

Repensando a política de entregas de livros e materiais digitais em escolas públicas do país: transparência e rastreabilidade com blockchain

Emerson Silva^{1,2}, José Silva^{1,2}, Rendrikson Soares², Waldsson Sacramento²,
André Araújo², Rafael Dias Araújo^{1,2}

¹Faculdade de Computação – Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, MG, Brasil

²Núcleo de Excelência em Tecnologias Sociais (NEES) – Universidade Federal de Alagoas
Maceió, AL, Brasil

{emerson.martins, vitor.abreu, rafael.araujo}@ufu.br
{andre.araujo, waldsson.santos}@nees.ufal.br, ros@ic.ufal.br

Abstract. *The increasing digitalization of educational public policies, such as the Brazilian National Textbook and Educational Materials Program (PNLD), has intensified challenges related to traceability, transparency, and auditability in processes involving multiple stakeholders and heterogeneous information systems. In this context, this work proposes a blockchain-based architecture to support transparency and traceability in the delivery of educational materials to students and teachers in public schools. The proposed solution combines distributed ledger technology, event-driven integration, and off-chain validation through oracles, enabling the registration and verification of critical events without replacing existing legacy systems. The architecture defines reusable primitives aimed at interoperability among systems and institutions, increasing the visibility and trust of public managers, teachers, students, and oversight agencies regarding the educational resources provided by the program.*

Resumo. *A crescente digitalização de políticas públicas educacionais, como o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD), tem ampliado desafios de rastreabilidade, transparência e auditabilidade em processos executados por múltiplos atores e sistemas heterogêneos. Nesse contexto, este trabalho propõe uma arquitetura baseada em blockchain para apoiar a transparência e a rastreabilidade na entrega de materiais educacionais a estudantes e professores da rede pública. A proposta combina registro distribuído, integração orientada a eventos e validação off-chain por oráculos, permitindo registrar e verificar eventos críticos sem substituir sistemas legados. A solução define primitivas reutilizáveis voltadas à interoperabilidade entre sistemas e instituições, ampliando a visibilidade e a confiança de gestores, professores, estudantes e órgãos de controle sobre os recursos disponibilizados pelo programa.*

1. Introdução

A transformação digital das políticas públicas educacionais tem ampliado o uso de recursos digitais no contexto escolar, modificando a forma como os materiais didáticos

são produzidos, distribuídos e consumidos por estudantes e professores da rede pública [de Fatima Silva et al. 2024]. No Brasil, iniciativas como o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) passaram a incorporar livros digitais, objetos de aprendizagem e conteúdos multimídia, ampliando o alcance pedagógico dessas políticas e aumentando a complexidade dos processos de distribuição, acompanhamento e validação dos recursos educacionais [Araújo et al. 2025].

Nesse contexto, as políticas públicas de distribuição de materiais educacionais envolvem múltiplas fases, atores institucionais e sistemas heterogêneos. Embora esses sistemas atendam às necessidades operacionais de cada etapa, os dados permanecem fragmentados, o que dificulta a rastreabilidade das entregas e a reconstrução verificável do histórico das operações. Essa ausência de mecanismos integrados de transparência e auditoria limita a visibilidade de gestores, professores, estudantes e órgãos de controle sobre a avaliação, distribuição e disponibilização dos materiais educacionais, tornando os processos de fiscalização dependentes de integrações manuais e reduzindo a capacidade de auditoria ao longo da política pública [TCU 2022, UNESCO. 2021, Singh et al. 2018, UNESCO. 2024].

Diante desse cenário, tecnologias baseadas em blockchain têm sido investigadas como alternativas para apoiar a integridade, a verificabilidade e a transparência de registros distribuídos [Cagigas et al. 2021, Song 2024, Soares et al. 2023]. Entretanto, a aplicação dessas tecnologias em políticas públicas educacionais ainda enfrenta desafios relacionados à interoperabilidade entre sistemas legados, à heterogeneidade institucional e à necessidade de registrar eventos críticos sem substituir infraestruturas pré-existent.

