



Amanda Seabra Kistler

**Rastreamento e Evidenciação de Ações de
Descarbonização na Produção de QAV utilizando
Blockchain**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Administração de Empresas, do Departamento de Administração da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Leonardo Lima Gomes

Rio de Janeiro
Abril de 2025



Amanda Seabra Kistler

**Rastreamento e Evidenciação de Ações de
Descarbonização na Produção de QAV utilizando
Blockchain**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Administração de Empresas da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Leonardo Lima Gomes
Orientador
PUC-Rio

Profa. Naielly Lopes Marques
PUC-Rio

Profa. Cristina Pimenta de Mello Spinetti Luz
UFRJ

Rio de Janeiro, 25 de abril 2025

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Amanda Seabra Kistler

Graduada em Economia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2021. Atualmente cursa o Doutorado em Administração de Empresas, com ênfase em finanças, também pela PUC-Rio. Na mesma instituição, é membro do Voltair – Centro de Pesquisa em Transição Energética.

Ficha catalográfica

Kistler, Amanda Seabra

Rastreamento e evidenciação de ações de descarbonização na produção de QAV utilizando blockchain / Amanda Seabra Kistler ; orientador: Leonardo Lima Gomes. – 2025.

69 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 2025.

Inclui bibliografia

1. Administração – Teses. 2. Blockchain. 3. Descarbonização. 4. QAV. 5. Cadeia de suprimentos. 6. Transição energética. I. Gomes, Leonardo Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Administração. III. Título.

CDD: 658

Agradecimentos

À Escola de Negócios da PUC-Rio (IAG) e ao meu orientador, Professor Leonardo Lima Gomes, pela dedicação, orientação e ensinamentos durante o desenvolvimento do trabalho.

À Professora Naielly Lopes Marques pelos conhecimentos que adquiri durante a jornada como integrante do Núcleo de Pesquisa em Transição Energética da PUC-Rio (Voltair).

À Petrobras, pelo incentivo e pela parceria que se inicia com o novo projeto TC1099.

À Radix, pela parceria e troca de conhecimentos ao longo do último ano, que contribuíram para o meu crescimento como pesquisadora.

À minha mãe, Christina, pelo apoio, incentivo, compreensão e suporte emocional em toda minha jornada acadêmica, da pré-escola à pós-graduação.

Ao meu pai, Henri, por todo o auxílio ao longo da minha trajetória estudantil, pelos conselhos, encorajamentos e contribuição intelectual.

Às minhas irmãs, Carolina e Giovanna, por me apoiarem e por sempre me lembrarem da minha capacidade.

Aos meus colegas de turma por compartilharam comigo essa intensa e gratificante trajetória.

Ao meu companheiro, Luis Felipe, por nunca me deixar desistir, e por todo o apoio, suporte e incentivos constantes.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

Resumo

Kistler, Amanda Seabra; Gomes, Leonardo Lima. **Rastreamento e Evidenciação de Ações de Descarbonização na Produção de QAV utilizando Blockchain**. Rio de Janeiro, 2025. 69p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O foco deste trabalho é mapear as cadeias de valor e de produção do querosene de aviação (QAV), com atenção especial aos pontos em que ações de descarbonização estão sendo implementadas e monitoradas. Para isso, propõe-se o uso da tecnologia *blockchain*, que permite a criação de um registro imutável das cadeias de produção e valor desse combustível. Essa abordagem proporciona transparência em todo o processo – da produção ao abastecimento das aeronaves – ao garantir a rastreabilidade da origem do QAV e sua conformidade com as regulamentações de segurança. Como principal contribuição, o estudo propõe a tokenização de atributos relacionados à descarbonização por meio de NFTs (*tokens* não fungíveis), que poderiam servir como instrumentos de comprovação para os clientes finais e até ser negociados em um mercado secundário. A natureza descentralizada e imutável de uma tecnologia de *ledger* distribuído (TLD) não apenas aprimora a gestão de métricas associadas à transição energética, como também minimiza o risco de fraudes – o que permite a automação de transações por meio de contratos inteligentes.

Palavras-chave

Blockchain; Descarbonização; QAV; Cadeia de Suprimentos; Transição Energética; Refino; Sustentabilidade.

Abstract

Kistler, Amanda Seabra; Gomes, Leonardo Lima (Advisor). **Tracking and Evidencing Decarbonization Actions in the Production of Aviation Kerosene Fuel (AKF) Using Blockchain Technology**. Rio de Janeiro, 2025. 69p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The focus of this work is to map the value and production chains of Aviation Kerosene Fuel (AKF), with particular attention to the points where decarbonization actions are being implemented and monitored. To do so, we propose the use of blockchain technology, which allows the creation of an immutable record of production and value chains for this fuel. This approach provides transparency throughout the process – from production to fueling aircraft – by ensuring the traceability of AKF's origin and its compliance with safety regulations. As a major contribution, the study proposes the tokenization of attributes related to decarbonization through NFTs (Non-Fungible Tokens), that could serve as evidence tools for end customers and even be traded in a secondary market. The decentralized and immutable nature of a Distributed Ledger Technology (DLT) not only enhances the management of metrics associated with the energy transition but also minimizes the risk of fraud, enabling the automation of transactions through smart contracts.

Keywords

Blockchain; Decarbonization; AKF; Supply Chain; Energy Transition; Refining; Sustainability.

Sumário

1. Introdução	10
2. Revisão de Literatura	13
2.1. Querosene de Aviação (QAV)	13
2.1.1. Petróleo bruto e o processo de refino do QAV	14
2.1.2. Emissão de carbono e outros poluentes no setor da aviação	17
2.1.3. Iniciativas globais de sustentabilidade	19
2.1.4. Acordos e colaborações internacionais em prol do meio ambiente	21
2.1.5. Combustíveis alternativos: SAFs	23
2.1.6. Estratégias do Brasil para descarbonizar o setor da aviação	27
2.2. Blockchain	30
2.2.1. Conceitos básicos e funcionamento	30
2.2.2. Mecanismo de consenso	31
2.2.3. Blockchains Públicas e Privadas	32
2.2.4. Blockchains Permissionadas e não Permissionadas	33
2.2.5. O uso de blockchain no setor de energia	34
2.2.6. O uso de blockchain em cadeias de suprimentos	35
3. O Modelo	37
3.1. Cenário geral	37
3.2. Blockchain Pública ou Privada?	39
3.3. Tecnologias e infraestrutura envolvidas no modelo	40
3.3.1. Integração de IoT e dispositivos inteligentes	40
3.3.2. O uso de contratos inteligentes e NFTs para o rastreamento e certificação	41
3.3.3. Oráculos: a ponte entre dados off-chain e on-chain	42
3.4. Características e o papel de cada participante	44
3.5. Benefícios e desafios do modelo	45
3.6. Resultados	46
4. Análise e Discussão	56
5. Conclusão	60
6. Referências bibliográficas	62

Lista de tabelas

Tabela 1 – Processos de conversão aprovados	25
Tabela 2 – As blockchains não permissionadas mais conhecidas	34
Tabela 3 – Tabela Resumo: Tecnologias e infraestrutura do modelo (seção 3.3)	43

Lista de figuras

Figura 1 – Componentes do combustível de aviação convencional	13
Figura 2 – As etapas da cadeia de suprimentos do petróleo	15
Figura 3 – Processo de refino do petróleo bruto (exemplo)	15
Figura 4 – Produção de combustível de aviação a partir do petróleo bruto	16
Figura 5 – Consumo histórico de combustível e RTK para voos domésticos e operações internacionais no Brasil - 2005 a 2021	18
Figura 6 – Emissões de CO ₂ na aviação em um cenário Net Zero	19
Figura 7 – Contribuições do CORSIA para a redução internacional de CO ₂ na aviação	23
Figura 8 – Rotas de coprocessamento	26
Figura 9 – Previsão da demanda por combustível de aviação e emissões de GEE	28
Figura 10 – Projetos de SAF anunciados no Brasil	28
Figura 11 – Ativos físicos envolvidos no processo de refino	46
Figura 12 – Modelo de tokenização de atributos relacionados à descarbonização por meio de NFTs	48
Figura 13 – Oráculos: a ponte entre dados off-chain e on-chain	50
Figura 14 – Cadeia de suprimentos do QAV e produção de combustível com pegada de carbono reduzida	52

1 Introdução

A combustão de combustíveis fósseis, o desmatamento e os processos industriais são algumas das atividades humanas que liberam quantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa (GEE). Essas atividades resultam em mudanças climáticas drásticas, como o aumento das temperaturas, representando um desafio global devido à elevada concentração de GEE na atmosfera terrestre (Rivera-Niquepa, Zuluaga e Rojas, 2023).

Atualmente, a Terra está aproximadamente 1,1°C mais quente do que no final do século XIX, e as emissões continuam a aumentar. Portanto, para mitigar os impactos mais severos das mudanças climáticas e garantir um planeta habitável, é essencial limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (The United Nations, 2015). Consequentemente, as emissões de GEE devem ser reduzidas em 45% até 2030, com o objetivo de alcançar emissões líquidas zero até, no máximo, 2050 (The United Nations, 2024a).

De acordo com o World Resources Institute (2024), o setor de energia é o maior responsável pelas emissões de GEE, representando impressionantes 75,7% das emissões globais totais. Por isso, para reduzir esse número e combater as mudanças climáticas, a transição energética busca substituir os combustíveis fósseis por alternativas sustentáveis e renováveis.

A aviação, sendo uma das principais emissoras de CO₂, enfrenta desafios significativos para reduzir seu impacto ambiental devido à sua dependência de combustíveis fósseis. Aeronaves requerem combustíveis com alta densidade energética para garantir eficiência, e o querosene de aviação (QAV) atua como uma solução de transição essencial enquanto tecnologias alternativas, como biocombustíveis e propulsão elétrica, estão em desenvolvimento. Além disso, o QAV é essencial para a aviação devido à sua alta densidade energética, que permite voos de longa distância e desempenho confiável em condições extremas.

No entanto, a implementação de estratégias eficazes de descarbonização do QAV apresenta desafios. Esses desafios surgem porque sistemas de gestão centralizados geralmente não são escaláveis nem adequados para lidar com múltiplos participantes, e os custos anuais de auditoria das fontes de energia e dos créditos de carbono são extremamente elevados. Além disso, tais sistemas de gestão são suscetíveis a fraudes devido à complexidade do sistema, à falta de transparência e à ausência de confiança mútua entre os participantes.

Outro problema é que sistemas centralizados podem comprometer a privacidade dos participantes, especialmente para aqueles que preferem manter em sigilo suas informações comerciais e níveis de exposição ao mercado (Danish et al., 2024). Nesse sentido, uma solução promissora para esse desafio é a adoção da tecnologia blockchain para aumentar a transparência e a responsabilidade no rastreamento da redução de emissões.

Considerando isso, a blockchain surge como uma tecnologia com potencial para revolucionar o setor energético, ao oferecer vantagens como descentralização, transparência, anonimato e confiança, eliminando a necessidade de intermediários.

Redes que utilizam tecnologia blockchain, como o Bitcoin, são descentralizadas, permitindo que todos os participantes validem novas transações sem depender de uma entidade central. Para isso, a blockchain é replicada em cada nó da rede. Essa característica é o que faz com que a tecnologia seja conhecida como Tecnologia de Ledger Distribuído – TLD (Martins, 2018).

Segundo Marques, Gomes e Brandão (2023), a TLD funciona com base em um sistema de contabilidade pública dividido em blocos. Cada bloco está criptograficamente vinculado ao anterior, formando assim uma sequência contínua de blocos, ou uma blockchain. O fato de as informações de cada bloco serem públicas e imutáveis abre espaço para inúmeras aplicações inovadoras na indústria, baseadas no protocolo blockchain.

Além disso, a blockchain pode aumentar tanto a eficiência quanto a segurança das transações energéticas, facilitando a negociação ponto a ponto (P2P) e permitindo integração com sistemas de energia renovável (Danish et al., 2024). Ademais, ao adotar a tecnologia blockchain, os agentes do setor energético podem implementar contratos inteligentes e tokens não fungíveis (NFTs) em seus sistemas,

o que assegura que os dados relacionados à redução de emissões sejam confiáveis e facilmente acessíveis.

Este estudo tem como objetivo mapear as cadeias de suprimento e de valor do querosene de aviação (QAV), enfatizando os pontos em que as iniciativas de descarbonização são implementadas e monitoradas. Ao utilizar a tecnologia de ledger distribuído (blockchain), o modelo estabelece um registro imutável de toda a cadeia de suprimento do QAV. Essa metodologia aumenta a transparência ao longo do processo produtivo e assegura a completa rastreabilidade do refino do combustível, bem como sua conformidade com os regulamentos de segurança.

Uma inovação significativa apresentada nesta pesquisa é a tokenização dos atributos de descarbonização por meio de Tokens Não Fungíveis (NFTs), que podem servir como evidência para os consumidores finais e até mesmo ser negociados em mercados secundários. As características descentralizadas e imutáveis dessa TLD não apenas melhoram a gestão de métricas relacionadas à transição energética, como também reduzem significativamente o risco de fraude, viabilizando a automação das transações por meio de contratos inteligentes. Por meio dessa abordagem abrangente, o modelo busca fornecer uma estrutura robusta para promover a sustentabilidade e a responsabilidade no setor de combustíveis para aviação.

Esta pesquisa contribuirá para a literatura sobre as aplicações da tecnologia blockchain no mercado de transição energética, ao apresentar um modelo abrangente que destaca a eficácia da blockchain no rastreamento e na comprovação de métodos de descarbonização na produção do QAV. Ao demonstrar como a blockchain pode aumentar a transparência, a responsabilidade e a rastreabilidade dentro da cadeia de suprimentos, o estudo oferece importantes insights sobre os potenciais benefícios da adoção dessa tecnologia em iniciativas sustentáveis.

Adicionalmente, a incorporação de contratos inteligentes e NFTs dentro do modelo ilustra abordagens inovadoras para certificar e negociar atributos de descarbonização, oferecendo, assim, implicações práticas para os agentes do setor. Em resumo, este trabalho visa preencher lacunas existentes na pesquisa, demonstrando o potencial transformador da blockchain na promoção de práticas sustentáveis no setor de combustíveis de aviação e criando oportunidades para novas explorações em outras áreas do cenário da transição energética.

2 Revisão de Literatura

Este capítulo detalha o referencial teórico que fundamenta o modelo proposto, cujo objetivo é rastrear e evidenciar ações de descarbonização na cadeia de suprimento do QAV utilizando a tecnologia blockchain. O capítulo está organizado em duas seções principais (QAV e blockchain), juntamente com subseções relevantes que exploram mais profundamente esses temas centrais.

2.1. Querosene de aviação (QAV)

O querosene de aviação, também conhecido como QAV, é o combustível que abastece aviões e helicópteros equipados com turbinas a jato, turboélices ou turbofans. Seu principal uso é no transporte aéreo comercial. O querosene de aviação é um derivado do petróleo obtido por meio de destilação direta, com uma faixa de temperatura de 150°C a 300°C, consistindo predominantemente em hidrocarbonetos parafínicos com 9 a 15 átomos de carbono (Petrobras, 2021).

Do ponto de vista técnico, o combustível convencional de aviação, também conhecido como Combustível para Turbinas de Aviação, é uma mistura de hidrocarbonetos composta predominantemente por parafinas normais e isoparafinas (C_nH_{2n+2}), cicloparafinas e aromáticos (ICAO, s.d.a):

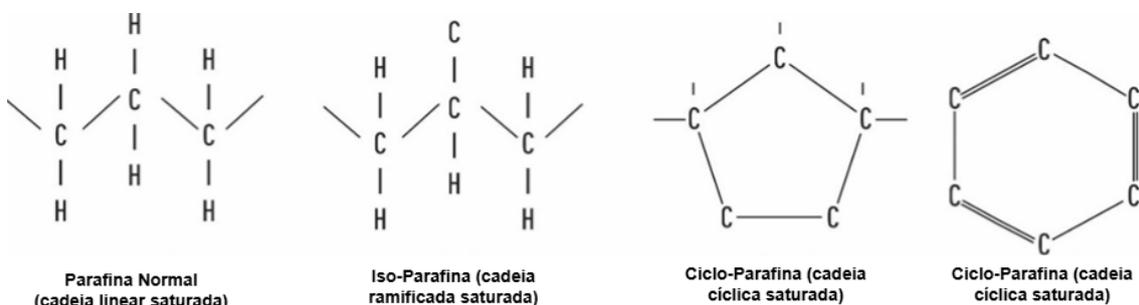


Figura 1: Componentes do combustível de aviação convencional

Fonte: Adaptado de ICAO, s.d.a.

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é o órgão regulador responsável por especificar os querosenes de aviação para uso na aviação civil: JET A, JET A-1 (anteriormente QAV-1) e JET C. O JET A difere do JET A-1 apenas na propriedade do ponto de congelamento; o JET C consiste na mistura de um único tipo de JET alternativo com JET A ou JET A-1, em proporções definidas pela Resolução da ANP (RANP nº 856/2021).

O querosene de aviação de uso militar, conhecido pela sigla QAV-5, segue a especificação da Resolução CNP nº 9/1987, DOU de 04/09/1987. A principal diferença entre os combustíveis de uso civil (JET A e JET A-1) e de uso militar (QAV-5) é a maior restrição quanto à presença de compostos leves no QAV-5, de modo a garantir a segurança no manuseio e armazenamento do produto (Petrobras, 2024).

Uma das referências de qualidade mais utilizadas para o combustível de aviação convencional derivado do petróleo é a norma ASTM D1655 da American Society for Testing and Materials (Liu, Yan & Chen, 2013). A ASTM estabelece requisitos para critérios como composição, volatilidade, fluidez, combustão, corrosão, estabilidade térmica, contaminantes e aditivos, entre outros, para assegurar que o combustível seja compatível quando misturado (IATA, s.d).

