

Benchmarking de Performance de Sistemas Distribuídos Aplicados à Mobilidade Aérea Urbana

Rodrigo Sergio dos Santos Nunes¹, Andre Elias Melo¹, Rafael Hickmann Albarello¹, Reinaldo Cesar 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

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

Abstract. *Urban Air Mobility (UAM) aims to revolutionize metropolitan transportation by enabling low-altitude air traffic networks that provide flexible and rapid aerial services through the use of drones and eVTOLs. However, integrating these new airspace users into already saturated urban airspace, often constrained by both commercial aviation and dynamic ground-level obstacles, presents substantial challenges. To ensure safety and maintain operational standards, there is an increasing need for well-structured frameworks that support airspace planning and system interoperability. Emerging operational concepts propose a distributed architecture in which multiple service providers manage access and share information about airspace constraints and conditions. However, deploying distributed systems in safety-critical contexts introduces various overheads, particularly in terms of system performance. Based on future projections of airspace access demand, our findings indicate that current state-of-the-art solutions may not meet the scalability requirements of future UAM systems.*

Resumo. *A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) busca transformar o transporte metropolitano ao viabilizar redes de tráfego aéreo em baixa altitude, oferecendo serviços aéreos rápidos e flexíveis por meio de drones e veículos elétricos de decolagem e pouso vertical (eVTOLs). No entanto, a integração desses novos usuários em um espaço aéreo urbano já saturado — impactado pelas demandas da aviação comercial e por obstáculos dinâmicos ao nível do solo — impõe desafios significativos. Para garantir a segurança (safety) e manter os padrões operacionais, cresce a necessidade de estruturas bem definidas que apoiam o planejamento do espaço aéreo e a interoperabilidade entre sistemas. Os conceitos operacionais emergentes propõem uma arquitetura distribuída, na qual múltiplos provedores de serviços de navegação aérea gerenciam o acesso e compartilham informações sobre restrições e condições do espaço aéreo. Contudo, a adoção de sistemas distribuídos em contextos de missão crítica exige a análise de diversos overheads, especialmente os relacionados ao desempenho. Com base em estimativas de crescimento da demanda por acesso ao espaço aéreo, concluímos que as soluções atualmente disponíveis ainda são insuficientes para atender aos requisitos de escalabilidade esperados para os futuros sistemas de mobilidade aérea urbana.*

1. Introdução

A crescente urbanização e os desafios enfrentados pelos sistemas tradicionais de transporte terrestre impulsionaram o desenvolvimento de novos conceitos de mobilidade, entre os quais se destaca a Mobilidade Aérea Urbana (UAM, do inglês *Urban Air Mobility*)[Federal Aviation Administration 2018]. Essa abordagem visa a utilização do espaço aéreo em baixa altitude para prover serviços aéreos rápidos, flexíveis e sustentáveis por meio de aeronaves leves, como drones e veículos elétricos de decolagem e pouso vertical (eVTOLs)[UBER 2019, EMBRAER 2019]. Portanto, há investimentos e interesse em reduzir o tempo de deslocamento, minimizar congestionamentos e oferecer alternativas logísticas mais eficientes tem despertado o interesse de governos, empresas e instituições para especificação de padrões (6G/3gpp)[BRASIL 2025, 3GPP 2025].

Contudo, a implementação em larga escala da UAM envolve desafios complexos, especialmente no que diz respeito à gestão do espaço aéreo urbano[Verri et al. 2020], que já é intensamente utilizado pela aviação convencional e sujeito a interferências advindas de obstáculos dinâmicos no solo [Rakotonarivo and Bronz 2024]. Nesse contexto, surgem propostas de arquitetura operacional descentralizada[Faiçal et al. 2023], nas quais múltiplos provedores de serviços de navegação aérea (USS - *UAS Service Supplier*) são responsáveis por coordenar, em tempo real, o acesso ao espaço aéreo e o compartilhamento de informações críticas. A Figura 1 ilustra este ambiente. Essas novas arquiteturas distribuídas operam em ambiente de dados altamente heterogêneo e dinâmico, exigindo integração e interoperabilidade entre diferentes domínios operacionais [Rakotonarivo and Bronz 2024]. De um lado, encontra-se a aviação tradicional, composta pelas operações militares (OPM), helicópteros e a estrutura de gerenciamento de tráfego aéreo convencional (ATM). Neste domínio, os dados disponíveis incluem informações de vigilância como ADS-B e radar, planos de voo, e restrições aeronáuticas previamente estabelecidas, como zonas proibidas e áreas restritas.

Na segunda camada de conectividade, concentram-se os novos modais que exploram o espaço aéreo inferior, incluindo operações de drones voltadas à vigilância, mapeamento, inteligência, entregas logísticas, transporte de passageiros com eVTOLs e missões de primeira resposta, como policiamento e busca e salvamento (SAR)[dos Santos de Souza et al. 2025]. Nessa camada, predominam tecnologias específicas, como o Remote ID (ASTM F3411)[ASTM International 2022] e o serviço de descoberta e troca de informações distribuídas (DSS - *Discovery and Synchronization Service*) conforme definido pelos padrões ASTM [ASTM International 2021]. Adicionalmente, há um terceiro conjunto de informações complementares essenciais para a operação segura desses sistemas, como dados meteorológicos — tanto previsões quanto observações em tempo real — e obstáculos físicos ou dinâmicos, como grandes obras urbanas, embarcações ou aglomerações humanas. Por razões de segurança, regulamentos vigentes frequentemente proíbem o sobrevoo dessas áreas, o que impõe restrições operacionais adicionais às aeronaves não tripuladas.

