

Avaliação Experimental de Contratos Inteligentes para Rastreabilidade da Cadeia Produtiva de Vegetais Frescos

Henrique Fan¹, Bruno B. Neves², Rafael Nogueira¹,
Roben C. Lunardi^{3,2}, Diego Kreutz¹, Rodrigo B. Mansilha¹

¹Universidade Federal do Pampa - PPGES (UNIPAMPA)

²Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

³Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS)

Abstract. *The traceability of fresh vegetables, regulated by Normative Instruction INC 02/2018, aims to ensure transparency and security in the supply chain and can be enabled by smart contracts. However, the impact of token standard selection on blockchain performance remains underexplored in the literature. This work presents a comparative evaluation of the ERC-721 and ERC-1155 standards in the context of INC 02/2018 through load testing under different concurrency levels and local and distributed deployment scenarios. The results indicate equivalent performance in write operations, while ERC-1155 demonstrates superior performance in read operations, evidencing greater efficiency in applications with high demand for traceability queries.*

Resumo. *A rastreabilidade de vegetais frescos, regulamentada pela Instrução Normativa INC 02/2018, visa garantir transparência e segurança na cadeia produtiva, podendo ser viabilizada por contratos inteligentes. No entanto, o impacto da escolha de padrões de tokens em blockchain sobre desempenho ainda é pouco explorado na literatura. Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa dos padrões ERC-721 e ERC-1155 no contexto da INC 02/2018 por meio de testes de carga sob diferentes níveis de concorrência e cenários de implantação local e distribuído. Os resultados indicam desempenho equivalente nas operações de escrita, enquanto o ERC-1155 apresenta desempenho superior nas operações de leitura, evidenciando maior eficiência em aplicações com alta demanda por consultas de rastreabilidade.*

1. Introdução

A Instrução Normativa Conjunta (INC) nº 02/2018¹ estabelece requisitos de rastreabilidade para a cadeia produtiva de vegetais frescos, impactando diretamente políticas públicas, como o Programa Nacional de Alimentação Escolar (PNAE). A natureza descentralizada e imutável da *blockchain* [Al-Jaroodi and Mohamed 2019] sustenta os pilares de transparência, segurança e não repúdio, agregando valor à cadeia produtiva e facilitando a execução e a auditoria de políticas públicas [Lunardi et al. 2024].

Dois padrões emergem para atender INC 02/2018 usando smart contracts: ERC-721 e ERC-1155. Recentemente, propomos a *Smart Agro RAF API* [Fan et al. 2025],

¹https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/2915263/dol-2018-02-08-instrucao-normativa-conjunta-inc-n-2-de-7-de-fevereiro-de-2018-2915259.

uma camada de abstração que viabiliza a integração de aplicações com a *blockchain*, fornecendo funcionalidades essenciais de ativos digitais enquanto oculta a complexidade dos contratos inteligentes e promove interoperabilidade e flexibilidade.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma avaliação experimental dos padrões ERC-721 e ERC-1155 aplicados à rastreabilidade da cadeia produtiva de vegetais frescos conforme a INC. O objetivo é analisar como as diferentes estratégias de tokenização impactam operações essenciais de leitura e escrita em sistemas de rastreabilidade. Para isso, os experimentos foram conduzidos em três ambientes distintos, sendo dois centralizados e um implantado em infraestrutura distribuída, utilizando o testbed Ilíada da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP). O plano experimental compreendeu 249 execuções, permitindo analisar o desempenho sob diferentes condições de carga e cenários de implantação.

Diferentes trabalhos têm investigado o ecossistema de tokens e o desempenho de contratos inteligentes, mas deixam lacunas que este estudo busca endereçar. O trabalho [Loporchio et al. 2026] analisa o ecossistema de *tokens* na *blockchain* Ethereum, comparando a adoção e a evolução dos padrões ERC-20, ERC-721 e ERC-1155 por meio de modelagem em grafos direcionados, porém sem realizar uma avaliação experimental de desempenho. Por sua vez, [Leduc et al. 2021] e [Hang et al. 2020] conduzem avaliações experimentais de desempenho de contratos inteligentes, mensurando vazão, latência e número de transações por bloco, mas sem considerar padrões de *tokens* como ERC-721 e ERC-1155. Diferentemente dessas abordagens, este trabalho apresenta uma avaliação experimental de desempenho dos padrões ERC-721 e ERC-1155 em operações de leitura e escrita, analisando vazão e latência em ambientes local e distribuído sob diferentes níveis de concorrência, contribuindo para preencher uma lacuna na literatura sobre avaliação operacional de contratos inteligentes em sistemas de rastreabilidade para a cadeia produtiva de vegetais frescos no Brasil, conforme definido pela INC.

