

Arquitetura de *blockchain* Permissionada para Aplicações Web 3.0: Caso de Uso na Transferência do Cuidado em Saúde

Matheus Lázaro Honório da Silva¹, Eliomar Araújo de Lima¹, Fábio M. Costa¹, Sergio T. Carvalho¹, Valdemar Vicente Graciano-Neto¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Caixa Postal 131 — 74001-970 — Goiânia — GO — Brasil

matheus.lazaro@discente.ufg.br

{eliomar|fmc|sergiocarvalho|valdemarneto}@ufg.br

Abstract. This paper presents a permissioned blockchain-based architecture that advances both the scientific understanding and practical implementation of distributed healthcare solutions in Web 3.0 contexts. Unlike approaches that address technologies such as blockchain, AI, edge computing, and immersive environments in isolation, this study integrates them to tackle challenges in transfer of care (also known as transitional care) scenarios. It proposes a hybrid on-chain/off-chain architecture that ensures traceability, governance, and security across institutions. The solution incorporates digital twins, AR/VR interfaces, and 5G/Wi-Fi 6E connectivity to support real-time clinical decision-making and enrich interactions between patients and healthcare professionals. The Proof of Concept (PoC) demonstrates how a permissioned blockchain can optimize auditing, reduce reliance on intermediaries, and enable decentralized data management. The analysis indicates that the proposed architecture contributes to building safer and more transparent healthcare systems.

Resumo. Este artigo apresenta uma arquitetura baseada em blockchain permissionada que avança o entendimento científico e a implementação de soluções de saúde distribuídas no contexto da Web 3.0. Diferente de abordagens que tratam tecnologias como blockchain, IA, computação de borda e imersividade de forma isolada, este estudo as integra para enfrentar desafios na transferência de cuidado. Propõe-se uma arquitetura híbrida on-chain/off-chain, com rastreabilidade, governança e segurança entre instituições. A solução incorpora gêmeos digitais, interfaces AR/VR e conectividade 5G/Wi-Fi 6E para apoiar decisões clínicas em tempo real e enriquecer interações entre pacientes e profissionais. A Prova de Conceito (PoC) demonstra como uma blockchain permissionada pode otimizar auditorias, reduzir dependência de intermediários e viabilizar a gestão descentralizada de dados. A análise indica que a arquitetura contribui para sistemas de saúde mais seguros e transparentes.

1. Introdução

Na sociedade contemporânea, a transformação digital tem provocado mudanças significativas em diversos setores, sendo a saúde um dos mais impactados. O avanço de tecnologias digitais tem impulsionado a criação de sistemas clínicos distribuídos e interoperáveis, capazes de lidar com o aumento exponencial do volume, da variedade e da sensibilidade

dos dados gerados durante o cuidado médico. A digitalização é motivada pela necessidade de melhorar a eficiência, a segurança e a qualidade do atendimento, promovendo melhores resultados clínicos e experiências enriquecidas para pacientes e profissionais.

Contudo, o crescente acúmulo de dados clínicos, provenientes de exames, diagnósticos, sensores biométricos e interações remotas, impõe novos desafios. A centralização dessas informações em sistemas tradicionais representa um risco significativo à privacidade, à integridade e à rastreabilidade dos registros médicos. Situações como reidentificação indevida, vazamentos de dados e manipulações não autorizadas comprometem a confiabilidade dos sistemas e limitam o uso seguro de informações em contextos sensíveis, como pesquisa e análise preditiva. Estudos recentes, como [Raso et al. 2024], demonstram que identificadores diretos e quase-identificadores presentes em padrões como o FHIR¹ tornam o compartilhamento seguro de dados um desafio, mesmo em ambientes regulados, exigindo o uso de técnicas rigorosas de anonimização e pseudonimização.

Diante desse cenário, torna-se necessário repensar a arquitetura das soluções digitais em saúde, buscando incorporar atributos como imutabilidade, governança distribuída, auditabilidade e controle granular de acesso. Para atender esses requisitos de segurança e de transparência, a Web 3.0 se apresenta como uma alternativa com grande potencial, na medida em que articula tecnologias emergentes como *blockchain*, gêmeos digitais, inteligência artificial (IA), realidade aumentada/virtual (AR/VR), computação de borda e redes 5G. Em especial, o uso de redes *blockchain* permissionadas possibilita o registro e compartilhamento de informações clínicas de forma transparente, segura e auditável, respeitando os princípios de privacidade, descentralização e interoperabilidade.

Este artigo propõe uma arquitetura distribuída baseada em *blockchain* permissionada, implementada com *Hyperledger Fabric*, que integra tecnologias da Web 3.0 para prover suporte a aplicações de transferência de cuidado em saúde. A proposta adota uma abordagem híbrida *on-chain/off-chain*, combinando contratos inteligentes (*chaincodes*), APIs RESTful, armazenamento *off-chain* com MinIO² e orquestração via NestJS, além de incorporar as demais tecnologias acima mencionadas.