2.1.1 Petróleo bruto e o processo de refino do QAV

A cadeia de suprimentos do petróleo pode ser dividida em três etapas: upstream, midstream e downstream. O segmento upstream inclui todas as atividades relacionadas à exploração, produção e transporte do petróleo até as refinarias. O midstream concentra-se na conversão do petróleo em produtos refinados nas refinarias e na produção petroquímica. Por fim, o segmento downstream abrange o armazenamento, a distribuição primária e secundária e a comercialização dos produtos refinados (Lima, Relvas & Barbosa-Póvoa, 2016).



Figura 2: As etapas da cadeia de suprimentos do petróleo

Fonte: Adaptado de Lima, Relvas & Barbosa-Póvoa, 2016.

O processo de refino do petróleo bruto é uma etapa importante para compreender a produção de QAV. Ele é basicamente dividido em processos de destilação, conversão, tratamento e processos auxiliares (Petrobras, s.d.)¹. A Organização da Aviação Civil Internacional apresenta, na Figura 3, um exemplo do processo de refino do petróleo bruto em uma refinaria. Em roxo, está destacada a seção onde o combustível de aviação é produzido:

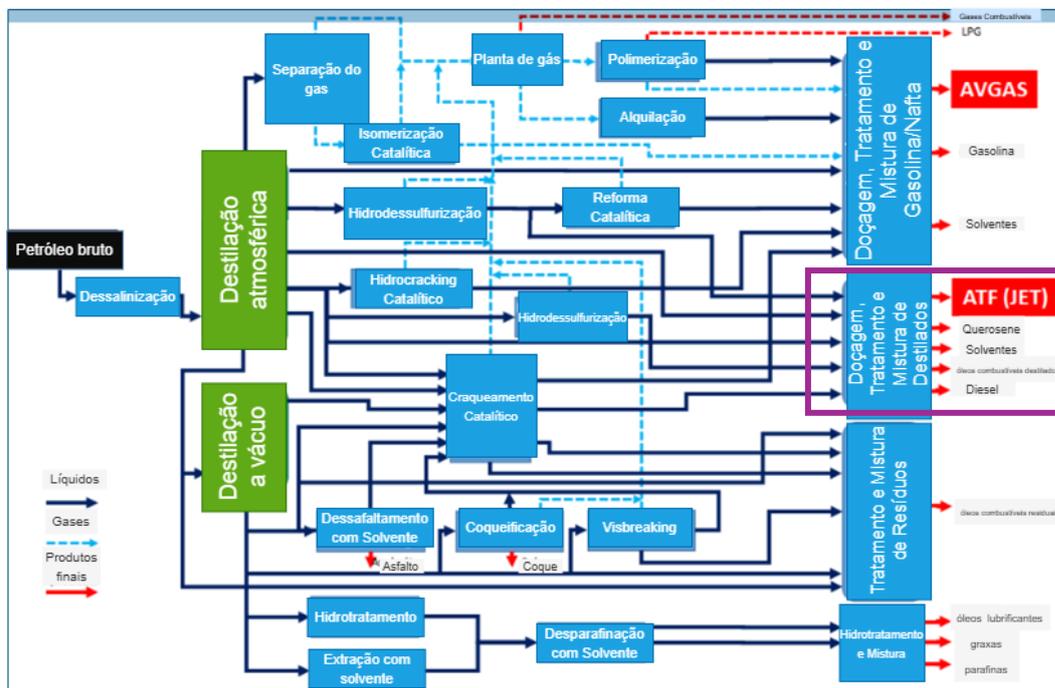


Figura 3: Processo de refino do petróleo bruto (exemplo).

Fonte: Adaptado de Silva, 2023

¹ <https://petrobras.com.br/quem-somos/refino>

Nesse sentido, a destilação é uma etapa de separação de componentes (ou frações), com o objetivo de processar o petróleo bruto em suas frações básicas ou processar uma fração previamente produzida para extrair dela um grupo específico de substâncias. A forma mais comum de separar o petróleo em frações é o processo denominado destilação fracionada, que utiliza as diferenças de temperatura de ebulição: o petróleo é aquecido, vaporizado e, em seguida, o vapor é condensado separadamente em diferentes andares da torre de destilação, separando as frações. (Barquette, 2008). A imagem a seguir mostra o fluxograma básico da destilação fracionada atmosférica:

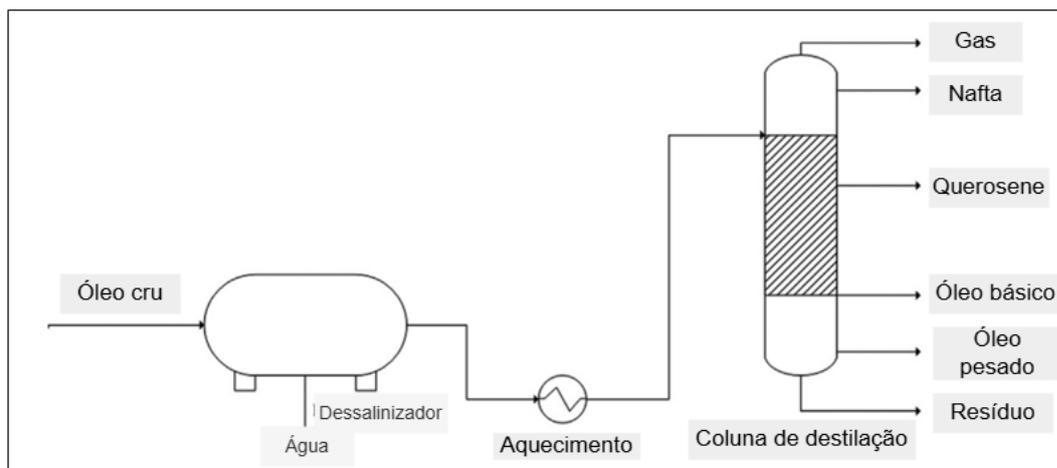


Figura 4: Produção de combustível de aviação a partir do petróleo bruto.

Fonte: Adaptado de Liu, Yan & Chen, 2013

A fração destacada, que representa aproximadamente 33% do volume de entrada de petróleo bruto, serve como matéria-prima para a produção de combustível de aviação. Essa fração é posteriormente processada na unidade de hidrotreatamento de destilados para a produção de querosene e solventes especializados. Essencialmente, o querosene é derivado como uma fração destilada direta do petróleo, com uma faixa de temperatura de ebulição entre 205°C e 260°C (Liu, Yan & Chen, 2013).

A etapa de conversão, por sua vez, é um processo químico que pode, por exemplo, quebrar cadeias moleculares mais longas em cadeias menores (Freudenrich, 2001). Em outras palavras, transforma os componentes mais pesados e de menor valor do petróleo, derivados da destilação, em moléculas menores. Essa conversão gera produtos valiosos como gasolina, diesel e gás liquefeito de petróleo, além de olefinas e aromáticos, que são utilizados na fabricação de plásticos,

borrachas e outros materiais. Essa etapa inclui dois tipos de processos: catalíticos, como o craqueamento catalítico, e não catalíticos, como o craqueamento térmico (Barquette, 2008).

A etapa de tratamento inclui processos realizados para ajustar os derivados à qualidade exigida pelo mercado, sendo as frações tratadas para remover impurezas. Alguns exemplos de métodos incluídos nessa etapa são: tratamento cáustico, tratamento Merox, tratamento Bender e hidrocessamento (Barquette, 2008). O hidrocessamento, por sua vez, ocorre por meio da hidrogenação catalítica, sendo alguns exemplos desse tratamento o hidrocessamento de diesel, de nafta e de querosene.

Por fim, os processos auxiliares são aqueles que fornecem insumos para as operações ou tratam os resíduos finais de outros processos. Na prática, eles servem de suporte, e sem eles não seria possível operar uma refinaria. Exemplos incluem caldeiras, geração de hidrogênio e outras utilidades como vapor, água, eletricidade, ar comprimido, entre outros (Petrobras, s.d.).

Em resumo, o QAV é produzido a partir de correntes provenientes da destilação atmosférica e de processos de conversão, seguidos de tratamento. Para que esse derivado do petróleo tenha características adequadas ao uso em aeronaves, são exigidos diversos critérios físico-químicos durante sua produção, incluindo fluidez (escoamento), estabilidade (armazenamento) e combustão adequada (Petrobras, 2021).

2.1.2

Emissão de carbono e outros poluentes no setor da aviação

A aviação emite diversos poluentes que modificam a composição química da atmosfera, alterando seu balanço radiativo e, conseqüentemente, impactando o clima (Lee, 2010). O principal gás de efeito estufa emitido pela aviação é o dióxido de carbono (CO_2), que representa aproximadamente de 2,0% a 2,5% do total anual de emissões de CO_2 no mundo. Outras emissões da aviação que afetam o balanço radiativo incluem óxidos de nitrogênio (NO_x , onde $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), partículas de sulfato e fuligem, além de vapor d'água (Lee et al., 2009).

A combustão do querosene gera emissões significativas de poluentes, incluindo óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2). Essas emissões não apenas contribuem para a poluição do ar, mas também têm efeitos adversos

sobre a saúde humana e o meio ambiente, como a acidificação do solo e da água. Além disso, as emissões de NO_x e SO₂ durante a combustão do querosene são importantes responsáveis pelo impacto ambiental geral associado ao uso desse combustível (Nojoumi et al., 2009).

Adicionalmente, motores de turbina a gás de aeronaves emitem partículas carbonáceas que aquecem a atmosfera terrestre, contribuindo para as mudanças climáticas. Os aerossóis de carbono negro (BC) emitidos por aeronaves absorvem fortemente a radiação solar e têm uma vida útil mais longa em comparação com as emissões de BC próximas à superfície, resultando em um forçamento radiativo (RF) positivo. Além disso, o BC emitido por aeronaves degrada a qualidade do ar, tanto em escala global quanto nas proximidades de aeroportos (Stettler et al., 2013).

De acordo com o Plano de Ação para Redução de Emissões de CO₂ da Aviação Civil Brasileira, o crescimento médio anual em RTK (toneladas-quilômetro transportadas) de 2005 a 2019 foi de 6,17% no mercado doméstico e de 3,17% no mercado internacional. Da mesma forma, o consumo de combustível cresceu 3,34% para voos domésticos e 1,15% para voos internacionais nesse período. Essa tendência de crescimento foi interrompida em 2020 devido aos impactos da pandemia de COVID-19. Naquele ano específico, o RTK total caiu 54%, enquanto o consumo de combustível caiu 53%, retornando a níveis de atividade inferiores aos do início da série, em 2005 (Mello et al., 2022). Essas informações estão representadas na Figura 5:

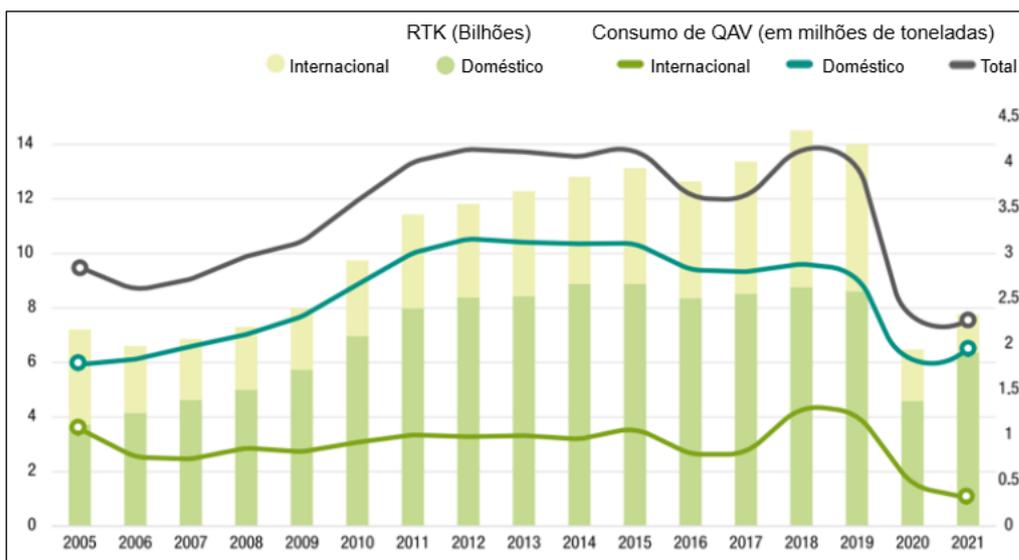


Figura 5: Consumo histórico de combustível e RTK para voos domésticos e operações internacionais no Brasil - 2005 a 2021

Fonte: Adaptado de Mello et al., 2022.

Em resumo, o setor de aviação foi responsável por 2,5% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia em 2023, apresentando uma taxa de crescimento entre 2000 e 2019 que superou a dos setores ferroviário, rodoviário e marítimo. Com a retomada da demanda por viagens internacionais após a pandemia de Covid-19, as emissões da aviação em 2023 alcançaram cerca de 950 milhões de toneladas de CO₂, ultrapassando 90% dos níveis registrados antes da pandemia (IEA, s.d.), conforme mostrado no gráfico a seguir (Figura 6):

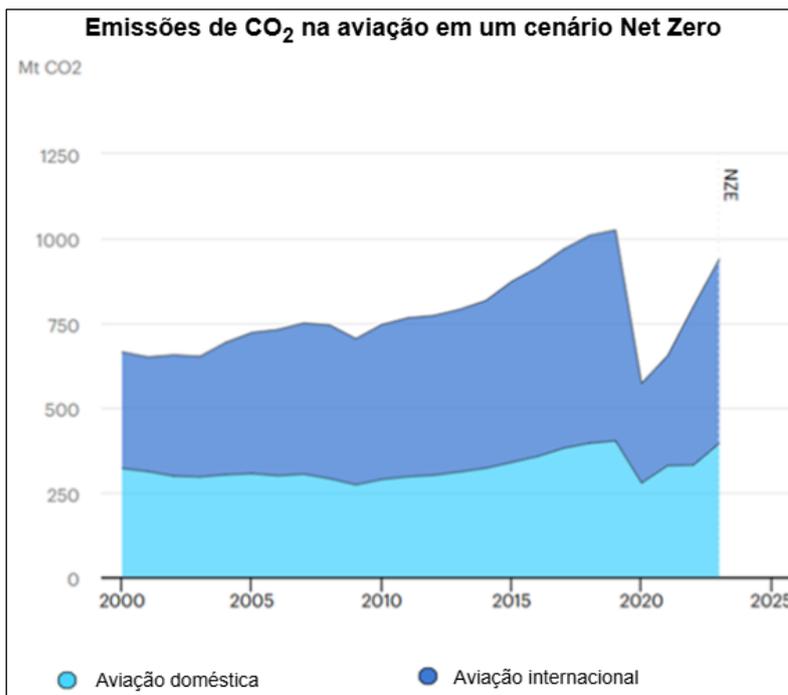


Figura 6: Emissões de CO₂ na aviação em um cenário Net Zero.

Fonte: Adaptado de IEA, s.d.

2.1.3 Iniciativas globais de sustentabilidade

As mudanças climáticas representam riscos substanciais para os ecossistemas, a saúde e o bem-estar humanos, além de ameaçarem a estabilidade econômica (Rivera-Niquepa, Zuluaga & Rojas, 2023). Diante disso, diversas estratégias e mecanismos foram desenvolvidos com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas e alcançar a neutralidade de carbono até 2050.

Nesse sentido, antes de analisar estratégias específicas para descarbonizar o QAV, é importante apresentar uma visão geral das estratégias voltadas à redução de gases de efeito estufa de forma ampla. Os mecanismos voltados à redução global das emissões de GEE devem considerar fatores como transparência, segurança,

proteção e o registro de dados energéticos derivados de processos de comercialização, como os Créditos de Carbono (CCs) e os Certificados de Energia Renovável (RECs) (Danish et al., 2024).

Os créditos de carbono são, portanto, permissões ou certificados negociáveis que simbolizam a redução ou remoção de uma tonelada métrica de CO₂ ou gases de efeito estufa equivalentes da atmosfera. Esses créditos são um elemento fundamental dos mercados de carbono, promovendo e financiando projetos que diminuem emissões ou auxiliam no sequestro de carbono (Rivera-Niquepa, Zuluaga & Rojas, 2023).

Nesse contexto, os créditos de carbono operam dentro de um sistema de “cap-and-trade”, no qual uma autoridade reguladora impõe um limite total de emissões e distribui ou vende permissões de emissão às empresas reguladas, como usinas de energia e instalações industriais. As entidades que emitem menos do que as permissões que receberam podem vender os créditos excedentes para aquelas que excedem seus limites de emissão, criando assim um mercado para a troca de créditos de carbono (Rivera-Niquepa, Zuluaga & Rojas, 2023).

Portanto, sabendo que o sistema de comércio de carbono contribui para enfrentar os desafios associados às mudanças climáticas, diversos sistemas de comércio de emissões de carbono foram implementados ao redor do mundo (Song, Zheng & Shen, 2023), como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS). Esse sistema, conhecido como “cap-and-trade”, estabelece um teto para o total permitido de emissões de GEE e permite que as empresas negociem permissões de emissão (European Commission, 2023).

Ao mesmo tempo, segundo a Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa (2018), os Certificados de Energia Renovável (RECs) foram introduzidos pela primeira vez em 1996 como um instrumento de mercado, emitido sempre que um megawatt-hora (MWh) de eletricidade é gerado a partir de fontes de energia renovável e entregue à rede elétrica (Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa, 2018, apud Marques, Gomes e Brandão, 2023).

