GOVERNANÇA INTERNACIONAL E DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO: BOOK-AND-CLAIM COMO INSTRUMENTO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

INTERNATIONAL GOVERNANCE AND AVIATION DECARBONIZATION: BOOK-AND-CLAIM AS AN INSTRUMENT FOR THE ENERGY TRANSITION

ALEANNA LUZIA MELO BUARQUE LIRA
UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

ANNA MANUELLA MELO NUNES

NATALY ALBUQUERQUE DOS SANTOS

LUIZ MOREIRA COELHO JUNIOR
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

Agradecimento à orgão de fomento:
O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no âmbito do projeto "Desenvolvimento de um framework técnico-regulatório e de uma plataforma digital para a implementação do modelo Book-and-Claim de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) no Brasil".

GOVERNANÇA INTERNACIONAL E DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO: BOOK-AND-CLAIM COMO INSTRUMENTO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Objetivo do estudo
Analisar como os instrumentos de governança internacional estruturam a descarbonização da aviação, com ênfase no mecanismo book-and-claim como instrumento emergente de mercado para ampliar a escalabilidade global dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAF).

Relevância/originalidade
O artigo oferece framework analítico multidimensional original aplicado ao conjunto de instrumentos de governança da aviação e posiciona o book-and-claim como instrumento de integração institucional, contribuindo para a literatura sobre policentrismo regulatório e transição energética em setores hard-to-abate.

Metodologia/abordagem
Pesquisa qualitativa, exploratório-analítica, com análise documental de marcos regulatórios internacionais, análise institucional comparativa entre cinco instrumentos e revisão bibliográfica dirigida sobre governança climática, mercados de carbono e certificação de SAF.

Principais resultados
A fragmentação da governança internacional compromete a escalabilidade do SAF. O book-and-claim apresenta desempenho superior nos critérios de eficiência econômica e escalabilidade, mas depende de harmonização de padrões de certificação e integração formal ao CORSIA.

Contribuições teóricas/metodológicas
Framework multidimensional original com cinco critérios analíticos; posicionamento do book-and-claim como instrumento de integração institucional articulado à literatura sobre policentrismo regulatório; análise das condições institucionais necessárias à sua efetividade ambiental e adoção em larga escala.

Contribuições sociais/para a gestão
Fornece subsídios para formuladores de políticas públicas nos planos multilateral, regional e nacional, com ênfase em economias emergentes, indicando o book-and-claim como oportunidade estratégica de inserção competitiva em mercados internacionais de SAF.

Palavras-chave: Governança climática internacional, Descarbonização da aviação, Combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), Book-and-claim, Transição energética

INTERNATIONAL GOVERNANCE AND AVIATION DECARBONIZATION: BOOK-AND-CLAIM AS AN INSTRUMENT FOR THE ENERGY TRANSITION

Study purpose
To analyze how international governance instruments structure aviation decarbonization, with emphasis on the book-and-claim mechanism as an emerging market instrument to expand the global scalability of sustainable aviation fuels (SAF).

Relevance / originality
The article offers an original multidimensional analytical framework applied to aviation governance instruments and positions book-and-claim as an institutional integration mechanism, contributing to literature on regulatory polycentrism and energy transition in hard-to-abate sectors.

Methodology / approach
Qualitative, exploratory-analytical research, using documentary analysis of international regulatory frameworks, comparative institutional analysis of five instruments, and a directed bibliographic review on climate governance, carbon markets, and SAF certification.

Main results
International governance fragmentation constrains SAF scalability. Book-and-claim outperforms traditional instruments in economic efficiency and scalability criteria, but depends on internationally harmonized certification standards and formal integration into the CORSIA framework.

Theoretical / methodological contributions
An original five-criteria analytical framework; positioning of book-and-claim as an institutional integration instrument articulated with regulatory polycentrism literature; analysis of the institutional conditions required for its environmental effectiveness and large-scale adoption.

Social / management contributions
Provides inputs for policymakers at multilateral, regional, and national levels, with emphasis on emerging economies, highlighting book-and-claim as a strategic opportunity for competitive insertion in international SAF markets.

Keywords: International climate governance, Aviation decarbonization, Sustainable aviation fuels (SAF), Book-and-claim, Energy transition

GOVERNANÇA INTERNACIONAL E DESCARBONIZAÇÃO DA AVIAÇÃO: BOOK-AND-CLAIM COMO INSTRUMENTO PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

1 Introdução

A intensificação da crise climática global impõe pressões crescentes sobre setores econômicos de difícil descarbonização — os denominados *hard-to-abate sectors* —, nos quais as alternativas tecnológicas de baixo carbono ainda enfrentam barreiras técnicas, econômicas e institucionais significativas (DAVIS et al., 2018; BATAILLE et al., 2018). O transporte aéreo insere-se nessa categoria de forma paradigmática: responsável por aproximadamente 2,5% das emissões globais de CO_2 e por uma parcela ainda maior do forçamento radiativo total, o setor apresenta limitações estruturais à eletrificação e ao uso de hidrogênio em voos comerciais de média e longa distância, tornando os combustíveis sustentáveis de aviação (*Sustainable Aviation Fuels* — SAF) a principal rota tecnológica disponível para a redução de sua intensidade carbônica no curto e médio prazo (IEA, 2023; ICAO, 2022).

