

SkyLedger: *Testbed* para o Gerenciamento do Espaço Aéreo para Sistemas de Transportes Inteligentes

Andre Elias Melo¹, Rafael Hickmann Albarello¹, Rodrigo Sergio dos Santos Nunes¹,
Reinaldo Cezar de Moraes Gomes², Cesar Marcondes e Lourenço Alves Pereira Junior¹

¹Divisão de Ciência da Computação – ITA – São Jose dos Campos, SP – Brazil

²Rede Nacional de Pesquisas – RNP – Rio de Janeiro, RJ – Brazil

{andre.melo, albarello, rodrigosergio}@ita.br
reinaldo.gomes@rnp.br, {cmarcondes, ljr}@ita.br

Abstract. *The versatility of drones, combined with their low infrastructure requirements for operation, has driven expectations of a sharp increase in airspace demand. In this context, the evolution of air traffic management models becomes essential to support this growing demand while ensuring safety, efficiency, and scalability for Advanced Air Mobility (AAM). This work presents requirements, challenges, and opportunities for a testbed based on permissioned Distributed Ledger Technologies (DLT) to enable data interoperability in AAM environments in compliance with Brazilian regulatory frameworks.*

Resumo. *A versatilidade dos drones, aliada à sua baixa necessidade de infraestrutura para operação, tem impulsionado a expectativa de uma demanda exponencial o espaço aéreo. Diante desse cenário, torna-se essencial a evolução de modelos de gerenciamento do tráfego aéreo para suportar a crescente demanda, mantendo a segurança, eficiência e escalabilidade para a Mobilidade Aérea Avançada (AAM). Este trabalho apresenta requisitos, desafios e oportunidades para a estruturação de um testbed baseado em tecnologias de Ledger Distribuído (DLT) permissionado para interoperabilidade de dados em ambiente AAM em compliance com o normativo brasileiro de aeronáutica.*

1. Introdução

A crescente demanda por acesso ao espaço aéreo exige a evolução dos frameworks de interoperabilidade de dados e segurança da informação. A descentralização dos serviços impulsiona a adoção dos *Unmanned Aircraft System Service Suppliers* (USSs) [Federal Aviation Administration 2018], responsáveis por operações essenciais como gestão de separação, roteamento dinâmico e identificação remota [Federal Aviation Administration 2018]. No entanto, a arquitetura tradicional baseada em bancos de dados distribuídos apresenta limitações em segurança e confiabilidade [Freeman et al. 2023], restringindo benefícios como imutabilidade, rastreabilidade e resiliência no compartilhamento de informações [Freeman et al. 2023].

Estudos do U-space europeu [Rakotonarivo and Bronz 2024] e da NASA/FAA [Freeman et al. 2023] destacam o potencial do DLT na gestão do espaço aéreo. No entanto, sua adoção exige arquiteturas que conciliem desafios operacionais e regulatórios,

bem como a avaliação do seu desempenho computacional, considerando *overhead*, escalabilidade e segurança, para garantir sua viabilidade na gestão do tráfego aéreo.

Este trabalho descreve requisitos, desafios e oportunidades para o desenvolvimento do SkyLedger, uma *testbed* experimental para prototipagem e validação de arquiteturas DLT no AAM, em parceria com o Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC) e Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP). A infraestrutura modela organizações, políticas e canais de comunicação descentralizados e interoperáveis. Apresentamos um cenário preliminar que trata da implementação distribuída nacionalmente de um *testbed* via RNP, garantindo escalabilidade e conectividade para os experimentos. Os contratos inteligentes, desenvolvidos conforme a regulamentação brasileira e diretrizes do ICEA, asseguram conformidade operacional e regulatória. Além disso, uma arquitetura de benchmark e monitoramento de desempenho permitirá avaliar a viabilidade operacional e escalabilidade das soluções propostas.

O artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 discute os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta o modelo arquitetura do SkyLedger. Em seguida, a Seção 4 resultados preliminares e desafios. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Diversos estudos exploram a aplicação de DLT na aviação, abordando aspectos específicos, mas poucos investigam sua integração com sistemas *Unmanned Traffic Management* (UTM) [Rakotonarivo and Bronz 2024]. Considerando o levantamento realizado, foram identificadas pesquisas com foco principalmente em cibersegurança e aspectos tecnológicos, com menor atenção às questões regulatórias.

Rakotonarivo et al. (2024) [Rakotonarivo and Bronz 2024] apresentam uma arquitetura descentralizada para U-space, usando contratos inteligentes para autorização de voo, monitoramento de conformidade e identificação de rede. Na interoperabilidade de dados, Abdelbaky et al. [Abdelbaky et al.] propõem o *Data & Reasoning Fabric* (DRF) para decisões em tempo real, enquanto Zhao et al. [Zhao et al. 2023] sugerem uma *blockchain* consorciada para proteção de dados de *Internet of Things* (IoT) na vigilância aérea. Para segurança em redes ATM, Wu et al. [Wu and Liu 2022] desenvolvem o *BlockTrust*, uma proposta de transmissão segura e compartilhamento confiável de dados aeronáuticos.

