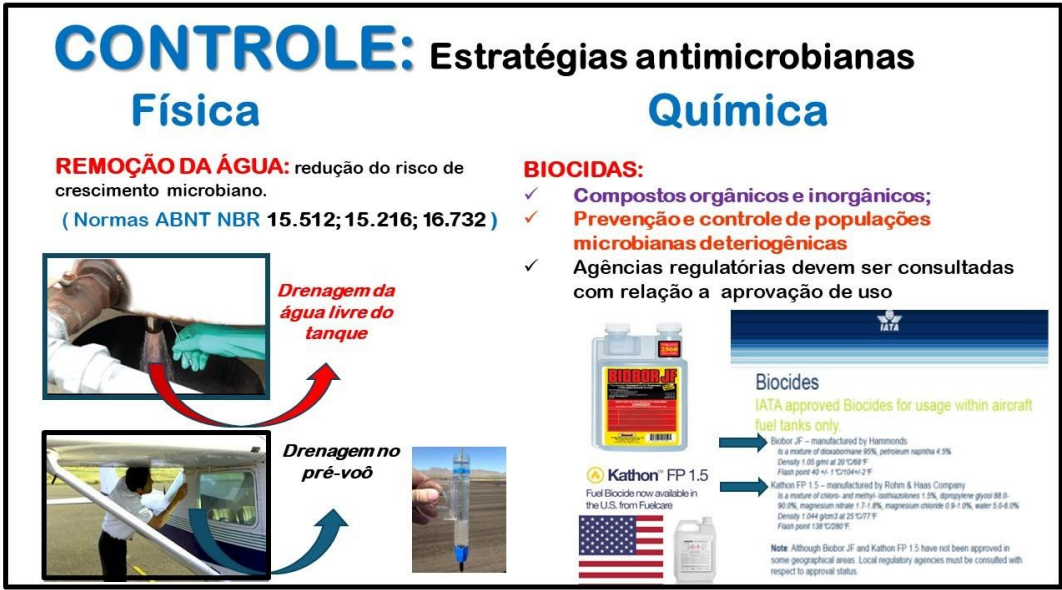
O caráter químico dos biocidas permite que sejam classificados em duas categorias: oxidantes (ozônio, peróxido de hidrogênio, compostos clorados) e não oxidantes (compostos sulfurados, estanhados, isotiazolonas, sais de cobre e outros) (GAYLARDE, 1995; BROWN *et al.*, 2011; BENTO *et al.*, 2016; YAN *et al.*, 2023). Algumas características são exigidas de um biocida para combustíveis, tais como: apresentar amplo espectro (ação sobre fungos e bactérias), não reduzir a qualidade dos combustíveis, ter ação prolongada, coeficiente de partição que permita que disperse tanto na fase combustível quanto na fase aquosa; não ser prejudicial a estrutura do motor, não ser corrosivo ao sistema de armazenamento e não provocar a geração de poluentes durante a combustão do combustível (GAYLARDE, 1995; RAJASEKAR *et al.*, 2012; PASSMAN, 2013. SHKILNIUK & BOICHENKO, 2019; ZIMMER & BENTO, 2020; KNEZEVIC, 2020).

A IATA (Associação de Transporte Aéreo Internacional) aprovou moléculas antimicrobianas (mistura de isotiazolonas e mistura de dioxiborinanos) para uso exclusivo no querosene de aviação, armazenado em tanques dentro das aeronaves. Embora aprovados pelo IATA, o uso destes produtos biocidas comerciais devem ser liberados pelas agências regulatórias de cada país (PASSMAN, 2013) (Figura 6). Os biocidas aprovados para utilização em combustíveis de aviação são

comercializados com o nome de Kathon FP1.5 e outro Biobor JF (aprovado para uso na União Europeia) (REPETTO *et al.*, 2016; KNEZEVIC, 2020). A utilização dos biocidas é permitida pelos fabricantes de motores e fuselagem, com uso intermitente durante o tempo de manutenção (REPETTO *et al.*, 2016) (Figura 7).