A transição energética da aviação não se reduz a um desafio tecnológico. Ela é, fundamentalmente, um problema de governança. A arquitetura regulatória internacional que enquadra o setor é marcada por fragmentação, assimetrias institucionais e baixa coordenação entre os múltiplos instrumentos em operação — Paris Agreement, CORSIA, EU ETS e ReFuelEU Aviation (VAN ASSELT; ZELLI, 2014; PATTBERG et al., 2022). A coexistência desses instrumentos em diferentes níveis de governança — multilateral, regional e nacional — configura um cenário de policentrismo regulatório que, embora reflita a pluralidade de atores e interesses envolvidos na governança climática global, gera sobreposições normativas, custos de conformidade elevados e dificuldades de integração entre mercados (CADMAN, 2013; JÖRGENS et al., 2025).

A fragmentação da governança internacional da aviação compromete, em particular, a escalabilidade do SAF: sem harmonização regulatória e sem mecanismos de mercado capazes de operar transversalmente às jurisdições, a expansão da oferta e da demanda por combustíveis sustentáveis permanece restrita a contextos com infraestrutura logística e regulatória consolidada, excluindo mercados emergentes e operadores de menor porte (PANG; CHEN, 2023; FAGEDA; TEIXIDÓ, 2022). Nesse contexto, emerge a seguinte questão central: como os instrumentos de governança internacional estruturam — e limitam — a descarbonização da aviação, e em que medida o mecanismo book-and-claim representa inovação institucional capaz de superar essas limitações para ampliar a escalabilidade global do SAF?

Diante desse quadro, o presente artigo tem como objetivo geral analisar como os instrumentos de governança internacional estruturam a descarbonização da aviação, com ênfase no mecanismo book-and-claim como instrumento emergente de mercado para ampliar a escalabilidade global do SAF. De forma específica, a pesquisa busca: (i) descrever a arquitetura regulatória vigente — Paris Agreement, CORSIA, EU ETS e ReFuelEU Aviation —, identificando seus mecanismos de funcionamento; (ii) identificar as limitações estruturais dessa arquitetura para a escalabilidade do SAF; (iii) avaliar o potencial do book-and-claim como mecanismo de integração institucional; e (iv) discutir as implicações dos resultados para a transição energética em setores *hard-to-abate* e para a formulação de políticas públicas em economias emergentes.

2 Referencial teórico

2.1 Setores de difícil mitigação e a transição energética

A literatura sobre transição energética distingue setores com alta viabilidade de eletrificação — como transportes leves e edificações — daqueles nos quais a eletrificação direta enfrenta limitações técnicas e econômicas estruturais, denominados *hard-to-abate sectors* (DAVIS et al., 2018). O transporte aéreo de média e longa distância insere-se nessa segunda categoria em razão da elevada densidade energética requerida, que torna inviável, no curto e médio prazo, a substituição dos combustíveis fósseis convencionais por baterias elétricas ou células de hidrogênio em aeronaves comerciais (BATAILLE et al., 2018; IEA, 2023).

Para esses setores, a descarbonização depende de soluções que conjuguem inovação tecnológica e instrumentos regulatórios e de mercado capazes de induzir a transição em escala e no ritmo compatíveis com as metas climáticas globais. Os SAF constituem, nesse contexto, a principal rota tecnológica disponível para a redução da intensidade carbônica da aviação, sendo definidos como combustíveis produzidos a partir de biomassa, resíduos, energia elétrica renovável ou outros insumos não fósseis, capazes de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida em comparação com o querosene convencional (IEA, 2023; ICAO, 2022). Apesar de seu potencial técnico, a escalabilidade global do SAF é limitada por restrições de custo de produção, disponibilidade de matéria-prima e, crucialmente, por barreiras regulatórias e institucionais que dificultam a integração dos mercados internacionais (PANG; CHEN, 2023).

2.2 Governança climática internacional: policentrismo e fragmentação

A governança climática internacional contemporânea é estruturada por um modelo descentralizado e policêntrico, no qual a responsabilidade pela definição e implementação de metas climáticas é distribuída entre Estados, organismos multilaterais, blocos regionais e atores não estatais (UNFCCC, 2015; VAN ASSELT; ZELLI, 2014). Esse modelo, consolidado pela adoção do Acordo de Paris em 2015, representa uma ruptura com a lógica top-down dos regimes multilaterais tradicionais: ao adotar uma estrutura bottom-up baseada em Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), o Acordo de Paris transferiu aos Estados a responsabilidade pela definição de metas climáticas, sem estabelecer mecanismos vinculantes específicos para setores de emissões internacionais como a aviação (ROBIOU DU PONT; MEINSHAUSEN, 2018).