Na gestão UTM descentralizada, Hamissi et al. [Hamissi et al. 2023] mostram como uma *blockchain* pode mitigar vulnerabilidades, assegurando a identificação de drones e a integridade de planos de voo, enquanto Kosuda et al. [Kosuda et al. 2020] destacam seu impacto na segurança de dados e conformidade regulatória. Para proteção cibernética em Mobilidade Aérea Urbana (UAM), Freeman et al. [Freeman et al. 2023] implementam uma *blockchain* permissionada para mitigação de ataques *man-in-the-middle*, e Reisman et al. [Reisman 2019] propõem uma Infraestrutura de Chave Pública (PKI) baseada em *blockchain* para *Automatic Dependent Surveillance–Broadcast* (ADS-B), aprimorando a privacidade e a autenticação no gerenciamento do tráfego aéreo.

Nossa proposta se destaca dos demais trabalhos ao abordar de forma abrangente cinco *macro-features* para a aplicação da tecnologia DLT no setor aéreo: AAM,

Tabela 1. Comparação dos Trabalhos Relacionados à Aplicação de Blockchain na Aviação. (Atende Totalmente: ● / Não Atende: ○)

Trabalho	AAM	UTM	Segurança	Caso Real	Regulatório	Desempenho
Zhao et al. (2023)	○	●	●	○	○	○
Wu et al. (2021)	○	●	●	○	○	○
Hamissi et al. (2023)	○	●	●	○	○	○
Kosuda et al. (2020)	○	●	●	○	○	○
Freeman et al. (2023)	○	●	●	○	○	○
Reisman et al. (2019)	○	○	●	○	○	○
Rakotonarivo et al. (2024)	○	●	●	○	●	○
Abdelbaky et al. (2021)	○	●	●	○	○	○
SkyLedger	●	●	●	●	●	●

Segurança, Caso Real, Regulatório e Desempenho. A Tabela 1 apresenta as lacunas a serem exploradas para aumentar o nível de prontidão tecnológica no setor. Para além de um UTM que atende os requisitos de AAM, gestão de tráfego mais avançada deve ser incorporada às soluções. De acordo com nosso levantamento, faltam investigações científicas que avaliem casos reais de aplicação, com modelagem operacional e desafios práticos de implementação. Mais ainda, são pouco exploradas i) a aderência a normas regulatórias, como os protocolos ASTM F3548 e F3411, e ii) a realização de *benchmarks* para avaliações de desempenho quantitativas.

3. Arquitetura do *SkyLedger*

Nesta Seção descrevemos uma implementação inicial que serve como experiência preliminar para suporte ao desenvolvimento do *SkyLedger*. Para testes de distribuição da rede blockchain, utilizamos a *infraestrutura* da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) por meio do Projeto ILÍADA [ILÍADA], que possibilita a experimentação de redes DLT. O *testbed* piloto da RNP foi utilizado para a criação de diferentes configurações de redes *Hyperledger Fabric* (HLF), permitindo a instanciamento de nós, configuração de políticas e algoritmos de consenso, instalação de contratos inteligentes (*Chaincodes*) e criação de canais privados de comunicação.

3.1. Implementação do *Hyperledger Fabric*

O HLF é uma DLT permissionada cuja arquitetura modular é composta por organizações, que representam as entidades participantes da rede, cada uma desempenhando um papel específico dentro do ecossistema (Figura 1). As organizações possuem *Peers*, que executam e validam transações; *Orderers*, responsáveis pela propagação e ordenação das transações por meio de mecanismos de consenso; e Autoridades Certificadoras (CAs), que garantem a autenticação dos participantes.

O HLF permite a criação de Canais (*Channels*), segmentos isolados dentro da *blockchain* que possibilitam o compartilhamento seletivo de informações, assegurando que apenas participantes autorizados acessem dados críticos, como restrições dinâmicas tais como: espaço aéreo e planos de voo. Essa estrutura habilita a implementação de contratos inteligentes para automação de processos regulatórios, integração segura entre provedores UTM e interoperabilidade com sistemas ATM, o que possibilita a implementação de conformidade com padrões como ASTM F3548 e F3411.