Além disso, os RECs, também conhecidos como “green tags”, são emitidos por usinas que geram eletricidade a partir de fontes renováveis, como solar, eólica, geotérmica, hidrelétrica e biomassa. Cada REC representa os atributos não energéticos da geração de eletricidade limpa, incluindo benefícios ambientais e

sociais. Existem variações específicas, como os SRECs para energia solar, os GOs na União Europeia, e os I-RECs, utilizados em mais de 50 países (Jonker, 2024).

Esses certificados também podem ser transferidos, comprados, vendidos ou utilizados por seus proprietários para reivindicar o uso de energia renovável. Nesse contexto, os RECs desempenham um papel importante ao ajudar a superar diversas barreiras associadas à compra e venda de atributos de energia renovável vinculados à eletricidade (Wingate & Holt, 2004, apud Marques, Gomes & Brandão, 2023).

Outra estratégia para reduzir as emissões de carbono é o hidrogênio verde. O hidrogênio verde foi destacado em diversos compromissos de redução de emissões durante a Conferência do Clima da ONU, a COP26, como uma estratégia para descarbonizar setores como a indústria pesada, o transporte de longa distância, a navegação marítima e a aviação. Tanto governos quanto indústrias têm reconhecido o hidrogênio como um componente crucial para uma economia de emissões líquidas zero (Chugh & Taibi, 2021).

Chugh e Taibi (2021) destacam que o hidrogênio está se tornando uma das principais opções para o armazenamento de energia renovável e para viabilizar seu transporte a longas distâncias. O hidrogênio verde é produzido pela separação da água em hidrogênio e oxigênio utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis. Outras formas sustentáveis incluem o hidrogênio cinza (produzido a partir do metano), o hidrogênio azul (que envolve a captura e o armazenamento do CO₂ gerado durante o processo), entre outras variantes.

Por fim, o hidrogênio pode ser utilizado como matéria-prima química nas indústrias petroquímica, alimentícia, de microeletrônica, de metais ferrosos e não ferrosos, de síntese química, de produção de polímeros e em processos metalúrgicos. Além disso, o hidrogênio pode atuar como um vetor energético em sistemas de energia limpa e sustentável. O hidrogênio também tem potencial para substituir a infraestrutura energética baseada em combustíveis fósseis, contribuindo para a sustentabilidade ambiental (Alzoubi, 2021).

2.1.4

Acordos e colaborações internacionais em prol do meio ambiente

Considerando que os acordos e colaborações internacionais desempenham um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa, é importante mencionar o GHG Protocol. O acordo estabelece estruturas

padronizadas globais abrangentes para a medição e gestão das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em operações do setor privado e público, cadeias de valor e esforços de mitigação (World Resources Institute, 2024). Nesse sentido, com base em uma parceria entre o World Resources Institute (WRI) e o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), o GHG Protocol colabora com governos, associações industriais, ONGs, empresas e outras organizações.

Outro exemplo importante é o Acordo de Paris. Na 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), realizada em Paris, foi adotado um novo acordo para fortalecer a resposta global às mudanças climáticas e aumentar a capacidade dos países de enfrentar seus impactos. O Acordo de Paris, aprovado por 195 países, tem como objetivo reduzir as emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável, comprometendo-se a limitar o aumento da temperatura global a bem menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais e a envidar esforços para limitar esse aumento a 1,5°C (BRASIL, 2017). Além disso, o Acordo de Paris “estabelece uma série de ações a serem seguidas pelos países signatários para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O tratado substituiu o Protocolo de Quioto, o primeiro acordo internacional para controle das emissões de gases de efeito estufa, assinado em 1997 no Japão” (Zanfer, 2022).

A UNFCCC, por sua vez, é um tratado multilateral adotado em 1992, após o primeiro relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), em 1990. Seu objetivo é estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa em um nível que evite interferências antrópicas perigosas no sistema climático. Todos os anos, os países signatários da UNFCCC se reúnem para avaliar o progresso e negociar respostas coletivas às mudanças climáticas. Desde que entrou em vigor em 1994, a UNFCCC tem servido como base para as negociações climáticas internacionais, levando a acordos significativos como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, ambos mencionados anteriormente (The United Nations, 2024b).

Outra colaboração, desta vez no setor da aviação, é o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA), que visa tratar das emissões de CO₂ da aviação internacional. Implementado pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), essa decisão histórica representa a primeira vez em que um setor industrial específico concorda com uma

medida global baseada no mercado para enfrentar os problemas relacionados às mudanças climáticas (ICAO, 2024).

O principal objetivo do CORSIA é compensar as emissões internacionais que excedam os níveis médios observados em 2019-2020 com créditos de carbono ou com o uso de combustíveis compatíveis com o CORSIA, especialmente os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF). Estima-se que a substituição do querosene fóssil de aviação por SAF contribuirá para atingir 65% da meta Net Zero 2050 (EPE, 2024). Conforme mostrado na Figura 7, a proposta é de crescimento neutro em carbono no setor da aviação a partir de 2020.

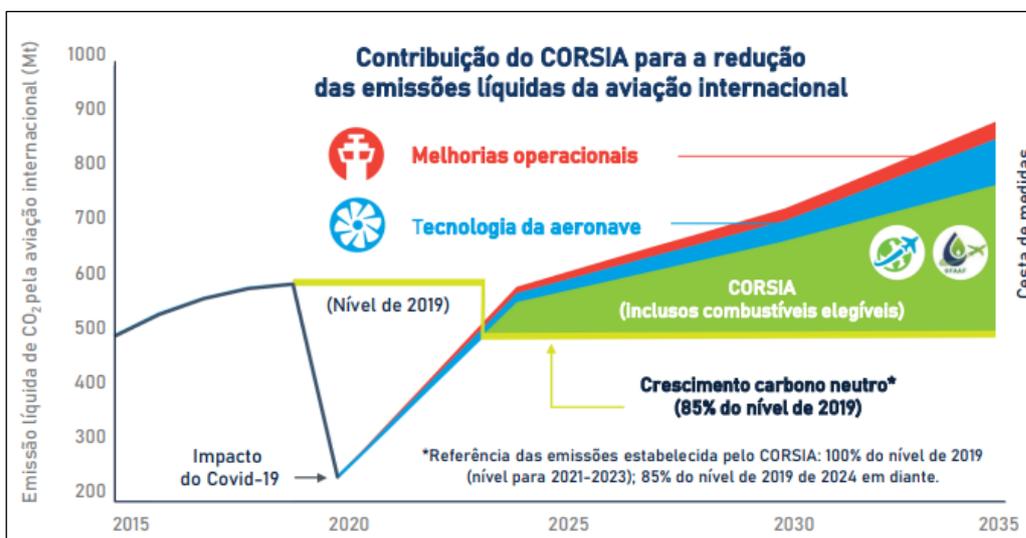


Figura 7: Contribuição do CORSIA para a redução internacional de CO₂ na aviação.

Fonte: ICAO, 2019.

2.1.5

Combustíveis alternativos: SAFs

Undavalli et al. (2022) definem os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF, na sigla em inglês) como combustíveis alternativos com uma pegada de carbono menor e emissão reduzida de gases de efeito estufa. Eles são considerados uma alternativa neutra em carbono e são projetados para serem "drop-in fuels", ou seja, podem ser utilizados sem a necessidade de modificações significativas na infraestrutura existente. A ampla adoção dos SAFs, juntamente com melhorias tecnológicas e operacionais, pode contribuir significativamente para mitigar os impactos ambientais e de saúde associados às emissões da aviação (Song, Li & Liu, 2024).

O potencial dos SAFs para a redução de emissões é significativo, já que podem reduzir as emissões de CO₂ em até 40% quando misturados em até 50% com combustíveis convencionais. Além disso, o uso de SAFs puros (100%) pode reduzir as emissões de CO₂ em até 80%. Também foi demonstrado que os SAFs reduzem outras emissões, como NO_x e material particulado, dependendo das rotas de produção do combustível (Undavalli et al., 2022).

A ICAO (2023) define SAF como a adição de Sustentabilidade e Combustível Sintético para Turbinas de Aviação (SATF) no contexto das especificações dos combustíveis de aviação (ATF). O SATF, por sua vez, pode ser semissintético ou totalmente sintético. Além disso, a ICAO (2023) define o Combustível de Aviação de Baixo Carbono (LCAF) como um “combustível de aviação de origem fóssil que atende aos Critérios de Sustentabilidade do CORSIA”.

Em 2009, passou a ser permitido o uso de outras matérias-primas não derivadas do petróleo na produção de combustíveis de aviação (ATF), e uma nova especificação de combustível (ASTM D7566) foi criada para contemplar e controlar exigências mais rigorosas (ICAO, s.d.a.). Nesse sentido, os processos de conversão para SAF são analisados e aprovados por organizações como a ASTM International. Em julho de 2023, 11 processos de conversão para a produção de SAF haviam sido aprovados (Tabela 1), e outros 11 processos estavam em avaliação (ICAO, s.d.a.).

Assim, diversas rotas tecnológicas para a produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) são reconhecidas, especialmente sob a norma ASTM D7566. Essas rotas envolvem a utilização de diferentes matérias-primas, como triglicerídeos — que incluem sementes oleaginosas, algas e gorduras residuais — e biomassa lignocelulósica, que abrange materiais como eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar. As principais rotas identificadas incluem HEFA (querosene parafínico a partir de ácidos graxos), HC-HEFA (a partir de hidrocarbonetos de origem biológica) e CHJ (a partir de liquefação hidrotérmica catalítica). Adicionalmente, há rotas como SPK-FT, SPK-A, SIP e ATJ, que utilizam diversas formas de biomassa e açúcares. Dentre essas, a tecnologia HEFA é apontada como a mais madura e comercialmente viável atualmente (EPE, 2024).

ASTM Reference	Processo de Conversão	Abreviação	Possíveis Matérias-primas	Proporção Máxima de Mistura
ASTM D7566 Annex A1	Querosene parafínico sintético hidroprocessado por Fischer-Tropsch	FT	Carvão, Gás Natural, Biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A2	Querosene parafínico sintético de ésteres e ácidos graxos hidroprocessados	HEFA	Óleos vegetais, gorduras animais, óleos de cozinha usados	50%
ASTM D7566 Annex A3	Iso-parafina sintética de açúcares fermentados hidroprocessados	SIP	Biomassa usada para produção de açúcar	10%
ASTM D7566 Annex A4	Querosene sintético com aromáticos derivados por alquilação de aromáticos leves de fontes não petrolíferas	FT-SKA	Carvão, Gás Natural, Biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A5	Parafina sintética para aviação de álcoois	ATJ-SPK	Etanol, Isobutanol e Isobuteno de biomassa	50%
ASTM D7566 Annex A6	Combustível para aviação por hidrotermólise catalítica	CHJ	Óleos vegetais, gorduras animais, óleos de cozinha usados	50%
ASTM D7566 Annex A7	Querosene parafínico sintético de hidrocarbonetos – ésteres e ácidos graxos hidroprocessados	HC-HEFA-SPK	Algas	10%
ASTMD 7566 Annex A8	Querosene parafínico sintético com aromáticos	ATJ-SKA	Álcoois C2-C5 de biomassa	
ASTM D1655 Annex A1	Co-processamento de ésteres e ácidos graxos em refinaria de petróleo convencional		Óleos vegetais, gorduras animais, óleos de cozinha usados processados com petróleo	5%
ASTM D1655 Annex A1	Co-processamento de hidrocarbonetos Fischer-Tropsch em refinaria de petróleo convencional		Hidrocarbonetos Fischer-Tropsch co-processados com petróleo	5%
ASTM D1655 Annex A1	Co-processamento de HEFA	Ésteres/ácidos graxos hidroprocessados a partir de biomassa.	Ésteres/ácidos graxos hidroprocessados de biomassa	10%

Tabela 1: Processos de conversão aprovados

Fonte: ICAO, s.d.b.

Além disso, uma solução que oferece um caminho acelerado para a produção de SAF é o coprocessamento. O coprocessamento consiste em incorporar matérias-primas renováveis em instalações convencionais de combustíveis fósseis. Esse método permite que refinarias existentes integrem materiais renováveis aos seus

processos de produção sem exigir modificações significativas na infraestrutura (Costa, 2024).

O coprocessamento de SAF é permitido segundo a norma ASTM D1655. Essa norma especifica três tipos de coprocessamento: primeiro, o coprocessamento de 5% em volume de mono-, di- e triglicerídeos, ácidos graxos livres e ésteres de ácidos graxos; segundo, o coprocessamento de 5% em volume de hidrocarbonetos derivados de gás de síntese via processo Fischer-Tropsch, utilizando catalisadores de ferro ou cobalto; e terceiro, o coprocessamento (incluindo a cofracionação) de hidrocarbonetos derivados de mono-, di- e triglicerídeos hidroprocessados, ácidos graxos livres e ésteres de ácidos graxos, com limite de até 24% em volume da alimentação e 10% em volume do produto (Perez & Folic, 2024). As rotas de coprocessamento de acordo com o CORSIA estão ilustradas na Figura 8:

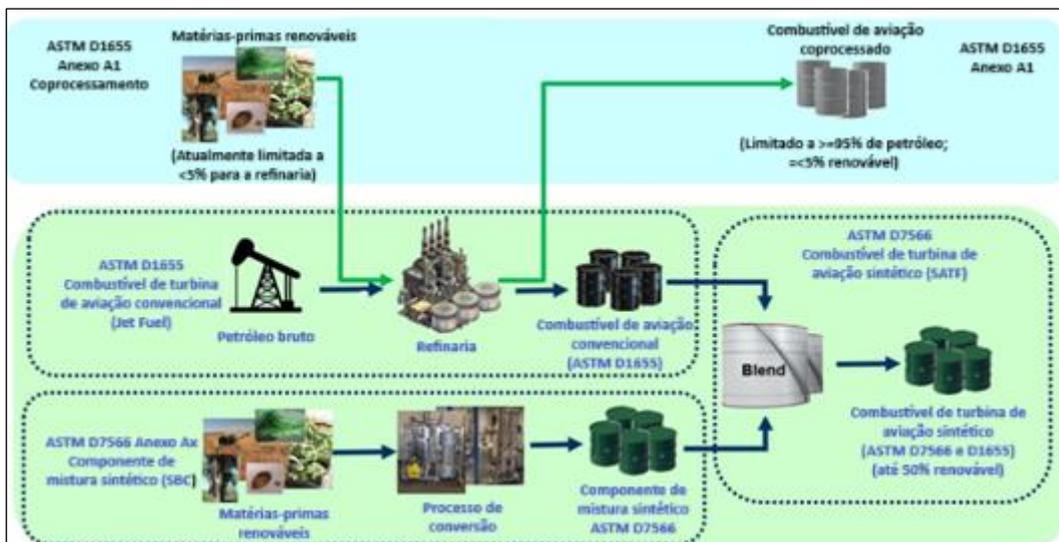


Figura 8: Rotas de coprocessamento

Fonte: Adaptado de Silva (2023)

Em resumo, o SAF para o CORSIA é regulamentado e possui um processo de certificação ativo e definido. Ele contém um Componente de Biocombustível Sustentável (SBC), produzido por meio de rotas como HEFA, ATJ, entre outras, em mistura com combustível mineral (os limites máximos variam conforme a rota, chegando a até 50%). Pode incluir uma matéria-prima renovável coprocessada misturada com querosene de aviação derivado do petróleo e, nesse caso, o limite máximo para o componente renovável coprocessado é de 5% (Silva, 2023).

As principais empresas do setor de SAF incluem Gevo, Alder Renewables, Fulcrum BioEnergy, Shell Aviation e Neste, conforme relatado por SimpliFlying

(2023). A Gevo se destaca por sua tecnologia que converte recursos renováveis em isobutanol e hidrocarbonetos, resultando em combustível para aviação com menor pegada de carbono. Enquanto isso, a Fulcrum BioEnergy é pioneira na transformação de resíduos de aterros sanitários em combustíveis de baixo carbono, utilizando tecnologias de gaseificação e Fischer-Tropsch. A Shell tem como meta produzir 2 milhões de toneladas de SAF por ano até 2025, utilizando biomassa e tecnologias sintéticas para a produção de combustíveis. A Neste está transformando sua refinaria em Porvoo na refinaria mais sustentável da Europa até 2030, com foco em diesel renovável e soluções de matérias-primas.

Apesar das vantagens dos SAFs, como o fato de serem uma alternativa promissora para a redução das emissões de gases de efeito estufa na aviação, eles enfrentam desafios. Os SAFs são geralmente mais caros que os combustíveis de aviação convencionais, o que pode elevar os custos operacionais. Embora reduzam as emissões de carbono ao longo de seu ciclo de vida, não atingem emissões líquidas zero devido às emissões associadas ao cultivo das matérias-primas e à síntese do combustível. Além disso, a produção de SAF exige grandes áreas de terra, o que pode resultar em desmatamento e mudanças no uso do solo. Ainda assim, a adoção generalizada dos SAFs, juntamente com avanços tecnológicos, pode mitigar substancialmente os impactos ambientais e à saúde relacionados às emissões da aviação (Adler & Martins, 2023; Song, Li & Liu, 2024).

2.1.6

Estratégias do Brasil para descarbonizar o setor de aviação

Para atender à retomada da demanda do setor após a pandemia, espera-se que tanto a produção doméstica quanto as importações de combustível de aviação no Brasil aumentem (Figura 9). No entanto, apesar dos avanços na eficiência das aeronaves e no planejamento das viagens, as emissões do setor também estão em crescimento. Nesse contexto, a produção de SAF deve desempenhar um papel crucial na descarbonização da aviação (EPE, 2024).