O policentrismo regulatório, embora favoreça a participação de múltiplos atores e a experimentação institucional, gera desafios de coordenação que comprometem a efetividade coletiva do sistema de governança (PATTBERG et al., 2022; CADMAN, 2013). Quando aplicado à aviação internacional, esse fenômeno se manifesta na coexistência de instrumentos com lógicas, abrangências e requisitos distintos — CORSIA, EU ETS e ReFuelEU Aviation —, cuja baixa coordenação resulta em sobreposições normativas, fragmentação de padrões de certificação e elevados custos de conformidade para os atores do setor (JÖRGENS et al., 2025; VAN ASSELT; ZELLI, 2014).

A fragmentação da governança internacional é particularmente problemática para o SAF, cuja cadeia produtiva é intrinsecamente transnacional e depende de reconhecimento mútuo entre jurisdições para viabilizar a comercialização internacional de atributos ambientais certificados. A proliferação de esquemas privados de certificação de sustentabilidade — como ISCC, RSB e outros —, cujo reconhecimento varia entre jurisdições e instrumentos, agrava esse quadro e representa barreira significativa para produtores de SAF em economias emergentes (PANG; CHEN, 2023; IEA, 2023).

2.3 Book-and-claim como inovação institucional

O mecanismo book-and-claim constitui objeto emergente na literatura sobre governança de mercados de energia renovável e certificação de atributos ambientais. Sua lógica operacional baseia-se na dissociação entre dois fluxos distintos: o fluxo físico do combustível — que percorre a cadeia logística convencional de produção, distribuição e abastecimento — e o fluxo dos atributos ambientais certificados associados a esse combustível, que podem ser transferidos, negociados e contabilizados de forma independente, por meio de certificados rastreáveis emitidos por entidades de certificação reconhecidas (IRENA, 2023; RSB, 2022).

Esse modelo já é aplicado em outros setores de energia renovável, como os Renewable Energy Certificates (RECs) e os Guarantees of Origin (GOs) no setor elétrico, mas sua aplicação à aviação apresenta especificidades que demandam tratamento analítico próprio, relacionadas às exigências de rastreabilidade da cadeia produtiva do combustível, aos requisitos de adicionalidade e à necessidade de integração com mecanismos regulatórios multilaterais como o CORSIA (RSB, 2022; IRENA, 2023). A literatura existente identifica o book-and-claim como potencial solução para barreiras logísticas e de integração de mercados, mas aponta a ausência de padrões internacionalmente harmonizados de certificação como principal obstáculo à sua adoção em larga escala (PANG; CHEN, 2023; ICAO, 2022).

Nesse sentido, o posicionamento teórico adotado neste artigo articula o book-and-claim não apenas como mecanismo de mercado, mas como instrumento de integração institucional, cuja efetividade é função direta da qualidade da arquitetura de governança em que se insere — perspectiva alinhada à literatura sobre policentrismo regulatório e fragmentação da governança climática (VAN ASSELT; ZELLI, 2014; PATTBERG et al., 2022; CADMAN, 2013).

3 Metodologia

3.1 Natureza da pesquisa

O presente estudo adota abordagem qualitativa, de caráter exploratório-analítico, orientada à compreensão dos arranjos institucionais e instrumentos de mercado que estruturam a governança internacional da descarbonização da aviação. A escolha pela abordagem qualitativa justifica-se pela natureza do objeto de pesquisa — a análise de marcos regulatórios, mecanismos institucionais e instrumentos de política climática —, que demanda interpretação contextualizada e comparação analítica entre sistemas normativos distintos, em detrimento de modelagem quantitativa ou inferência estatística (CRESWELL, 2014; YIN, 2016).

3.2 Procedimentos metodológicos

A pesquisa foi conduzida por meio de três procedimentos metodológicos complementares:

a) Análise documental: exame sistemático de documentos primários produzidos por organismos multilaterais, instituições regulatórias e entidades de certificação, incluindo tratados internacionais, regulamentos, diretrizes técnicas, relatórios institucionais e normas de certificação de sustentabilidade. Os documentos foram selecionados com base em sua relevância para os instrumentos analisados e na autoridade institucional das fontes emissoras.
b) Análise institucional comparativa: cotejamento entre os instrumentos de governança selecionados a partir de critérios analíticos previamente definidos — governança,

rastreabilidade, adicionalidade, eficiência econômica e escalabilidade —, permitindo identificar convergências, divergências e lacunas entre os mecanismos examinados.
c) Revisão bibliográfica dirigida: levantamento não sistemático da literatura acadêmica relevante sobre governança climática internacional, mercados de carbono, transição energética em setores *hard-to-abate* e mecanismos de certificação de combustíveis sustentáveis, com foco em obras de referência e publicações recentes de periódicos especializados.