Por fim, para garantir a segurança das operações, a auditabilidade dos sistemas e a otimização do uso do espaço aéreo, é imprescindível que autoridades aeronáuticas e centros de investigação de acidentes tenham acesso confiável e contínuo a esse ecossistema de dados. Tal capacidade é fundamental para que possam exercer suas funções regulatórias, de supervisão e de resposta a incidentes de maneira eficaz em

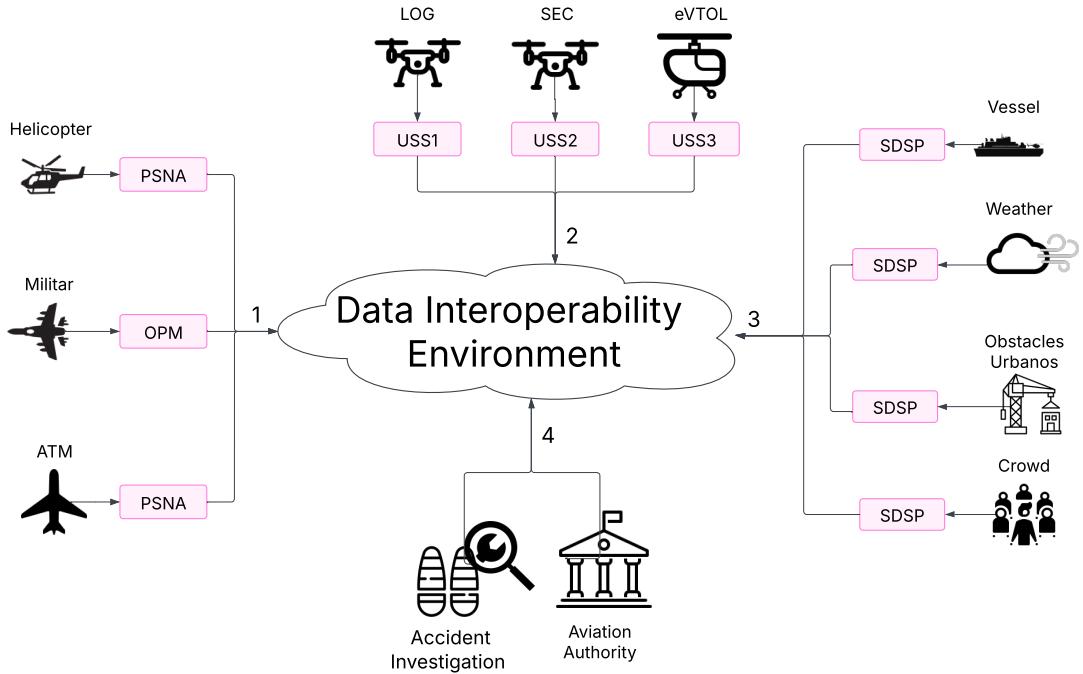


Figura 1. Ambiente de interoperabilidade de dados para operações UAM

um ambiente cada vez mais complexo e descentralizado. Nesse contexto, estudos da NASA/FAA [Freeman et al. 2023] e do U-space europeu [Rakotonarivo and Bronz 2024] destacam o potencial das *Distributed Ledger Technologies* (DLTs) na gestão do espaço aéreo; no entanto, sua adoção exige arquiteturas que conciliem desafios operacionais e regulatórios. Mais ainda, é importante avaliar seu desempenho computacional, considerando *overhead*, escalabilidade e segurança para garantir sua viabilidade na gestão do tráfego aéreo.

Este trabalho contribui para esse cenário ao realizar uma análise de desempenho da solução InterUSS [Foundation 2024], uma infraestrutura de referência utilizada em testes operacionais de gerenciamento de tráfego para aeronaves não tripuladas, baseada na arquitetura *Discovery and Synchronization Service* (DSS), definida pelo padrão ASTM F3548-21. Como baseline consideramos a implementação do InterUSS¹, e avaliamos nossa proposta, funcionalmente equivalente à InterUSS, mas implementada sobre a tecnologia de *blockchain* permissionada Hyperledger Fabric. Ambas as abordagens foram analisadas com base na funcionalidade de reserva de espaço aéreo para navegação, permitindo uma comparação direta quanto a métricas de desempenho como latência, taxa de transações por segundo (TPS), resiliência, e confiabilidade.

Além disso, utilizando previsão de demanda de [Doole et al. 2018] — voltada para a simulação e modelagem de cenários urbanos de mobilidade aérea — caracterizamos a demanda por acesso ao espaço aéreo ao longo do tempo em uma zona urbana hipotética. A partir dessa modelagem, foi possível avaliar a escalabilidade e a adequação das arquiteturas analisadas frente ao crescimento projetado da atividade

¹<https://github.com/interuss/dss>

aérea em ambientes urbanos densos. Os resultados obtidos indicam que, embora a arquitetura atual baseada em InterUSS atenda a requisitos operacionais em cenários de baixa densidade, há limitações importantes frente à projeção de aumento da demanda. Isso reforça a necessidade de soluções mais robustas, auditáveis e distribuídas para sustentar o futuro da Mobilidade Aérea Urbana.

O artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 discute os trabalhos relacionados. A Seção 4 apresenta o modelo arquitetura do benchmarking. Em seguida, a Seção 5 resultados preliminares e desafios. Por fim, a Seção 6 conclui o trabalho.