2. Metodologia

Nosso objetivo é comparar os padrões ERC 721 e 1155 quanto seu desempenho nas operações essenciais do processo de rastreabilidade obrigatória de vegetais frescos conforme INC 02/2018. Nesse sentido, adotamos a metodologia ilustrada na Figura 1 e discutida em seguida.

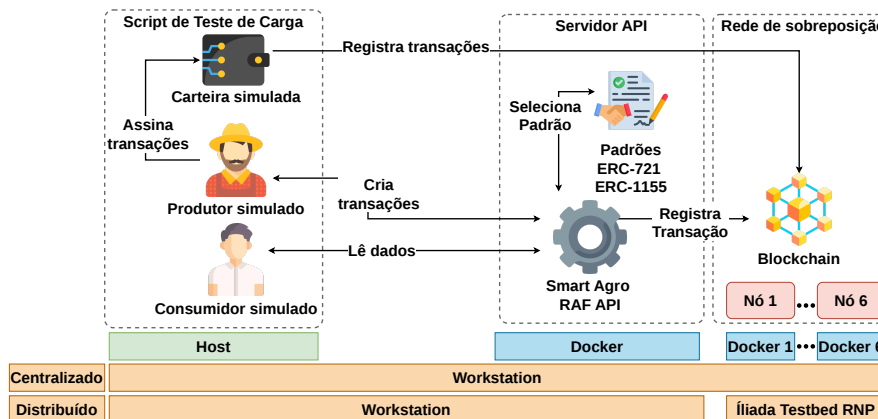


Figura 1. Visão geral da metodologia.

Contratos Inteligentes. A INC 02/2018 define os dados obrigatórios para cada transação na cadeia de vegetais frescos em dois blocos principais: (i) Informações do Produto Vegetal, que incluem nome, variedade, quantidade, lote e data; e (ii) Informações das Partes, compostas pelos dados cadastrais completos do fornecedor e do comprador, mantendo uma estrutura simétrica entre operações de entrada e saída, diferenciadas apenas por termos contextuais. Nesse contexto, a escolha do padrão de tokenização impacta diretamente na granularidade, escalabilidade e flexibilidade. Os padrões ERC-721 [Entriken et al. 2018] e ERC-1155 [Radomski et al. 2018] destacam-se por fornecerem abordagens complementares na modelagem de ativos rastreáveis. O ERC-721 garante a unicidade dos *tokens*, permitindo a representação individualizada de ativos e um rastreamento mais detalhado, porém com limitações de escalabilidade devido ao aumento de transações e dados armazenados na *blockchain*; como mitigação, pode-se representar lotes por um único *token* ERC-721, agregando informações e reduzindo a sobrecarga transacional. Em contraste, o ERC-1155 permite a emissão conjunta de *tokens* fungíveis e não fungíveis em um único contrato, viabilizando a representação de lotes com maior eficiência operacional, embora com menor granularidade no controle individual.

API. Neste estudo, adotamos *Smart Agro RAF API* [Fan et al. 2025], como camada de abstração e integração entre as aplicações da cadeia produtiva de vegetais frescos e a infraestrutura de *blockchain*. A API segue o paradigma REST e disponibiliza *endpoints* para a criação, consulta, transferência e alteração de estado de *tokens*, atendendo diretamente aos requisitos de registro da INC. Nesse processo, as transações pré-construídas no *backend* e assinadas no lado do cliente (pelo Produtor). A API permite a seleção entre diferentes padrões de contratos inteligentes (como ERC-721 e ERC-1155) de forma simplificada para as aplicações clientes. Por exemplo, a rota `/api/ERC/getTokensByBatchId` permite consulta os tokens (ativos digitais) vinculados a um identificador de lote específico. Na avaliação, consideramos quatro rotas de leitura e três de escrita.