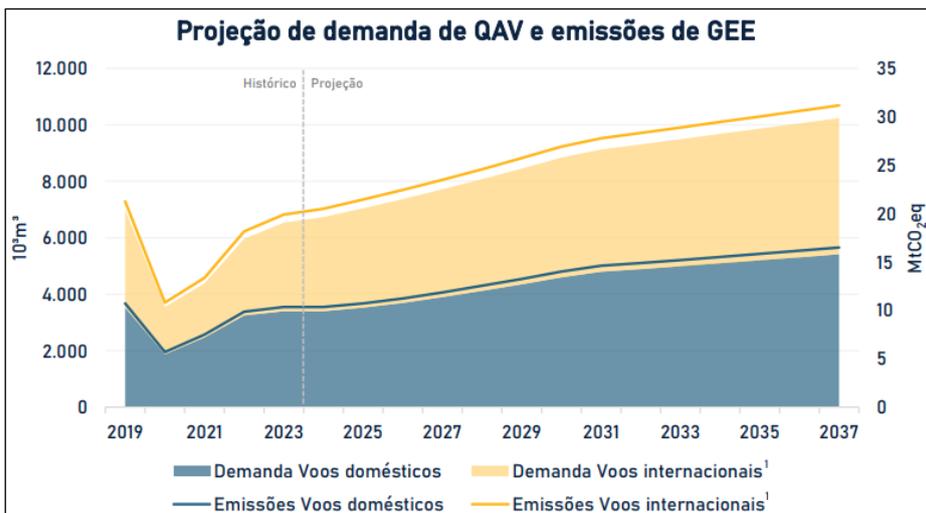


Figura 9: Previsão da demanda por combustível de aviação e emissões de GEE

Fonte: EPE, 2024b

EPE (2024) enfatiza que o Brasil possui potencial para se destacar na produção de SAF devido à sua experiência em biocombustíveis e à abundância de biomassa e outras fontes de energia renovável, sendo que alguns projetos já estão em desenvolvimento (Figura 10). Nesse sentido, o Programa Combustível do Futuro, lançado em 2021 pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), tem como objetivo propor estratégias para ampliar o uso de combustíveis sustentáveis em todos os modais de transporte, com foco na descarbonização da matriz energética nacional do transporte e na melhoria da eficiência energética dos veículos (EPE, 2024).



Figura 10: Projetos de SAF anunciados no Brasil

Fonte: EPE, 2024a

Em 2023, o Programa resultou na apresentação do Projeto de Lei 4516/2023, que visa instituir o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV) e o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV). Além disso, o projeto propõe modificar os limites máximos e mínimos de mistura de etanol anidro na gasolina C, bem como regulamentar e fiscalizar a produção e comercialização de combustíveis sintéticos. O projeto também busca regulamentar e supervisionar a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) e integrar políticas públicas de mobilidade e biocombustíveis, incluindo o RenovaBio, o Rota 2030 e o PBEV (EPE, 2024).

As iniciativas atuais de construção de biorrefinarias têm o potencial de atender a parte das metas de redução de emissões exigidas pelo CORSIA e pelo ProBioQAV. No entanto, a longo prazo, é essencial diversificar as matérias-primas utilizadas na produção de biocombustíveis, o que pode estimular a geração de empregos e a distribuição de renda nas áreas rurais do Brasil. Além disso, é crucial investir recursos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para consolidar uma indústria robusta que apoie uma transição energética justa rumo a uma economia de baixo carbono.

Outra importante iniciativa no Brasil voltada à descarbonização do setor aéreo é o Programa Aeroportos Sustentáveis, criado em 2019. Trata-se de uma iniciativa voltada à análise e ao monitoramento do desempenho ambiental dos aeroportos brasileiros. O objetivo é incentivar boas práticas para reduzir o impacto ambiental das operações aeroportuárias. A participação dos aeroportos é voluntária, e a avaliação é feita com base em critérios definidos pelo programa, que refletem as melhores iniciativas voltadas à sustentabilidade aeroportuária (Anac, 2025).

É importante mencionar também o Programa SustentAr, criado em 2021. Trata-se de um desdobramento do Programa Aeroportos Sustentáveis que aplica os mesmos princípios de participação voluntária, incentivos não regulatórios e promoção de boas práticas ambientais, mas com foco específico nos operadores aéreos brasileiros. O programa visa incentivar a adoção de medidas que promovam a eficiência operacional e a redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas no setor da aviação (Anac, s.d.).

2.2 Blockchain

2.2.1 Conceitos básicos e funcionamento

A primeira ideia de Blockchain aparece no White Paper do Bitcoin, escrito por Satoshi Nakamoto (2008). Segundo Nakamoto (2008), uma versão totalmente peer-to-peer de moeda digital permitiria que pagamentos online fossem transferidos diretamente entre duas partes, eliminando a necessidade de mediação por uma instituição financeira.

Além disso, a criação do Bitcoin serve como o primeiro exemplo de uma organização autônoma descentralizada (DAO). Em outras palavras, trata-se de uma entidade que opera de forma totalmente autônoma, sem centralização, transparente e segura graças à tecnologia blockchain que a sustenta. É descentralizada porque funciona peer-to-peer exclusivamente por meio dos nós dos usuários na rede, e é transparente porque as transações são publicamente visíveis e a rede é acessível a qualquer pessoa (Czepluch, Lollike & Malone, 2015).

Para possibilitar transações em uma rede baseada em Blockchain, é essencial validar sua autenticidade, o que envolve verificar a identidade dos usuários e garantir que os recursos não tenham sido utilizados anteriormente em outras transações. Esse processo depende do acesso a um banco de dados que registra todas as transações passadas. Esse banco de dados, conhecido como ledger (livro-razão), é fundamental para o funcionamento da tecnologia Blockchain. Além disso, o Blockchain não é exclusivo do Bitcoin; ele é um elemento central presente em todas as implementações dessa tecnologia (Martins, 2018).

Blockchain é, portanto, uma sequência de blocos, em que cada bloco contém dados de todas as transações ocorridas em um determinado período, juntamente com uma referência ao bloco anterior. Embora a criptografia utilizada para criar um bloco possa variar de acordo com o protocolo de blockchain adotado, é possível percorrer toda a cadeia e localizar cada transação realizada. Adicionalmente, os algoritmos de hash garantem que todos os blocos estejam corretamente formados e protegidos contra alterações, mantendo assim a segurança da blockchain e tornando-a virtualmente inquebrável (Czepluch, Lollike & Malone, 2015).

Além disso, segundo o Financial Times (2016), Blockchain é uma “rede de computadores, todos os quais devem aprovar que uma transação ocorreu antes que ela seja registrada, em uma ‘cadeia’ de código de computador. Os detalhes da transferência são registrados em um livro-razão público que qualquer pessoa na rede pode visualizar.” (Ahram et al., 2017).

Danish et al. (2024) também definem blockchain como um "livro-razão público, onde todas as transações confirmadas são armazenadas em uma cadeia de blocos. Com a adição de novos blocos, essa cadeia cresce continuamente. A tecnologia blockchain funciona em um ambiente descentralizado baseado em várias tecnologias essenciais, como hash criptográfico, assinaturas digitais e mecanismos de consenso distribuído”.

Nesse sentido, a tecnologia blockchain permite o armazenamento de dados que podem incluir, por exemplo, informações sobre a localização e o destino de itens em uma cadeia de suprimentos ou o saldo de tokens em uma conta. As atualizações são organizadas em “blocos” e encadeadas criptograficamente, permitindo a auditoria do histórico anterior (Harvey, Ramachandran & Santoro, 2021).

Em resumo, “os benefícios da blockchain são bastante atraentes no setor financeiro, onde transparência, confiança e segurança nas transações são vitais. A blockchain tem sido utilizada para desenvolver muitos sistemas econômicos e criptomoedas, como o Bitcoin e milhares de altcoins, incluindo Litecoin, Dogecoin e Nxt” (Czepluch, Lollike & Malone, 2015).

2.2.2 Mecanismo de consenso

Napoletano (2024) explica que, como as criptomoedas que utilizam a tecnologia blockchain não possuem reguladores centralizados para verificar a precisão das novas transações e dos dados adicionados à blockchain, elas dependem de uma rede distribuída de participantes para validar as transações de entrada e adicioná-las como novos blocos à cadeia.

Um mecanismo de consenso é necessário tanto para validar os blocos existentes dentro da rede blockchain quanto para adicionar novos blocos de transações. Esse mecanismo, que requer a aprovação da rede, é uma característica

fundamental que garante a segurança e a imutabilidade das informações armazenadas na blockchain (Durante, 2021).

Um dos mecanismos de consenso mais amplamente utilizados é o Proof of Work (Prova de Trabalho). Nesse sistema, um participante deve comprovar que uma determinada quantidade de trabalho computacional foi realizada para se qualificar a adicionar novos blocos de transações à blockchain. Embora esse mecanismo seja considerado de baixa complexidade de verificação, ele exige um gasto significativo de energia e recursos computacionais. O trabalho computacional dos participantes é recompensado por meio da distribuição de uma criptomoeda (Kamilaris, Fonts & Prenafeta-Boldú, 2019, apud Durante, 2021).

O algoritmo de Proof of Work garante matematicamente a segurança da blockchain, desde que uma única entidade não detenha a maior parte do poder computacional. Somente sob essas condições blocos ilegítimos criados por essa entidade poderiam ser inseridos na blockchain, já que ela seria responsável por gerar mais da metade dos novos blocos (Czepluch, Lollike e Malone, 2015).

Outro mecanismo de consenso é conhecido como Proof of Stake (Prova de Participação): trata-se de um protocolo baseado na distribuição de criptomoedas dentro do sistema. O Proof of Stake é o algoritmo que o Ethereum pretende adotar, pois evita o desperdício de recursos associado ao Proof of Work. No entanto, há argumentos de que o Proof of Stake não pode ser aplicado como esquema de consenso em sua forma mais pura (Czepluch, Lollike e Malone, 2015).

Esse mecanismo de Proof of Stake apresenta um gasto energético significativamente menor do que o Proof of Work, pois os validadores são selecionados aleatoriamente, em vez de por esforço computacional. Os nós participantes são recompensados na forma de uma taxa sobre a transação realizada, que pode ser paga com um criptoativo (Durante, 2021).

2.2.3 Blockchains Públicas e Privadas

Uma blockchain privada é uma blockchain permissionada ou restrita que opera exclusivamente dentro de uma rede fechada. Normalmente, blockchains privadas são utilizadas dentro de organizações ou empresas, nas quais apenas membros selecionados participam da rede blockchain. A organização controladora determina os níveis de segurança, autorizações, permissões e acessibilidade.

Conseqüentemente, blockchains privadas funcionam de maneira semelhante às blockchains públicas, porém dentro de uma rede menor e mais restrita (National Informatics Centre, s.d.).

Por outro lado, uma blockchain pública não possui restrições de acesso. Qualquer pessoa pode se conectar, acessar os dados das transações registrados nela e participar dos mecanismos de consenso. Esse tipo de blockchain, como a do Bitcoin, exemplifica a descentralização total. Geralmente, as transações são registradas em alta velocidade, todos os nós podem participar dos mecanismos de consenso, e a segurança dos dados é significativamente elevada, tornando praticamente impossível a alteração das informações (Durante, 2021).

2.2.4

Blockchains Permissionadas e não Permissionadas

A Uma blockchain permissionada é um tipo de blockchain que possui restrições quanto à participação e aos processos de controle. Nessas blockchains, uma configuração definida especifica os papéis dos participantes, permitindo que determinados membros acessem e insiram informações ou aprovem a admissão de novos membros. Como diferentes membros possuem níveis distintos de controle de acesso, uma blockchain permissionada é considerada parcialmente descentralizada e pode preservar melhor a privacidade e atender aos requisitos de governança corporativa quando comparada a uma blockchain não permissionada (Liu, Wu & Xu, 2019). Exemplos de blockchains permissionadas incluem Hyperledger Fabric, R3 Corda e Quorum.

Uma blockchain não permissionada é um livro-razão distribuído e descentralizado que permite transações seguras, transparentes e à prova de adulteração em uma rede peer-to-peer. Todos os participantes têm acesso igual e podem validar transações, já que essas blockchains são de código aberto. Embora o livro-razão público aumente a responsabilidade e a confiança, também levanta preocupações com a privacidade, pois qualquer pessoa pode visualizar ativos digitais, informações pessoais e transações financeiras, o que aumenta o risco de invasões e furtos (Bayan & Banach, 2023).

Bayan e Banach (2023) realizaram uma análise aprofundada das principais blockchains não permissionadas, concentrando-se naquelas com maior

engajamento de usuários e comunidades de desenvolvedores mais ativas, conforme mostrado na Tabela 2:

Blockchain	Tipo	TVL	Transações (diárias)	Protocolos	Desenvolvedores ativos mensais
Ethereum	Layer 1	27B	1.2M	693	5734
BSC	Layer 1	4.9B	3.1M	540	150
Solana	Layer 1	245M	0.13M	93	2200
Polygon	Layer 2	1.17B	3M	367	1100
Cosmos	Layer 1	1B	N/A	281	1500
BTC	Layer 1	131M	300092	4	920
Near	Layer 1	81M	374268	15	830

Tabela 2: As blockchains não permissionadas mais conhecidas.

Fonte: Bayan and Banach (2023)

2.2.5

O uso de blockchain no setor de energia

Alguns estudos já propõem a integração entre blockchain e transição energética. Por exemplo, Muzumdar et al. (2022) têm como objetivo sugerir um sistema de comércio de emissões confiável e com incentivos, utilizando uma blockchain permissionada e contratos inteligentes, para lidar com problemas dos sistemas de comércio de emissões (ETSs) existentes. Esses problemas incluem fraudes com créditos de carbono, falhas no monitoramento e verificação, e negociações não transparentes. O modelo proposto busca melhorar a confiança, a transparência e a eficiência na negociação de créditos de carbono, incentivando, assim, maior participação e promovendo a sustentabilidade energética.

Golding, Yu, Lu e Xu (2022) propõem o Carboncoin, um sistema de comércio de carbono baseado em blockchain que tokeniza o direito de emitir carbono, eliminando a necessidade de permissões off-chain. Construído sobre a plataforma Hyperledger Fabric, esse sistema descentralizado utiliza contratos inteligentes para automatizar transações, integrar dados ESG para pontuação de reputação e controlar

a oferta de Carboncoins. A produção de energia é reportada automaticamente, resultando na contabilização automática do gasto de Carboncoins. Embora ofereça maior transparência e responsabilidade, os autores reconhecem limitações de desempenho no sistema atual e sugerem melhorias por meio da transferência de determinadas operações para aumentar a escalabilidade.

Mengelkamp et al. (2018, apud Marques, 2019) utilizam uma blockchain privada para criar uma plataforma de mercado descentralizado. Essa plataforma tem como objetivo facilitar a comercialização de energia renovável gerada localmente, eliminando a necessidade de um intermediário. Os autores argumentam que a blockchain é a tecnologia ideal de informação e comunicação para esses mercados locais de energia renovável, pois permite que os consumidores negociem diretamente a energia produzida em suas comunidades.

2.2.6

O uso de blockchains em cadeias de suprimentos

Um ecossistema de cadeia de suprimentos descreve os processos que englobam o design, a engenharia, a fabricação e a distribuição de produtos ou serviços, desde os fornecedores até o consumidor final (Muckstadt, Murray, Rappold & Collins, 2001, apud Azzi, Chamoun & Sokhn, 2019).

A principal aplicação da blockchain nas cadeias de suprimentos é verificar a origem dos produtos e rastrear sua trajetória desde a origem até o consumidor final. Rastreabilidade e visibilidade são essenciais para uma logística de alta qualidade, pois fornecer informações detalhadas sobre a origem e o transporte de um produto agrega valor significativo e proporciona vantagem competitiva. No entanto, muitos clientes enfrentam problemas de transparência, o que leva a avaliações imprecisas do valor do produto e a questionamentos éticos. A blockchain, portanto, pode fornecer informações confiáveis sobre a origem dos produtos e suas rotas de transporte, facilitando uma avaliação mais precisa antes das decisões de compra (Dujak & Sajter, 2018).

Como exemplo de implementação de blockchain na cadeia de suprimentos, Dujak e Sajter (2018) citam a colaboração entre Walmart e IBM. As empresas desenvolveram padrões e soluções para aumentar a segurança alimentar na cadeia de suprimentos de alimentos, testando o rastreamento de produtos como carne suína e mangas. O rastreamento com blockchain das mangas comercializadas pelo

Walmart reduziu o tempo necessário para rastrear um pacote desde a fazenda até a loja — de dias para segundos. Toyota, Volkswagen e General Motors também estão considerando o uso da tecnologia blockchain em várias áreas da cadeia de suprimentos, desde manufatura aditiva até rastreamento de peças automotivas e no setor de carros autônomos (Dujak & Sajter, 2018).

Outro exemplo é o Project Provenance Ltd., lançado em 2016, um dos primeiros projetos a rastrear atum enlatado até seus produtores. Os pescadores registram o peixe por SMS, criando um ativo permanente com um ID único. À medida que o peixe se move pela cadeia de suprimentos, esse ativo o acompanha, e cada transação é registrada por meio de QR codes, RFID ou outras tecnologias. Combinada a sistemas ERP (Enterprise Resource Planning), a blockchain atua como banco de dados e ferramenta de auditoria, enquanto etiquetas inteligentes podem rastrear com eficácia a origem dos produtos (Boulais, 2019; Motta, Tekinerdogan & Athanasiadis, 2020, apud Vijay T & Raju, 2023).