2. Modelo do sistema

A crescente complexidade das operações de Mobilidade Aérea Urbana (UAM) tem motivado diversas iniciativas voltadas para segurança (*safety*), escalabilidade e integridade da informação no Gerenciamento de Tráfego Não Tripulado (UTM) [Dehez-Clementi et al. 2019]. Neste contexto, a plataforma InterUSS é reconhecida como referência para testes operacionais e foi objeto de estudos voltados à sua viabilidade em ambientes operacionais [Foundation 2024]. Arquitetura InterUSS, baseada no DSS conforme definido pelo padrão ASTM F3411 e F3548, é um componente da arquitetura de gerenciamento de tráfego de drones proposta pela FAA [Federal Aviation Administration 2018] e padronizada pela ASTM (especificação ASTM F3411). Ele atua como uma camada intermediária de interoperabilidade, permitindo que diferentes provedores de serviço UTM (USS - UAS Service Suppliers) possam: Descobrir entre si informações operacionais, como planos de voo e áreas reservadas; Compartilhar estados de voo e restrições temporárias no espaço aéreo; e Sincronizar informações críticas para prevenir conflitos, mesmo quando operando sob diferentes provedores.

O DSS não gerencia o tráfego diretamente, ele apenas sincroniza dados críticos entre os diferentes participantes do ecossistema de forma distribuída e segura. A implementação de referência do DSS, e a plataforma **InterUSS** mantida como código aberto sob a Linux Foundation e projetado para promover a interoperabilidade entre diferentes USS em testes e ambientes reais. A plataforma está em conformidade com os regulamentos da aviação [Foundation 2024] e implementa os principais endpoints RESTful para os viabilizar: Registro de voos, áreas ou notificações; Consulta de informações de outros provedores; Recebimento de atualizações em tempo real (via notificações assíncronas ou polling); e Interação segura, auditável e escalável.

O processo de registro de voo por exemplo é ilustrado no diagrama apresentado na Figura 2, e corresponde a uma simplificação do processo pelo qual um UAS Service Supplier (USS) obtém autorização para realizar operações aéreas utilizando uma Operational Intent Reference (OIR) por meio do DSS.

Inicialmente, o USS autentica-se junto ao serviço de autorização (AUTH) para obter um token JWT específico para acesso ao serviço central (core-service). Após essa autenticação, o USS envia ao DSS uma consulta sobre possíveis restrições (constraints) no espaço aéreo. O DSS então fornece ao USS referências dessas restrições, indicando quem são os Constraint Providers responsáveis pelas mesmas. Com isso, o USS obtém novo token de autenticação direcionado especificamente ao Constraint Provider indicado, recuperando os detalhes das restrições pertinentes à operação. Em seguida, o USS verifica junto ao DSS a existência prévia de OIRs que possam interferir ou se sobrepor à operação

Diagrama de Sequência OIR (com AUTENTICAÇÃO e Constraint Provider)

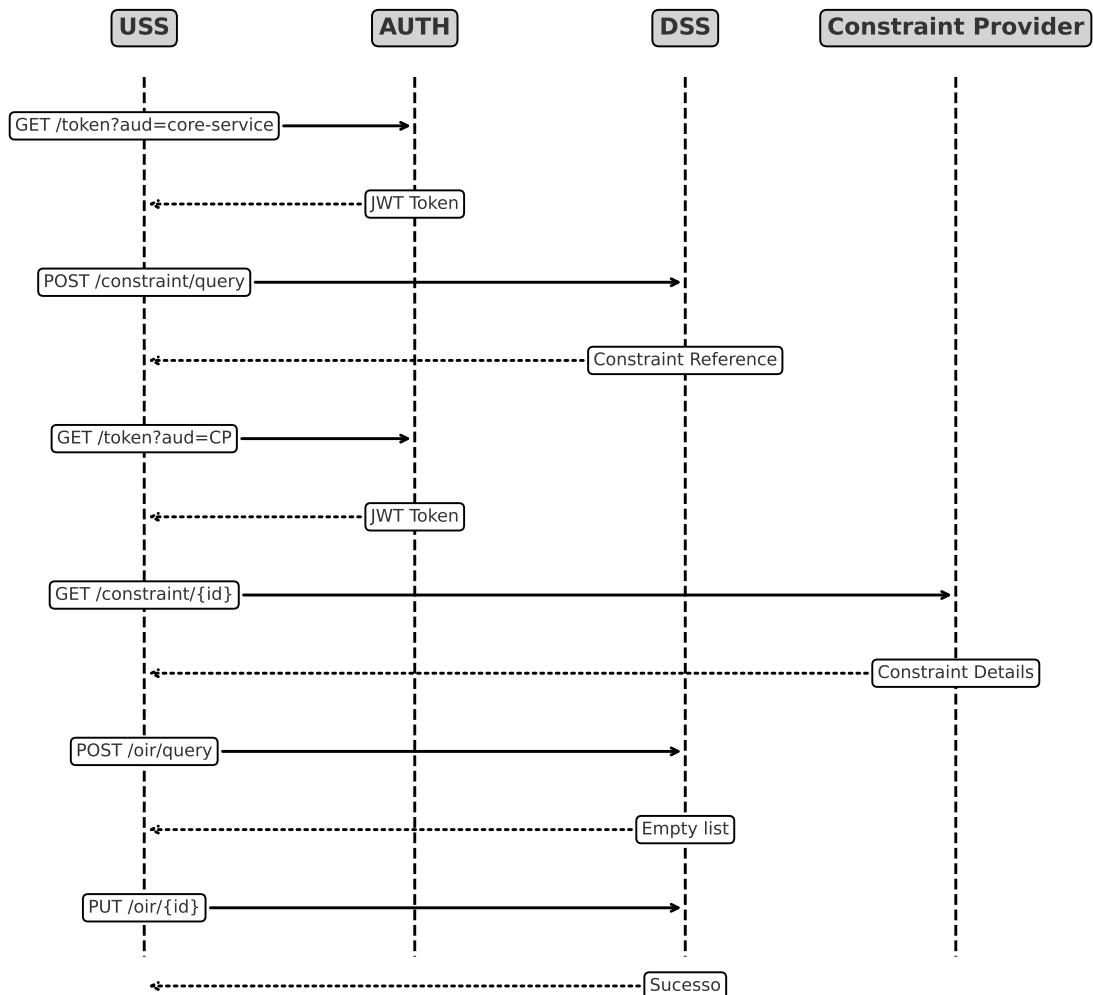


Figura 2. Cenário de implantação piloto para o SkyLedger [Melo et al. 2025].

