

Rastreabilidade em Ecossistemas Multiatores: Uma Abordagem Baseada em Metadados e Identidades Digitais Descentralizadas

Silvio Queiroz¹, Leobino Sampaio¹

¹Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PGCOMP)
Instituto de Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Salvador – BA – Brasil

{silvio.queiroz, leobino}@ufba.br

Abstract. *Traceability is a central requirement in regulated, multi-actor ecosystems, where transparency, auditability, and trustworthy governance are essential. Although blockchain-based solutions are widely adopted, they often reduce traceability to mere event logging, neglecting aspects such as authorship, accountability, and process governance. This paper presents an architectural traceability model based on a hybrid on-chain/off-chain architecture, with metadata-oriented modeling and workflow automation through rule engines and state machines. Decentralized Digital Identities are treated as first-class metadata, enabling verifiable binding among assets, events, and agents. The proposed approach is validated through the CarbonID platform, employed in the management of the carbon credit lifecycle.*

Resumo. *A rastreabilidade é um requisito central em ecossistemas regulados e multiatores, nos quais transparência, auditabilidade e governança confiável são essenciais. Embora soluções baseadas em blockchain sejam amplamente adotadas, elas frequentemente reduzem a rastreabilidade ao simples registro de eventos, negligenciando aspectos como autoria, responsabilidade e governança de processos. Este trabalho apresenta um modelo arquitetural de rastreabilidade baseado em uma arquitetura híbrida on-chain/off-chain, com modelagem orientada a metadados e automação de fluxos por meio de motores de regras e máquinas de estados. Identidades Digitais Descentralizadas são tratadas como metadados de primeira classe, permitindo a vinculação verificável entre ativos, eventos e agentes. A abordagem proposta é validada por meio da plataforma CarbonID, empregada na gestão do ciclo de vida de créditos de carbono.*

1. Introdução

A rastreabilidade constitui um requisito central em domínios que demandam transparência, auditabilidade e governança confiável, especialmente em ecossistemas regulados e multiatores. Soluções baseadas em *blockchain* têm sido amplamente adotadas para esse propósito. No entanto, tais iniciativas frequentemente tratam a rastreabilidade como mero registro de eventos, negligenciando aspectos fundamentais como autoria, responsabilidade e governança dos processos.

A literatura recente sobre rastreabilidade baseada no uso de *blockchain* tem avançado significativamente, sobretudo no contexto de cadeias de suprimentos, concentrando-se em atributos como imutabilidade, transparência, integridade dos dados e auditoria

de eventos ao longo do ciclo de vida de produtos e processos [Agrawal et al. 2021]. No entanto, a maior parte dessas abordagens assume entidades centralizadas ou semi-centralizadas como responsáveis pela inserção e validação dos dados rastreados, limitando a rastreabilidade à dimensão do objeto ou do processo e negligenciando a rastreabilidade do agente responsável pelas ações registradas. Ademais, estudos recentes indicam que questões relacionadas à identidade, responsabilização e autoria confiável dos registros permanecem como lacunas abertas na pesquisa acadêmica [Agrawal et al. 2021]. Essa limitação torna-se evidente na implementação de sistemas reais para a tokenização de ativos infungíveis (NFTs – *Non-Fungible Tokens*), os quais, na prática, exigem uma integração arquitetural entre modelos de processo, mecanismos de identidade, estruturas de governança e registros auditáveis, em vez da adoção isolada de *blockchain*.

Esses requisitos podem ser adequadamente endereçados a partir do entendimento de que a rastreabilidade não é uma propriedade monolítica, mas composta por múltiplas dimensões complementares. Entre elas destacam-se a capacidade de identificar a origem de um item ou evento, incluindo insumos, decisões e agentes envolvidos, bem como a capacidade de identificar seus impactos, destinos ou consequências futuras. Em sistemas complexos, tais dimensões são frequentemente combinadas para permitir análises retrospectivas e prospectivas, essenciais para auditoria, conformidade regulatória e mitigação de riscos. Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma abordagem para o desenvolvimento de soluções de rastreabilidade baseada na adoção de uma arquitetura híbrida *on-chain/off-chain*, combinada com modelagem orientada a metadados e automação de fluxos por meio de motores de regras e máquinas de estados.

Como resultado da abordagem proposta, apresentamos um modelo arquitetural de rastreabilidade baseado em uma arquitetura híbrida *on-chain/off-chain*, com modelagem orientada a metadados e automação de fluxos por meio de motores de regras e máquinas de estados. Identidades Digitais Descentralizadas são tratadas como metadados de primeira classe, permitindo a vinculação verificável entre ativos, eventos e agentes. A abordagem foi validada por meio da plataforma CarbonID¹, empregada na gestão do ciclo de vida de créditos de carbono. A CarbonID foi desenvolvida e avaliada no contexto do Grupo de Trabalho (GT) responsável pelo tema de identidade digital e rastreabilidade, integrando o escopo do projeto ILIADA da RNP, uma iniciativa voltada à pesquisa, desenvolvimento e experimentação de soluções baseadas em tecnologias distribuídas e identidade digital.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos fundamentos teóricos e trabalhos relacionados ao tema. Em seguida, a Seção 3 introduz a abordagem proposta, seus requisitos funcionais e elementos arquiteturais necessários para que sejam endereçados. A partir da apresentação da abordagem proposta, o artigo apresenta Seção 4 a prova de conceito, realizada através da implementação da plataforma CarbonID. Por fim, a Seção 5 conclui o artigo e propõe direções para trabalhos futuros.