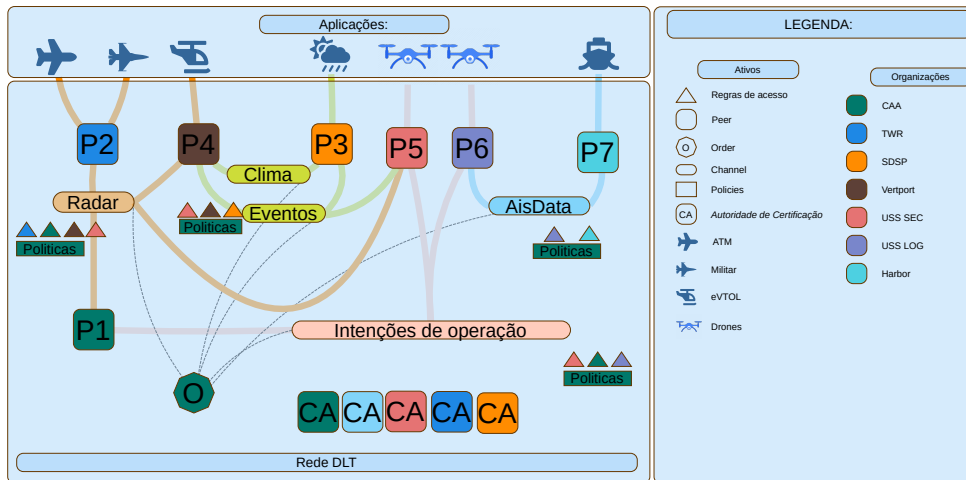


Figura 1. Cenário de Teste Proposto para Implantação do SkyLedger.

Os *Chaincodes* desenvolvidos foram baseados na norma ASTM F3548, garantindo compatibilidade. Foi criada uma assinatura de função baseada no InterUSS [The Linux Foundation 2024], a plataforma *opensource* de troca de informações entre provedores UTM, utilizada no gerenciamento dinâmico do espaço aéreo para drones.

3.2. Integração com Sistemas UTM e ATM

Para possibilitar uma gestão integrada do espaço aéreo, desenvolvemos uma integração baseada na norma ASTM F3411, permitindo a fusão de dados entre sistemas UTM e ATM (Figura 1). O TARIS, sistema de visualização radar do ICEA, foi adaptado para exibir, em um ambiente único, tanto os dados convencionais de vigilância aeronáutica (ADS-B e radares secundários) quanto os dados da *testbed* UTM. Isso possibilita a criação de uma visão situacional unificada para a coordenação entre operações tripuladas e não tripuladas.

3.2.1. Cenário de Testes: Desafio de Mobilidade Aérea Urbana

Para validar o desempenho das arquiteturas sobre a *testbed* e padronizar os experimentos, foi desenvolvida a descrição de exercício operacional na região da Baía de Guanabara, simulando um cenário realista de UAM. O ambiente inclui entidades essenciais para a gestão do espaço aéreo, cada uma com papéis bem definidos: a Autoridade de Aviação Civil, responsável por definir e publicar restrições dinâmicas ou definitivas; as torres de controle dos aeroportos Santos Dumont e Galeão, que gerenciam operações em áreas controladas; e o Porto do Rio de Janeiro, que fornece dados *Automatic Identification System* (AIS) das embarcações para coordenação com as operações aéreas (Figura 1).

Além disso, três provedores de serviço UTM foram considerados: um especializado em *delivery* entre Rio e Niterói, outro voltado para segurança privada, e um terceiro focado em logística portuária, gerenciando drones que prestam serviços a embarcações em aproximação ao porto. Para avaliar a integração entre modais, foi

definida uma rota de UAM para eVTOLs entre o Aeroporto Santos Dumont e a Barra da Tijuca, explorando desafios como coordenação entre vertiportos, compartilhamento de informações e gestão de tráfego aéreo misto. Os vertiportos, considerados entidades independentes, requerem protocolos específicos de integração com os sistemas ATM/UTM para garantir segurança e eficiência operacional.

3.3. Benchmark

Uma preocupação essencial diz respeito ao desempenho do sistema como um todo, e para avaliar o desempenho da solução proposta, implementamos uma infraestrutura distribuída de *benchmark* utilizamos o *Hyperledger Caliper* para medir *latência*, *throughput* e tempo de processamento, simulando cargas de trabalho realistas baseadas na Baía de Guanabara e utilizamos as estimativas de demanda de Doole [Doole et al. 2018] para as simulações.

4. Resultados preliminares: discussões, desafios e oportunidades

A *testbed* com HLF e *Caliper* no contexto de AAM, demonstrou, preliminarmente, uma série de vantagens estruturais ao permitir a definição clara de papéis, políticas e requisitos para a entrada de novas organizações na rede. A utilização de CAs garante que apenas participantes autorizados acessem a rede, utilizando mecanismos de criptografia para assegurar a identidade do emissor e a autenticidade das transações. Além disso, os contratos inteligentes podem reduzir significativamente os custos operacionais em processos de certificação de funções críticas, que são tradicionalmente onerosos na aviação, uma vez que, estes são compartilhados e assinados pela autoridade aeronáutica.