planejada. Após essa verificação, caso não haja conflitos identificados (lista vazia), o USS registra a sua própria OIR por meio de uma requisição PUT ao DSS, que por fim retorna uma confirmação de sucesso. Este fluxo evidencia como as interações entre o USS, o DSS e os serviços de autenticação e de restrições garantem a segurança e coordenação eficiente no gerenciamento de operações aéreas não tripuladas.

A arquitetura do InterUSS é modular e distribuída, permitindo a implantação em ambientes de produção com múltiplos nós DSS.

Para atender aos requisitos de consistência, disponibilidade e tolerância a falhas, o InterUSS utiliza o **CockroachDB** como seu banco de dados principal. O CockroachDB é um banco de dados relacional distribuído, implementado para ser compatível com PostgreSQL, projetado para garantir propriedades ACID em ambientes distribuídos, além de permitir escalabilidade horizontal e replicação automática entre regiões.

3. Fundamentação teórica e trabalhos relacionados

Em termos de escalabilidade e modelagem da demanda, abordagens que empregam simulações urbanas têm ganhado destaque. Bharadwaj et al [Bharadwaj et al. 2021]. propuseram um modelo descentralizado de controle para vertihubs, utilizando simulações para observar comportamentos emergentes e gargalos operacionais em diferentes configurações urbanas, demonstrando como a densidade e a topologia do espaço aéreo impactam diretamente na capacidade do sistema.

A utilização de drones autônomos para entregas urbanas, visando solucionar problemas de congestionamento e custos relacionados ao último trecho das entregas (last-mile) [Doole et al. 2018]. É destacada a necessidade de estimar a densidade do tráfego aéreo urbano, fundamental para projetar adequadamente o espaço aéreo dedicado aos drones. O estudo apresenta um modelo detalhado para prever a demanda de entregas por drones e calcula a densidade esperada para diversas cidades, com foco em Paris como estudo de caso principal. Além disso, realiza uma comparação econômica entre entregas por drones e bicicletas elétricas para entrega de fast-food, demonstrando vantagens financeiras e operacionais significativas para o uso de drones em cenários futuros. O método empregado para prever a demanda futura de drones inclui: Estimativa do volume atual de encomendas domésticas utilizando dados do setor postal; Projeção da urbanização e porcentagem de encomendas com peso adequado (até 2.2kg); Aplicação de três cenários de crescimento (pessimista, realista e otimista) baseados nas taxas anuais compostas (CAGR) do crescimento global do setor; Cálculo específico para a cidade de Paris, ajustando a demanda proporcionalmente à sua população urbana.

O modelo prevê um crescimento significativo no número de entregas por drones, atingindo potencialmente centenas de milhares de operações por hora em 2050. Essas previsões destacam a importância crítica de uma infraestrutura aérea urbana adaptada e eficiente. Conforme projetado na Figura 3, há um aumento exponencial na demanda prevista para entregas por drones nas cidades ao longo dos anos analisados, especialmente no cenário otimista.

Com a perspectiva de crescimento das operações UAM, surgem propostas que exploram arquiteturas alternativas baseadas em *blockchain*. A NASA, por exemplo, avaliou o uso da plataforma permissionada Hyperledger Fabric como solução para garantir integridade e rastreabilidade de dados entre serviços UTM, como o DSS, preservando a intenção operacional de voos mesmo diante de ataques cibernéticos [Freeman et al. 2023]. Outro estudo complementa essa abordagem ao demonstrar a implementação de redes de canais privados com contratos inteligentes (chaincodes) para prover privacidade e segmentação de informações entre operadores e provedores de serviços UAM[Abdelbaky et al.].

Além disso, [Reisman 2019] propôs o uso do Hyperledger Fabric como alternativa mais apropriada às exigências de sistemas de tráfego aéreo, comparando suas vantagens em relação a *blockchain* públicas voltadas a aplicações financeiras. O autor destacou atributos como arquitetura modular, suporte a múltiplos protocolos de consenso e canais privados como diferenciais para cenários de vigilância aérea e troca segura de informações entre aeronaves e serviços terrestres.