3.3 Base analítica

A análise incide sobre cinco instrumentos centrais da governança internacional da descarbonização da aviação, selecionados em razão de sua relevância regulatória, abrangência geográfica e impacto sobre a cadeia produtiva do SAF:

- Paris Agreement (UNFCCC, 2015): tratado multilateral que estabelece o marco global de governança climática, com base em NDCs definidas pelos Estados-parte, e que serve de referência normativa para os demais instrumentos analisados;
- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA/ICAO, 2022): mecanismo multilateral de compensação de emissões para a aviação internacional, administrado pela ICAO, com fases de implementação progressiva e critérios de elegibilidade para unidades de compensação;
- EU Emissions Trading System (EU ETS): sistema regional de comércio de emissões da União Europeia aplicado ao setor aéreo, baseado em tetos de emissão e alocação de licenças, com cobertura atualmente restrita a voos intra-europeus (FAGEDA; TEIXIDÓ, 2022);
- ReFuelEU Aviation (EASA, 2024; EUROPEAN COMMISSION, 2023): regulamento europeu que estabelece metas obrigatórias e progressivas de incorporação de SAF nos aeroportos da União Europeia, com exigências específicas de rastreabilidade e certificação de sustentabilidade;
- Mecanismo book-and-claim (IRENA, 2023; RSB, 2022): instrumento emergente de mercado que permite a dissociação entre o fluxo físico do SAF e a transferência de seus atributos ambientais certificados, viabilizando a comercialização de créditos de sustentabilidade independentemente da localização geográfica do abastecimento.

3.4 Estrutura analítica

O diferencial metodológico deste estudo reside na aplicação de um framework analítico multidimensional, construído a partir de cinco critérios que permitem avaliar comparativamente os instrumentos de governança examinados:

- **Governança**: grau de centralização ou descentralização do arranjo institucional, incluindo a distribuição de competências entre atores multilaterais, regionais e nacionais;
- **Rastreabilidade**: capacidade do instrumento de assegurar a identificação, o monitoramento e a verificação da origem e dos atributos ambientais do SAF ao longo da cadeia produtiva;
- **Adicionalidade**: garantia de que as reduções de emissões contabilizadas representam impacto ambiental efetivo e não teriam ocorrido na ausência do instrumento;
- **Eficiência econômica**: capacidade do mecanismo de minimizar custos de conformidade, reduzir fricções transacionais e alocar recursos de forma economicamente racional;

- **Escalabilidade**: potencial do instrumento de operar em diferentes contextos geográficos, institucionais e de mercado, incluindo economias emergentes e regiões com infraestrutura logística limitada.

3.5 Estratégia de análise

A estratégia analítica adotada estrutura-se em três movimentos complementares. Primeiro, descreve-se a arquitetura da governança internacional da aviação, identificando os principais instrumentos em operação, suas bases normativas e seus mecanismos de funcionamento. Segundo, realiza-se uma comparação sistemática entre instrumentos regulatórios tradicionais (CORSIA e EU ETS), mandatos de incorporação de SAF (ReFuelEU Aviation) e o mecanismo de mercado book-and-claim, aplicando o framework analítico definido na seção 3.4. Terceiro, avaliam-se as implicações dos resultados para a transição energética da aviação, com ênfase nas condições institucionais necessárias à escalabilidade global do SAF e nas contribuições do book-and-claim como instrumento de integração de mercados.

3.6 Limitações

O estudo apresenta duas limitações principais que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A primeira refere-se à natureza qualitativa da abordagem: a ausência de modelagem quantitativa impede a mensuração precisa dos impactos econômicos e ambientais dos instrumentos analisados, restringindo as conclusões ao plano analítico-interpretativo. A segunda diz respeito ao escopo temporal e geográfico da revisão bibliográfica: por se tratar de revisão dirigida e não sistemática, não se pode garantir a cobertura exaustiva da literatura disponível, especialmente no que se refere a publicações em idiomas distintos do inglês e do português ou a documentos de circulação restrita produzidos por organismos regulatórios nacionais.

4 Análise dos resultados e discussões

4.1 Arquitetura da governança internacional da aviação

A governança climática internacional da aviação configura-se como um sistema multinível, caracterizado pela coexistência de instrumentos de natureza, abrangência e lógica institucional distintas. Essa arquitetura reflete a estrutura mais ampla da governança climática global, que, desde a adoção do Acordo de Paris em 2015, consolidou um modelo descentralizado e policêntrico, no qual a responsabilidade pela definição e implementação de metas climáticas é distribuída entre Estados, organismos multilaterais, blocos regionais e atores não estatais (UNFCCC, 2015; VAN ASSELT; ZELLI, 2014; PATTBERG et al., 2022).