Assim, este trabalho tem como objetivo explorar a viabilidade de uma arquitetura computacional baseada em blockchain para apoiar a transparência e a rastreabilidade na entrega de livros e de materiais digitais em escolas públicas. A proposta combina registro distribuído, integração orientada a eventos e validação off-chain por meio de oráculos, permitindo registrar e verificar eventos críticos ao longo do ciclo de vida dos materiais educacionais. Embora mecanismos tradicionais de auditoria registrem eventos, eles dependem de uma autoridade central para garantir sua integridade. Em políticas públicas educacionais envolvendo múltiplas instituições, essa característica limita a verificabilidade independente e a interoperabilidade. Assim, adotou-se uma rede blockchain permissionada para registrar evidências imutáveis e auditáveis, preservando a integração com os sistemas legados.

Além dos aspectos tecnológicos, a arquitetura proposta fortalece o acompanhamento das políticas públicas educacionais ao ampliar a visibilidade do ciclo de vida dos materiais didáticos para gestores, professores, estudantes e órgãos de controle, contribuindo para a tomada de decisão baseada em evidências, transparência institucional e governança de dados. Neste trabalho, dados *on-chain* correspondem a *hashes*, metadados e eventos registrados na blockchain, enquanto dados *off-chain* permanecem em um repositório de Gerenciamento de Dados Mestres (MDM), preservando a escalabilidade e a interoperabilidade. As regras de negócio são implementadas por contratos inteligentes, e um serviço *Oracle* integra sistemas externos à blockchain por meio da publicação de eventos confiáveis.

2. Trabalhos Relacionados

A utilização de blockchain em contextos educacionais e governamentais tem recebido atenção crescente na literatura, especialmente em cenários que demandam transparência, integridade e compartilhamento distribuído de informações.

[Sunarsi et al. 2025] propuseram um modelo de colaboração acadêmica internacional baseado em blockchain sharding com Hyperledger Fabric, visando aumentar a transparência, a auditabilidade e a rastreabilidade em ambientes multi-institucionais. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica e o potencial de fortalecer a confiança e o compartilhamento de informações entre instituições.

Em uma perspectiva mais próxima da rastreabilidade de recursos, [Azevedo et al. 2023] propuseram um framework baseado em blockchain para cadeias de suprimentos educacionais. A proposta demonstra potencial para acompanhamento de ativos distribuídos, porém não contempla integração com sistemas governamentais legados nem mecanismos de interoperabilidade entre múltiplas instituições públicas. Essas limitações tornam-se particularmente relevantes em programas nacionais de distribuição de materiais educacionais executados por diferentes atores e plataformas.

No âmbito governamental, [Diadia et al. 2023] implementaram um sistema de contratação pública utilizando Hyperledger Fabric e o padrão Open Contracting Data Standard (OCDS), demonstrando a viabilidade técnica para o registro auditável de processos administrativos. [Sion et al. 2023] propuseram uma arquitetura multicamada voltada à digitalização de processos interorganizacionais no setor público, enquanto [Alotaibi et al. 2025] apresentaram um modelo conceitual de blockchain para aumentar a transparência em registros governamentais. Apesar das contribuições, os trabalhos analisados não abordam, conjuntamente, integração orientada a eventos, interoperabilidade com sistemas legados, validação off-chain por oráculos e rastreabilidade ponta a ponta aplicada a políticas públicas educacionais de distribuição em escala nacional.

Dessa forma, identifica-se uma lacuna relacionada à ausência de arquiteturas computacionais capazes de integrar sistemas heterogêneos, registrar eventos auditáveis ao longo do ciclo de vida dos recursos educacionais e apoiar mecanismos independentes de transparência e fiscalização.