Apesar desses trabalhos contribuírem para o entendimento da demanda pela

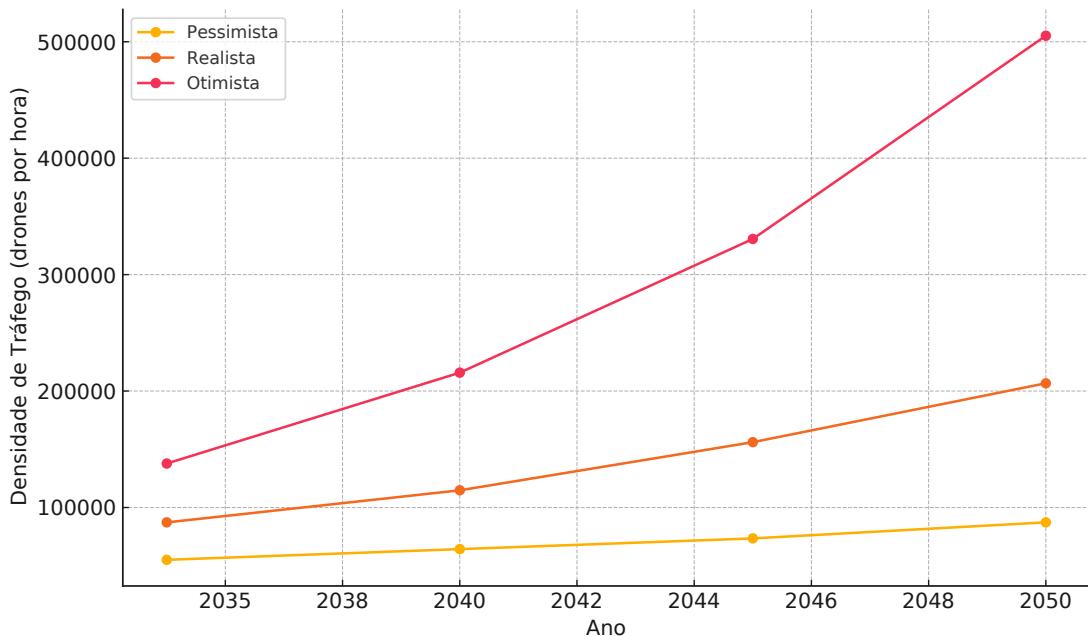


Figura 3. Previsão de demanda de drones (drones/hora) entre 2035 e 2050, para cenários pessimista, realista e otimista. Fonte: adaptado de Doole et al. (2018).

utilização do espaço aéreo urbano e reforçarem a importância de explorar soluções distribuídas e auditáveis como alternativas viáveis para sustentar o crescimento previsto das operações UAM, ainda há uma lacuna no sentido de trazer elementos mais realistas. O presente trabalho avança nessa direção ao comparar diretamente o desempenho da arquitetura InterUSS com uma implementação baseada em Hyperledger Fabric. Destacamos que a comparação é avaliada a partir da análise e modelagem da demanda aérea urbana frente a cenários futuros de alta densidade operacional.

4. Metodologia

Este estudo utiliza uma abordagem comparativa para avaliar o desempenho de plataformas distribuídas aplicadas ao gerenciamento do tráfego aéreo urbano não tripulado (UTM). Especificamente, foram analisadas as plataformas InterUSS e Hyperledger Fabric (HLF), focando na operação crítica de criação de intenção operacional (*Create Operational Intent*).

Plataforma InterUSS. A plataforma InterUSS consiste em uma solução aberta de referência baseada no padrão ASTM para gestão de serviços UTM. Para os testes realizados, configuramos um ambiente simulado representativo de cenários operacionais realistas. Nessa configuração, executamos repetidamente a operação *Create Operational Intent*, registrando métricas de desempenho, como latência e taxa de transação por segundo (*throughput*), para compreender o comportamento da plataforma sob diferentes condições de carga.

Plataforma Hyperledger Fabric. O Hyperledger Fabric²(HLF) constrói uma infraestrutura blockchain permissionada, focada em segurança, privacidade e escalabilidade. Implementamos nela um contrato inteligente (*chaincode*) específico que reproduz exatamente a operação *Create Operational Intent* no padrão ASTM, garantindo equivalência funcional com a plataforma InterUSS e permitindo comparações diretas entre ambas as plataformas.

Para garantir que o custo computacional dos cálculos geográficos fossem similares em ambas plataformas e não interferisse na comparação entre elas, o chaincode foi implementado utilizando a mesma biblioteca utilizada no InterUSS para detectar se há intersecção entre os polígonos. O cálculo utiliza geohashes para determinar conflito, intersecções e para indexação. Isso foi possível pois tanto o *chaincode* quanto o InterUSS estão implementados na mesma linguagem de programação.

Gerador de carga de trabalho: Hyperledger Caliper. Para garantir precisão e objetividade na avaliação quantitativa, utilizamos a ferramenta Hyperledger Caliper³. Esta solução *open-source* foi escolhida por permitir benchmarks em redes blockchain, oferecendo métricas detalhadas como latência, *throughput*, consumo de recursos computacionais e taxas de sucesso das transações. A ferramenta também foi escolhida por possuir modularidade nos conectores, permitindo testar diversas plataformas blockchains a figura 4 ilustra o ambiente criado com a ferramenta.

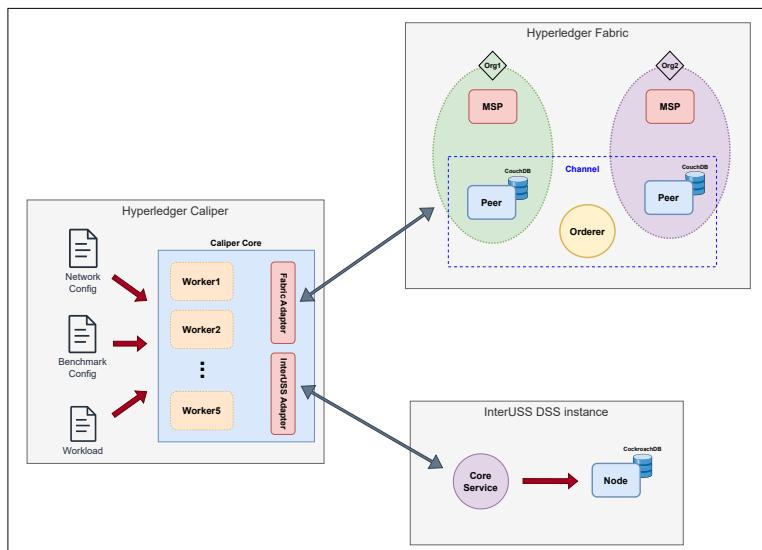


Figura 4. Arquitetura Geral do Ambiente de Experimentação

Além disso, implementamos um conector customizado que permite que o Caliper execute testes sobre a plataforma InterUSS, da mesma maneira que é realizado com o Hyperledger Fabric, expandindo sua capacidade original e possibilitando uma comparação direta entre as plataformas. Esse conector realiza chamadas HTTP REST equivalentes às invocações do chaincode como pode ser observado na figura 4.