Cui, Dixon, Guin & Dimase (2019) propõem uma estrutura baseada em blockchain para garantir a proveniência na cadeia de suprimentos de componentes eletrônicos, abordando os desafios de segurança e integridade em um mercado globalizado. A solução utiliza uma blockchain permissionada implementada com Hyperledger, permitindo o rastreamento de chips por meio de nós de autoridade de design, fabricantes, distribuidores e usuários finais. Assim, a implementação com Hyperledger Fabric e a avaliação de desempenho demonstram a aplicabilidade da estrutura para proteger a cadeia de suprimentos contra falsificações.

3 O Modelo

3.1 Cenário geral

O querosene de aviação (Jet A-1 e Jet A) é derivado do petróleo bruto por meio de um processo de refino intensivo em energia, contribuindo com 2 a 3% das emissões globais de CO₂. Segundo Zhang et al. (2018), a pegada de carbono associada ao QAV inclui: (i) extração do petróleo bruto, que libera metano e CO₂; (ii) refino, com emissões provenientes da destilação e craqueamento; (iii) transporte até os aeroportos, adicionando emissões devido à ineficiência logística; e (iv) combustão nos motores das aeronaves, a etapa mais intensiva em emissões, liberando CO₂ diretamente. Ao compreender a complexidade da segunda etapa do ciclo de vida do combustível, este estudo se concentrará nas iniciativas voltadas à otimização da eficiência energética, integração de processos e redução de falhas operacionais nas operações de refino, particularmente nas unidades de destilação a vácuo, destilação atmosférica e sistemas associados.

Uma iniciativa-chave é a recuperação de condensado, que captura vapor das colunas de destilação para reutilização, geralmente como água de alimentação para caldeiras, melhorando a eficiência do sistema ao reduzir o uso de água e energia (Guedes et al., 2019). Em uma Unidade de Destilação a Vácuo (UDV), esse processo recicla calor, reduz a demanda energética, conserva água e diminui o impacto ambiental. Outra iniciativa sustentável é o uso do ejetor de vapor, que utiliza vapor de alta pressão para criar vácuo, reciclando vapor e reduzindo a demanda total (Szklo & Schaeffer, 2007). Isso melhora a eficiência, reduz o consumo de energia e potencializa a recuperação energética no processo de destilação.

Outra iniciativa que pode ser destacada é a integração da Unidade de Processamento de Gás (UPG) com a Unidade de Destilação Atmosférica (UDA), o que pode aumentar a eficiência energética e otimizar as operações. A UPG processa gases como gás natural e hidrogênio, enquanto a UDA fraciona o petróleo bruto.

Essa integração oferece benefícios como recuperação de energia, melhor rendimento de produtos e sinergia operacional (Guedes et al., 2019).

Mais uma iniciativa analisada neste estudo é a redução da formação de coque nos fornos da destilação atmosférica, o que pode ser alcançado por meio do controle da temperatura do forno, pré-tratamento do petróleo bruto para remoção de contaminantes, adição de cargas ricas em hidrogênio e manutenção periódica dos fornos (Meyers, 2004).

Por fim, algumas iniciativas de descarbonização associadas à unidade de hidrotratamento de querosene (HDT Q) também farão parte do desenvolvimento do modelo. São elas: instalação de uma Caldeira de Recuperação de Calor (Waste Heat Boiler) na Unidade de Recuperação de Enxofre (URE); integração da Unidade de Processamento de Gás (UPG) com as Instalações Dentro dos Limites da Bateria (IDLB); e integração da Unidade de Remoção de Gás Ácido (URGA) com o IDLB (Guedes et al., 2019).

Para mapear essas ações de sustentabilidade voltadas à descarbonização da etapa de refino do petróleo, propomos o uso de uma TLD (Tecnologia de Ledger Distribuído), que também possibilitou a criação das moedas digitais, podendo promover agilidade nas transações, reduzir ou eliminar a burocracia nos meios de pagamento e aumentar a segurança e a transparência das operações (Priem, 2020). A ideia central é tokenizar atributos relacionados à descarbonização por meio de NFTs que possam servir como ferramentas de comprovação para os clientes finais e até mesmo ser negociados em um mercado secundário (Jenkins, Negangard e Sheldon, 2024).

Esta pesquisa apresenta frameworks que ilustram, dentro da operação de uma refinaria, como as ações de descarbonização podem ser rastreadas e evidenciadas na produção de QAV, utilizando a tecnologia Blockchain. Informações como tecnologias de mitigação de CO₂, equipamentos de refino e a quantidade numérica de descarbonização em cada etapa de produção serão registradas em NFTs. Ao final do processo, tanto o produtor quanto o comprador de QAV poderão acessar essas informações essenciais da cadeia de suprimentos, garantindo que todas as partes envolvidas tenham a certeza de que o combustível possui, de fato, uma pegada de carbono reduzida.

Neste estudo, assume-se uma cadeia de produção simplificada, que se inicia com o armazenamento do petróleo bruto na refinaria. Para serem registradas no

sistema de Planejamento de Recursos Empresariais (ERP) da refinaria e posteriormente na blockchain, as atividades serão observadas por funcionários designados e verificadas por dispositivos IoT (Internet das Coisas) e digitais.

Além disso, o uso de contratos inteligentes em diferentes etapas do esquema automatiza tarefas como a criação e troca dos NFTs, garantindo que o processo ocorra de forma eficiente e segura. Esses contratos inteligentes também facilitam a consolidação das informações de emissões das várias etapas do processo de refino, culminando na criação de um NFT que representará o total acumulado de emissões de determinado componente da cadeia de suprimentos.

Em resumo, a adoção do modelo de Blockchain proposto para rastrear e evidenciar ações de descarbonização na produção de QAV oferece vantagens significativas. Em primeiro lugar, a capacidade de registrar e verificar cada etapa da cadeia de produção em um ledger imutável aumenta a confiança das partes envolvidas no processo, proporcionando transparência e autenticidade — condições essenciais para aceitação no mercado. Além disso, os produtores podem comprovar de forma irrefutável suas práticas ecológicas e tecnologias sustentáveis, enquanto os clientes têm a garantia de que estão adquirindo um produto com baixa pegada de carbono.

3.2 Blockchain Pública ou Privada?

Optou-se por utilizar uma blockchain privada no modelo proposto por oferecer diversos benefícios, especialmente em termos de segurança, controle e eficiência operacional. Ao restringir o acesso às informações de produção apenas a participantes autorizados (Guegan, 2017) — como refinarias, órgãos reguladores e funcionários do setor — uma rede privada garante a integridade e a confidencialidade dos dados.

Em comparação com uma blockchain pública, onde qualquer usuário pode acessar e participar da rede (Yang et al., 2020), uma blockchain privada oferece um controle de acesso mais rigoroso, limitando o acesso e o controle das informações a partes confiáveis. Além disso, em uma blockchain pública, as transações podem ser visíveis a todos, o que, embora promova transparência, pode comprometer a

privacidade necessária para operações comerciais sensíveis, especialmente em setores regulados, como o da aviação.

Adicionalmente, blockchains privadas permitem uma validação de transações mais rápida (Paul, P., Aithal, P., Saavedra, R. & Ghosh, S., 2021), devido ao número limitado de participantes e aos sistemas de governança estabelecidos, resultando em menor consumo de recursos. Isso está alinhado com práticas sustentáveis e com os princípios ecológicos de projetos de descarbonização.

Além disso, a velocidade de operação da blockchain privada é essencial para atividades empresariais que exigem tempos de resposta ágeis e atualizações contínuas sobre os processos de descarbonização. Outra vantagem da rede privada é a possibilidade de ajustar as regras do sistema conforme as necessidades dos participantes, promovendo maior adaptabilidade e colaboração dentro da rede.

Em resumo, a adoção de uma blockchain privada para o modelo proporciona segurança e controle, além de melhorar a eficiência e facilitar a colaboração efetiva entre os stakeholders. Nesse sentido, essa opção é a mais adequada para lidar com os desafios específicos da descarbonização na produção de QAV, garantindo que as informações sejam geridas de forma responsável e transparente, ao mesmo tempo que preserva a integridade e a privacidade de dados críticos para os agentes envolvidos.

3.3

Tecnologias e infraestrutura envolvidas no modelo

3.3.1

Integração de IoT e dispositivos inteligentes

A Internet das Coisas ou IoT (sigla abreviada em inglês) refere-se a uma rede de dispositivos tangíveis, veículos, eletrodomésticos e outros itens físicos equipados com sensores, softwares e conectividade de rede — o que lhes permite coletar e trocar dados (IBM, s.d.). A IoT oferece diversas vantagens para as empresas, como aumento da eficiência, automação e insights em tempo real, ao aproveitar a grande quantidade de dados gerados por esses dispositivos conectados (IMD, 2025). Nesse sentido, a integração da IoT ao modelo aumenta a precisão e a

eficácia no rastreamento e na comprovação dos métodos de descarbonização na produção de QAV.

Dispositivos IoT, como sensores e medidores inteligentes, podem monitorar temperatura, umidade e pressão dentro de uma instalação de produção, enquanto máquinas conectadas podem fornecer dados em tempo real sobre seu status e desempenho (Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R., 2023). Dessa forma, a IoT pode ser aplicada em diversas etapas da produção de QAV para coletar continuamente dados em tempo real sobre emissões, eficiência operacional, equipamentos e tecnologias de mitigação de CO₂. Esses dados detalhados não apenas fornecem insights sobre o desempenho do processo produtivo, como também permitem ajustes imediatos para reduzir as emissões de GEE.

No modelo proposto, os dados coletados pelos dispositivos IoT são automaticamente registrados nos sistemas ERP da empresa, garantindo precisão e reduzindo o potencial de erro humano. Uma vez coletadas, essas informações serão enviadas para um sistema de blockchain, onde serão registradas com segurança e disponibilizadas para os stakeholders autorizados. Contratos inteligentes dentro da blockchain poderão utilizar esses dados para acionar ações específicas, como a criação de NFTs que representem reduções de emissões verificadas ou a aplicação bem-sucedida de tecnologias de descarbonização.

Além disso, a integração de dispositivos inteligentes e IoT facilita a tomada de decisões proativas. Ao utilizar análises avançadas junto a dados em tempo real, as refinarias podem identificar tendências e ineficiências, permitindo aos gestores implementar estratégias direcionadas para a redução de emissões. Essa capacidade promove a eficiência operacional e reforça a credibilidade das alegações de descarbonização feitas pelos produtores.

3.3.2

O uso de contratos inteligentes e NFTs para o rastreamento e certificação

No modelo proposto para rastrear e evidenciar métodos de descarbonização na produção de QAV, os contratos inteligentes e os Tokens Não Fungíveis (NFTs) desempenham um papel importante no aprimoramento da transparência e da responsabilização. Um contrato inteligente é um código autoexecutável que opera na blockchain para facilitar, implementar e fazer cumprir os termos de um acordo.

Seu principal objetivo é cumprir automaticamente esses termos assim que as condições especificadas forem atendidas (Alharby e van Moorsel, 2017). Algumas das vantagens dos contratos inteligentes em relação aos contratos tradicionais são a “redução de riscos, menores custos de serviço e administração, e maior eficiência nos processos de negócio” (Feng et al., 2019, apud Taherdoost, 2023).

Os tokens não fungíveis (NFTs) baseados em blockchain são itens digitais frequentemente vinculados a conteúdos digitais únicos, como músicas ou fotografias (Ghelani, 2022). Neste modelo, eles atuam como representações digitais únicas de ações específicas, equipamentos ou reduções de emissões relacionadas aos esforços de descarbonização. Ao vincular NFTs a ativos físicos ou dados de emissões, os stakeholders podem rastrear a origem de cada ação tomada na refinaria. Por exemplo, quando um determinado equipamento atinge um marco na redução de sua pegada de carbono, um NFT pode ser criado para certificar esse feito. Como o NFT é registrado na blockchain, garante-se que a informação seja imutável e facilmente acessível por todas as partes envolvidas.

Em resumo, os contratos inteligentes podem reger o ciclo de vida desses NFTs desde o início, assegurando que todas as ações registradas sejam verificadas e rastreáveis. Essa transparência é essencial para todos os stakeholders, pois garante que o QAV produzido realmente cumpra com as alegações de sustentabilidade. Como resultado, a integração de contratos inteligentes e NFTs melhora a eficiência do rastreamento e da certificação. Além disso, fortalece a confiança em todo o processo de descarbonização, alinhando-se à crescente demanda por responsabilidade nas práticas sustentáveis dentro da indústria da aviação.

3.3.3

Oráculos: a ponte entre dados off-chain e on-chain

Blockchains e contratos inteligentes não conseguem acessar informações fora da rede. Nesse sentido, os oráculos surgem como serviços de terceiros que fornecem informações externas aos contratos inteligentes, atuando como pontes entre as blockchains e os dados off-chain (Beniiche, 2020). Em outras palavras, um oráculo é um agente intermediário (middleware) que consulta, verifica e autentica fontes de dados externas, e então entrega essas informações à blockchain para uso posterior pelos contratos inteligentes (Kochovski, Gec, Stankovski, Bajec & Drobintsev, 2019).

Em geral, um mecanismo de oráculo blockchain começa com um solicitante criando um contrato inteligente que especifica os dados necessários. Oráculos centralizados identificam automaticamente os requisitos, enquanto oráculos distribuídos utilizam oráculos redundantes. Oráculos automatizados se comunicam com fontes de dados externas para coletar as informações, que são então injetadas na blockchain para utilização nos contratos inteligentes (Lo, Xu, Staples & Yao, 2020).

Além disso, os oráculos podem ser categorizados com base em diferentes critérios: pela fonte dos dados (software, hardware ou humano); pela direção do fluxo de informações (entrada ou saída); pelos padrões de design (requisição-resposta, publicação-assinatura ou leitura imediata); e pelos modelos de confiança (centralizados ou descentralizados). Em resumo, como informações relevantes do mundo exterior são essenciais para a execução de muitos contratos, os oráculos blockchain viabilizam essa conexão ao fornecer um elo entre os dados off-chain e on-chain (Beniiche, 2020).

Em resumo, as tecnologias e infraestruturas envolvidas no modelo são apresentadas na tabela abaixo:

Tecnologia / Infraestrutura	Descrição	Papel no Modelo Proposto	Benefícios
IoT e Dispositivos Inteligentes	Rede de sensores, medidores e equipamentos conectados que coletam dados em tempo real	Monitoramento contínuo de variáveis como temperatura, pressão e emissões de CO ₂ em diferentes estágios da produção	Maior precisão dos dados, automação, decisões proativas, redução de erro humano
Contratos Inteligentes	Programas autoexecutáveis baseados em blockchain que aplicam automaticamente os acordos	Automatizam ações como criação e transferência de NFTs com base em dados coletados pelos sensores	Redução de custos, riscos e burocracia; maior eficiência operacional e confiabilidade
NFTs	Representações digitais únicas de ações, equipamentos ou resultados de redução de emissões	Certificam digitalmente práticas de descarbonização implementadas em cada etapa do processo	Imutabilidade, rastreabilidade, transparência e possibilidade de negociação em mercados secundários
Oráculos	Sistemas intermediários que conectam dados do mundo real (off-chain) ao blockchain (on-chain)	Permitem que contratos inteligentes acessem dados externos necessários à tomada de decisões e execução de ações	Integração segura entre dados externos e blockchain; permite automação confiável

Tabela 3 – Tabela Resumo: Tecnologias e infraestrutura do modelo (seção 3.3)

3.4 Características e o papel de cada participante

Os produtores de QAV, no modelo proposto, implementam práticas de descarbonização na cadeia de produção do combustível, ao mesmo tempo em que garantem a produção de um QAV de alta qualidade, em conformidade com os padrões de segurança e ambientais. Nesse modelo, esses produtores utilizam sensores IoT e dispositivos inteligentes para monitorar e registrar continuamente as emissões de CO₂ associadas a cada etapa do processo de refino.

Portanto, é obrigação da refinaria gerar dados legítimos sobre a cadeia de produção, os quais serão posteriormente carregados na blockchain. Os produtores precisam garantir a integridade desses registros, permitindo que reguladores e compradores verifiquem a autenticidade do combustível com emissões reduzidas de GEE. O cliente, assim, tem acesso aos dados da cadeia de produção, podendo verificar informações como os níveis de emissões de GEE geradas e os equipamentos utilizados. Nesse sentido, permitir que os compradores verifiquem, por meio de dados seguros, que o combustível possui, de fato, uma pegada de carbono reduzida, promove a transparência e a confiança na cadeia produtiva do QAV.

Além dos produtores e compradores, outros stakeholders desempenham papéis essenciais no modelo: reguladores, auditores e desenvolvedores de tecnologia. Nesse sentido, é papel dos reguladores garantir que os produtores de combustível estejam alinhados com as políticas e normas climáticas locais. Para isso, acessam a blockchain para realizar auditorias e verificações, utilizando os dados de emissões registrados de modo a assegurar que as refinarias estão cumprindo os requisitos legais.

Os auditores, por sua vez, são funcionários designados para realizar avaliações periódicas e garantir a precisão dos dados reportados. Com acesso às informações na blockchain, eles podem realizar verificações independentes, aumentando ainda mais a confiabilidade dos registros de descarbonização. Por fim, os desenvolvedores de tecnologia são essenciais para a manutenção da infraestrutura da blockchain, assegurando que o sistema esteja sempre atualizado e que a integração com os dispositivos IoT funcione de forma eficiente. Em resumo, isso facilita a colaboração entre todos os participantes na busca por práticas mais sustentáveis.

3.5 Benefícios e desafios do modelo

O modelo proposto neste trabalho oferece algumas vantagens que podem melhorar significativamente a eficiência operacional e a sustentabilidade nos processos de refino. Um dos principais benefícios é o aumento da transparência dos dados ao longo de toda a cadeia de produção de QAV. Por meio da utilização de contratos inteligentes e NFTs, os stakeholders podem acessar registros imutáveis das emissões e das ações de descarbonização realizadas em cada etapa, promovendo a confiança entre produtores, consumidores e reguladores.