2. Fundamentos teóricos e Trabalhos Relacionados

A rastreabilidade (*traceability*) é um conceito amplamente utilizado em sistemas de informação, engenharia de software, cadeias de suprimentos e sistemas regulados, sendo definida, de forma geral, como a capacidade de acompanhar o histórico, a aplicação ou a localização de um objeto por meio de identificações registradas ao longo do tempo (ISO

¹ Acessível em: <https://carbonid.com.br/>

8402, 1994; ISO 9000, 2015). Em contextos computacionais, a rastreabilidade permite reconstruir a trajetória completa de um artefato, decisão ou evento, desde sua origem até seu estado atual, assegurando transparência, auditabilidade e confiança. Segundo a norma ISO 22005, rastreabilidade consiste na “capacidade de seguir o movimento de um produto através de etapas especificadas de produção, processamento e distribuição” (ISO, 2007). Embora originalmente aplicada a cadeias agroalimentares, essa definição foi progressivamente generalizada para sistemas digitais, onde o “produto” pode representar dados, documentos, ativos digitais ou processos.

A literatura acadêmica reconhece que a rastreabilidade não é uma propriedade monolítica, mas composta por múltiplas dimensões complementares: i) **Rastreabilidade backward (para trás)**: capacidade de identificar a origem de um item ou evento, incluindo insumos, decisões e agentes envolvidos; e ii) **Rastreabilidade forward (para frente)**: capacidade de identificar os impactos, destinos ou consequências futuras de um item ou evento. Em sistemas de informação complexos, essas dimensões são frequentemente combinadas para permitir análises retrospectivas e prospectivas, essenciais para auditoria, conformidade regulatória e mitigação de riscos [Jansen-Vullers et al. 2003].

Com a evolução dos sistemas digitais, o conceito de rastreabilidade expandiu-se para além de objetos físicos. A rastreabilidade moderna pode ser classificada em três categorias principais: i) **Rastreabilidade de dados**: capacidade de rastrear a origem, transformação e uso de dados ao longo do tempo; ii) **Rastreabilidade de processos**: capacidade de reconstruir a sequência de atividades, estados e transições que compõem um processo; e iii) **Rastreabilidade organizacional ou de responsabilidade**: capacidade de associar ações, decisões e eventos aos agentes responsáveis [Bechini et al. 2008].

Essa última dimensão tem ganhado relevância em sistemas distribuídos e regulados, uma vez que a ausência de vínculos claros entre eventos e autores compromete a confiança e a governança do sistema [Kshetri 2018]. Em sistemas distribuídos tradicionais, a rastreabilidade é frequentemente prejudicada pela fragmentação de dados, pela heterogeneidade de sistemas e pela dependência de autoridades centralizadas para validação de registros [van der Aalst 2016]. A literatura aponta que logs centralizados, embora úteis, são vulneráveis a inconsistências, adulterações e assimetrias de informação.

Nesse contexto, tecnologias de *Distributed Ledger* passaram a ser exploradas como mecanismos para fortalecer a rastreabilidade, ao fornecer registros imutáveis, ordenados temporalmente e compartilhados entre múltiplas partes [Greve et al. 2018]. No entanto, estudos recentes destacam que a simples adoção de blockchain não é suficiente para garantir rastreabilidade completa, especialmente quando aspectos como identidade, autoria e governança não são adequadamente modelados [Rejeb et al. 2021].

Trabalhos como a ChainID [Queiroz et al. 2021] abordam o uso de IDD com foco na identificação de usuários, integridade e verificabilidade de eventos relacionados ao ciclo de vida das identidades. A proposta do ChainID concentra-se na implementação de plataforma como serviços que utiliza a *blockchain* como repositório verificável para registrar evidências criptográficas associadas à criação, atualização e revogação de identidades digitais e credenciais verificáveis, garantindo não repúdio e auditabilidade das operações. Embora não trate diretamente de rastreabilidade de processos ou ativos, o ChainID fornece serviços importantes para a incorporação de identidade digital verifi-

cável em sistemas distribuídos. A abordagem apresentada neste artigo se apoia nesses fundamentos ao consumir serviços de IDD como componentes de alto nível, estendendo seu uso para vincular identidades a eventos, decisões e responsabilidades em uma solução de rastreabilidade mais ampla.

Uma contribuição importante da literatura contemporânea é o entendimento da rastreabilidade como uma propriedade emergente do sistema, e não como uma funcionalidade isolada. A rastreabilidade efetiva depende da integração coerente entre dados, processos, regras e atores, sendo fortemente influenciada pela arquitetura do sistema [van der Aalst 2016]. A literatura reforça esse entendimento ao afirmar que soluções de rastreabilidade robustas devem contemplar: i) modelos formais de processos, ii) mecanismos de versionamento de regras, iii) identificação confiável dos agentes envolvidos e iv) registros auditáveis e verificáveis ao longo do tempo [Rejeb et al. 2023].

Existem trabalhos acadêmicos relacionados à abordagem proposta, com foco em rastreabilidade baseada em *blockchain*. Os trabalhos selecionados representam diferentes perspectivas sobre o problema, permitindo posicionar a abordagem apresentada neste artigo em relação ao estado da arte. [Francisco et al. 2022] explora o uso de *blockchain* para aumentar transparência em mercados de carbono, com foco no registro imutável de créditos, mas com suporte limitado à governança de processos e à rastreabilidade das decisões intermediárias. [Zhang et al. 2024] realizou análise dos benefícios e desafios do uso de *blockchain* nesses mercados, destacando limitações de soluções puramente *on-chain* e a necessidade de arquiteturas híbridas, embora sem propor um modelo operacional concreto. [Azevedo et al. 2023] apresentam uma arquitetura híbrida para rastreabilidade em cadeias de suprimentos, integrando registros *on-chain* e dados *off-chain* com mecanismos de identificação baseados em certificados digitais; entretanto, a proposta não aborda governança de processos nem controle de workflows orientados a regras. Em conjunto, esses trabalhos abordam aspectos relevantes da rastreabilidade baseada em *blockchain* de forma fragmentada, enquanto a abordagem apresentada neste artigo integra arquitetura híbrida, governança de processos e identidade digital em um modelo unificado.