3. Arquitetura Proposta

A arquitetura proposta utiliza blockchain para garantir transparência, rastreabilidade e auditabilidade na distribuição de materiais educacionais. A Figura 1 apresenta a visão geral das interações entre os atores envolvidos. O fluxo inicia-se com materiais didáticos contendo um QRCode associado ao identificador da obra, permitindo consultas ao seu histórico por professores, gestores e cidadãos. As requisições são processadas por uma API Gateway integrada a uma blockchain permissionada, responsável pelo controle de acesso e pelo registro imutável de eventos por meio de identificadores criptográficos e assinaturas digitais. Além disso, nós de auditoria com acesso somente leitura permitem que órgãos de controle, como o TCU e a CGU, realizem fiscalização independente por meio de APIs de consulta.

A proposta busca garantir interoperabilidade entre sistemas heterogêneos, rastreabilidade verificável e transparência na distribuição de recursos educacionais, sem substi-

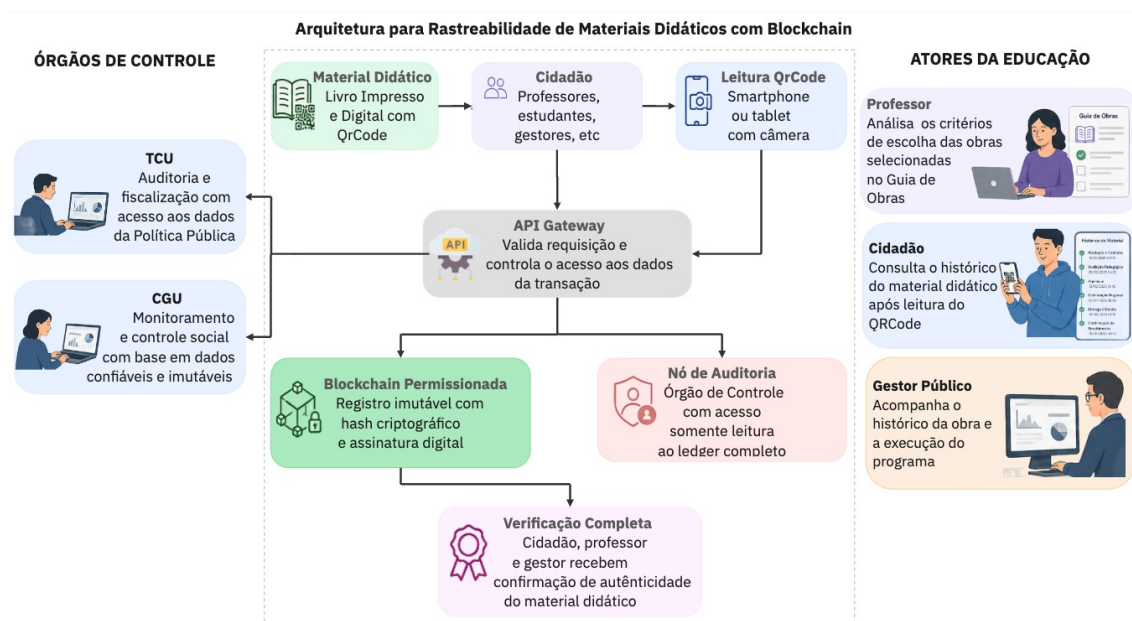


Figura 1. Fluxo de acompanhamento das obras do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD).

tuir as infraestruturas governamentais existentes. Além disso, permite que órgãos de controle realizem consultas independentes ao *ledger* distribuído, enquanto apoia o MEC e o FNDE no acompanhamento da execução do PNLD por meio de evidências verificáveis, o que favorece a identificação de gargalos e inconsistências.

3.1. Estratégia de Generalização

A arquitetura foi modelada a partir de primitivas abstratas (*fases, eventos de dados e entidades*), permitindo sua adaptação a diferentes políticas públicas executadas por múltiplos atores e sistemas heterogêneos. O PNLD foi utilizado como estudo de caso para validar a proposta, devido à sua abrangência nacional e elevada complexidade operacional.