Além disso, o modelo facilita o monitoramento em tempo real por meio da integração de dispositivos IoT, permitindo a detecção imediata de ineficiências ou picos de emissões. Esse método orientado por dados possibilita que as refinarias implementem, de forma proativa, mudanças que podem reduzir ainda mais as emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, o uso da tecnologia blockchain simplifica os processos de documentação, automatiza os relatórios de conformidade e reduz encargos administrativos. Ao criar um registro abrangente e auditável de emissões por meio de NFTs, a indústria estará mais bem preparada para atender às exigências regulatórias e poderá abrir novas oportunidades de mercado para combustíveis produzidos de forma sustentável.

Entretanto, a implementação do modelo proposto de rastreamento da descarbonização na produção de querosene de aviação envolve diversos desafios e limitações potenciais. Um dos principais desafios é o custo inicial e a complexidade associados à implantação da infraestrutura blockchain e à integração de dispositivos IoT nas instalações de refino. Essas tecnologias exigem investimentos significativos, expertise técnica e, possivelmente, atualizações nos sistemas existentes, o que pode impor uma pressão financeira sobre organizações com orçamentos limitados.

Outro desafio está relacionado à manutenção da integridade e consistência dos dados. Embora os dispositivos IoT possam coletar grandes volumes de dados em tempo real, variações na qualidade e na precisão desses dados podem gerar discrepâncias. É essencial alcançar a padronização entre as diversas fontes de dados, pois inconsistências podem comprometer a confiabilidade dos registros de emissões armazenados na blockchain. Além disso, o processo de integração pode enfrentar resistência por parte de colaboradores acostumados a práticas tradicionais,

o que destaca a importância de programas abrangentes de treinamento e estratégias de gestão da mudança.

Por fim, navegar pelos cenários regulatórios e de conformidade apresenta um desafio relevante. A natureza dinâmica das regulamentações relacionadas à tecnologia blockchain e aos ativos digitais introduz incertezas que as empresas devem gerenciar com cautela. É fundamental garantir que o sistema esteja em conformidade com os requisitos de diferentes jurisdições, ao mesmo tempo em que protege a privacidade e a segurança de dados sensíveis. Nesse sentido, enfrentar esses desafios será essencial para a implementação bem-sucedida do sistema e para o alcance de seus objetivos de transparência e responsabilização nos esforços de descarbonização.

3.6 Resultados

Como primeira parte do modelo, descreve-se um processo de refino simplificado. Os ativos físicos (equipamentos e iniciativas de mitigação de CO₂) envolvidos na produção do combustível são ilustrados na Figura 11.

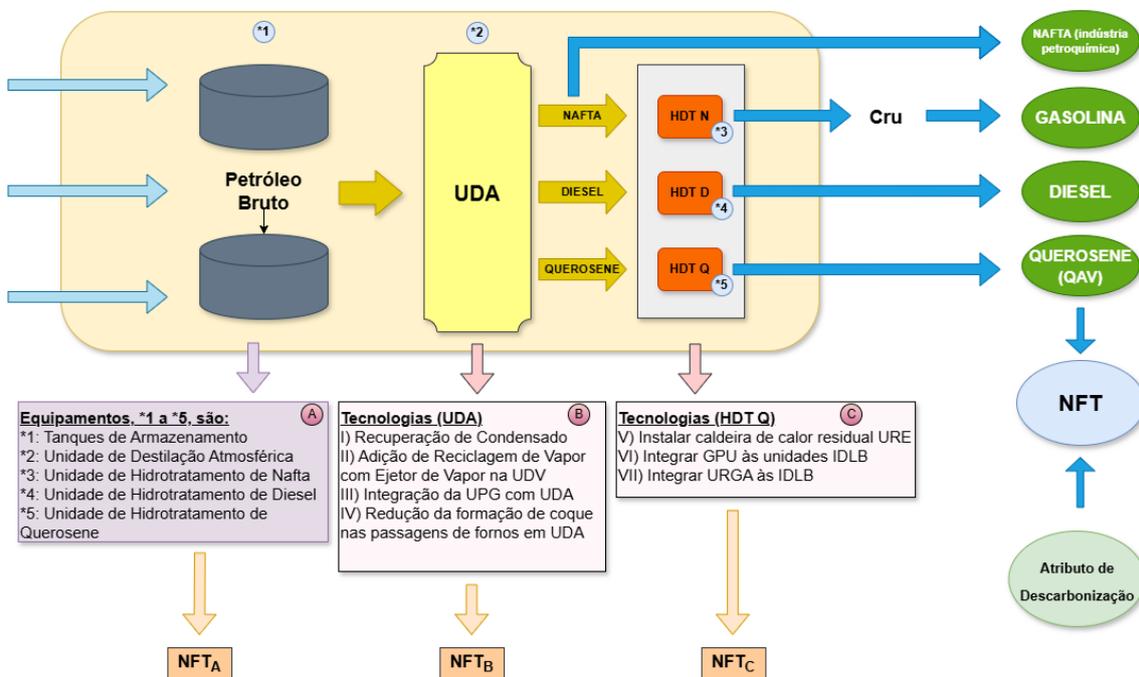


Figura 11 – Ativos físicos envolvidos no processo de refino

Fonte: Elaborado pela autora.

De forma simplificada, os equipamentos utilizados no processo de refino (quadro A) estão indicados de *1 a *5: inicialmente, o petróleo bruto é armazenado em tanques de armazenamento (*1); em seguida, ele segue para a torre de destilação atmosférica (*2), onde, conforme mencionado anteriormente, os componentes são separados em nafta, diesel e querosene; depois, os componentes, já separados, seguem para suas respectivas unidades de hidrotreatamento (*3, *4 e *5). Todos os equipamentos estão registrados em NFTs (representados no esquema como “NFT_A”).

Além disso, o esquema apresenta as iniciativas de mitigação de emissões de GEE mencionadas na seção 3.1 deste capítulo. O quadro B contém as tecnologias utilizadas na UDA e o quadro C contém as tecnologias utilizadas na HDT Q. Todas as tecnologias estão registradas em NFTs (representadas no esquema como “NFT_B” e “NFT_C”, respectivamente).

Sobre o processo de refino, na UDA, o petróleo bruto é aquecido dentro da torre de destilação, onde é subsequentemente separado em diferentes frações com base em seus pontos de ebulição. Nesse sentido, nafta, diesel e querosene (que é a base para a fabricação do QAV) são extraídos como frações intermediárias; além disso, o hidrotreatamento é uma etapa essencial para remover impurezas como enxofre, nitrogênio e metais, além de saturar hidrocarbonetos e melhorar a estabilidade térmica e a qualidade do QAV.

Na figura 11, as frações obtidas no processo de destilação atmosférica passam por suas respectivas unidades de hidrotreatamento e dão origem a produtos mais refinados, como gasolina e QAV (nota-se que, neste diagrama, não são consideradas as demais etapas da produção de QAV, mas apenas as principais). Por fim, o QAV produzido também é registrado em NFT, representado no esquema como “NFT_K”, e gera um atributo de descarbonização.

Nesse sentido, é desenvolvido o modelo de tokenização de atributos relacionados à descarbonização por meio de NFTs (Figura 12). Funcionários, dispositivos IoT e dispositivos inteligentes rastreiam atividades, eventos e emissões de GEE para que possam ser registrados nos sistemas ERP e, em seguida, enviados à blockchain. A blockchain garante um registro imutável e transparente, com transações validadas por consenso e adicionadas sequencialmente para manter um histórico cronológico. Assim, os participantes podem verificar os dados de emissões na blockchain, confirmando se o QAV é, de fato, um produto mais sustentável.

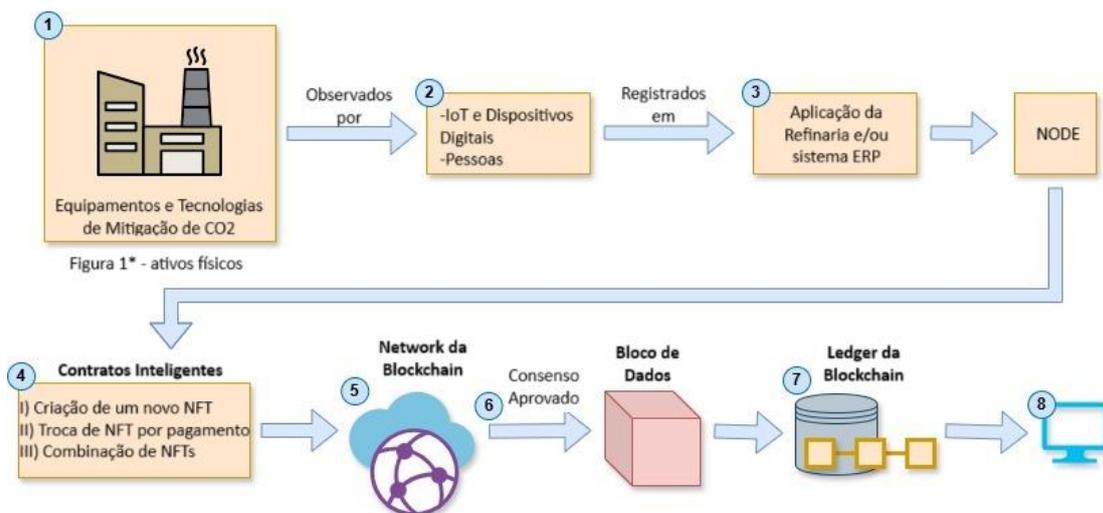


Figura 12 – Modelo de tokenização de atributos relacionados à descarbonização por meio de NFTs

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 12 mostra que os ativos físicos (listados na Figura 11) serão observados por pessoas, dispositivos IoT e dispositivos inteligentes. É nessa etapa que as atividades, os equipamentos, as tecnologias e as emissões de CO₂ de cada ativo serão registradas. No caso do modelo proposto, tais observações ocorrerão por meio de um sistema permissionado – uma rede na qual o acesso é restrito a participantes autorizados.

Nesse sentido, a adoção de um sistema permissionado proporciona maior segurança, uma vez que apenas pessoas e dispositivos autorizados pela entidade central podem adicionar dados e validar transações. Para isso, funcionários designados para a função e dispositivos inteligentes irão observar transações e atividades ao longo da cadeia de produção e criar um registro do evento. Essas informações serão registradas nos aplicativos ou sistemas ERP da refinaria antes de serem enviadas para a blockchain.

No modelo proposto, os dados registrados são inseridos na blockchain por meio de contratos inteligentes, os quais são utilizados em várias etapas do processo: criação de um novo NFT (um novo NFT é criado, incluindo as emissões totais até a etapa atual); criação ou troca de NFTs para pagamentos (entre produtores de QAV e compradores); e queima ou combinação de NFTs (processo de combinação de NFTs para gerar um novo que represente as emissões totais do componente naquele ponto da cadeia de suprimentos).

Cada NFT, nesse cenário, representa não apenas um ativo físico específico, mas também registra, em cada etapa, as emissões de GEE associadas à sua operação, criando um vínculo direto entre o componente físico e seu impacto ambiental. Ao final do processo, o NFT associado ao produto final (no caso do estudo, o QAV) contém um registro completo e auditável de todas as emissões de GEE ao longo de sua trajetória na cadeia produtiva.

A blockchain, portanto, é utilizada para manter um registro compartilhado, imutável e distribuído das informações contidas nos NFTs, garantindo a transparência e a confiabilidade do processo. Antes de serem adicionadas a um novo bloco de dados, as transações são validadas e aprovadas por consenso entre participantes pré-selecionados. Esse novo bloco contendo dados sobre os ativos e eventos é então adicionado ao final do livro-razão da blockchain, criando um registro linear e cronológico.

Assim, na figura 13, é mostrado que todos os participantes envolvidos podem observar os registros de eventos realizados na blockchain, já que, por se tratar de um livro-razão distribuído, todos mantêm uma cópia quase em tempo real do ledger da blockchain. Nesse cenário, é possível consultar o livro-razão para verificar o relatório de emissões de toda a cadeia de produção do combustível.

No entanto, o modelo proposto ainda está incompleto. Isso porque os contratos inteligentes, concebidos para resolver problemas de confiança entre as partes envolvidas em uma transação, enfrentam um desafio fundamental: eles não conseguem interagir com informações externas à rede. Em outras palavras, os contratos inteligentes são incapazes de acessar diretamente dados off-chain e, conseqüentemente, são agentes passivos. Quando ativados, esses contratos necessitam de informações externas para executar suas funções.

Para superar essa limitação, é necessário um sistema externo que facilite a conexão entre os contratos inteligentes e os dados off-chain. Portanto, os oráculos desempenharão esse papel crucial ao atuarem como intermediários que fazem essa ponte, permitindo o acesso fluido às informações necessárias fora da blockchain.

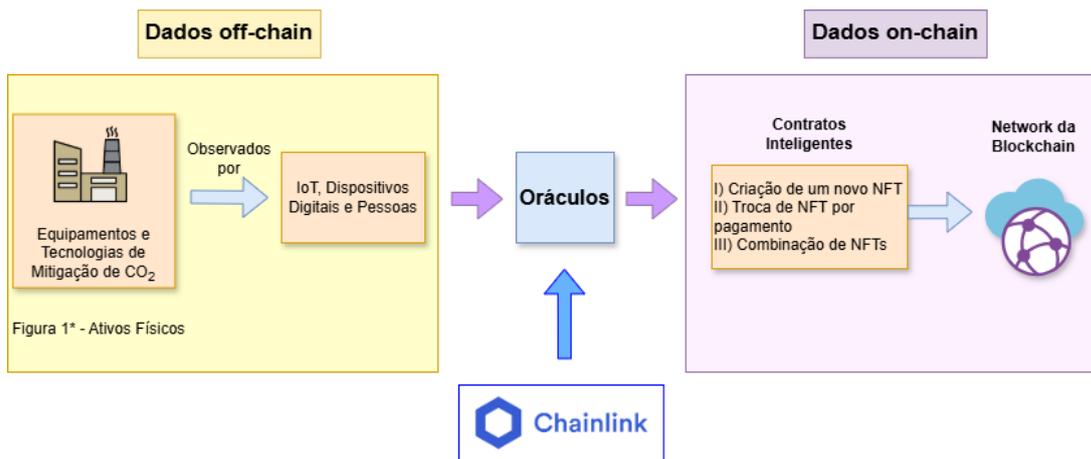


Figura 13 – Oráculos: a ponte entre dados off-chain e on-chain

Fonte: Elaborado pela autora.

Os oráculos, conforme mostrado na Figura 13, desempenham um papel crucial ao atuarem como intermediários que conectam dados do mundo real à blockchain, facilitando a integração entre sistemas off-chain e on-chain. Eles são essenciais para levar informações externas confiáveis aos contratos inteligentes, garantindo que decisões automatizadas sejam baseadas em dados precisos e atualizados.

No modelo, os oráculos coletam dados de dispositivos IoT que verificam continuamente se os equipamentos estão funcionando corretamente e monitoram as emissões de CO₂ durante o processo de refino. Esses dispositivos capturam informações detalhadas sobre o desempenho dos equipamentos e as ações de descarbonização. Em seguida, os oráculos verificam e formatam esses dados, tornando-os compatíveis para transmissão à blockchain, onde os contratos inteligentes processam as informações.

A interação dos oráculos com serviços Web3 é fundamental para transferir esses dados ao ambiente on-chain. Eles se comunicam com o Web3 para entregar os dados aos contratos inteligentes, que são responsáveis por criar e atualizar os NFTs que representam as métricas de descarbonização registradas. Isso automatiza o processo de documentação e garante que apenas informações confiáveis sejam registradas na blockchain.

Por essa razão, propõe-se a implementação de uma rede de oráculos dedicada para melhorar a eficácia e a confiabilidade do sistema de oráculos dentro do modelo, sendo o Chainlink a opção sugerida. O Chainlink é uma rede descentralizada de

oráculos que visa fornecer dados confiáveis e à prova de adulteração para contratos inteligentes em blockchains, conectando com segurança os contratos inteligentes aos dados do mundo real (Lo, Xu, Staples, Yao, 2020).

Além disso, a flexibilidade do Chainlink permite sua integração com diversas fontes de dados e serviços Web3, garantindo que todas as informações relevantes sejam capturadas e transmitidas de forma eficiente. Ademais, ele automatiza a interação entre dados off-chain e ambientes on-chain, simplificando processos como a criação e atualização de NFTs.

O design descentralizado do Chainlink também proporciona resiliência contra adulterações e imprecisões de dados, ao realizar a verificação cruzada das informações por meio de múltiplos nós. Essa característica é particularmente importante para validar os dados coletados dos dispositivos IoT que monitoram emissões nas operações de refino. Ao utilizar essa rede de oráculos, os dados transmitidos aos contratos inteligentes são precisos e confiáveis, reforçando a integridade de todo o sistema blockchain.

Por fim, o quarto framework (Figura 14) do modelo de rastreamento e evidência das ações de descarbonização na produção de QAV ilustra a cadeia de valor e suprimentos do QAV, incluindo uma visão abrangente das etapas que antecedem o refino. Ele oferece uma visualização clara de como as ações de descarbonização podem ser integradas desde a exploração até o produto final, utilizando a tecnologia blockchain para garantir transparência e rastreabilidade ao longo de toda a cadeia produtiva do QAV.