Tabela 1. Comparação entre trabalhos relacionados e a abordagem proposta

| Trabalho | Blockchain | Arquitetura Híbrida | Governança | IDD |
|---------------------------|------------|---------------------|------------|-----|
| [Francisco et al. 2022] | ✓ | Parcial | – | – |
| [Zhang et al. 2024] | ✓ | ✓ | – | – |
| [Azevedo et al. 2023] | ✓ | ✓ | – | ✓ |
| Abordagem proposta | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

3. Uma abordagem para desenvolvimento de soluções de rastreabilidade e auditoria de ativos

Como apresentado na Seção 1, a proposta de abordagem surge diante do desafio de construir soluções de rastreabilidade que visam apresentar como principais benefícios a transparência, auditabilidade e governança confiável, especialmente em ecossistemas regulados e multiatores. Desta forma, ao pensar numa solução de rastreabilidade este trabalho não busca fazer o uso da tecnologia blockchain apenas como mero meio de registro de eventos, mas para incorporar Identidade Digital Descentralizada (IDD) como metadado

de primeira classe no modelo de rastreabilidade, permitindo não apenas o acompanhamento do estado e histórico dos ativos rastreados, mas também a vinculação criptograficamente verificável entre eventos, agentes e credenciais verificáveis. Buscamos, portanto, incorporar a IDD como elemento estruturante de uma arquitetura que será discutida em subseções subsequentes.

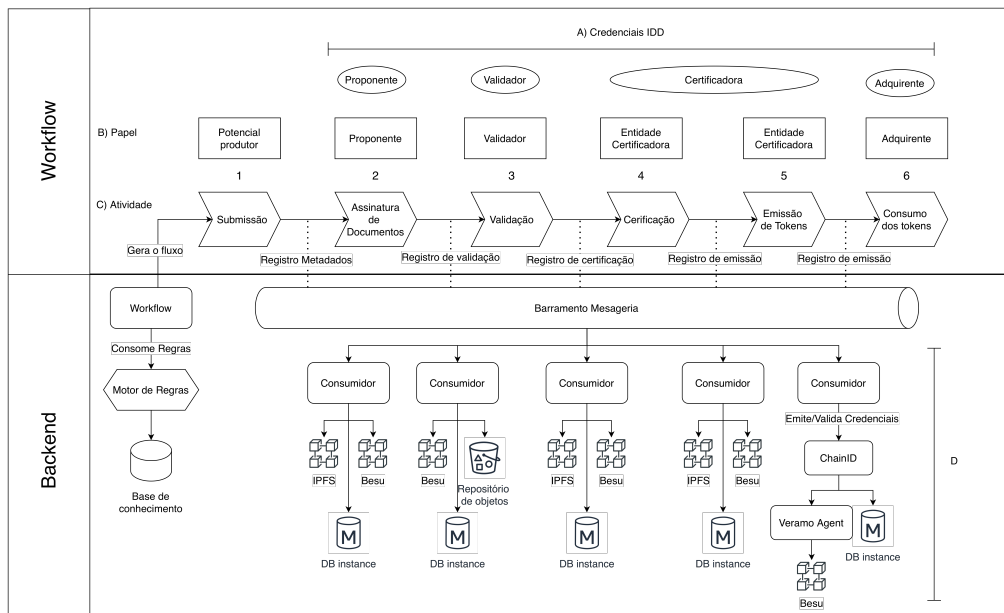


Figura 1. Abordagem proposta em que o uso conjunto de soluções *On-chain* e *Off-chain* gerencia o ciclo de vida de *tokens* a partir do gerenciamento distribuído de credenciais verificáveis.

3.1. Requisitos Funcionais

A definição de requisitos funcionais para uma abordagem de rastreabilidade está diretamente alinhada aos conceitos fundamentais de *traceability*, entendida como a capacidade de acompanhar, reconstruir e auditar a trajetória completa de dados, processos e responsabilidades ao longo do tempo. Em sistemas digitais complexos e multiatores, esses requisitos extrapolam o simples registro de eventos, exigindo mecanismos formais que garantam integridade, autoria, contexto metodológico e governança distribuída.

Dessa forma, a abordagem adotada estabelece um conjunto de requisitos funcionais que estão relacionados as dimensões clássicas da rastreabilidade: de dados, de processos e de responsabilidades; bem como das limitações observadas na literatura sobre soluções baseadas em blockchain e sistemas distribuídos. Os principais requisitos funcionais da abordagem são:

- **Rastreabilidade completa do ciclo de vida:** o sistema deve permitir o rastreamento integral do ciclo de vida de projetos e ativos, registrando de forma contínua e verificável todas as etapas, desde a submissão inicial até o encerramento, incluindo decisões intermediárias e estados finais. Esse requisito contempla rastreabilidade *backward* e *forward*, possibilitando a identificação tanto da origem quanto dos impactos de cada evento;

- **Rastreabilidade orientada por metodologias e regras versionadas:** cada decisão, dado submetido ou documento analisado deve estar explicitamente associado à metodologia e à versão vigente no momento da execução, permitindo reconstruir não apenas o resultado, mas também os critérios normativos que fundamentaram a decisão;
- **Controle formal de estados e transições:** as entidades rastreáveis devem possuir um conjunto finito de estados e transições autorizadas, com cada mudança de estado registrada de forma auditável, incluindo contexto temporal e agente responsável. Esse controle assegura consistência processual e reduz ambiguidades quanto à legitimidade das ações realizadas;
- **Associação inequívoca entre eventos e agentes responsáveis:** todas as ações relevantes devem ser vinculadas a identidades verificáveis, garantindo que cada evento possa ser atribuído de forma confiável a um ator específico, fortalecendo a responsabilização e a governança organizacional;
- **Registro imutável e verificável de eventos críticos:** eventos-chave do ciclo de vida, como decisões finais e certificações, devem ser registrados de forma imutável, permitindo verificação independente e prevenindo adulterações ou disputas em ambientes multiatores;
- **Rastreabilidade temporal e encadeamento de eventos:** o sistema deve preservar a ordem, as dependências e as relações causais entre eventos, possibilitando a reconstrução completa da sequência de ações associadas a um projeto ou ativo, conforme recomendado para auditorias e análises retrospectivas;
- **Separação entre dados operacionais e provas de rastreabilidade:** a abordagem deve distinguir claramente entre dados operacionais, sujeitos a evolução, e evidências de rastreabilidade, que devem ser preservadas de forma imutável, conciliando flexibilidade operacional, escalabilidade e rigor auditável.