No âmbito multilateral, a ICAO ocupa posição central como organismo especializado das Nações Unidas responsável pela regulação da aviação civil internacional. A adoção do CORSIA, em 2016, representou o primeiro esforço coordenado de estabelecer um mecanismo de compensação de emissões específico para o setor aéreo internacional, operando em fases progressivas de implementação com participação inicialmente voluntária e posteriormente obrigatória para os Estados-membros (ICAO, 2022). Paralelamente, no plano regional, a União Europeia desenvolveu sua própria arquitetura regulatória, integrando o EU ETS à aviação e introduzindo, mais recentemente, o regulamento ReFuelEU Aviation como instrumento de mandato de incorporação de SAF (EASA, 2024; EUROPEAN COMMISSION, 2023; FAGEDA; TEIXIDÓ, 2022).

A coexistência desses instrumentos em diferentes níveis de governança não resulta, contudo, em complementaridade funcional. Ao contrário, a baixa coordenação entre os mecanismos, a sobreposição de exigências regulatórias e a ausência de padrões harmonizados de certificação e contabilização de emissões configuram um cenário de fragmentação institucional que compromete a efetividade coletiva do sistema (CADMAN, 2013; JÖRGENS et al., 2025). Essa fragmentação é particularmente problemática para o SAF, cuja cadeia produtiva é intrinsecamente transnacional e depende de reconhecimento mútuo entre jurisdições para viabilizar a comercialização internacional de atributos ambientais certificados.

4.2 Instrumentos regulatórios e de mercado: funcionamento e alcance

A) **CORSIA**: O mecanismo da ICAO opera com base na compensação de emissões que excedam os níveis de referência estabelecidos para o período 2019–2020, exigindo que as companhias aéreas adquiram unidades de compensação elegíveis para neutralizar o crescimento de suas emissões. O CORSIA admite o uso de SAF como alternativa à compensação, desde que os combustíveis atendam aos critérios de sustentabilidade definidos pelo organismo, incluindo requisitos de redução mínima de emissões ao longo do ciclo de vida e de rastreabilidade da cadeia produtiva (ICAO, 2022). Embora represente avanço significativo na governança multilateral da aviação, o mecanismo enfrenta críticas quanto à ambição de suas metas, à qualidade das unidades de compensação elegíveis e à ausência de mecanismos vinculantes de *enforcement* (PANG; CHEN, 2023).
B) **EU ETS — aviação**: O sistema europeu de comércio de emissões aplica-se atualmente aos voos intra-europeus, estabelecendo um teto de emissões para o setor e permitindo que as companhias aéreas adquiram ou negociem licenças de emissão no mercado. A inclusão da aviação no EU ETS introduziu um sinal de preço de carbono no setor, incentivando a adoção de tecnologias e combustíveis de menor intensidade carbônica (FAGEDA; TEIXIDÓ, 2022). A restrição geográfica do mecanismo, contudo, limita seu impacto sobre as emissões da aviação internacional de longa distância, que respondem pela maior parcela das emissões globais do setor.
C) **ReFuelEU Aviation**: O regulamento europeu estabelece metas obrigatórias e progressivas de incorporação de SAF nos aeroportos da União Europeia, partindo de 2% em 2025 e alcançando 70% em 2050, com submetas específicas para SAF sintéticos (*e-fuels*). O instrumento introduz obrigações tanto para fornecedores de combustível quanto para operadores aeroportuários, criando demanda regulatória previsível que favorece o investimento em capacidade produtiva de SAF (EASA, 2024; EUROPEAN COMMISSION, 2023). A ReFuelEU Aviation representa o instrumento de maior especificidade regulatória no conjunto analisado, mas sua abrangência permanece restrita ao mercado europeu, sem mecanismos de extensão ou reconhecimento mútuo com outras jurisdições.

4.3 Limitações estruturais da arquitetura vigente

A análise dos instrumentos em operação revela três limitações estruturais que comprometem a efetividade da governança internacional da descarbonização da aviação.

A primeira é a fragmentação regulatória: a ausência de harmonização entre os critérios de elegibilidade do CORSIA, os requisitos do EU ETS e as exigências da ReFuelEU Aviation impõe às companhias aéreas e aos produtores de SAF a necessidade de conformidade simultânea com múltiplos regimes normativos, elevando os custos de transação e reduzindo a previsibilidade regulatória (JÖRGENS et al., 2025; CADMAN, 2013). Essa fragmentação é

agravada pela proliferação de esquemas privados de certificação de sustentabilidade — como ISCC, RSB e outros —, cujo reconhecimento varia entre jurisdições e instrumentos.

A segunda limitação é o custo de conformidade: a complexidade dos requisitos de rastreabilidade, certificação e contabilização de emissões associados aos instrumentos vigentes representa barreira significativa para produtores de SAF em economias emergentes e para operadores aéreos de menor porte, concentrando os benefícios da transição energética em atores com maior capacidade institucional e financeira (PANG; CHEN, 2023; IEA, 2023).

A terceira limitação refere-se aos problemas de integração entre mercados: a lógica territorial dos instrumentos regulatórios vigentes — que vincula a contabilização de atributos ambientais ao local de abastecimento físico do combustível — é incompatível com a natureza transnacional das operações aéreas internacionais, criando fricções logísticas que restringem a demanda efetiva por SAF a rotas e aeroportos com infraestrutura de distribuição consolidada (IRENA, 2023; RSB, 2022).