Uma das maiores preocupações no que se refere a utilização de biocidas em combustíveis é a possibilidade de aumentar a emissão de poluentes durante a combustão e o descarte da água que se forma no fundo dos tanques de estocagem (BENTO *et al.*, 2016; KNEZEVIC, 2020; YAN *et al.*, 2023). Na Figura 7 é apresentado um resumo das estratégias física e química para evitar a contaminação microbiana e degradação dos combustíveis armazenados (Figura 7).

Figura 7 - Estratégias antimicrobianas de controle físico e químico da contaminação microbiana durante a estocagem de combustíveis da aviação, certificadas e recomendadas (IP; ASTM; ABNT-NBR e IATA)



Fonte: IP; ASTM; ABNT-NBR e IATA.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria do petróleo e da aviação são consideradas atividades globais e de importância econômica no mundo moderno. Os combustíveis utilizados na aviação exigem especificações que devem atender aos mais elevados padrões de qualidade.

Por esta razão, a estabilidade dos combustíveis de aviação no armazenamento é garantida pelo cumprimento de normas que permitem sua utilização em qualquer parte do mundo, com segurança e confiabilidade. A aviação mundial e brasileira tem participado do esforço global na redução das emissões de gases do efeito estufa produzidos durante o processo de combustão dos combustíveis. Os combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) são uma alternativa sustentável, renovável e com diversas vantagens ambientais sobre o fóssil tradicional. Alterações na qualidade final dos combustíveis de aviação durante o armazenamento podem ser determinadas por fatores limitantes tais como físicos, químicos e biológicos (susceptibilidade natural de degradação por microrganismos). Neste sentido, ações de monitoramento (seguindo metodologias padrões certificadas nacionais e internacionais) permitem identificar se o sistema de distribuição e armazenamento de combustíveis encontra-se em condições aceitáveis ou de alerta. Com a indicação das condições de estocagem é possível adotar as melhores práticas que visem o controle e a prevenção da contaminação de qualquer natureza (química e/ou biológica).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15216-10- **Armazenamento de Líquidos inflamáveis e combustíveis: controle de qualidade no armazenamento, transporte e abastecimento de combustíveis de aviação**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16732-19 - **Combustíveis líquidos e sistemas associados - Requisitos para prevenção, monitoramento e controle de contaminação microbiana**. Rio de Janeiro, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Homepage**. Brasília: ANC, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br> Acesso em: 9 nov. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 856, de 22 de outubro de 2021**. Brasília: ANP, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 901, de 18 de novembro de 2022**. Brasília: ANP, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ATSM D1655**: 2019. ATSM, 2019a. Disponível em: https://infostore.saiglobal.com/en-au/standards/astm-d-1655-2019-141453_saig_astm_astm_2714774/. Acesso em: 4 out. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ATSM D4054**: 2019. ATSM, 2019b. Disponível em: https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/astm-d-4054-2019-147730_saig_astm_astm_2731455/. Acesso em: 4 out. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ATSM D7566**: 2019. ATSM, 2019c. Disponível em: https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/astm-d-7566-2019-158110_saig_astm_astm_2714863/. Acesso em: 4 out. 2023.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em: . Acesso entre os meses de março a junho de 2024. ANAC- Agência Nacional de Aviação Civil- www.gov.br/anac/pt-br

ARAUJO, D. 2020 <https://autoentusiastas.com.br/2020/08/um-pouco-da-historia-da-gasolina-aeronautica/>

BAENA-ZAMBRANA, S. *et al.* **Behaviour of water in jet fuel: a literature review**. Progress in Aerospace Sciences, v. 60, p. 35–44, jul. 2013.

BAKANAUKAS, S. **Bacterial Activity in JP-4 Fuel**. Wright Air Develop Center Rept., p. 32-58, 1958.