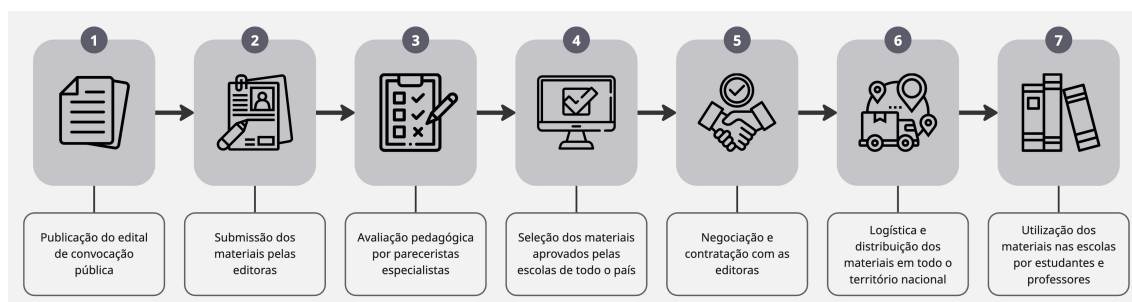


Figura 2. Fluxo de Execução do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD).

A Figura 2 apresenta o fluxo de execução do PNLD ao longo de sete fases conduzidas por diferentes atores institucionais e sistemas de informação. O ciclo inicia-se com a publicação do edital pelo Ministério da Educação (MEC) e pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), seguida da submissão e da avaliação pedagógica das obras, da seleção dos materiais pelas escolas, da contratação com editoras e da distribuição logística em escala nacional. Por fim, os materiais são utilizados por

professores e estudantes no ambiente escolar, gerando novos dados e evidências que reatualizam ciclos subsequentes do programa.

3.2. Visão em Camadas e Distribuição de Responsabilidades

A arquitetura proposta é organizada em três domínios: *off-chain*, *on-chain* e infraestrutura de auditoria. O domínio *off-chain* integra interoperabilidade, MDM e oráculos para coleta, padronização e validação de dados em conformidade com a LGPD e a LAI antes do registro distribuído. O domínio *on-chain* compreende a blockchain permissionada e os contratos inteligentes, responsáveis pelo registro imutável de eventos, pela validação de transações e pelo controle de acesso. A infraestrutura de auditoria permite o armazenamento analítico e a verificação independente das transações por gestores públicos e por órgãos de controle. Como principal contribuição, a arquitetura utiliza oráculos entre sistemas externos e a blockchain, reduzindo a dependência de uma única fonte de dados.

A governança dos dados adota o princípio da minimização, registrando *on-chain* apenas identificadores, *hashes* e metadados, enquanto dados pessoais permanecem na camada MDM em conformidade com a LGPD. O controle de acesso, implementado por papéis institucionais nos contratos inteligentes, restringe operações de escrita a atores autorizados e concede acesso somente leitura aos órgãos de controle, preservando a auditabilidade e reduzindo a exposição de dados sensíveis. A Figura 3 apresenta o diagrama de contexto da arquitetura, envolvendo sistemas governamentais, instituições executoras, órgãos de auditoria e provedores de oráculos, que fornecem dados *off-chain* para suportar o ciclo de vida das políticas públicas educacionais.