Visando atender tais requisitos, projetamos os principais componentes utilizados no processamento dos ativos e transações rastreáveis sugeridos pela abordagem proposta, conforme a Figura 1. Estes serão detalhados nas próximas subseções.

3.2. Motor de Regras

O motor de regras desempenha um papel central na solução ao atuar como o mecanismo responsável por formalizar, interpretar e aplicar regras que governam dados, processos e decisões ao longo do ciclo de vida de entidades rastreáveis. O conceito agregador desse componente é a metodologia, entendida de forma abstrata como o artefato que consolida critérios, regras e procedimentos que orientam a execução de processos em um determinado contexto. A metodologia funciona como a referência de mais alto nível para a definição de fluxos, estruturas de informação, regras de validação, estados e transições, permitindo que o comportamento do sistema seja governado por definições explícitas e auditáveis.

Para garantir flexibilidade e rastreabilidade, o motor de regras adota o versionamento de metodologias, possibilitando que alterações regulatórias, organizacionais ou técnicas sejam incorporadas por meio de novas versões, sem afetar instâncias previamente avaliadas sob versões anteriores. Esse mecanismo assegura que cada decisão, validação ou dado registrado possa ser contextualizado em relação ao conjunto de regras vigente

no momento de sua execução, preservando consistência histórica e auditabilidade — um requisito essencial em sistemas rastreáveis e regulados.

Nesse contexto, uma instância de processo representa a aplicação concreta de uma metodologia e de sua respectiva versão. Cada instância passa a ser governada integralmente pelas regras definidas na metodologia selecionada, que determina quais informações devem ser fornecidas, quais evidências são exigidas e quais etapas compõem seu ciclo de vida. A associação explícita entre instância de processo, metodologia e versão permite que o comportamento do sistema, tais como: inclusão de validações, permissões, transições de estado e produção de artefatos; seja conduzido de forma previsível, controlada e rastreável. Assim, enquanto a metodologia define o arcabouço normativo, a instância materializa sua aplicação operacional.

Do ponto de vista conceitual, a modelagem associada ao motor de regras é estruturada para ser integralmente parametrizável, de modo que regras, estruturas e comportamentos sejam definidos por metadados, e não por lógica codificada. Essa característica permite que o motor interprete dinamicamente diferentes metodologias e versões, suportando múltiplos conjuntos de regras de forma simultânea. A parametrização favorece a evolução contínua do sistema, reduz o acoplamento entre regras e código e reforça a rastreabilidade normativa ao longo do tempo. A capacidade de incorporar novas metodologias ou versões exclusivamente por meio de metadados é um fator-chave para a sustentabilidade e a escalabilidade de soluções de rastreabilidade para diversos contextos sem a necessidade de alterações estruturais no sistema.

Complementarmente, a governança processual é reforçada pela integração do motor de regras com uma máquina de estados finita, responsável por reger formalmente o ciclo de vida das instâncias de processo. Essa máquina de estados também é parametrizada por metadados, permitindo que cada metodologia defina seus próprios estados, transições permitidas, permissões associadas e regras de progressão. Dessa forma, o comportamento do sistema passa a ser determinado por definições declarativas, e não por fluxos rígidos implementados em código, fortalecendo a rastreabilidade processual e a previsibilidade das execuções.

Os objetivos centrais dessa integração incluem: i) **suportar múltiplas metodologias com fluxos distintos de forma simultânea**; ii) **assegurar rastreabilidade completa por meio do registro auditável de transições de estado**; iii) **garantir que apenas agentes autorizados executem ações sensíveis**; e iv) **padronizar a comunicação entre o núcleo de governança e as camadas consumidoras do sistema por meio de eventos bem definidos**. A composição entre motor de regras, máquina de estados e serviços de aplicação consolida, assim, um modelo de governança orientado a dados, no qual regras, estruturas e comportamento são definidos de forma explícita, versionada e rastreável, independentemente do domínio de aplicação.

3.3. Workflow

O *workflow* é o componente que tem como finalidade estruturar, coordenar e controlar a execução dos processos associados a entidades rastreáveis, garantindo que cada etapa seja realizada de forma ordenada, verificável e conforme regras previamente definidas. Em uma solução de rastreabilidade, o *workflow* atua como o mecanismo responsável por materializar o fluxo operacional que conecta dados, decisões e estados, assegurando que a

progressão de um processo ocorra de maneira consistente e auditável ao longo do tempo.

De forma conceitual, o *workflow* identifica a instância de processo e seu estado atual e, com base nos fluxos definidos pelas regras e metodologias vigentes, determina quais etapas, atividades e informações devem ser apresentadas ou executadas em cada momento. Esses elementos são processados de maneira centralizada no servidor e apresentados ao usuário conforme o contexto do processo, alinhando-se aos princípios de *Server-Driven UI*, nos quais a estrutura da interface, as ações disponíveis e as restrições de interação são definidas por dados e regras, e não por lógica fixa no cliente. Essa abordagem favorece flexibilidade, consistência e evolução contínua dos fluxos, sem necessidade de alterações na camada de apresentação.