BARBOSA, C.S.; FIORI, P., FUENTEFRIA, A.; TEIXEIRA, R.; VISCARDI, S.L.; BENTO, F.M. **Uso de laminocultivos na avaliação da contaminação microbiológica em combustíveis estocados** IN: Coletânea Estudos Ambientais e Agrônômicos: resultados para o Brasil Editora Pascal, v.4: 10-27, 2020.

BENTO, F.M.; GAYLARDE, C.C. **Biodeterioration of stored diesel oil: studies in Brazil**. International Biodeterioration & Biodegradation, V. 47(2): 107-112, 2001.

BENTO, F.M. *et al.* **Degradation and corrosive activities of fungi in a diesel-mild steel-aqueous system**. World Journal Microbiology and Biotechnology, v. 21, n. 2, p. 135–142. 2005.

BENTO, F. M. *et al.* **Diagnóstico, Monitoramento e controle da contaminação microbiana em biodiesel e misturas durante o armazenamento**. In: PINHO, D. M.M.; SUAREZ, P. A. Z. (Orgs.). Armazenagem e uso de Biodiesel: problemas associados e formas de controle. Brasília: CDT; UNB, p. 112-175, 2016.

ISSN 2763-7697

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. 2011.

BOSZCZYK-MALESZAK, H. *et al.* **Effectiveness of biodegradation of petroleum products by mixed bacterial populations in liquid medium at different pH values**. Polish Journal of Microbiology, v. 55, n. 1, p. 69–73. 2006.

BRILHANTE, E. L. G.; BEKER, S. A.; BENTO, M. F. **Gasolina de aviação: isolamento e caracterização de microrganismos com capacidade deteriorogênica**. ANAIS LABS 10- 10 Simpósio Latino-Americano de Biodeterioração e Biodegradação, 2024 *in press*.

BROWN, L.M.; MCCOMB, J.P.; VANGSNESS, M.D.; BOWEN, L.L.; MUELLER, S.S.; BALSTER, L.M.; BLECKMANN, C.A. **Community dynamics and phylogenetics of bacteria fouling Jet A and JP-8 aviation fuel**. International Biodeterioration & Biodegradation, 64(3): 253-261, 2010.

COMMERCIAL AVIATION ALTERNATIVE FUELS INITIATIVE. 2021. CAAFI Webinar Series: the State of Sustainable Aviation Fuel (SAF). Washington, DC: CAAFI, 2021. Disponível em: https://caafi.org/resources/pdf/CAAFI_Webinar_State_of_SAF_05_06_2020.pdf. Acesso em: 4 maio. 2024.

DOLIENTE STEPHEN S., NARAYAN ARAVIND, TAPIA JOHN FREDERICK D., SAMSATLI NOURI J., ZHAO YINGRU, SAMSATLI SHEILA. **Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components** Frontiers in Energy Research, v.8. 2020.

DUONG, L. H, *et al.* **Soap-derived biokerosene as an aviation alternative fuel: production, composition, and properties of various blends with jet fuel.** Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, v. 153, p. 107980, maio. 2020.

FRANCISCONE, B.G.; LIMA, P.A.L. **A consolidação da aviação civil internacional e suas implicações para a implementação do plano global de navegação aérea.** R. Bras. Av. civil. Ci. Aeron., Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 6-32, maio. 2021.

GAYLARDE, C. C. Design, selection and use of biocides. In: GAYLARDE, C.; VIDELA, H. (Ed.). **Bioextraction and biodeterioration of metals.** New York: Cambridge University Press, p. 327-360, 1995

GAYLARDE, C. C.; BENTO, F. M.; KELLEY, J. **Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control.** Revista de Microbiologia, v. 30, n. 1, p. 01-10, 1999.

GÓMEZ-BOLÍVAR J, WARBURTON MP, MUMFORD AD, MUJICA-ALARCÓN JF, ANGUILANO L, ONWUKWE U, BARNES J, CHRONOPOULOU M, JU-NAM Y, THORNTON SF, ROLFE SA, OJEDA JJ. **Spectroscopic and Microscopic Characterization of Microbial Biofouling on Aircraft Fuel Tanks.** Langmuir. 2024 Feb 6;40(7):3429–39, 2024.