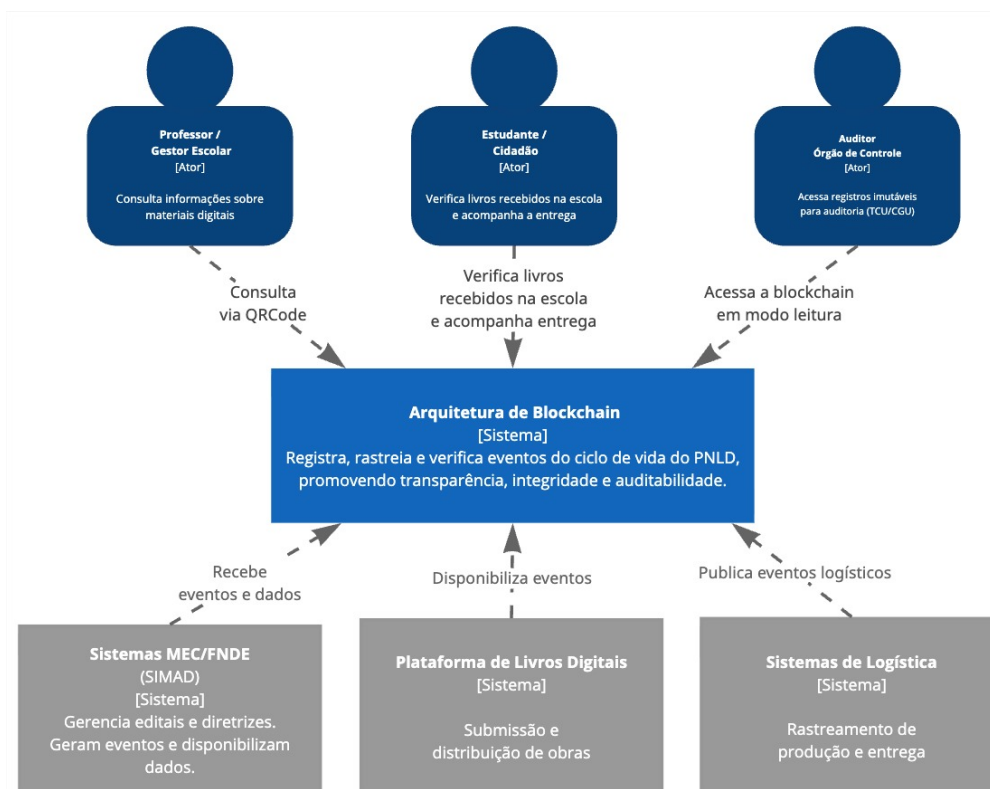


Figura 3. Arquitetura proposta e os principais atores.

O diagrama de container da Figura 4 apresenta os principais componentes da infraestrutura blockchain, incluindo contratos inteligentes para orquestração das fases do programa, controle de papéis e permissões, além de módulos de validação e ordenação das transações. Os nós governamentais são organizados em perfis de validação e auditoria, enquanto camadas de API oferecem consultas, geração de QRCode e integração com sistemas legados e serviços externos por meio de oráculos.

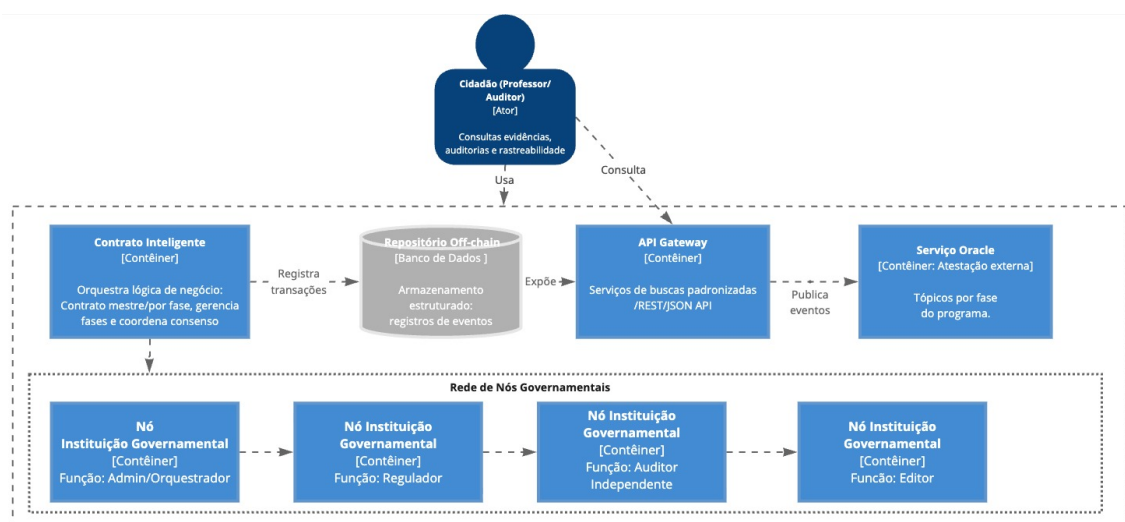


Figura 4. Diagrama de Contêiner: Aplicações e serviços.