Ambientes de Testes. A Tabela 1 apresenta a localização geográfica e as configurações de *hardware* das máquinas utilizadas. Os testes de carga foram realizados em três ambientes: dois centralizados, nos quais a *blockchain*, a *Smart Agro RAF API* e o Script de Teste de Carga executam na mesma máquina (Desktop ou Workstation), e um distribuído, em que a API e o Script executam na Workstation, enquanto a *blockchain* opera em seis nós geograficamente distribuídos pelo Brasil.

Tabela 1. Infraestrutura dos Ambientes de Testes.

Host	UF	Núcleos	RAM	SSD	Centralizado	Distribuído
Workstation	RS	8	128 GB	4.000 GB	Script, API e Rede	Script e API
VM RNP Besu C2 Bevel	BA	4	8 GB	128 GB	–	Nodo 1
VM RNP Besu C2 Bevel	DF	4	8 GB	128 GB	–	Nodo 2
VM RNP Besu C2 Bevel	PI	4	8 GB	128 GB	–	Nodo 3
VM RNP Besu C2 Bevel	PR	4	8 GB	128 GB	–	Nodo 4
VM RNP Besu C2 Bevel	RJ	4	8 GB	128 GB	–	Nodo 5
VM RNP Besu C2 Bevel	SC	4	8 GB	128 GB	–	Nodo 6

Carga de Trabalho. Desenvolvemos um *script* que simula os dois principais perfis de usuários do sistema, Produtor e Consumidor, sendo responsável tanto pela geração das requisições quanto pela coleta de métricas de desempenho, especificamente **vazão**, em requisições por segundo, e **latência**, em segundos. O perfil Consumidor executa apenas operações de leitura, realizando consultas às informações registradas na *blockchain* por

meio de acessos aleatórios às rotas da *Smart Agro RAF API*, seguindo uma distribuição uniforme para simular padrões de consulta recorrentes e não coordenados ao longo do tempo.

O perfil Produtor é simulado por uma carteira dedicada implementada com `web3.py`, que assina localmente as transações pré-construídas pela *Smart Agro RAF API* antes de submetê-las à blockchain, preservando o modelo de custódia das chaves privadas e refletindo o fluxo real do sistema. Seu comportamento reproduz, de forma determinística, a progressão da cadeia de rastreabilidade, iniciando com uma transação `mintRootBatch` para criação do lote raiz, seguida por uma a cinco transações `splitBatch` para simular o fracionamento do lote e manter o vínculo com a origem, e por uma a cinco transações `addStatus` para registrar eventos logísticos e comerciais.

Consideramos níveis de concorrência de 1 a 100 usuários para analisar o comportamento do sistema sob diferentes intensidades de carga. Para otimizar recursos, a granularidade foi maior no ambiente centralizado, com incrementos de 10 usuários até 100, enquanto no ambiente distribuído foram considerados 10, 20, 50 e 100 usuários. Cada execução teve duração de 100 segundos e avaliou simultaneamente os padrões ERC-721 e ERC-1155, com intervalo de 1 segundo entre requisições, sendo cada experimento repetido cinco vezes. Adicionalmente, foi incluída uma fase de aquecimento com 10 usuários durante 100 segundos, também com intervalo de 1 segundo entre requisições, para estabilizar o ambiente antes da coleta efetiva dos dados.

3. Resultados

A Figura 2 mostra o impacto número de usuários concorrentes na vazão (esquerda) e latência (direita) no ambiente centralizado. Cada gráfico apresenta resultados para operações de leitura (curvas vermelhas) e escrita (curvas azuis) para os padrões ERC-721 (curvas em tons escuros) e ERC-1155 (curvas em tons claros). Cada ponto mostra a média e a barra representa o intervalo de confiança