GUTHEIL, N.G. **Ocorrência de *Cladosporium resinae* (Lindau) de Uries em Querosene de aviação no Brasil.** Porto Alegre: Instituto Tecnológico do RS, 1966.

GUSTON, B. **Development of Piston Aero Engines.** 2nd edition; Edited by Britsch Library, 231 pg, 1999.

HANGAR 33. **A evolução das aeronaves.** Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/a-evolucao-das-aeronaves/>. Acesso em abril de 2018.

HEMINGHAUS, G., BOVAL, T., BACHA, J., BARNES, F., FRANKLIN, M., GIBBS, L., HOGUE, N., JONES, J., LESNINI, D., LIND, J. AND MORRIS, J. **Aviation Fuels Technical Review**, Technical Report. Chevron Corporation, 2006.

HILL, T. **Microbial growth in aviation fuel.** Aircraft Engineering and Aerospace Technology; Bradford v. 75, n. 5, p. 497-502. 2003.

HILL, 2012, G.C. **Investigation of Susceptibility of Alternative Jet Fuels to Microbiological Growth:** ALFA-BIRD Project. St Mellons: ECHA Microbiology Limited, 2012. Disponível em: https://www.caafi.org/news/pdf/ECHA_Microbial_Rpt_Alpha_Bird_Jun12.pdf. Acesso em 12 junho, 2024.

HU, D. *et al.* **A survey of microbial contamination in aviation fuel from aircraft fuel tanks.** Folia Microbiologica, v. 65, n. 2, p. 371–380, 2019.

HU, D. *et al.* **Profiling the microbial contamination in aviation fuel from an airport.** Biofouling, v. 35, n. 8, p. 856–869. 2020.

International Air Transport Association- IATA Sustainable Aviation Fuel Fact Sheet. 2023. Available online: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-{}-{}-alternative-fuels/>. Acesso em: 21 maio 2024.

International Air Transport Association- IATA Guidance Material on microbiological in Aircraft Fuel Tanks <https://www.iata.org/en/publications/store/tech-fuel-servicing-guidelines/> . Acesso em: 21 maio 2024).

ILHA, B. K.V. et al. **Equações lineares e não lineares para prever o comportamento de propriedades físico-químicas de combustível de aviação misturados com Bioquerosene Drop In alternativo.** Química Nova, v. 42, n. 1. p. 1-19. 2019.

JIA, T. et al. **A comprehensive review of the thermal oxidation stability of jet fuels.** Chemical Engineering Science, v. 229, p. 116157. 2021.

KRIVUSHINA A.A.; CHEKUNOVA L.N.; MOKEEVA L. **Features of *Amorphotheca resinae* strains in their cultivation on aviation fuel and nutrient media.** Mikologiya I Fitopatologiya, V: 53(1): 26-35, 2019.

KRIVUSHINA A.A.; BOBYREVA T.V.; MOKEEVA V.L. **The growth ability of “kerosene fungus” *Amorphotheca resinae* strains isolated from different habitats in aviation fuel** Mikologiya I Fitopatologiya, V.54 (2): 143 – 149, 2020.

KROHN, I. et al. **Deep (Meta)genomics and (Meta)transcriptome analyses of fungal and bacteria consortia from aircraft tanks and kerosene identify key genes in fuel and tank corrosion.** Frontiers in Microbiology, v. 12, p. 722250. 2021.

KNEZEVIC, J. **Microbial Decontamination of Fuel Tanks as a Mechanism of the Motion of an Aircraft through MIRCE Space.** Archives in Biomedical Engineering & Biotechnology (ABEB) 4(5): 2020.

KUMAR, T., MOHSIN, R., GHAFIR, M.F.A., KUMAR, I., AND WASH, A.M. **“Concerns over use of leaded aviation gasoline (AVGAS) fuel”** Chemical Engineering Transactions 63, 2018.