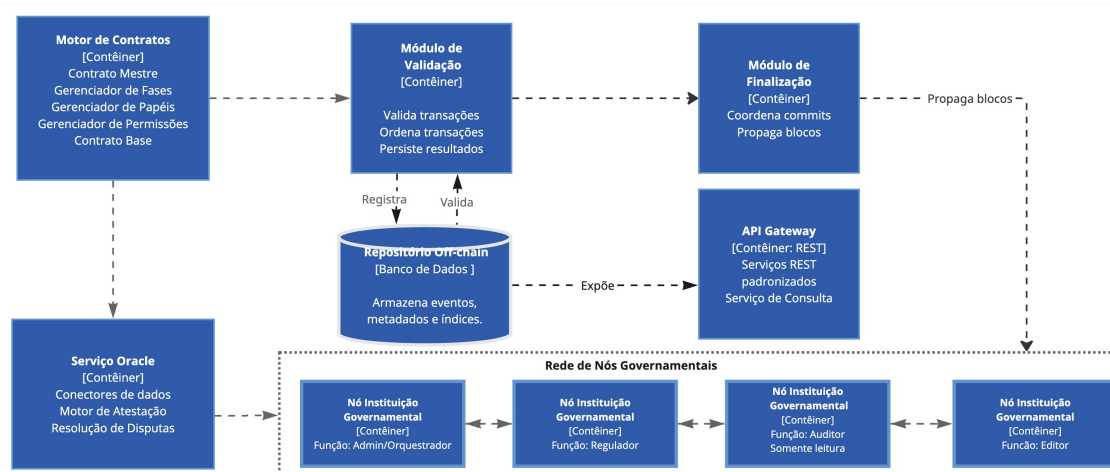


Figura 5. Diagrama de componentes internos do contêiner.

O diagrama de componentes apresentado na Figura 5 detalha os principais módulos responsáveis pela orquestração, validação e auditoria da arquitetura. O *Contrato Mestre* coordena o fluxo das fases do programa por meio dos módulos *Gerenciador de Fases*, *Gerenciador de Papéis* e *Gerenciador de Permissões*, responsáveis pelo controle do ciclo de vida, pela definição de papéis institucionais e pelo gerenciamento de permissões. O *Módulo de Validação* executa os processos de validação, ordenação e persistência das transações, assegurando a integridade e a consistência dos eventos antes de seu registro no ledger distribuído. O *Módulo de Finalização* coordena o commit e a propagação

dos blocos aos nós participantes, enquanto nós de auditoria com acesso somente leitura permitem a verificação independente dos registros. Além disso, a *Camada API* disponibiliza mecanismos de consulta e integração com sistemas externos que permitem rastrear eventos desde sua origem nos sistemas governamentais até sua representação imutável na blockchain.

4. Resultados Preliminares

Para avaliar a viabilidade e o desempenho da arquitetura no contexto de políticas públicas educacionais de múltiplas fases, foi desenvolvida uma prova de conceito que simula as sete fases do ciclo do PNLD.

A prova de conceito foi implementada com contratos inteligentes em Solidity 0.8.13, executados no Ganache, integração em Node.js com web3.js e armazenamento *off-chain* em PostgreSQL. O ambiente permite validar funcionalmente a arquitetura, embora não represente uma rede distribuída em produção. Os experimentos simularam as sete fases do PNLD, registrando eventos *on-chain* e validações por oráculos. A avaliação considerou a ausência de falhas HTTP, a execução completa das transições de fase e latências compatíveis com operações administrativas assíncronas.

Tabela 1. Configuração e resultados das suítes de teste com k6.