Um aspecto central do *workflow* é a separação entre a coleta, o armazenamento de dados operacionais e o registro de evidências rastreáveis. Tipicamente, os dados informados durante a execução das etapas são inicialmente persistidos em repositórios operacionais, enquanto os registros imutáveis são produzidos apenas em momentos semanticamente relevantes, como transições de estado ou decisões finais. Essa estratégia permite reduzir custos, aumentar escalabilidade e preservar simplicidade arquitetural, sem comprometer a integridade e a auditabilidade dos processos.

Nesse contexto, o *workflow* operacionaliza os requisitos funcionais de rastreabilidade ao assegurar que cada etapa do processo seja executada conforme regras previamente estabelecidas, preservando a coerência entre dados informados, validações aplicadas, permissões concedidas e estados alcançados. A definição dinâmica de etapas, campos e validações permite que o sistema adapte seu comportamento de acordo com a metodologia vigente e com o estado atual da instância de processo, garantindo previsibilidade, controle formal de transições e rastreabilidade completa do ciclo de vida. Ao restringir ações sensíveis a momentos e perfis autorizados, o *workflow* contribui diretamente para os requisitos de governança, responsabilização e controle de acesso.

Além disso, o *workflow* viabiliza a separação entre dados operacionais e provas de rastreabilidade ao coordenar quando informações devem permanecer em camadas operacionais e quando eventos críticos devem ser registrados como evidências imutáveis. As transições de estado atuam como pontos de consolidação da rastreabilidade, disparando o registro auditável de decisões e resultados, enquanto o encadeamento ordenado das etapas permite a reconstrução temporal completa do processo. Essa integração assegura aderência aos requisitos funcionais de rastreabilidade temporal, integridade dos registros e auditabilidade, ao mesmo tempo em que mantém a solução escalável, flexível e alinhada à arquitetura híbrida proposta.

3.4. IDD como elemento estruturante da rastreabilidade

Um diferencial central da abordagem é a incorporação da Identidade Digital Descentralizada como elemento estruturante da rastreabilidade. Nela a IDD é utilizada como o mecanismo central para identificação, autenticação e responsabilização dos agentes envolvidos nos processos rastreáveis. Cada ator é representado por uma identidade digital única, controlada pelo próprio titular, que pode ser utilizada para comprovar sua identidade e seu papel no sistema sem dependência de uma autoridade central de autenticação.

Nesta abordagem, a IDD pode ser empregada para vincular ações, decisões e eventos a seus respectivos responsáveis de forma verificável. Sempre que uma ação relevante

ocorre, como por exemplo: a submissão de informações, a validação de dados, a aprovação de etapas ou a execução de transições de estado; essa ação é associada à IDD do agente que a executou. Esse vínculo garante que o histórico do processo inclua não apenas o registro do evento, mas também a autoria correspondente, permitindo rastrear responsabilidades ao longo de todo o ciclo de vida.

Ao usar IDD na assinatura das ações e decisões realizadas no sistema eventos críticos podem ser assinados digitalmente pelo agente responsável, assegurando integridade, autenticidade e não repúdio. Essas assinaturas permitem que registros sejam verificados de forma independente e correlacionados a identidades específicas, reforçando a audibilidade e a confiabilidade da solução, garantindo, assim, requisitos de integridade e verificabilidade dos registros. Dessa forma, a identidade digital passa a integrar o próprio modelo de governança e controle de processos, influenciando diretamente o comportamento do workflow e da máquina de estados.

3.5. Arquitetura Resultante

A arquitetura resultante foi concebida para apoiar um fluxo genérico de atividades relacionado a todo o ciclo de vida de um token, fundamentada no gerenciamento distribuído das credenciais digitais verificáveis de todos os atores envolvidos. A Figura 1 ilustra as credenciais IDD (em A), os atores principais (em B), as atividades do fluxo (em C) e armazenamento descentralizado (em D).

A Figura 1 ilustra o funcionamento da abordagem de rastreabilidade proposta por meio de um fluxo genérico, estruturado em seis atividades sequenciais: (1) submissão, (2) assinatura de documentos, (3) validação, (4) certificação, (5) emissão de tokens e (6) consumo dos tokens. Cada atividade é associada a um papel específico, refletindo a separação de responsabilidades ao longo do ciclo de vida do processo. O *workflow* atua como o elemento coordenador dessas atividades, garantindo que a progressão entre etapas ocorra de forma controlada, rastreável e conforme as regras previamente definidas.

Um aspecto importante é que todos os atores envolvidos no fluxo são identificados de forma segura e descentralizada, desde a etapa inicial de submissão até o consumo final dos *tokens*. As IDDs são utilizadas para vincular cada ação ao seu respectivo responsável, assegurando autoria e responsabilização em todas as etapas. De maneira complementar, os documentos e decisões críticas gerados ao longo do processo são assinados digitalmente, preservando autenticidade e integridade e permitindo verificação posterior de forma independente.

Do ponto de vista arquitetural, o *workflow* opera em conjunto com o motor de regras, que interpreta as metodologias e define as transições permitidas entre as atividades. A cada avanço no fluxo, eventos são produzidos e encaminhados a um barramento de mensageria, que desacopla a execução do processo dos mecanismos responsáveis pelo registro das evidências. Esse modelo orientado a eventos permite que metadados, resultados de validação, certificações e emissões sejam processados de forma assíncrona, favorecendo escalabilidade e rastreabilidade temporal, representado pela área D. Extensões, novos componentes e integrações podem utilizar o barramento de mensageria e processar as mensagens produzidas durante as interações. Desta forma, o fluxo base, materializado pelo motor de regras, pode ser ampliado, como por exemplo, incluindo integrações com agentes de IA ou registros em outras tecnologias/ferramentas de preservação digital de

documentos além da *blockchain*.