KUMAR, T. et al. **Material and chemical stability of using motor gasoline/automotive gasoline in piston engine aircrafts – a review.** IOP Conference Series, 2020.

JOHNSON, D. **Chapter 10. The Effects of Storage on Turbine Engine Fuels.** In book: Flight Physics - Models, Techniques and Technologies, Edited by Intech Open pg:193-210, 2018.

LAM, J.K.W.; MARK D. CARPENTER, COLLEEN A. WILLIAMS, JANICE I. HETHERINGTON. **Water solubility characteristics of current aviation jet fuels.** Fuel,133: 26-33, 2014.

LI, Z., XIONG, Y., CHEN, B., MA, Z. **The contamination degree of characteristic fungi in jet fuel detected by ATP bioluminescence.** American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 14 (2), pp. 162-167, 2018.

LEE D.S.; FAHEY, D.W.; SKOWRON, A.; ALLEN, M.R.; BURKHARDT, U.; CHEN,Q.; DOHERTY, S.J.; FREEMAN, S.; FORSTER, P.M.; FUGLESTVEDT, J.; GETTELMAN, A.; DE LEÓN, R.R.; LIM,L.L.; LUND,M.T.; MILLAR,R.J.; OWEN, J.E. PENNER, PITARI,G.; M.J. PRATHER,SAUSEN, R., WILCOX,L.J. **The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.** Atmospheric Environment, v. 244, p. 117834. 2021.

LOBATO, M.R. et al. **Prospecção, identificação e capacidade de crescimento de microrganismos de querosene de aviação e bioquerosene durante estocagem simulada.** In: NOBRE, Camila Pinheiro; OLIVEIRA, Anna Christina Sanazario de. Estudos ambientais e agrônômicos, resultados para o Brasil. São Luís: Editora Pascal, p. 249-270, 2020.

LOBATO, M. et al. **Behavior of deteriogenic fungi in aviation fuels (fossil and biofuel) during simulated storage.** Braz. J. Microbiol. 54:1603–1621, 2023.

MARCHAL, R.; S. PENET, F. SOLANO-SERENA, J. P. VANDECASTEELE. **Gasoline and Diesel Oil Biodegradation**. Oil & Gas Science and Technology, v. 58 (4): 441-448, 2010.

NAYA, S. **Estimating water and solid impurities in jet fuel from ISO codes**. Energy and Fuels, v.27 (12): 858–867. 2013.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M.. **Conversion routes for production of biokerosene – status and assessment**. Biomass Conversion and Biorefinery, v. 5, n. 4, p. 367-385, 2015.

OGSTON, ALEXANDER R. **“A Short History of Aviation Gasoline Development, 1903 – 1980.”** SAE Transactions, v.90: 2587–2600, 1981.

ONUORAH, S., OBIKA, I.; ORJI, M.; ODIBO, F. **Microbial Contaminants in the Commercial Aviation Fuel Obtained from Benin City Airport, Nigeria**. Universal Journal of Microbiology Research 3(3): 31-35, 2015.

PASSMAN, F.J. **Microbial contamination and its control in fuels and fuel systems since 1980 - a review**. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 81, p. 88–104. 2013.

PETERS, M.A.; ALVES, C.T.; ONWUDILI, J.A. **A Review of Current and Emerging Production Technologies for Biomass-Derived Sustainable Aviation Fuels**. Energies, v. 16: 6100, 2023.

PETRESCU, R.V.; AVERSA, R.; AKASH, B.; BUCINELL, R.; CORCHADO, J.; APICELLA, A.; PETRESCU, F.I.T. **History of Aviation-A Short Review** Journal of Aircraft and Spacecraft Technology, 1 (1): 30-49, 2017.

PETROBRAS. **MANUAL DE QUEROSENE DE AVIAÇÃO**, 2021. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/QAV-Informações-Técnicas>. Acesso em: 3 out. 2022.

PETROBRAS, **MANUAL DE GASOLINA DE AVIAÇÃO**, 2019. Disponível <https://petrobras.com.br/data/Manual-de-GAV.pdf>. Acesso em 13 jun. 2024.