²<https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/>

³<https://hyperledger-caliper.github.io/caliper>

4.1. Planejamento de Experimentos

Definimos um protocolo experimental estruturado, envolvendo a execução dos testes em ambas as plataformas com variações no volume total de transações e na taxa de disparo dessas transações. Foram variados os seguintes Fatores:

- Volumes testados: 50, 500 e 5000 transações totais.
- Taxas de envio (TPS): 5, 10, 15 e 20 transações por segundo.

Cada cenário específico foi replicado cinco vezes para aumentar confiabilidade estatística e reduzir efeitos causados por variações momentâneas no desempenho. Os resultados apresentados correspondem à média das métricas coletadas.

O ambiente de testes com o Hyperledger Caliper foi detalhadamente configurado, envolvendo clientes responsáveis pela execução controlada das transações contra os sistemas avaliados. Especificações detalhadas sobre o hardware e a infraestrutura de rede utilizada foram documentadas, visando clareza e reprodução futura.

4.1.1. Ambiente dos Sistemas Avaliados

As configurações dos ambientes de teste (*System Under Test* - SUT) seguem as recomendações de implantação operacional das plataformas InterUSS e Hyperledger Fabric, os detalhes sobre hardware (processadores, RAM, discos rígidos) e configurações específicas utilizadas neste estudo são:

- Processador: 4 x Intel Xeon E5-2620 @ 2.00 GHz
- Memória: 2 x 16 GB DDR3 @ 1600 MT/s
- Disco: Virtual 80 GiB HD @ 5400rpm

Para garantir a isonomia dos testes, o ambiente experimental foi refeito a cada teste. Para o ambiente do InterUSS, a configuração do ambiente escolhida foi a *Standalone Instance*⁴, que utiliza a plataforma docker para instanciar um container de aplicação, e um container do banco de dados *CockroachDB*. Já para o ambiente HLF, foi utilizada a "*test network*"⁵ utilizando como banco de dados o *CouchDB*. A *test network* consiste em três organizações, com um *peer* cada, e um *orderer*. Nos testes, apenas um *peer* foi utilizado como *gateway*. Em ambos os cenários, a autenticação não foi considerada nos tempos de resposta e taxa de sucesso

4.2. Coleta e Análise dos Dados

Durante cada execução, foram coletadas métricas, incluindo tempo médio de resposta, latência média e máxima, taxa de sucesso das operações. Realizamos análises estatísticas utilizando o software R para identificar tendências e possíveis limitações operacionais de cada plataforma, garantindo uma comparação fundamentada das tecnologias estudadas no melhor de nossas capacidades.

⁴https://github.com/interuss/dss/blob/master/build/dev/standalone_instance.md

⁵<https://github.com/hyperledger/fabric-samples/tree/main/test-network>

5. Resultados

5.1. InterUSS

Nesta seção, apresentamos uma análise detalhada dos resultados obtidos nos testes realizados com a plataforma InterUSS, considerando tanto a taxa de transações por segundo (TPS) quanto o volume total de *Operational Intent References* (OIRs) geradas durante os testes. Destaca-se que um caso é considerado sucesso quando a operação de criação de uma OIR é concluída corretamente, enquanto as falhas são exclusivamente atribuídas a eventos de timeout, indicando que a plataforma não respondeu dentro do tempo máximo estabelecido.

Os resultados evidenciaram um comportamento dependente tanto do TPS quanto do volume total de operações. Para volumes menores de operações (50 OIRs), a plataforma apresentou uma taxa de sucesso perfeita (100%) mesmo sob cargas mais elevadas (20 TPS), com latências médias inferiores a 0,5 segundos. Como pode ser percebido no gráfico de latência da Figura 5.

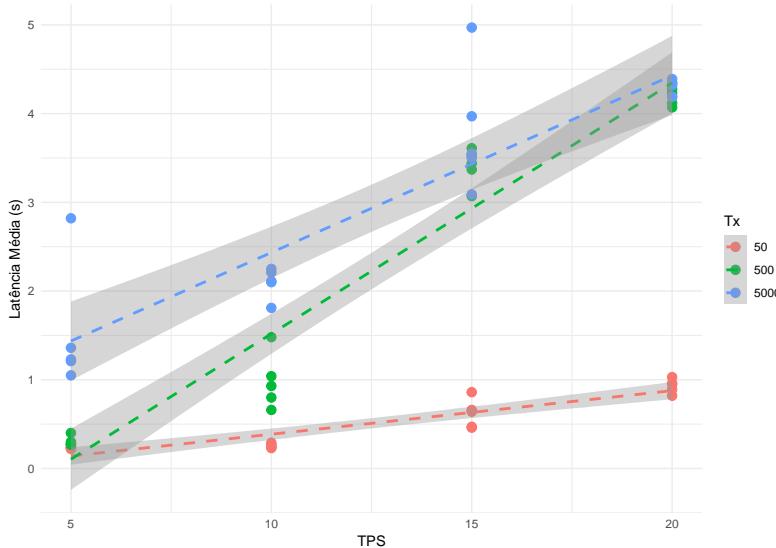


Figura 5. Latência Média por TPS com Tendências (Create OplIntent) do InterUSS.