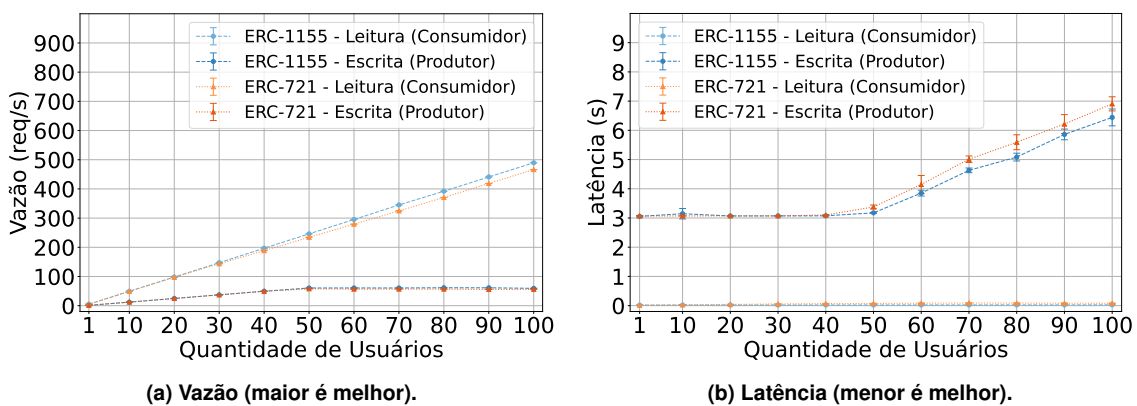


Figura 2. Desempenho no ambiente centralizado (média \pm desvio padrão, $n=5$).

A Figura 2a revela visualmente dois aspectos relevantes. Primeiro, observa-se um crescimento linear assintótico na vazão das operações de leitura, enquanto as operações de escrita atingem um platô a partir de 50 usuários simultâneos. Esse comportamento era esperado, pois operações de leitura, por não modificarem o estado da *blockchain*, escalam com maior facilidade. O platô na escrita indica que o ambiente atingiu seu ponto de

saturação para esse tipo de transação. Segundo, nota-se uma equivalência de desempenho entre os padrões ERC-721 e ERC-1155 nas operações de escrita. Contudo, nas operações de leitura, o padrão ERC-1155 apresenta uma vazão consistentemente superior em praticamente todos os níveis de concorrência testados. Essa vantagem, ainda que modesta em magnitude, é tecnicamente significativa, pois corrobora a eficiência do padrão ERC-1155 em consultas agregadas e o posiciona como a escolha mais adequada para cenários de rastreabilidade com alta demanda de leitura.

Como esperado, na Figura 2b observa-se um aumento gradual nas médias da latência à medida que o número de usuários simultâneos cresce. Este comportamento espelha, de forma inversa, as conclusões da análise de vazão: onde a taxa de transferência atinge um platô para escrita, a latência correspondente inicia uma curva de crescimento mais acentuada; e onde o ERC-1155 demonstra maior eficiência em leitura, ele também registra os menores tempos de resposta para essa operação.

Prosseguimos com a análise do ambiente distribuído, que se mostra mais relevante por refletir um cenário operacional mais realista, ainda que esteja mais sujeito a interferências externas, como variações de rede e latência entre nós geograficamente dispersos. Para facilitar a comparação direta com os resultados obtidos no ambiente controlado, mantivemos a mesma organização dos gráficos e as mesmas escalas, reduzindo apenas a quantidade de valores independentes avaliados.

Com base nos resultados apresentados na Figura 3, observa-se que, de modo geral, a vantagem de desempenho identificada no ambiente controlado se mantém e se torna mais pronunciada no cenário distribuído. Em relação à vazão, a taxa de leitura exibe um crescimento linear assintótico, enquanto a vazão de escrita se mantém aproximadamente constante após determinado nível de carga, indicando que o sistema atinge um platô de saturação mais rapidamente nas operações de escrita no ambiente distribuído em comparação ao centralizado. Quanto à latência, os valores são maiores no ambiente distribuído, como esperado.

No contexto da INC 02/2018 e do PNAE, os resultados indicam que operações de consulta podem ser escaladas adequadamente mesmo em cenários distribuídos. Em contrapartida, operações de escrita tendem a atingir saturação mais rapidamente sob alta concorrência, o que pode impactar cenários com elevado volume de registros simultâneos de eventos de rastreabilidade.