RAIKOS, V., VAMVAKAS, S.S., KAPOLOS, J., KOLIADIMA, A., KARAIKAKIS, G. **Identification and characterization of microbial contaminants isolated from stored aviation fuels by DNA sequencing and restriction fragment length analysis of a PCR-amplified region of the 16S rRNA gene**. Fuel, 90 (2), pp. 695-700, 2011.

RAIKOS, V.; SOTIRIS S. VAMVAKAS, DIMITRIOS, S., KAPOLOS, J.; KARAIKAKIS, G.; KOLIADIMA, A. **Water content, temperature and biocide effects on the growth kinetics of bacteria isolated from JP-8 aviation fuel storage tanks**. Fuel: 93: 559-566, 2012.

RADWAN, O.; BROTHERS, M; COYLE, V.; CHAPLEAU, M.E.; CHAPLEAU, R.R.; KIM, S.; RUIZ, O. **Electrochemical biosensor for rapid detection of fungal contamination in fuel system**. Biosensors and Bioelectronics, v. 211: 114374, 2022.

RADWAN, O.; CHAPLEAU, M.E.; CHAPLEAU, R.R.; RUIZ, O. **Discovery, development and implementation of biomarker-specific peptide BRE for biosensing hydrocarbon-degrading fungi**. International Biodeterioration & Biodegradation, 178: 105568, 2023.

RAFIN, C.; VEIGNIE, E. **Hormoconis resinae, the kerosene fungus**. In: MCGENITY, Terry J. Taxonomy, Genomics and Ecophysiology of Hydrocarbon-Degrading Microbes. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Switzerland: Springer, p. 299–318, 2019.

RAUCH, M. E, *et al.* **Characterization of microbial contamination in United States Air Force aviation fuel tanks.** Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, v. 33, n. 1, p. 29–36. 2006.

REPETTO; S.L.; COSTELLO, J.F.; PARMENTER, D. **Current and Potential Aviation Additives for Higher Biofuel Blends in Jet A-1.** Biofuels for Aviation, p. 261–275. 2016.

ROBBINS, J.A.; LEVY, R. **A review of the microbial degradation of fuel.** In: Directory of Microbicides for the Protection of Materials: a Handbook, edited by PAULUS, Wilfried. Dordrecht: Springer, p. 177- 201, 2005.

RUAMCHAT, K.; THAWESAENGSKULTHAI, N.; PONGPANICH, C. **A method of prioritizing quality improvement in aviation refuelling services at airport.** Advances in Mechanical Engineering, v. 9, n. 6, p. 1– 12, 2017.

RYE, L.; BLAKEY, S. WILSON, C.W. **Sustainability of supply or the planet: A review of potential drop-in alternative aviation fuels.** Energy and Environmental Science, 3:17-27, 2010.

SIEGERT, W. Microbial Contamination in Diesel Fuel - Are new problems arising from biodiesel blends? In: IASH 2009- **11th International Conference on Stability, Handling and Use of Liquid Fuels**, Prague, Czech Republic, 18-22, 2009.

SILVA, T. L. *et al.* **Microbial sludge formation in Brazilian marine diesel oil (B0) and soybean methylic biodiesel blends (B10 and B20) during simulated storage.** Fuel, v. 8035. 2022.

SHAPIRO, T. *et al.* **Revealing of non-cultivable bacteria associated with the mycelium of fungi in the kerosene-degrading community isolated from the contaminated jet fuel.** Journal of Fungi, v. 7, n. 1, p. 43. 2021a.

SHAPIRO, T. N. *et al.* **Community of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria in Petroleum Products on the Example of TS-1 Jet Fuel and AI-95 Gasoline.** Applied Biochemistry and Microbiology, v. 57, nº 9, p. 949–61. Dez. 2021b.

TECMUNDO. 2024. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/127105-genio-vs-genio-4-combate-aereo-entre-santos-dumont-irmaos-wright.htm> Acesso em: 02 set. 2024.