Quando o volume aumentou para 500 OIRs, manteve-se uma taxa de sucesso elevada (100%) para até 10 TPS. Entretanto, ao elevar a taxa de envio para 15 TPS e 20 TPS, observou-se redução significativa na taxa de sucesso, com 88,38% e 78,38% respectivamente. Além disso, a latência média cresceu consideravelmente, chegando a 2,13 segundos no cenário mais exigente (20 TPS).

Para o cenário de maior volume, com 5000 OIRs, a degradação foi ainda mais acentuada. Mesmo na menor carga operacional (5 TPS), a taxa de sucesso já apresentou queda para 87,13%, aumentando drasticamente a partir de 10 TPS, com taxas de sucesso reduzidas a cerca de 56,21%, 53,59% e 52,99% para 10, 15 e 20 TPS, respectivamente. A latência média neste cenário mais intenso atingiu até 2,172 segundos (20 TPS). Como pode ser percebido no gráfico de latência da Figura 5 e no gráfico de sucesso na Figura 6.

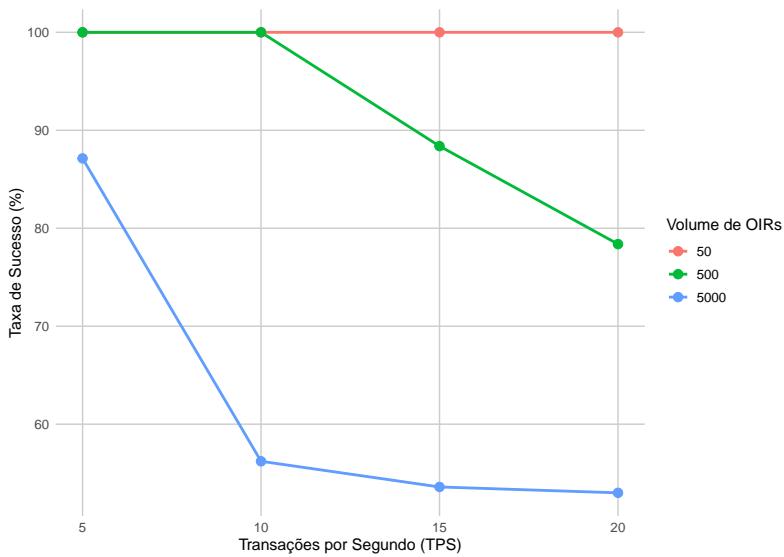


Figura 6. Taxa de Sucesso por TPS e Volume de OIRs InterUSS.

5.2. Implementação em HLF

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos nos testes realizados com operações do tipo Chaincode, considerando variações no volume total de operações e diferentes taxas de transações por segundo (TPS). Assim como no teste InterUSS, um caso é considerado sucesso quando uma operação de criação é concluída corretamente, enquanto falhas correspondem exclusivamente a eventos de timeout.

Para volumes menores (50 operações), o desempenho da plataforma Chaincode foi excelente, apresentando uma taxa de sucesso perfeita (100%) em todas as cargas testadas (5, 10, 15 e 20 TPS), com latências médias inferiores a 1 segundo.

Ao ampliar o volume para 500 operações, manteve-se uma taxa de sucesso elevada (100%) para carga de 5 TPS. Porém, ao elevar para 10 TPS, a taxa de sucesso caiu para 89,84%, piorando ainda mais nas cargas superiores, atingindo 60,94% a 15 TPS e apenas 54,28% em 20 TPS. Paralelamente, a latência média subiu drasticamente, alcançando valores superiores a 40 segundos na carga mais elevada (20 TPS).

No cenário de maior exigência (5000 operações), os resultados mostraram forte degradação de desempenho. Mesmo para carga de 5 TPS, a taxa de sucesso caiu dramaticamente para apenas 7,58%, reduzindo-se ainda mais em cargas superiores, chegando a apenas 4,05%, 2,77% e 2,17% para cargas de 10, 15 e 20 TPS, respectivamente. A latência média também aumentou significativamente, mantendo-se acima de 5 segundos em todos os casos. Como pode ser percebido no gráfico de latência da Figura 7 e no gráfico de sucesso na Figura 8.

6. Conclusões

A implementação da nova geração de sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo para aeronaves não tripuladas (UTM) serve como um habilitador de novos verticais que possuem o potencial de trazer soluções inovadoras e benéficas para mobilidade urbana aérea. Nessa perspectiva, nossos resultados indicam que há potencial para um volume de

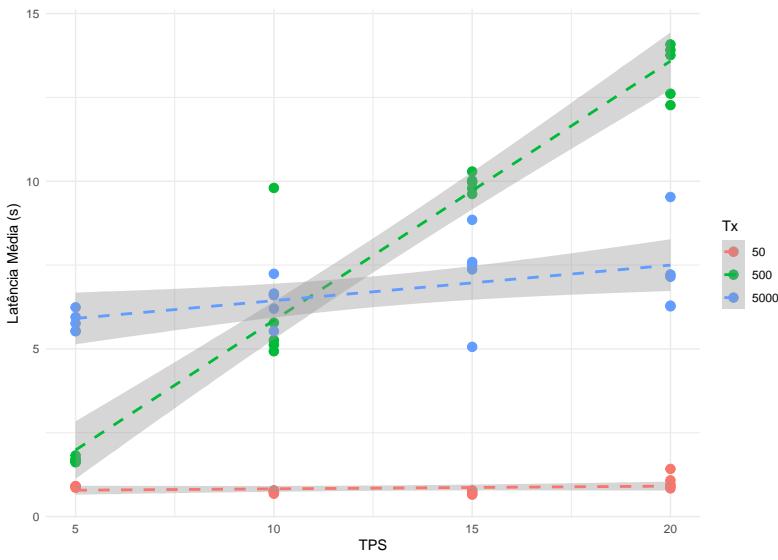


Figura 7. Taxa de Sucesso por TPS e Volume de OIRs CHAINCODE.