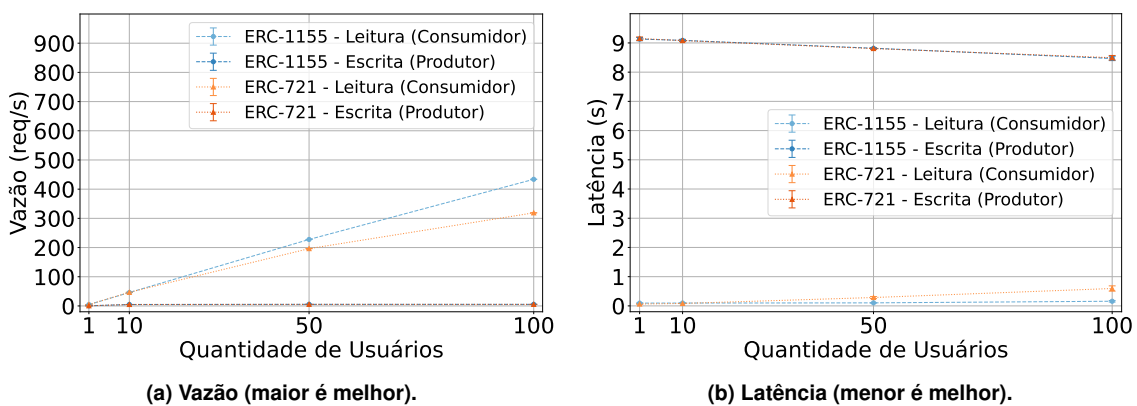


Figura 3. Desempenho no ambiente distribuído (média \pm desvio padrão, $n=5$).

4. Considerações finais

A implementação da rastreabilidade na cadeia de vegetais frescos, conforme exigido pela INC, demanda soluções tecnológicas viáveis e eficientes. Nesse contexto, nosso grupo de pesquisa tem desenvolvido uma arquitetura baseada em *blockchain*, centrada em uma API de abstração e contratos inteligentes. Este artigo contribui para esse esforço ao apresentar uma avaliação experimental abrangente de desempenho, comparando os impactos da adoção dos padrões de *tokens* ERC-721 e ERC-1155. Os experimentos, conduzidos em múltiplos cenários (local e distribuído) e com uma ampla variedade de cargas, demonstram que ambos os padrões oferecem desempenho equivalente em operações de escrita. Contudo, o padrão ERC-1155 apresenta uma vantagem de desempenho clara e consistente nas operações de leitura (consultas), evidenciando sua maior eficiência e tornando-o a escolha mais adequada para sistemas de rastreabilidade onde consultas frequentes e a agregação de dados são operações críticas.

Como trabalhos futuros, planeja-se ampliar os cenários de avaliação considerando outros comportamentos simulados de consumidores e produtores, bem como ambientes de experimentação para compreender em profundidade os trade-offs envolvidos. Espera-se ainda que a metodologia adotada e os artefatos tornados públicos possam subsidiar e reproduzir pesquisas similares aplicadas a outras cadeias produtivas.

Agradecimentos. Este trabalho recebeu apoio da FAPERGS (termos de outorga 24/2551-0001368-7, 24/2551-0000726-1 e 25/2551-0002572-9), da FAPESP (termos de outorga #2020/05183-0 e #2023/00816-2), pelo CNPq/MCTI/FNDCT N° 22/2024, projeto número 444727/2024-8. Roben Lunardi recebe apoio do IFRS e é pós-doutorando PIPD/CAPES.

Referências

- Al-Jaroodi, J. and Mohamed, N. (2019). Blockchain in industries: A survey. *IEEE access*, 7:36500–36515.
- Entriiken, W., Shirley, D., Evans, J., and Sachs, N. (2018). ERC-721: Non-Fungible Token Standard. <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>. Acesso em: 16 de maio de 2026.
- Fan, H., Nogueira, R., Neves, B., Silva, F., Lunardi, R., Kreutz, D., and Mansilha, R. (2025). Smart agro raf api. In *Anais da IX Escola Regional de Engenharia de Software*, pages 218–227, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Hang, L., Ullah, I., and Kim, D.-H. (2020). A secure fish farm platform based on blockchain for agriculture data integrity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170:105251.
- Leduc, G., Kubler, S., and Georges, J.-P. (2021). Innovative blockchain-based farming marketplace and smart contract performance evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 306:127055.
- Loporchio, M., Di Francesco Maesa, D., Bernasconi, A., and Ricci, L. (2026). Erc-1155 under the lens: a graph-based analysis of the ethereum multi-token standard. *Applied Network Science*.
- Lunardi, R. C., Michelin, R. A., Alharby, M., Dedeoglu, V., Nunes, H. C., Arruda, E., Zorzo, A. F., and van Moorsel, A. (2024). When blockchain meets smart cities: Opportunities, security and future research. *Blockchains: A Handbook on Fundamentals, Platforms and Applications*, 105:423.
- Radomski, W., Cooke, A., Castonguay, P., Therien, J., Binet, E., and Sandford, R. (2018). ERC-1155: Multi Token Standard. <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1155>. Acesso em: 16 de maio de 2026.