4.4 Book-and-claim como inovação institucional

O mecanismo book-and-claim representa uma resposta institucional direta às limitações estruturais identificadas na seção anterior. Sua lógica operacional baseia-se na dissociação entre dois fluxos distintos: o fluxo físico do combustível sustentável — que percorre a cadeia logística convencional de produção, distribuição e abastecimento — e o fluxo dos atributos ambientais certificados associados a esse combustível, que podem ser transferidos, negociados e contabilizados de forma independente, por meio de certificados rastreáveis emitidos por entidades de certificação reconhecidas (IRENA, 2023; RSB, 2022).

Essa dissociação produz três efeitos institucionais relevantes. Primeiro, reduz barreiras logísticas: ao desvincular a aquisição de atributos ambientais do abastecimento físico, o book-and-claim permite que operadores aéreos em regiões sem infraestrutura de distribuição de SAF participem do mercado de combustíveis sustentáveis, ampliando geograficamente a demanda efetiva. Segundo, aumenta a flexibilidade comercial: produtores de SAF podem comercializar seus atributos ambientais para compradores em qualquer jurisdição, independentemente do destino físico do combustível, o que amplia o mercado potencial e melhora a viabilidade econômica dos projetos de produção. Terceiro, favorece a integração de mercados internacionais: ao operar de forma transversal às fronteiras regulatórias, o book-and-claim tem potencial de funcionar como mecanismo de articulação entre os diferentes instrumentos de governança em operação, reduzindo fricções de integração e ampliando a liquidez do mercado global de SAF (IRENA, 2023; PANG; CHEN, 2023).

A efetividade do mecanismo, contudo, está condicionada à adoção de critérios robustos de integridade ambiental. Os requisitos de rastreabilidade — garantia de que os atributos ambientais certificados correspondem a volumes reais de SAF produzido e não são contabilizados em duplicidade — e de adicionalidade — demonstração de que as reduções de emissões associadas ao SAF são efetivas e não teriam ocorrido na ausência do mecanismo — são condições necessárias para que o book-and-claim preserve sua credibilidade ambiental e evite riscos de *greenwashing* (RSB, 2022; ICAO, 2022). A ausência de padrões internacionalmente harmonizados para esses requisitos representa, atualmente, o principal obstáculo à adoção em larga escala do mecanismo.

4.5 Comparação analítica: matriz de avaliação dos instrumentos

A aplicação do framework analítico multidimensional definido na seção 3.4 aos instrumentos examinados permite sistematizar suas características e limitações comparativas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz comparativa dos instrumentos de governança da descarbonização da aviação

Nota. Elaboração própria com base em ICAO (2022), Fageda e Teixidó (2022), EASA (2024), IRENA (2023) e RSB (2022).

Critério	CORSIA	EU ETS	ReFuelEU Aviation	Book-and-Claim
Governança	Multilateral, baixa vinculatividade	Regional, alta institucionalização	Regional, mandatório	Descentralizado, dependente de certificação
Rastreabilidade	Parcial, critérios em desenvolvimento	Limitada ao mercado de licenças	Alta, exigências específicas de cadeia	Potencialmente alta, condicionada a padrões
Adicionalidade	Variável, dependente da qualidade das unidades	Estrutural, via teto de emissões	Indireta, via mandato de incorporação	Condicionada a critérios de certificação
Eficiência econômica	Moderada, custos de conformidade elevados	Moderada, sinal de preço limitado	Baixa flexibilidade, custos fixos de conformidade	Alta, redução de fricções logísticas e transacionais
Escalabilidade	Média, cobertura global, mas metas limitadas	Baixa, restrito a voos intra-europeus	Baixa, restrito ao mercado europeu	Alta, potencial de operação transjurisdicional

A matriz evidencia que nenhum dos instrumentos analisados apresenta desempenho satisfatório em todos os critérios simultaneamente. O CORSIA oferece abrangência multilateral, mas carece de vinculatividade e ambição. O EU ETS introduz sinal de preço relevante, mas tem alcance geográfico restrito. A ReFuelEU Aviation cria demanda regulatória previsível, mas opera exclusivamente no mercado europeu. O book-and-claim, por sua vez, apresenta o maior potencial de escalabilidade e eficiência econômica, mas depende de avanços na harmonização de padrões de certificação para consolidar sua credibilidade ambiental.

4.6 Implicações para a transição energética

Os resultados da análise comparativa apontam para três implicações centrais para a transição energética da aviação. A primeira refere-se à integração de mercados: a escalabilidade global do SAF requer mecanismos capazes de operar de forma transversal às fronteiras regulatórias, conectando produtores e compradores em diferentes jurisdições sem impor custos de conformidade proibitivos. O book-and-claim, quando inserido em arquitetura de governança com padrões harmonizados de certificação, tem potencial de cumprir essa função integradora (IRENA, 2023; PANG; CHEN, 2023).