Suíte	Reqs. HTTP	Falha (%)	Avg (ms)	P95 (ms)	Gas avg	Destaque
Full pipeline	95	0%	50,4	112,7	286.548	Transições 100% ok
Oracle consensus	117	0%	31,4	38,9	220.620	1 retry por ciclo
Carga por fase	2.203	0%	98,2	230,8	146.388	P1, P5 e P6 ok

A Tabela 1 apresenta os principais resultados dos experimentos na camada de integração (REST). As métricas *Avg* e *P95* representam, respectivamente, o tempo médio e o percentil 95 das requisições HTTP, as fases do PNLD são identificadas de P1 a P7, e *Gas* corresponde ao custo computacional médio das transações dos contratos inteligentes. A coluna *Reqs. HTTP* indica o total de requisições executadas, *Falha (%)* representa a proporção de requisições sem resposta válida, e *Destaque* resume observações qualitativas relevantes, incluindo a ocorrência de *retries*, isto é, novas tentativas de envio de transações após falhas temporárias, geralmente causadas por conflitos de concorrência. Em todas as suítes, a taxa de falha HTTP foi de 0%, indicando estabilidade do pipeline de integração, ausência de perda de eventos e execução bem-sucedida das sete transições de fase do ciclo do PNLD, preservando o encadeamento verificável entre os eventos registrados.

Os experimentos envolvendo validação *off-chain* por oráculos executaram 77 iterações com latência média de 31,4 ms, demonstrando potencial para confirmação de disponibilização de materiais digitais em tempo próximo ao real. Esse resultado é particularmente relevante no contexto do PNLD, pois permite verificar computacionalmente se um recurso educacional aprovado em fases anteriores corresponde ao material efetivamente disponibilizado para escolas e estudantes.

Nos testes de carga, as fases P1, P5 e P6 apresentaram execução estável, enquanto P2, P3 e P4 evidenciaram conflitos de concorrência no contrato inteligente atual, decorrentes de atualizações simultâneas ao mesmo registro. Esses conflitos resultaram ape-

nas em *retries*, sem comprometer a integridade dos dados, podendo ser mitigados por serialização de transações e controle otimista de concorrência. O *ledger* rejeitou corretamente transações inválidas e preservou a integridade dos registros. Como limitações, a avaliação foi realizada em uma rede simulada de nó único (Ganache), restringindo conclusões sobre escalabilidade e considerando apenas o desempenho técnico da arquitetura, sem evidências de adoção institucional ou de utilidade prática, aspectos previstos como trabalhos futuros na Seção 5.

Os resultados preliminares indicam que a arquitetura tem potencial para apoiar a transparência, a auditabilidade e a rastreabilidade verificável em políticas públicas educacionais executadas por múltiplos atores e sistemas heterogêneos. Além da viabilidade técnica da infraestrutura blockchain, os experimentos demonstram a capacidade da solução em produzir trilhas auditáveis de eventos ao longo do ciclo de vida dos materiais educacionais, fortalecendo mecanismos de governança e acompanhamento das políticas públicas.

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma arquitetura computacional baseada em blockchain permissionada e uma integração orientada a eventos para apoiar a transparência, a rastreabilidade e a auditabilidade em políticas públicas educacionais de múltiplas fases. Utilizando o PNLD como estudo de caso, a proposta buscou enfrentar limitações relacionadas à fragmentação de dados e à dificuldade de reconstrução verificável do ciclo de vida de livros e de materiais digitais distribuídos em escolas públicas. Os resultados obtidos indicam que a arquitetura apresenta potencial para integrar sistemas heterogêneos e produzir trilhas auditáveis de eventos, contribuindo para mecanismos de governança, transparência e acompanhamento das políticas públicas educacionais.

Os resultados preliminares da prova de conceito fornecem evidências iniciais da viabilidade técnica da arquitetura proposta no contexto de rastreabilidade ponta a ponta. Os experimentos realizados com a ferramenta k6 confirmaram a estabilidade do pipeline de integração, a ausência de falhas de transporte em 2.415 requisições HTTP e a execução consistente das transições de fase do programa. Adicionalmente, os mecanismos de validação off-chain por oráculos demonstraram potencial para a confirmação verificável da disponibilização de materiais digitais em tempo próximo ao real, contribuindo para ampliar a capacidade de auditoria e de verificação computacional dos recursos distribuídos no âmbito do programa.