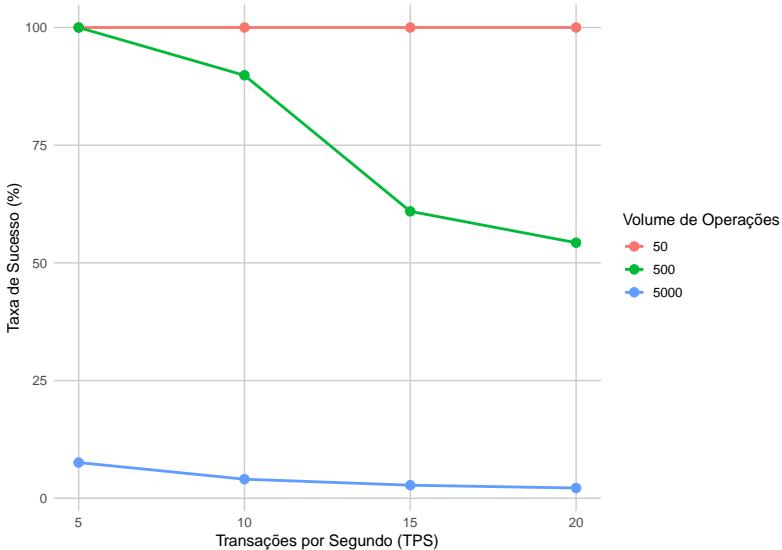


Figura 8. Taxa de Sucesso por TPS e Volume de OIRs CHAINCODE.

aproximadamente 28 transações por segundo em 2035, valor significativamente superior à capacidade das plataformas InterUSS e HLF analisadas neste estudo. Observamos que ao aumentar o volume de aeronaves não tripuladas (UAVs) há degradação na capacidade computacional em 10 TPS para cenários em que se aumenta o número de aeronaves para 500. Esses resultados evidenciam desafios e oportunidades no estado da técnica (InterUSS) e no estado da arte (uso de DLTs) referentes à arquitetura e à escalabilidade de sistemas aplicados à mobilidade aérea urbana. Assim, como futuros trabalhos planeja-se analisar e comparar novas abordagens de DLTs capazes de entregar maior escalabilidade com métricas de desempenho (e.g., tempo de resposta) adequados para a aplicação de UTM, bem como buscar por soluções capazes de dar vazão (*throughput*) as cargas previstas para operações nesse contexto.

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

- 3GPP (2025). Release 20 and 6g planning <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-20>.
- 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*.
- ASTM International (2021). ASTM F3548-21: Standard Specification for UAS Traffic Management (UTM) UAS Service Supplier (USS) Interoperability. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. Acesso em: 30 mar. 2025.
- ASTM International (2022). ASTM F3411-22: Standard Specification for Remote ID and Tracking. Technical report, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. Acesso em: 30 mar. 2025.
- Bharadwaj, S., Carr, S., Neogi, N., and Topcu, U. (2021). Decentralized control synthesis for air traffic management in urban air mobility. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 8(2):598–609.
- BRASIL (2025). <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2025/02/governo-federal-e-embraer-anunciam-r-20-bilhoes-em>
- Dehez-Clementi, M., Larrieu, N., Lochin, E., Kâafar, M. A., and Asghar, H. J. (2019). When air traffic management meets blockchain technology: a blockchain-based concept for securing the sharing of flight data.
- 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.
- dos Santos de Souza, F. L., Teixeira, M. A., Ribeiro, C. H. C., and Junior, L. A. P. (2025). Classification and specification of communication network requirements for aavs in military applications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 40(3):4–18.
- EMBRAER (2019). <https://journalofwonder.embraer.com.br/pt/204-embraerx-propoe-uma-visao-do-futuro-do-trafego-aereo-urbano>.
- Faiçal, B. S., Marcondes, C. A. C., Loubach, D. S., Sbruzzi, E. F., Verri, F. A. N., Marques, J. C., Pereira, L. A., Maximo, M. R. O. A., and Curtis, V. V. (2023). A cyber-physical system's roadmap to last-mile delivery drones. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38(5):6–16.
- Federal Aviation Administration (2018). Concept of Operations (ConOps). Technical report, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Accessed: 17 February 2025.
- Foundation, T. L. (2024). The interuss platform fund charter.
- Freeman, K., Gillem, N., Jones, A., and Sharma, N. (2023). *A Blockchain Case Study for Urban Air Mobility Operational Intent*.

- Melo, A. E., Albarello, R. H., dos Santos Nunes, R. S., de Moraes Gomes, R. C., and Júnior, L. A. P. (2025). Skyledger: *Testbed* para o gerenciamento do espaço aéreo para sistemas de transportes inteligentes. In *Anais Estendidos do XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- 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.
- UBER (2019). <https://www.uber.com.br/en/elevate/vision/>.
- Verri, F. A. N., Marcondes, C. A. C., Loubach, D. S., Sbruzzi, E. F., Marques, J. C., Júnior, L. A. P., Omena De Albuquerque Maximo, M. R., and Curtis, V. V. (2020). An analysis on tradable permit models for last-mile delivery drones. *IEEE Access*, 8:186279–186290.