A segunda diz respeito à redução de custos: a simplificação dos requisitos de rastreabilidade e a eliminação de barreiras logísticas associadas ao book-and-claim podem reduzir significativamente os custos de conformidade para produtores e compradores de SAF, tornando o mercado acessível a atores em economias emergentes e ampliando a base de investimento em capacidade produtiva (IEA, 2023; BATAILLE et al., 2018).

A terceira refere-se à escalabilidade global: a transição energética da aviação não pode ser alcançada por instrumentos de alcance regional. A consolidação de um mercado global de SAF requer a articulação entre os instrumentos multilaterais existentes — especialmente o CORSIA — e mecanismos de mercado com capacidade de operação transjurisdicional, como o book-and-claim, sob uma arquitetura de governança que assegure integridade ambiental, previsibilidade regulatória e inclusão de mercados emergentes (DAVIS et al., 2018; VAN ASSELT; ZELLI, 2014).

4.7 Síntese dos resultados

A análise desenvolvida nas seções anteriores permite articular uma síntese interpretativa em três movimentos. O problema central identificado é a fragmentação da governança internacional da aviação: a coexistência de instrumentos multilaterais, regionais e nacionais sem coordenação efetiva gera sobreposições normativas, custos de conformidade elevados e barreiras à integração de mercados que comprometem a escalabilidade do SAF e, consequentemente, a trajetória de descarbonização do setor.

Os instrumentos vigentes — CORSIA, EU ETS e ReFuelEU Aviation — representam avanços regulatórios relevantes, mas são insuficientes, individualmente e em conjunto, para endereçar as limitações estruturais identificadas. Suas restrições de abrangência geográfica, vinculatividade e harmonização regulatória impedem que operem como sistema integrado de governança capaz de induzir a transição energética na escala e no ritmo exigidos pelas metas climáticas globais.

O book-and-claim emerge, nesse contexto, como solução potencial para parte dessas limitações, especialmente no que se refere à escalabilidade e à integração de mercados. Sua adoção em larga escala, contudo, não é automática: depende do desenvolvimento de padrões internacionais harmonizados de certificação, rastreabilidade e adicionalidade, bem como de sua integração formal aos mecanismos de governança multilaterais existentes — em particular ao CORSIA — e de políticas públicas que incentivem sua adoção em economias emergentes. O book-and-claim não substitui a necessidade de uma arquitetura de governança robusta; ao contrário, sua efetividade é função direta da qualidade institucional do sistema em que se insere.

5 Conclusões/Considerações finais

A descarbonização da aviação internacional constitui um dos desafios mais complexos da transição energética global, não apenas em razão das limitações tecnológicas inerentes ao setor, mas, sobretudo, em função da fragmentação da arquitetura de governança que enquadra suas emissões. O presente artigo demonstrou que os instrumentos regulatórios e de mercado atualmente em operação — Paris Agreement, CORSIA, EU ETS e ReFuelEU Aviation — representam avanços institucionais relevantes, mas são insuficientes para induzir a descarbonização do setor na escala e no ritmo exigidos pelas metas climáticas globais, em razão de suas limitações de abrangência geográfica, vinculatividade e harmonização regulatória.

Em resposta ao objetivo proposto, a análise demonstrou que o mecanismo book-and-claim representa inovação institucional com potencial significativo para ampliar a escalabilidade global do SAF, ao dissociar o fluxo físico do combustível sustentável da transferência de seus atributos ambientais certificados. Essa lógica operacional reduz barreiras logísticas, amplia a flexibilidade comercial e favorece a integração de mercados internacionais, endereçando diretamente as limitações estruturais identificadas na arquitetura de governança vigente. A análise comparativa realizada por meio do framework multidimensional — governança, rastreabilidade, adicionalidade, eficiência econômica e escalabilidade — evidenciou que o book-and-claim apresenta desempenho superior aos instrumentos tradicionais nos critérios de eficiência econômica e escalabilidade, embora sua efetividade ambiental permaneça condicionada ao desenvolvimento de padrões internacionalmente harmonizados de certificação e à sua integração formal aos mecanismos multilaterais existentes.

Do ponto de vista das contribuições teóricas, o artigo oferece três aportes ao debate sobre governança climática internacional e transição energética em setores *hard-to-abate*. A primeira é a aplicação de um framework analítico multidimensional original ao conjunto de instrumentos de governança da aviação, com potencial de superar análises setoriais fragmentadas. A segunda é o posicionamento do book-and-claim como instrumento de integração institucional — e não apenas como mecanismo de mercado —, articulando sua lógica operacional à literatura sobre policentrismo regulatório e fragmentação da governança climática (VAN ASSELT; ZELLI, 2014; PATTBERG et al., 2022; CADMAN, 2013). A terceira reside na análise das condições institucionais necessárias à efetividade do mecanismo, com ênfase nos requisitos de integridade ambiental, rastreabilidade e adicionalidade como variáveis determinantes de sua credibilidade e adoção em larga escala.