VALLE, S. M. **Estudo da corrosão microbiológica do alumínio e liga de alumínio 2024, por contaminantes fúngicos de turbo combustível.** Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 197 pg, 1991.

YAN X, HAN R, FAN W, SHAN B, YANG J, ZHAO X. **Mechanism of 5-chloro-2-methyl-4-isothiazolin-3-one (CMIT) in controlling microbial problems in aircraft fuel systems.** RSC Adv. v.13:19485-19494, 2023.

YANG, J.; ZHONG XIN, QUAN (SOPHIA) HE, KENNETH CORSCADDEN, HAIBO NIU, **An overview on performance characteristics of bio-jet fuels.** Fuel, v. 237: 916-936, 2019.

YEMASHOVA, N.A. *et al.* **Biodeterioration of crude oil and oil derived products: a review.** Reviews in Environmental Science and Biotechnology, v. 6 (4): 315–337. 2007.

WEI, H. *et al.* **Renewable bio-jet fuel production for aviation: a review.** Fuel, v. 254:115999, 2019.

WISE, M.; MURATORI, M.; KYLE, P. **Biojet fuels and emissions mitigation in aviation: an integrated assessment modeling analysis.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 52: 244-253, 2017.

UBRABIO. **BIOQUEROSENE NO BRASIL**, Edição nº 1, 48 pg, Setembro de 2017

UNITED STATES. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. **Sustainable aviation fuel: review of technical pathways**. Washington: EERE, 2020. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.

ZHANG, J. *et al.* Surface coating on aluminium substrate with polymeric guanidine derivative to protect jet fuel tanks from microbial contamination. **Surface and Coatings Technology**, v. 422, p. 127521. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127521>

MIRANDA, M. B. **Aspectos Históricos da Aviação Civil Brasileira**. Revista Virtual Direito Brasil, v.8(2), 2014.

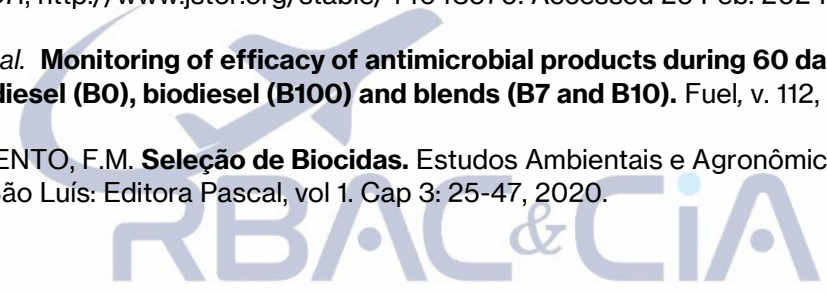
PEREIRA, M. A.; HAUENSTEIN, N.E.; FRIEDRICH, A. **Um relato sobre a evolução histórica da aviação**. XXIII Seminário Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2018. <http://home.unicruz.edu.br/seminario/anais/anais2018/XXIIISEMINARIOINTERINSTITUCIONAL>

OGSTON, A.R. **"A Short History of Aviation Gasoline Development, 1903 – 1980."** SAE *Transactions*, vol. 90, 1981, pp. 2587–600. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/44643969>. Accessed 29 Feb. 2024.

KERLEY, R.V. **"A History of Aircraft Piston Engine Lubricants."** SAE *Transactions*, vol. 90, 1981, pp. 2601–28. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/44643970>. Accessed 29 Feb. 2024.

ZIMMER, A. *et al.* **Monitoring of efficacy of antimicrobial products during 60 days storage simulation of diesel (B0), biodiesel (B100) and blends (B7 and B10)**. Fuel, v. 112, p. 153-62. 2013.

ZIMMER, A.; BENTO, F.M. **Seleção de Biocidas**. Estudos Ambientais e Agronômicos, Resultados para o Brasil. São Luís: Editora Pascal, vol 1. Cap 3: 25-47, 2020.


**Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas**
ISSN 2763-7697