Sob a perspectiva da gestão educacional, a arquitetura apresenta potencial para apoiar a governança baseada em evidências ao consolidar registros verificáveis das diferentes fases do PNLD, ampliando a visibilidade da execução da política pública, subsidiando a tomada de decisão e reduzindo a dependência de relatórios consolidados manualmente. Como trabalhos futuros, pretende-se complementar a avaliação técnica com estudos envolvendo gestores, auditores e pesquisadores, analisando a utilidade percebida, a transparência e o apoio à tomada de decisão, além de investigar a aplicação da arquitetura em outros programas públicos para ampliar as evidências sobre sua generalização e potencial de adoção.

Declaração sobre o Uso de Inteligência Artificial

Os autores declaram o uso do ChatGPT como apoio pontual à estruturação, organização e aprimoramento da fluidez textual deste manuscrito. A utilização dessas ferramentas restringiu-se ao suporte à escrita e à revisão linguística, não tendo participado da concepção da pesquisa, da análise dos dados, da interpretação dos resultados ou da elaboração das conclusões, atividades que permaneceram sob a responsabilidade integral dos autores.

Referências

- Alotaibi, E. M., Issa, H., and Codesso, M. (2025). Blockchain-based conceptual model for enhanced transparency in government records: A design science research approach. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5(1):100304.
- Araújo, A., Araújo, R., Cabral, L., Silva, L., Tomaz, H., Martins, E., Dermeval, D., Sobrinho, Á., da Silva, A. P., Marques, L., et al. (2025). Data-driven analysis for improving educational policies: A case in brazil's textbook program. In *Conference on Digital Government Research*, volume 26.
- Azevedo, P., Gomes, J., and Romão, M. (2023). Supply chain traceability using blockchain. *Operations Management Research*, 16(3):1359–1381.
- Cagigas, D., Clifton, J., Diaz-Fuentes, D., and Fernández-Gutiérrez, M. (2021). Blockchain for public services: A systematic literature review. *IEEE access*, 9:13904–13921.
- de Fatima Silva, L., Silva, A., Araujo, R., Araujo, A., Dermeval, D., and Cantarino, R. (2024). Digital transformation in a brazilian public policy: A case study of pedagogical evaluation within the national textbook program. In *Proceedings of the 25th Annual International Conference on Digital Government Research*, pages 515–524.
- Diadia, P., Tamgno, J. K., and Kora, A. D. (2023). Implementing and evaluating a blockchain-based dematerialized public procurement system with hyperledger fabric and ocds. In *2023 Fifth International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA)*, pages 136–141. IEEE.
- Singh, J., Cobbe, J., and Norval, C. (2018). Decision provenance: Harnessing data flow for accountable systems. *IEEE Access*, 7:6562–6574.
- Sion, S. I., Zhang, K., and April, A. (2023). Towards citizen-centric services using blockchain-powered digitalization of public sector processes. In *2023 Fifth International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA)*, pages 361–368. IEEE.
- Soares, R., Araújo, A., Rodrigues, G., and Alencar, C. (2023). Streaming Platforms Based on Blockchain Technology: A Business Model Impact Analysis. In Latifi, S., editor, *ITNG 2023 20th International Conference on Information Technology-New Generations*, pages 143–149, Cham. Springer International Publishing.
- Song, Z. (2024). Educational resource sharing based on blockchain technology using elliptical curve digital signature algorithm-proof-of-stake. In *2024 International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS)*, pages 1–4. IEEE.

Sunarsi, D., Usman, H., Fachrezzy, F., Zulkarnain, N., et al. (2025). Blockchain shard model to improve the efficiency of global lecturer research collaboration. In *2025 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS)*, pages 701–705. IEEE.

TCU (2022). Análise integrada de dados da administração pública federal - DIA-D. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/analise-integrada-de-dados-da-administracao-publica-federal-dia-d.htm>. Acessado em: 29 Maio. 2026.

UNESCO. (2021). *Non-state Actors in Education: WHO CHOOSES? WHO LOSES?* UNESCO.

UNESCO. (2024). Our priority on transparency and financing. Technical report, UNESCO-IIEP. Acesso em: 29 maio 2026.