Quanto às implicações regulatórias, os resultados têm relevância direta para formuladores de políticas públicas, organismos regulatórios e atores do setor privado envolvidos na governança da descarbonização da aviação. No plano multilateral, os achados reforçam a necessidade de revisão e fortalecimento do CORSIA, com ampliação de sua ambição, melhoria dos critérios de elegibilidade para unidades de compensação e integração formal do book-and-claim como instrumento complementar de mercado. No plano regional, indicam a importância de mecanismos de reconhecimento mútuo entre a ReFuelEU Aviation e outros marcos regulatórios nacionais e multilaterais, de modo a evitar a duplicação de exigências e reduzir os custos de conformidade para produtores e compradores de SAF. No plano nacional, especialmente para economias emergentes, os resultados sugerem que a adoção do book-and-claim pode representar oportunidade estratégica para inserção competitiva em mercados internacionais de combustíveis sustentáveis, desde que acompanhada do desenvolvimento de marcos regulatórios domésticos que assegurem rastreabilidade, adicionalidade e reconhecimento internacional dos atributos ambientais certificados (IEA, 2023; PANG; CHEN, 2023).

Por fim, as limitações metodológicas do presente estudo, em particular a ausência de modelagem quantitativa e o escopo não sistemático da revisão bibliográfica, apontam para uma agenda de pesquisa relevante. Estudos futuros poderão avançar na mensuração dos impactos econômicos e ambientais do book-and-claim em diferentes contextos geográficos e institucionais, por meio de modelagem econométrica ou de simulações de equilíbrio geral. Investigações adicionais sobre os arranjos de certificação mais adequados para garantir a integridade ambiental do mecanismo — incluindo análises comparativas entre esquemas como ISCC, RSB e outros — também constituem lacuna relevante na literatura. Por fim, pesquisas voltadas à análise das condições políticas e institucionais que favorecem a adoção do book-and-claim em economias emergentes, com atenção às assimetrias de capacidade

regulatória e às dinâmicas de transferência de tecnologia, representam contribuição potencialmente relevante tanto para o debate acadêmico quanto para a formulação de políticas públicas orientadas à transição energética em setores *hard-to-abate*.

6 Referências

Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fischedick, M., Lechtenböhmer, S., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Stiebert, S., Waisman, H., Sartor, O., & Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, *187*, 960–973. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107

Cadman, T. (2013). Quality and legitimacy of global governance: Case lessons from forestry. *Global Environmental Politics*, *13*(3), 1–4. https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00181

Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., Benson, S. M., Bradley, T., Brouwer, J., Chiang, Y. M., Clack, C. T. M., Cohen, A., Doig, S., Edmonds, J., Fennell, P., Field, C. B., Hannegan, B., Hodge, B. K., Hoffert, M. I., … Caldeira, K. (2018). Net-zero emissions energy systems. *Science*, *360*(6396), eaas9793. https://doi.org/10.1126/science.aas9793

European Union Aviation Safety Agency. (2024). *ReFuelEU Aviation — Sustainable aviation fuels*. https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/refueleu-aviation

European Commission. (2023). *Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation)*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405

Fageda, X., & Teixidó, J. J. (2022). Pricing carbon in the aviation sector: Evidence from the European emissions trading system. *Journal of Environmental Economics and Management*, *111*, 102591. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102591

International Civil Aviation Organization. (2022). *Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA): CORSIA eligible emissions units*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx

International Energy Agency. (2023). *Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach*. https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15c-goal-in-reach

International Renewable Energy Agency. (2023). *Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers*. https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Bioenergy-for-the-Energy-Transition

Jörgens, H., Kolleck, N., Saerbeck, B., & Silva-Garbade, M. (2025). The fragmentation of global climate governance: Causes, consequences and coping strategies. *Global Environmental Politics*, *25*(1), 1–22. https://doi.org/10.1162/glep_a_00733

Pang, R., & Chen, W. (2023). Sustainable aviation fuel policy and carbon market interaction: Implications for aviation decarbonization. *Energy Policy*, *174*, 113432. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113432

Pattberg, P., Widerberg, O., Ituarte-Lima, C., & Sanderink, L. (2022). Mapping the institutional architecture of global sustainability governance. *Earth System Governance*, *14*, 100160. https://doi.org/10.1016/j.esg.2022.100160

Robiou du Pont, Y., & Meinshausen, M. (2018). Warming assessment of the bottom-up Paris Agreement emissions pledges. *Nature Communications*, *9*(1), 4810. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07223-9

Roundtable on Sustainable Biomaterials. (2022). *RSB book and claim standard for sustainable aviation fuel*. https://rsb.org/rsb-book-and-claim/

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement

Van Asselt, H., & Zelli, F. (2014). Connect the dots: Managing the fragmentation of global climate governance. *Environmental Economics and Policy Studies*, *16*(2), 137–155. https://doi.org/10.1007/s10018-013-0060-3