Os registros considerados semanticamente relevantes são então consolidados nos componentes responsáveis pela persistência das evidências, incluindo mecanismos de armazenamento distribuído e infraestrutura de registro imutável. Dessa forma, a abordagem assegura que apenas os marcos críticos do processo sejam ancorados como provas rastreáveis, mantendo a correlação explícita entre atividades do workflow, identidades dos agentes envolvidos e registros persistentes. Em conjunto, esses elementos demonstram como a abordagem integra workflow, identidade digital descentralizada e arquitetura híbrida para oferecer rastreabilidade ponta a ponta de forma estruturada e auditável.

O uso de IDD é incorporado por meio do consumo de serviços, de forma que a complexidade inerente à gestão de identidades, credenciais e mecanismos criptográficos seja abstraída dos demais componentes da solução. Esses serviços devem oferecer funcionalidades de criação de identidades, emissão e verificação de credenciais, autenticação de agentes e assinatura de ações, permitindo que a abordagem utilize a IDD como um recurso transversal de rastreabilidade sem acoplamento direto às suas camadas internas. Dessa forma, ações e decisões podem ser vinculadas a identidades verificáveis de maneira auditável, atendendo aos requisitos de autoria, responsabilização e governança, ao mesmo tempo em que a solução preserva simplicidade arquitetural, interoperabilidade e facilidade de evolução.

Outro ponto relevante sobre a arquitetura está no princípio de que soluções de rastreabilidade em ambientes distribuídos devem equilibrar rigor auditável com viabilidade operacional. Nesse contexto, o uso de uma arquitetura híbrida, com separação clara entre componentes *on-chain* e *off-chain*, fornece a base necessária para que o *workflow* atue como mecanismo de coordenação entre execução operacional e registro de evidências. A distinção entre dados operacionais e registros imutáveis permite que o *workflow* controle quando informações devem ser tratadas de forma dinâmica e quando eventos críticos devem ser consolidados como provas rastreáveis, evitando o uso excessivo de mecanismos distribuídos de alto custo e complexidade.

Na camada *off-chain*, o workflow assume o papel de orquestrador do processo, coordenando a execução das etapas, a aplicação de regras, a coleta de dados e a interação com os agentes envolvidos. De forma conceitual, esse componente mantém a noção do estado corrente de cada instância de processo e, com base em definições previamente estabelecidas, determina quais ações são permitidas, quais informações são exigidas e quais validações devem ser aplicadas em cada momento. O workflow opera de maneira orientada a eventos, permitindo desacoplamento entre componentes, escalabilidade e rastreabilidade temporal, ao mesmo tempo em que preserva flexibilidade para evolução dos fluxos sem alterações estruturais no sistema.

A camada *on-chain*, por sua vez, não participa da execução contínua do processo, mas atua como camada de consolidação da rastreabilidade, recebendo apenas os eventos semanticamente relevantes definidos pelo *workflow*. Transições de estado, decisões finais e marcos críticos do processo são registrados de forma imutável, garantindo integridade e auditabilidade criptográfica. Nesse modelo, o *workflow* funciona como o elemento de ligação entre a execução operacional e a prova distribuída, determinando precisamente quais eventos devem ser ancorados como evidência e mantendo a correlação explícita

entre registros *off-chain* e seus correspondentes *on-chain*.

Assim, o *workflow* deixa de ser apenas um mecanismo de automação e passa a desempenhar um papel estrutural na solução de rastreabilidade. Ele coordena a progressão controlada do processo, assegura aderência às regras vigentes, preserva a ordem e o encadeamento dos eventos e define os pontos de consolidação auditável. Essa abordagem permite que a rastreabilidade emergja de forma sistêmica, como resultado da integração entre execução controlada, separação arquitetural e registro imutável, independentemente do domínio de aplicação.

4. Prova de conceito

A plataforma CarbonID constitui um ambiente multi-inquilino (*multi-tenant*) para armazenamento de dados rastreáveis, combinando tecnologias avançadas, como blockchain, armazenamento descentralizado e Identidade Digital Descentralizada (IDD) utilizando a abordagem apresentada na seção 3. Desta forma, a CarbonID fundamenta-se na experiência acumulada em projetos de pesquisa e desenvolvimento realizados no âmbito dos Grupos de Trabalho (GTs) da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), em especial: (i) a plataforma ChainID [Queiroz et al. 2021], que consistiu em uma plataforma para gestão de identidades descentralizadas com base em tecnologia blockchain; e (ii) a própria CarbonID, oferece serviços para gerenciar o ciclo de vida de um token de forma dinâmica e configurável. Embora inicialmente voltada ao mercado de créditos de carbono, a proposta é suficientemente ampla para atender a uma diversidade de aplicações que demandam transparência, rastreabilidade e governança descentralizada. A plataforma foi desenvolvida com o objetivo de abstrair a complexidade inerente ao mercado voluntário de carbono e facilitar a criação de tokens.

O fluxo utilizado no desenvolvimento baseia-se na relação proponente, certificadora e metodologia do ciclo de vida de projeto de créditos de carbono. Neste modelo, os proponentes submetem projetos que estão associados a uma metodologia de contabilização ou validação do projeto. As certificadoras possuem o papel de validar a viabilidade técnica e a contabilização do projeto. As metodologias definem o fluxo, práticas e análises a serem realizadas nas diversas fases do projeto. Um ponto importante, é que apenas certificadoras habilitadas na metodologia do projeto podem realizar validações. Neste contexto, a metodologia é um componente crucial e fundamental que atua como um conjunto de regras, procedimentos e critérios padronizados, cientificamente embasados, para medir, monitorar, reportar e verificar as reduções de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) ou o aumento da remoção de carbono por um projeto específico.