O esquema está estruturado em quatro seções distintas que detalham o processo desde a exploração até o armazenamento do combustível. Em cada etapa, um novo NFT é gerado, registrando as informações relevantes que comprovam a descarbonização do combustível produzido:

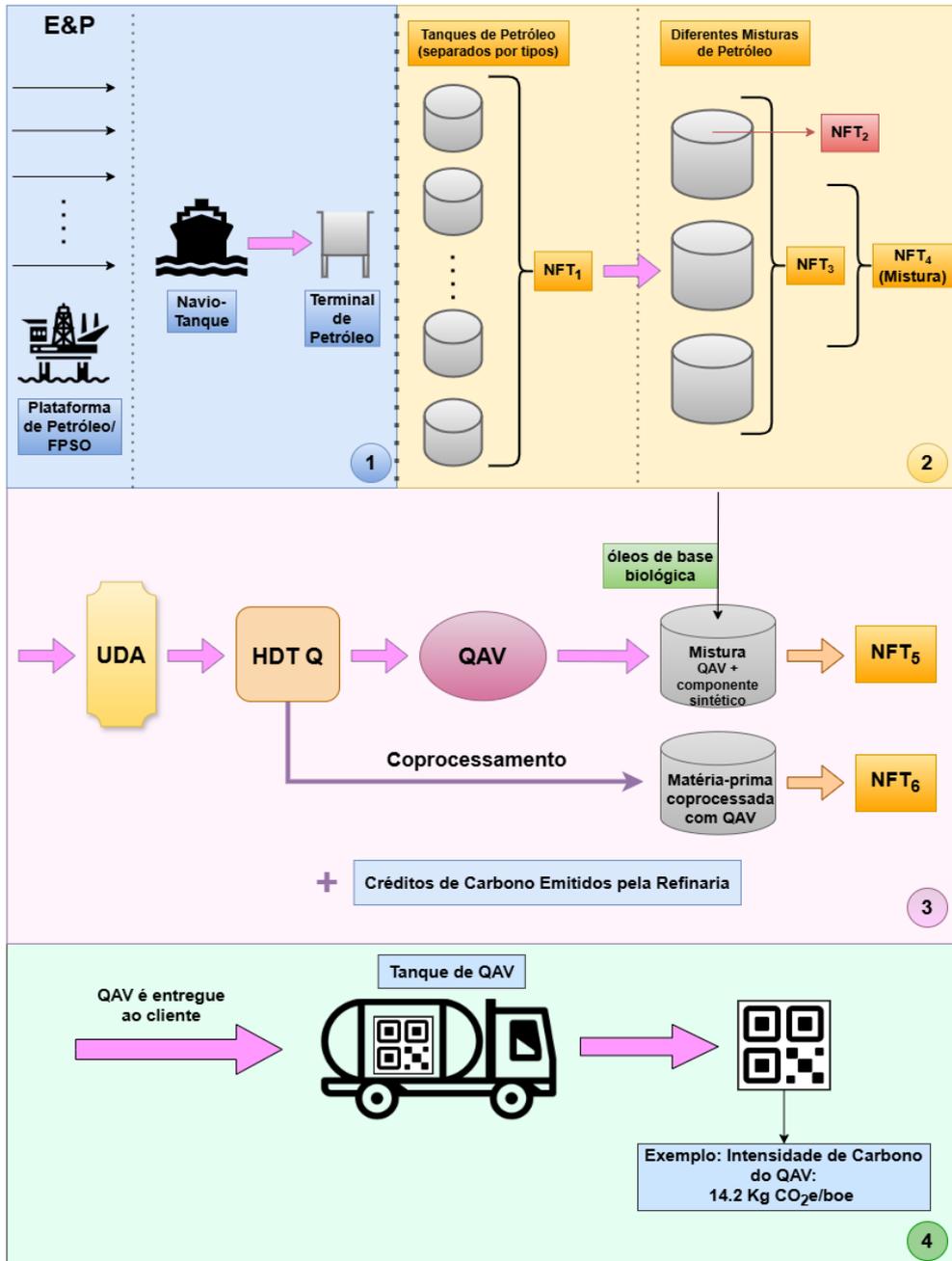


Figura 14: Cadeia de suprimentos do QAV e produção de combustível com pegada de carbono reduzida

Fonte: Elaborado pela autora.

O quadro 1 da figura 14 mapeia o processo de Exploração e Produção (E&P), incluindo a operação de plataformas de petróleo e Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Transferência (FPSOs). O petróleo extraído é transportado para os terminais de petróleo por meio de navios aliviadores (shuttle tankers), garantindo o deslocamento eficiente do recurso até as refinarias. Essa

etapa é essencial, pois estabelece a base para um fornecimento contínuo de petróleo bruto que será posteriormente refinado em QAV.

No segundo quadro da figura 14, o foco se volta para os tanques de armazenamento, onde o petróleo é categorizado por tipo e registrado em NFTs. Esses NFTs contêm informações importantes sobre cada tanque, incluindo a intensidade de carbono, a categoria e o tipo de petróleo. A intensidade de carbono, por sua vez, refere-se à liberação de dióxido de carbono e é frequentemente chamada de intensidade de emissões ou fator de emissão no contexto das mudanças climáticas. A definição geral de intensidade de emissão para qualquer poluente, proveniente de uma fonte específica por unidade de atividade ou produção específica, é expressa como (Basu & Kaushal, 2023):

$$\text{Intensidade de emissões de carbono} = \frac{\alpha}{\beta}$$

(1)

Onde α representa a quantidade de poluente emitido e β representa o montante da atividade responsável pela emissão.

À medida que diferentes tipos de petróleo são misturados, novos tanques são introduzidos, cada um associado a um NFT que documenta dados como a intensidade total de carbono contida naquela mistura. Essa tokenização não apenas proporciona segurança e confiabilidade, como também possibilita o rastreamento da pegada de carbono desde as etapas iniciais da produção.

O terceiro quadro da figura 14 integra uma visão simplificada do processo de refino (conforme mostrado na Figura 11), iniciando-se na Unidade de Destilação Atmosférica (UDA) e prosseguindo até o Hidrotratamento de Querosene (HDT Q). Aqui, são apresentadas duas possibilidades de produção de combustível com pegada de carbono reduzida: a primeira refere-se ao coprocessamento de matérias-primas de biomassa na etapa de hidrotratamento, resultando em um combustível que incorpora elemento renovável (de acordo com a regulamentação da ASTM); a segunda possibilidade refere-se à mistura do QAV produzido com óleos de base biológica, criando um blend que inclui um Componente de Mistura Sintético (SBC, da sigla em inglês), também conforme a regulamentação da ASTM. Ambos os tipos

de combustível são vinculados a NFTs que contêm informações detalhadas sobre sua origem, percentual de biocombustível e intensidade de carbono.

Após a produção dos combustíveis, conforme ilustrado no terceiro quadro, a refinaria oferecerá duas opções aos seus clientes (as companhias aéreas). A primeira opção permite que os clientes adquiram querosene de aviação com pegada de carbono reduzida, garantindo o uso de um combustível mais sustentável. Para assegurar aos clientes que o combustível é, de fato, mais ambientalmente responsável, as refinarias fornecerão, por meio de NFTs, o rastreamento completo das ações de descarbonização envolvidas na produção daquele combustível. Essa escolha envolve um pagamento adicional, refletindo os custos associados ao processo de descarbonização, e demonstra o compromisso da companhia aérea com práticas ambientalmente responsáveis e com a busca por uma aviação mais verde.

A segunda opção permite que as companhias aéreas adquiram querosene de aviação convencional, que não passa por nenhum processo de redução de pegada de carbono. No entanto, como forma de compensação, elas terão a oportunidade de adquirir um certificado de compensação de emissões de carbono emitido pela refinaria. Esse certificado serve para mitigar as emissões geradas pela queima do QAV tradicional e permite que a companhia aérea financie parte da produção de combustíveis com menor impacto ambiental. Em troca, essa abordagem oferece um crédito de carbono que pode ser utilizado para cumprir cotas de mitigação de GEE exigidas por órgãos reguladores.

No quarto quadro da figura 14, é mostrado que o comprador do QAV terá acesso a um código QR afixado ao tanque de combustível. Esse código QR conterá as informações registradas no NFT referentes às ações de descarbonização realizadas na cadeia de produção do combustível, bem como os dados da intensidade de carbono associada ao QAV. O valor da intensidade de carbono (como, por exemplo, os 14.2 kg CO₂e/boe atingidos pela Petrobras em suas atividades upstream e downstream ²) seria disponibilizado ao consumidor, permitindo que ele tenha ciência da intensidade real de emissões relacionadas ao

² <https://agencia.petrobras.com.br/w/sustentabilidade/petrobras-reduz-emissoes-absolutas-operacionais-em-41-#:~:text=A%20intensidade%20de%20emiss%C3%A3o%20por,emiss%C3%B5es%20de%202015%20a%202023.>

combustível adquirido. Isso, portanto, reforça a confiança no processo de descarbonização realizado pela refinaria.

Dessa forma, as refinarias promoveriam a adoção de combustíveis mais sustentáveis e ofereceriam uma alternativa viável às companhias aéreas que ainda utilizam combustíveis convencionais. Assim, esse modelo não apenas contribui para a redução das emissões, como também gera uma nova fonte de receita para a refinaria, incentivando o compromisso das empresas com a sustentabilidade e criando um ciclo positivo de responsabilidade ambiental no setor da aviação.

4 Análise e Discussão

O modelo proposto para rastreamento e evidência das ações de descarbonização na produção de querosene de aviação, estruturado em quatro frameworks interconectados, representa um caminho possível para que refinarias e a indústria da aviação enfrentem os desafios da sustentabilidade e da transparência em suas organizações. Para as refinarias, esse modelo é particularmente relevante, pois oferece um sistema atualizado que facilita a adoção de práticas sustentáveis em um ambiente altamente regulado e competitivo. A capacidade de fornecer registros imutáveis e auditáveis das ações de descarbonização contribui para o atendimento das exigências regulatórias e fortalece a reputação corporativa, aumentando a confiança dos consumidores em produtos sustentáveis.

A implementação da blockchain melhora a transparência nas operações, permitindo que as refinarias registrem e compartilhem informações importantes – como equipamentos de refino, tecnologias de descarbonização e dados de emissões de GEE – de forma imutável e auditável, contribuindo para a competitividade e a operação sustentável das refinarias. Essa visibilidade não apenas fortalece a confiança de consumidores e reguladores, como também posiciona a refinaria como líder em práticas sustentáveis, diferenciando-a de concorrentes que não adotam tais tecnologias.

Além disso, o uso de contratos inteligentes automatiza processos operacionais, reduzindo a necessidade de intervenção manual e minimizando erros, o que pode contribuir para economia de tempo e de custos. Essa eficiência operacional aumenta a produtividade e reduz os custos de conformidade, permitindo que a refinaria reinvesta esses recursos em novas inovações e atraia investimentos de stakeholders interessados em apoiar práticas ambientalmente responsáveis.

A colaboração com oráculos é essencial para garantir que os contratos inteligentes tenham acesso a dados em tempo real provenientes de dispositivos IoT e outras fontes externas. Esses oráculos verificam e transmitem informações

confiáveis sobre emissões de CO₂ e desempenho de equipamentos, assegurando que os contratos inteligentes operem com dados precisos e atualizados. Como resultado, as ações de descarbonização podem ser automaticamente registradas em NFTs, que funcionam como certificados digitais imutáveis das práticas sustentáveis implementadas pela refinaria. Essa integração melhora a eficiência do processo de rastreamento e certificação da descarbonização do QAV, reforçando a credibilidade do modelo.

Por fim, ao adotar essas tecnologias, a refinaria se alinha aos objetivos internacionais de sustentabilidade, preparando-se para futuras exigências regulatórias e aumentando sua capacidade de resposta aos desafios ambientais. Ao integrar tecnologias inovadoras e evidenciar ações de descarbonização, as refinarias não apenas asseguram sua relevância no mercado, como também contribuem ativamente para um futuro mais sustentável.

O modelo proposto também oferece benefícios significativos para os compradores, especialmente para as companhias aéreas que consomem QAV. Ao adquirirem um combustível “mais verde”, que passou por um processo eficaz de rastreamento, essas empresas atendem às exigências regulatórias e se alinham com a crescente expectativa dos consumidores por práticas sustentáveis. As preocupações ambientais dos consumidores estão aumentando devido aos eventos climáticos extremos, e muitos estão dispostos a mudar seu comportamento, pagando até 12% a mais por produtos sustentáveis (Faelli, 2023). Isso é particularmente importante em um cenário em que a conscientização ambiental está em alta e os passageiros estão cada vez mais atentos à pegada de carbono das companhias aéreas.

A transparência proporcionada pelo modelo permite que as companhias aéreas ofereçam informações honestas e verificáveis sobre os métodos de descarbonização empregados na cadeia de produção do QAV. Esse acesso a dados confiáveis aumenta a confiança do consumidor, permitindo que as companhias comuniquem efetivamente suas iniciativas de sustentabilidade. Além disso, ao destacar práticas sustentáveis por meio da blockchain e da tokenização das ações de descarbonização, as empresas podem se diferenciar no mercado, o que pode resultar em uma vantagem competitiva.

Em resumo, ao consumir QAV com menor pegada de carbono, as companhias aéreas contribuem para a mitigação das mudanças climáticas e fortalecem sua

imagem institucional, gerando valor agregado que pode resultar em maior fidelização de clientes. Essa combinação de vantagens ecológicas, competitivas e mercadológicas posiciona as companhias aéreas para um futuro mais sustentável, demonstrando responsabilidade social e ambiental em suas operações.

A relevância deste estudo impacta os setores de transição energética e descarbonização ao oferecer um modelo abrangente que preenche a lacuna entre práticas teóricas de descarbonização e aplicações tecnológicas práticas. Ao integrar tecnologias como blockchain, contratos inteligentes, IoT e oráculos, a pesquisa destaca a capacidade da indústria de inovar e se adaptar frente aos desafios impostos pela crise climática. Este modelo serve como um exemplo prático de como os avanços tecnológicos podem ser aproveitados para alcançar reduções significativas nas emissões de GEE, mantendo a eficiência operacional e a transparência.

Além disso, o uso inovador de NFTs para tokenizar atributos de descarbonização apresenta oportunidades para marketing e investimento dentro da indústria. A proposta de um ativo negociável que certifica práticas sustentáveis na cadeia de produção do QAV oferece uma nova via para engajar diferentes stakeholders – de investidores a consumidores – na busca pela sustentabilidade. Essa tokenização facilita o investimento em tecnologias limpas e dissemina a responsabilidade ambiental das indústrias, incentivando as empresas a adotarem práticas mais verdes ao alinhar incentivos financeiros a benefícios ecológicos.

O desempenho ambiental é um aspecto muito importante na avaliação da eficácia de qualquer modelo de descarbonização, especialmente no contexto da produção de querosene de aviação. O modelo proposto pode servir como uma ferramenta significativa para a redução de emissões de GEE ao garantir um monitoramento mais eficiente e confiável das ações de descarbonização. Por meio da utilização da blockchain, toda a cadeia de produção pode ser rastreada, permitindo a identificação e mitigação de barreiras à redução de emissões. Com informações acessíveis e auditáveis, as refinarias poderão otimizar seus processos, minimizando desperdícios e aumentando a eficiência energética.

Por fim, este trabalho aborda lacunas existentes na literatura e estabelece uma base para pesquisas e desenvolvimentos futuros em tecnologias sustentáveis, enfatizando o papel fundamental que a tecnologia desempenha na transição para um futuro energético mais limpo e responsável. Ao oferecer frameworks abrangentes para a implementação da tecnologia blockchain no rastreamento de

ações de descarbonização em refinarias, o estudo apoia os esforços contínuos no combate às mudanças climáticas e pode servir como referência para acadêmicos, líderes da indústria, consumidores e formuladores de políticas comprometidos com a promoção de um cenário energético mais sustentável.

5 Conclusão

O modelo proposto para rastreamento dos métodos de descarbonização na produção de QAV, utilizando tecnologia blockchain, oferece vantagens significativas, incluindo maior eficiência operacional e sustentabilidade. Os principais benefícios incluem o aumento da transparência dos dados ao longo da cadeia de produção, permitindo que os stakeholders acessem registros imutáveis, além do monitoramento em tempo real por meio da integração com dispositivos IoT, que possibilitam a rápida detecção de ineficiências.

Adicionalmente, o modelo simplifica os processos burocráticos e automatiza os relatórios de conformidade, posicionando a indústria para atender de forma eficaz às exigências regulatórias. O modelo também auxilia tanto os setores de aviação quanto de refino na redução das emissões de GEE e na melhoria das práticas de sustentabilidade, o que é essencial para mitigar as mudanças climáticas em nosso planeta.

No entanto, a implementação desse modelo apresenta desafios, como os altos custos iniciais e a complexidade associada ao estabelecimento da tecnologia blockchain e à integração com IoT. Além disso, é fundamental garantir a integridade e a consistência dos dados, já que quaisquer discrepâncias podem comprometer a transparência dos registros de emissões. Enfrentar desafios regulatórios também representa possíveis obstáculos, exigindo que as empresas gerenciem a conformidade ao mesmo tempo em que asseguram a privacidade e a segurança de dados sensíveis. Abordar essas questões é crucial para alcançar os objetivos de transparência e responsabilização nos esforços de descarbonização.

Olhando para o futuro, há oportunidades para pesquisas que podem ampliar ainda mais a compreensão e a eficácia desse modelo. Estudos podem investigar os impactos de longo prazo da adoção da blockchain na redução de emissões nos setores de refino e aviação, bem como o potencial para escalar esse modelo a outros setores.

Além disso, a investigação de tecnologias complementares, como inteligência artificial e aprendizado de máquina, pode oferecer insights relevantes para otimizar as operações dentro da estrutura blockchain e melhorar a eficiência geral das iniciativas de descarbonização. Abordar essas lacunas será essencial para aprimorar o modelo e garantir que ele esteja alinhado com os objetivos de sustentabilidade necessários para um futuro mais verde na produção de combustíveis.