Outro ponto relevante é a simplicidade na implementação de redundância utilizando redes permissionadas como o HLF, pois a replicação de dados é distribuída entre os nós da rede, garantindo maior resiliência a falhas e ataques cibernéticos. A imutabilidade dos dados é outro diferencial essencial, assegurando que os registros de tráfego e operações não possam ser alterados, o que melhora a transparência e a rastreabilidade das informações compartilhadas.

O cenário da Baía de Guanabara foi escolhido para os testes por representar um ambiente altamente desafiador para a mobilidade aérea urbana. A região é densamente povoada, com apenas uma ponte ligando o Rio de Janeiro a Niterói, o que aumenta a necessidade de soluções de transporte alternativo, como UAM e UTM. A inclusão dos dados AIS para monitoramento de embarcações adiciona complexidade ao gerenciamento do tráfego, especialmente devido à presença de organizações militares e desafios geográficos, que exigem coordenação avançada entre múltiplos stakeholders.

O *testbed* desenvolvido neste estudo representa um primeiro passo para o amadurecimento da tecnologia, permitindo desenvolvimento e testes de novas soluções, como contratos inteligentes mais eficientes, algoritmos de consenso alternativos e novos mecanismos de interoperabilidade. Além do *benchmark* inicial, a infraestrutura poderá ser utilizada para criação de métricas operacionais, possibilitando o monitoramento de *safety*, *security*, *efficiency* e outras *Key Performance Areas* (KPAs), fundamentais para a regulamentação e adoção ampla da tecnologia no setor aeronáutico.

5. Conclusões

O *SkyLedger* demonstra a viabilidade do uso de *Hyperledger Fabric* (HLF) para garantir segurança, interoperabilidade e confiabilidade na gestão do espaço aéreo em

AAM/UTM. O *testbed* desenvolvido permite experimentação controlada, possibilitando o teste de contratos inteligentes, algoritmos de consenso e integração com sistemas ATM/UTM. O cenário da Baía de Guanabara ilustra um ambiente realista e desafiador, validando a aplicabilidade da abordagem. Por fim, destacamos que nossa proposta integra o desenvolvimento de soluções seguras e escaláveis para o setor aéreo brasileiro (DECEA/ICEA e SAC) com pesquisa (ITA e RNP), promovendo desafios e oportunidades para futuras colaborações e desenvolvimentos.

Agradecimentos

CAPES, FAPESP (#2020/09850-0, #2022/00741-0), CNPq, RNP/ILÍADA e Divisão de Pesquisas do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA/FAB).

Referências

- Abdelbaky, M., Chen, J., Fedin, A., Freeman, K., Gurram, M., Ishihara, A. K., Joe-Wong, C., Knight, C., Krishnakumar, K., Reyes, I., Robinson, C., Shannon, P., Shetye, S. D., Tomljenovic, L., and Dalsem, W. V. *DRF: A Software Architecture for a Data Marketplace to Support Advanced Air Mobility*.
- Doole, M., Ellerbroek, J., and Hoekstra, J. (2018). Drone delivery: Urban airspace traffic density estimation. In *8th SESAR Innovation Days, 2018*. SIDs2018: 8th SESAR Innovation Days, SIDs2018 ; Conference date: 03-12-2018 Through 07-12-2018.
- Federal Aviation Administration (2018). Concept of Operations (ConOps). Technical report, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Acessado em: 17 de Fevereiro de 2025.
- Freeman, K., Gillem, N., Jones, A., and Sharma, N. (2023). *A Blockchain Case Study for Urban Air Mobility Operational Intent*.
- Hamissi, A., Dhraief, A., and Sliman, L. (2023). On safety of decentralized unmanned aircraft system traffic management using blockchain. pages 1–6.
- ILÍADA. Projeto Ilíada - Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. <https://www.rnp.br/projetos/iliada/>. Acessado em: 17 de Fevereiro de 2025.
- Kosuda, M., Lipovsky, P., Yang, W., Bai, M., Novotnak, J., and Szöke, Z. (2020). Discussion on blockchain applications in unmanned aerial systems domain. In *2020 New Trends in Aviation Development (NTAD)*, pages 142–145.
- Rakotonarivo, B. and Bronz, M. (2024). U-spacechain: A decentralized approach to unmanned traffic management services provision.
- Reisman, R. (2019). Air traffic management blockchain infrastructure for security, authentication, and privacy.
- The Linux Foundation (2024). The InterUSS Platform Fund Charter. <https://interussplatform.org/>. Acessado em: 7 de Abril de 2025.
- Wu, Z. and Liu, J. (2022). Blockchain-based trusted avionics authentication for secure ground-to-air communication. pages 1–9.
- Zhao, E., Bai, J., Shen, Y., Jia, Y., Zhang, X., and Kang, R. (2023). A blockchain method to iot sensors for data security in aviation surveillance. pages 7–12.