O acesso à prova de conceito pode ser realizado por meio do endereço <https://carbonid.com.br/>. Conforme ilustrado na Figura 2, a interface da plataforma apresenta diferentes funcionalidades relacionadas à abordagem proposta. A imagem (a) ilustra a geração da DID do usuário logado, no qual é possível gerar e gerenciar sua identidade digital, utilizada posteriormente para vincular ações, documentos e responsabilidades ao longo do processo. A geração do DID é realizada através de serviço da ChainID e o DID criado vinculado ao usuário. A imagem; (b) apresenta o formulário dinâmico de submissão de projetos, cuja estrutura é definida em tempo de execução pelo motor de regras a partir da metodologia selecionada, permitindo a exibição dinâmica de campos obrigatórios, validações e seções conforme regras versionadas.

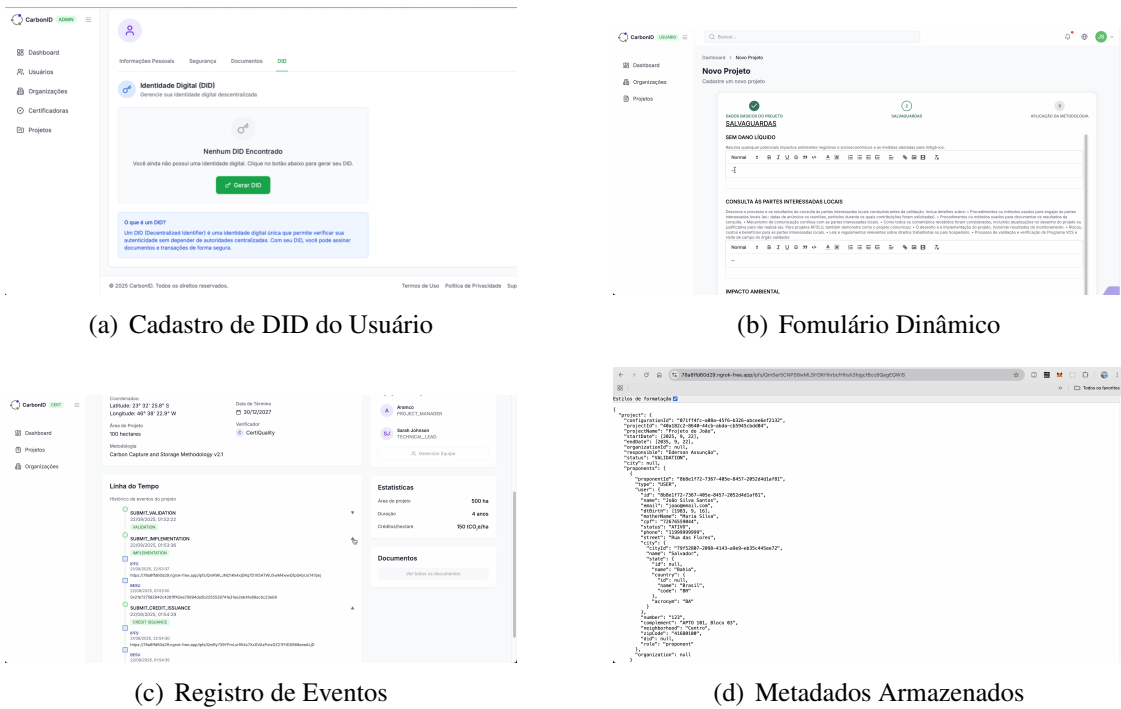


Figura 2. Interface de interação com o usuário

A imagem (c) exemplifica o registro de eventos do projeto, no qual são apresentados, de forma cronológica, os marcos relevantes do ciclo de vida, como submissões, validações, certificações e demais transições de estado, garantindo rastreabilidade temporal e auditabilidade do processo. Por fim, a imagem (d) mostra os metadados armazenados, evidenciando a estrutura de dados utilizada para correlacionar projetos, atores, estados, documentos e evidências, permitindo a reconstrução completa do histórico do projeto. Em conjunto, as interfaces ilustradas demonstram como a abordagem integra identidade digital, formulários orientados a regras, *workflow* automatizado e registro estruturado de eventos para prover rastreabilidade ponta a ponta.

Todos os eventos relevantes, como submissões, validações, certificações, emissões e aposentadorias de créditos são distribuídos a consumidores através de mensagens publicadas no *Broker* de mensageria RabbitMQ e, por meio destes consumidores, são armazenados metadados de rastreáveis na *blockchain* Hyperledger Besu e no registro de dados descentralizado IPFS, de modo a garantir a imutabilidade, integridade e auditabilidade de todas as transações. Esses consumidores foram desenvolvidos com Spring Boot e Java. Novas integrações podem ser adicionadas através do consumo de mensagens do RabbitMQ, promovendo integração e extensibilidade. Um diferencial importante da solução é o uso de tokens não fungíveis (NFTs), baseados nos padrões ERC-721 e ERC-1155, que representam o ativo, que neste caso de uso é o créditos de carbono.

A Figura 3 ilustra o fluxo de registro de metadados na qual 1) os eventos são gerados pelo *Workflow* e Motor de Regras, 2) o RabbitMQ encaminha os eventos para os consumidores, 3) cada consumidor realiza uma operação específica: *IPFS Consumer* publica o metadado extraído no IPS e o *Blockchain Consumer* publica os dados do projeto através de contrato vários inteligentes no *Hyperledger Besu*; e 4) os consumidores regis-