Em resumo, a integração da TLD oferece uma abordagem transformadora para a gestão e o rastreamento das cadeias de produção e valor do QAV. Ao explorar a natureza imutável e transparente da blockchain, esse sistema proporciona maior visibilidade e rastreabilidade, assegurando que todo o processo — da produção ao abastecimento da aeronave — apoie os esforços de descarbonização. O uso de NFTs para representar ações de descarbonização reforça ainda mais essa abordagem, facilitando o monitoramento de métricas de sustentabilidade e o potencial para que esses tokens sejam negociados em mercado secundário. Em última análise, os frameworks garantem que todos os stakeholders (produtores, consumidores e órgãos reguladores) possam acessar dados precisos e em tempo real, promovendo um futuro mais transparente, responsável e sustentável para a produção de combustíveis.

6 Referências bibliográficas

ADLER, E. J.; MARTINS, J. R. R. A. Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 141, n. 141, p. 100922, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **SustentAr**. Brasília, DF: Governo Federal, [s. d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/sustentar>. Acesso em: 08 fev. 2025.

AHRAM, T.; SARGOLZAEI, A.; SARGOLZAEI, S.; DANIELS, J.; AMABA, B. Blockchain technology innovations. In: **IEEE TECHNOLOGY & ENGINEERING MANAGEMENT CONFERENCE (TEMSCON)**, 2017, Santa Clara, CA. Anais... [S. l.]: IEEE, 2017. p. 137–141. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMSCON.2017.7998367>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ALHARBY, M.; MOORSEL, A. VAN. Blockchain Based Smart Contracts: A Systematic Mapping Study. **Computer Science & Information Technology (CS & IT)**, 2017.

ALZOUBI, A. Renewable Green hydrogen energy impact on sustainability performance. **International Journal of Computations, Information and Manufacturing (IJCIM)**, v. 1, n. 1, 19 dez. 2021.

ANAC - AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Aeroportos sustentáveis**. Brasília, DF: Governo Federal, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/aeroportos-sustentaveis>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA. Certificado de energia renovável. **ABRAGEL**, 2018. Disponível em: <http://www.abragel.org.br/energia-renovavel/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D1655-23: Standard specification for aviation turbine fuels**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D7566-21: Standard specification for aviation turbine fuels containing synthesized hydrocarbons**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

AZZI, R.; CHAMOUN, R. K.; SOKHN, M. The power of a blockchain-based supply chain. **Computers & Industrial Engineering**, v. 135, n. 1, p. 582–592, set. 2019.

BARQUETTE, A. **Avaliação da melhor localização do sistema de mistura em linha de diesel da REDUC**. Dissertation (Master's degree in Production Engineering) - Department of Industrial Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2008.

BASU, P., KAUSHAL, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction**. In Elsevier eBooks. Elsevier, 2023. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/c2022-0-02464-8>. Acesso em: 12 fev. 2025.

BAYAN, T.; BANACH, R. Exploring the privacy concerns in permissionless blockchain networks and potential solutions. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES (SIST)**, 2023. *Anais...* [S. l.]: IEEE, 2023. p. 567–572. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223536>. Acesso em: 18 jan. 2025.

BENIICHE, A. A Study of Blockchain Oracles. **arXiv (Cornell University)**, 14 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2004.07140>. Acesso em: 03 fev. 2025.

BOULAIS, O. **Viral Communications**, 2019. Exploring Provenance of Tuna using Distributed Ledgers. Disponível em: <https://viral.media.mit.edu/pub/tunaprovenance/release/12>. Acesso em: 10 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Acordo de Paris: versão oficial do Governo Brasileiro (Decreto nº 9.073/2017). Brasília, DF: MCTIC, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/assuntos/sustentabilidade/arquivos/acordo_paris.pdf. Acesso em: 08 mar. 2025.

CHUGH, A.; TAIBI, E. What is green hydrogen? An expert explains the benefits. [S. l.]: **World Economic Forum**, 13 dez. 2021. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2021/12/what-is-green-hydrogen-expert-explains-benefits/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

COSTA, Ignacio. Co-processing: A fast-track to SAF. **Sustainable Aviation Futures**, 9 abr. 2024. Disponível em: <https://www.sustainableaviationfutures.com/saf-spotlight/coprocessing-topsoe>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CUI, P. et al. A Blockchain-Based Framework for Supply Chain Provenance. **IEEE Access**, v. 7, p. 157113–157125, 2019.

CZEPLUCH, J. S.; NIKOLAJ LOLLIKE; MALONE, S. **The Use of Block Chain Technology in Different Application Domains**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321490248_The_Use_of_Block_Chain_Technology_in_Different_Application_Domains. Acesso em: 28 mar. 2025.

DANISH, S. M. et al. Blockchain for Energy Credits and Certificates: A Comprehensive Review. **IEEE Transactions on Sustainable Computing**, p. 1–13, 1 jan. 2024.

DUJAK, D.; SAJTER, D. Blockchain Applications in Supply Chain. **SMART Supply Network**, p. 21–46, 15 jun. 2018.

DURANTE, G. C. **A Utilização de Blockchain para controle da cadeia de distribuição de combustíveis derivados: Proposta de modelo de negócio**. Orientador: Leonardo Lima Gomes. 2021. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Administração) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1911993_2021_completo.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

ENERGY RESEARCH OFFICE – EPE (Brasil). **Estudos do Plano decenal de expansão de energia 2034: Oferta de Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2034/cadernos/pde-2034-caderno-de-oferta-de-biocombustiveis/view>. Acesso em: 13 fev. 2025.

ENERGY RESEARCH OFFICE – EPE (Brasil). **Sustainable aviation fuels: pathways, challenges and perspectives**. Rio de Janeiro: EPE, 2024b. (Nota Técnica CA-EPE-DPG-SDB-2024-02). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_SUSTAINABLE%20AVIATION%20FUELS%20_EPE.pdf. Acesso em: 25 jan. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **About the EU ETS**, 2023. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/about-eu-ets_en. Acesso em: 17 mar. 2025.

FAELLI, F. Consumers say their environmental concerns are increasing due to extreme weather; study shows they're willing to change behavior, pay 12% more for sustainable products. **Bain & Company**, 2023. Disponível em: <https://www.bain.com/about/media-center/press-releases/2023/consumers-say-their-environmental-concerns-are-increasing-due-to-extreme-weather-study-shows-theyre-willing-to-change-behavior-pay-12-more-for-sustainable-products/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

FENG, T. et al. Smart contract model for complex reality transaction. **International Journal of Crowd Science**, v. 3, n. 2, p. 184–197, 30 ago. 2019.

FREUDENRICH, C. How Oil Refining Works. **Howstuffworks**, 2001. Disponível em: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/oil-refining.htm>. Acesso em: 12 mar. 2025.

GHELANI, D. What Is Non-fungible Token (NFT)? a Short Discussion about NFT Terms Used in NFT. **Authorea**, 4 out. 2022.

GOLDING, O. et al. Carboncoin: Blockchain Tokenization of Carbon Emissions with ESG-based Reputation. **2022 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)**, 2 maio 2022.

GUEDES, F. et al. Climate-energy-water nexus in Brazilian oil refineries. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 90, p. 102815, nov. 2019.

Guegan, D. Public Blockchain versus Private blockchain. **HAL Open Science**, 2017. Disponível em: <https://shs.hal.science/halshs-01524440v1>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HARVEY, C. R., Ramachandran, A., Santoro, J. **Defi And The Future Of Finance**. S.L.: John Wiley, 2021.

IATA. **Fact Sheet 2: Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification**. Montreal, s.d. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2025.

IBM. What is the Internet of Things (IoT)? **IBM**, 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>. Acesso em: 25 fev. 2025.

IMD. Internet of Things: What it is and the main IoT trends. **IMD**, 2024. Disponível em: <https://www.imd.org/blog/digital-transformation/internet-of-things/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. Components of conventional jet fuel. **ICAO**, s.d.a. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/AltFuels-Paraffins.aspx>. Acesso em: 13 fev. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. Conversion Processes. **ICAO**, s.d.b. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>. Acesso em: 10 fev. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. **CORSIA fact sheet**. Montreal, 2024. Disponível em: <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-corsia/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). **ICAO**, 2019. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>. Acesso em: 12 jan. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Aviation. **International Energy Agency**, s.d. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>. Acesso em: 03 mar. 2025.

JENKINS, J. G.; NEGANGARD, E. M.; SHELDON, M. D. Using Blockchain, Non-Fungible Tokens, and Smart Contracts to Track and Report Greenhouse Gas Emissions. **The Accounting Review**, p. 1–29, 1 dez. 2024.

JONKER, A. What are renewable energy certificates (RECs)? **IBM**, 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/renewable-energy-certificates>. Acesso em: 12 mar. 2025.

KAMILARIS, A.; FONTS, A.; PRENAFETA-BOLDY, F. X. The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. **Trends in Food Science & Technology**, v. 91, n. 1, p. 640–652, set. 2019.

KOCHOVSKI, P. et al. Trust management in a blockchain based fog computing platform with trustless smart oracles. **Future Generation Computer Systems**, v. 101, p. 747–759, dez. 2019.

LEE, D. (2010). Aviation Greenhouse Gas Emissions (pp. 42–46). Montreal: **ICAO Environmental Report**, 2010. Disponível em: http://admin.indiaenvironmentportal.org.in/files/environmentreport_2010.pdf#page=44. Acesso em: 10 mar. 2025.

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.

LIMA, C.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. Downstream oil supply chain management: A critical review and future directions. **Computers & Chemical Engineering**, v. 92, p. 78–92, set. 2016.

LIU, G.; YAN, B.; CHEN, G. Technical review on jet fuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 59–70, set. 2013.

LIU, M.; WU, K.; XU, J. How Will Blockchain Technology Impact Auditing and Accounting: Permissionless Vs. Permissioned Blockchain. **Current Issues in Auditing**, v. 13, n. 2, 29 ago. 2019.

LO, S. K. et al. Reliability analysis for blockchain oracles. **Computers & Electrical Engineering**, v. 83, p. 106582, maio 2020.

MARQUES, N. L. **Um Modelo Para Oferta de Certificados de Energia Renovável na Blockchain Sob Incerteza e Flexibilidade**. Orientador: Luiz Eduardo Teixeira Brandão. 2019. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Administração) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: https://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1711851_2019-completo.pdf. Acesso em: 12 jan. 2025.

MARQUES, N. L.; GOMES, L. L.; BRANDÃO, L. E. A blockchain-based model for token renewable energy certificate offers. **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 34, n. 91, 2023.

MARTINS, P. **Introdução à Blockchain - Bitcoin, Criptomoedas, Smart Contracts, Conceitos, Tecnologia, Implicações**. 1. ed. Lisboa: FCA, 2018.

MELLO, A. et al. Brazil's Action Plan on CO2 Emissions Reduction from Civil Aviation. **Brazilian Ministry of Infrastructure**, 2022. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental->

protection/Documents/ActionPlan/Brazil%20Action%20Plan%20-%202022_EN.pdf. Acesso em: 06 fev. 2025.

MENGELKAMP, E. et al. A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets. **Computer Science - Research and Development**, v. 33, n. 1-2, p. 207–214, 22 ago. 2017.

MEYERS, R.A. **Handbook of Petroleum Refining Processes**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Handbooks, 2004.

MOTTA, G. A.; TEKINERDOGAN, B.; ATHANASIADIS, I. N. Blockchain Applications in the Agri-Food Domain: The First Wave. **Frontiers in Blockchain**, v. 3, 21 fev. 2020.

MUCKSTADT, J. A. et al. Guidelines for Collaborative Supply Chain System Design and Operation. **Information Systems Frontiers**, v. 3, n. 4, p. 427–453, 2001.

MUZUMDAR, A.; MODI, C.; VYJAYANTHI, C. A permissioned blockchain enabled trustworthy and incentivized emission trading system. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, p. 131274, mio 2022.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2025.

NAPOLETANO, E. Proof of Work Explained. **Forbes Advisor**, 2024. Disponível em: <https://www.forbes.com/advisor/investing/cryptocurrency/proof-of-work/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

NATIONAL INFORMATICS CENTRE. Blockchain use cases by type. **Government of India**, s.d. Disponível em: <https://blockchain.gov.in/Home/BlockChain?blockchain=type>. Acesso em: 01 mar. 2025.

NOJOURI, 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.

PAUL, P et al. Blockchain Technology and Its Types—A Short Review. **International Journal of Applied Science and Engineering (IJASE)**, 9(2), 189–200, 2021. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4050933>. Acesso em: 03 jan. 2025.

PEREZ, M. J. L.; FOLIC, M. Co-processing SAF: Standards, incentives, and regulation. **Biomass Magazine**, 2024. Disponível em: <https://biomassmagazine.com/articles/co-processing-saf-standards-incentives-and-regulation>. Acesso em: 25 fev. 2025.

PETROBRAS. **Gasolinas Automotivas - Informações Técnicas**. Rio de Janeiro, October 2024. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/assistencia-tecnica>. Acesso em: 10 jan. 2025.

PETROBRAS. **Querosene de Aviação: Informações Técnicas**. Rio de Janeiro, December 2021. Disponível em: [https://petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/Manual%20de%20Querosene%20de%20Aviacao%202021.pdf/69d04190-1cb3-978c-160d-50eaff34c0d9?](https://petrobras.com.br/documents/2677942/3190768/Manual%20de%20Querosene%20de%20Aviacao%202021.pdf/69d04190-1cb3-978c-160d-50eaff34c0d9?version=1.0&t=1691773218000&download=true)

version=1.0&t=1691773218000&download=true. Acesso em: 11 jan. 2025.

PETROBRAS. Refino: transformando o petróleo em produtos. **Petrobras**, s.d. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/refino>. Acesso em: 02 abr. 2025.

PETROBRAS. Relatório de Sustentabilidade. Rio de Janeiro: **Petrobras**, 2023. Disponível em: <https://sustentabilidade.petrobras.com.br/#!/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

PRIEM, R. Distributed ledger technology for securities clearing and settlement: benefits, risks, and regulatory implications. **Financial Innovation**, v. 6, n. 1, 6 fev. 2020.

RIVERA-NIQUEPA, J. D.; ZULUAGA MUÑOZ, W.; ROJAS HERNÁNDEZ, A. Carbon Credits: Basics, the Role of ICTs, and a bibliometric literature review. **ParadigmPlus**, v. 4, n. 3, p. 1–16, 30 dez. 2023.

SILVA, B. **SAF Technical Certification**. Harare, April 2023. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO_EU_II/ZimbabweSeminar/Session%203%20-%20SAF%20technical%20certification.pdf. Acesso em: 12 fev. 2025.

SIMPLIFLYING. Sustainable Aviation Fuels: Powerlist 2023. Singapore: SimpliFlying, 2023. Disponível em: <https://simpliflying.com/reports/sustainable-aviation-fuels-powerlist-2023/>. Acesso em: 02 jan. 2025.

SONG, M.; ZHENG, H.; SHEN, Z. Whether the carbon emissions trading system improves energy efficiency – Empirical testing based on China’s provincial panel data. **Energy**, v. 275, p. 127465–127465, 1 jul. 2023.

SONG, Z.; LI, Z.; LIU, Z. Comparison of Emission Properties of Sustainable Aviation Fuels and Conventional Aviation Fuels: A Review. **Applied Sciences**, v. 14, n. 13, p. 5484, 1 jan. 2024.

SOORI, M.; AREZOO, B.; DASTRES, R. Internet of Things for Smart Factories in Industry 4.0, a Review. **Internet of Things and Cyber-Physical Systems**, v. 3, n. 1, p. 192–204, 2023.

STETTLER, M. E. J. et al. Global Civil Aviation Black Carbon Emissions. **Environmental Science & Technology**, p. 130823150610008, 23 ago. 2013.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries. **Energy**, v. 32, n. 7, p. 1075–1092, jul. 2007.

T. ASHA VIJAY; RAJU, S. Blockchain Applications in Fisheries. **E3S web of conferences**, v. 399, p. 07008–07008, 1 jan. 2023.

TAHERDOOST, H. Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review. **Information**, v. 14, n. 2, p. 117, 13 fev. 2023.

UNDAVALLI, V. et al. Recent advancements in sustainable aviation fuels. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 136, p. 100876, jan. 2023.

UNITED NATIONS. For a Livable climate: Net-zero Commitments Must Be Backed by Credible Action. **United Nations**, 2024a. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>. Acesso em: 23 mar. 2025.

UNITED NATIONS. Paris Agreement. New York: United Nations, 2015. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 8 mar. 2025.

UNITED NATIONS. UN Climate Change Conferences. **United Nations**, 2024b. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/un-climate-conferences>. Acesso em: 13 jan. 2025.

WANG, A. et al. Non-Fungible Token (NFT): Overview, Evaluation, Opportunities and Challenges. **arXiv (Cornell University)**, 16 maio 2021.

WINGATE, M., & HOLT, E. Design guide for renewable energy certificate tracking systems. Washington, DC: **National Wind Coordinating Committee**, 2004. Disponível em: http://www.nationalwind.org/publications/rec/rec_guide.pdf. Acesso em: 10 fev. 2025.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. Greenhouse Gas Protocol. **World Resources Institute**, 2024. Disponível em: <https://www.wri.org/initiatives/greenhouse-gas-protocol>. Acesso em: 05 mar. 2025.

YANG, R. et al. Public and private blockchain in construction business process and information integration. **Automation in Construction**, v. 118, n. 1, p. 103276, out. 2020.

ZANFER, G. Entenda o Acordo de Paris, assinado por 196 países e discutido na COP27. **CNN Brasil**, 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/entenda-o-acordo-de-paris-assinado-por-196-paises-e-discutido-na-cop27/>. Acesso em: 07 jan. 2025.