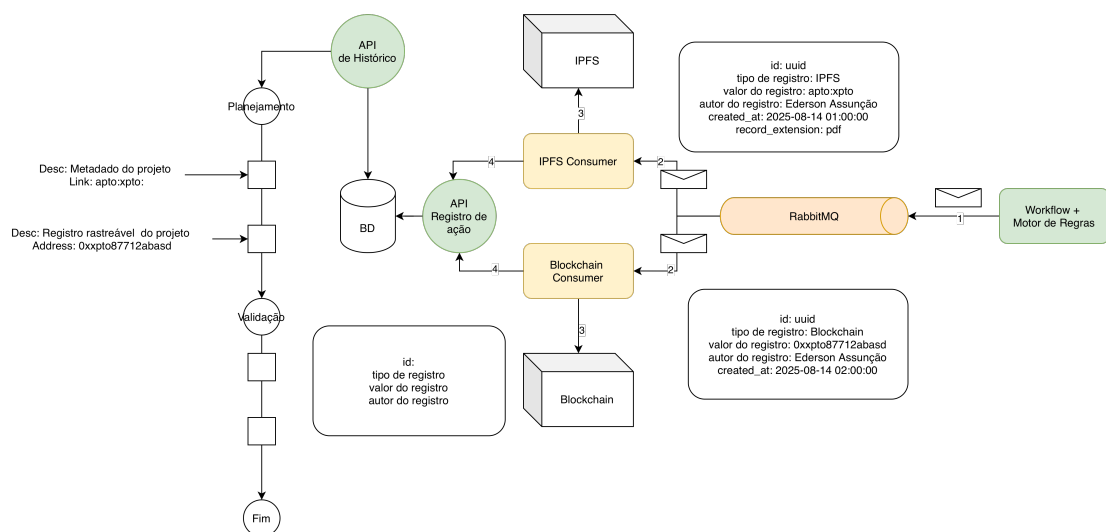


Figura 3. Registro Histórico dos eventos.

tram as ações realizadas (publicação na Besu e no IPFS) na API de registro de ações. Os dados apresentados na imagem (c) da Figura 2 são obtido a partir da API de Histórico que monta os eventos em ordem cronológica. Esta solução foi integrada com o ambiente de experimentação do *Testbed* RNP.

5. Conclusão

A abordagem apresentada neste trabalho propõe um modelo arquitetural para soluções de rastreabilidade baseado na integração entre arquitetura híbrida *on-chain/off-chain*, governança de processos orientada por metodologias versionadas, automação por meio de motores de regras e *workflows*, e uso de *IDDs* para vinculação verificável de responsabilidades. Essa combinação permite tratar a rastreabilidade como uma propriedade sistêmica, assegurando auditabilidade, transparência e controle formal do ciclo de vida de processos e ativos, independentemente do domínio de aplicação.

A plataforma CarbonID é utilizada como estudo de caso para demonstrar a viabilidade prática da abordagem proposta no contexto do mercado de créditos de carbono. A aplicação da abordagem na CarbonID evidenciou a capacidade de suportar rastreabilidade ponta a ponta, flexibilidade na aplicação de metodologias, controle de papéis e permissões, e integração entre dados operacionais e registros imutáveis. Elementos como a emissão de ativos digitais rastreáveis e o uso de armazenamento distribuído para evidências documentais reforçam a aderência da plataforma aos requisitos funcionais definidos pela abordagem.

Os resultados obtidos com o estudo de caso indicam que a abordagem é aplicável a outros domínios que demandam rastreabilidade e certificação digital. Como trabalhos futuros, vislumbra-se a aplicação do modelo proposto em diferentes cadeias produtivas e sistemas regulados, como cadeias agroalimentares, processos de produção sustentável e logística, explorando sua capacidade de adaptação a distintos contextos normativos e operacionais.

Disponibilidade de Artefatos

Os artefatos de implementação associados à abordagem apresentada neste trabalho, incluindo código-fonte e componentes da plataforma utilizada como estudo de caso, não puderam ser disponibilizados publicamente em razão de questões de sigilo e confidencialidade, uma vez que a solução encontra-se em potencial de registro e comercialização de serviço. Contudo, estão disponíveis o site oficial da prova de conceito, <https://carbonid.com.br/>, informações sobre o projeto e link de acesso ao ambiente de experimentação utilizando o usuário admin@admin.com e a senha admin, permitindo a compreensão, análise e validação da implementação da abordagem.

Referências

- Agrawal, T. K., Kumar, V., Pal, R., Wang, L., and Chen, Y. (2021). Blockchain-based framework for supply chain traceability: A case example of textile and clothing industry. *Computers & Industrial Engineering*, 154:107130.
- Azevedo, P., Gomes, J., and Romão, M. (2023). Supply chain traceability using blockchain. *Operations Management Research*, 16:1359–1381.
- Bechini, A., Cimino, M. G. C. A., Marcelloni, F., and Tomasi, A. (2008). Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business. *Information and Software Technology*, 50(4):342–359.
- Francisco, L., Bonacin, R., and De Franco Rosa, F. (2022). A Study on the Application of Blockchain in Carbon Trading Systems. In *2022 IEEE/ACS 19th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pages 1–6.
- Greve, F. G., Sampaio, L. S., Abijaude, J. A., Coutinho, A. C., and Queiroz, S. Q. (2018). Blockchain e a revolução do consenso sob demanda. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) — Minicursos*. SBC.
- Jansen-Vullers, M. H., van Dorp, C. A., and Beulens, A. J. M. (2003). Managing traceability information in manufacture. *International Journal of Information Management*, 23(5):395–413.
- Kshetri, N. (2018). Blockchain’s roles in strengthening cybersecurity and protecting privacy. *Telecommunications Policy*, 42(4):315–328.
- Queiroz, S., Greve, F., Sampaio, L., and Marques, E. (2021). Plataforma para gestão de identidades descentralizadas baseada em blockchain. In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*, pages 29–42. SBC.
- Rejeb, A., Keogh, J. G., Wamba, S. F., and Treiblmaier, H. (2021). Potentials of blockchain technology for supply chain management: A literature review. *Management Review Quarterly*, 71(4):919–969.
- Rejeb, A., Rejeb, K., Keogh, J. G., and Treiblmaier, H. (2023). Supply chain traceability using blockchain technology: A systematic literature review. *Information Systems and e-Business Management*, 21:613–658.
- van der Aalst, W. M. P. (2016). *Process Mining: Data Science in Action*. Springer.
- Zhang, G., Chen, S.-C., and Yue, X. (2024). Blockchain technology in carbon trading markets: Impacts, benefits, and challenges. *Energies*, 17(13).