Soluções baseadas em *Hyperledger Fabric* têm se destacado nesse contexto por sua aderência a domínios regulados, como o da saúde. Sua arquitetura modular, com canais privados, autenticação via certificados digitais e consenso configurável, atende aos requisitos normativos de segurança e controle de acesso [Antwi et al. 2021]. Estudos recentes ressaltam que abordagens híbridas de armazenamento *on-chain/off-chain* têm sido eficazes na preservação da integridade e da escalabilidade em aplicações clínicas [Satybaldy et al. 2022, Eren et al. 2025], enquanto a integração com tecnologias emergentes tem viabilizado ecossistemas imersivos, inteligentes e distribuídos [Siddiqi et al. 2025, Vasiliu-Feltes et al. 2023].

Embora essas tecnologias emergentes potencializem experiências clínicas imersivas, diagnósticos inteligentes e processamento local de sinais vitais, é a *blockchain* que provê a base confiável para garantir integridade, rastreabilidade, controle de acesso e

¹FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) é um padrão internacional para a representação e troca de informações em saúde, desenvolvido pela HL7.

²Servidor de objetos para armazenamento distribuído de arquivos (<https://min.io/>).

governança entre múltiplas instituições. Nesse sentido, o diferencial da proposta está em consolidar a *blockchain* como o núcleo de confiança de um ecossistema distribuído, auditável e interoperável, habilitando a composição de aplicações Web 3.0 em saúde com segurança verificável de ponta a ponta.

Este estudo apresenta uma Prova de Conceito (PoC) que investiga a viabilidade técnica dessa arquitetura e analisa os benefícios da adoção de *blockchain* permissionada como eixo estruturante para a integração segura e transparente de tecnologias digitais emergentes na saúde.

O artigo está estruturado como se segue. A Seção 2 aborda a fundamentação teórica que embasa a proposta. A Seção 3 discute a arquitetura geral para aplicações clínicas baseadas n Web 3.0, evidenciando a integração entre *blockchain*, orquestração e armazenamento distribuído. A Seção 4 descreve as principais tecnologias empregadas na solução, enquanto a Seção 5 apresenta a interface de gerenciamento da *blockchain*. Já a Seção 6 trata da avaliação da proposta por meio de um caso de uso que trata do problema da transferência de cuidado. Por fim, a Seção 7 apresenta os resultados e a Seção 8 discute limitações e propõe direções futuras.

2. Fundamentação teórica

2.1. *Blockchain* em saúde e tecnologias emergentes

A transformação digital na saúde tem sido impulsionada por avanços em *blockchain* e outras tecnologias emergentes, com aplicações amplamente discutidas em contextos críticos. A integridade dos dados é uma das maiores preocupações, diante da sofisticação crescente dos ataques cibernéticos e dos riscos de manipulação de informações sensíveis. Segundo [Pandey et al. 2020], violações de integridade em registros clínicos podem levar a diagnósticos incorretos e erros terapêuticos. Por meio de avaliações com a técnica Fuzzy-AHP,³ o estudo identifica a *blockchain* como a técnica prioritária para garantir integridade e rastreabilidade, superando outras abordagens. Esses sistemas registram transações de forma transparente e imutável, mitigando vulnerabilidades dos modelos tradicionais.

Pesquisas recentes destacam o papel de tecnologias imersivas, como realidade aumentada (AR), realidade virtual (VR) e gêmeos digitais, na saúde digital personalizada. Interfaces imersivas, com dispositivos vestíveis e sensores biométricos, possibilitam representações virtuais detalhadas do paciente, apoioando monitoramento remoto e suporte clínico em tempo real [Song and Qin 2022]. Gêmeos digitais têm sido usados para avaliar sinais vitais e sintomas, permitindo predição clínica e intervenções precoces. Estudos mostram que sua integração com realidade estendida (XR) pode otimizar o ciclo de vida de dispositivos médicos, do design ao treinamento e sustentabilidade [Rowan 2024]. Combinadas com *blockchain*, essas tecnologias viabilizam o registro seguro e auditável de interações e eventos clínicos, promovendo rastreabilidade e confiança nos ecossistemas digitais de saúde.

A convergência entre IA, computação de borda (*edge computing*) e *blockchain* tem viabilizado soluções clínicas distribuídas, seguras e com resposta em tempo real. Modelos de IA em saúde processam grandes volumes de dados heterogêneos (como imagens

³Fuzzy-AHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) combina AHP e lógica fuzzy para priorização de soluções sob múltiplos critérios e incertezas, sendo usada em [Pandey et al. 2020] para identificar *blockchain* como abordagem mais eficaz na integridade de dados em saúde.

médicas e sinais fisiológicos) para apoiar diagnóstico, triagem, e atendimento personalizado. A computação de borda permite o processamento local desses dados, reduzindo latência e exposição, além de aumentar a eficiência em aplicações sensíveis. Integrada à *blockchain*, essa arquitetura garante desempenho, imutabilidade e auditabilidade dos dados. Em [Almalki et al. 2022], os autores mostram que a combinação de dispositivos *IoMT*,⁴ *edge computing* e *blockchain* permite uma estrutura distribuída e segura de apoio à decisão clínica, com dados processados localmente e resultados registrados de forma confiável em uma rede *Hyperledger Fabric*. Essa integração fortalece os pilares da Web 3.0 na saúde, promovendo escalabilidade, interoperabilidade e confiança na gestão de dados clínicos.

2.2. *Blockchain permissionada e integração dos habilitadores da Web 3.0*

Redes *blockchain* permissionadas têm se destacado como um dos pilares de arquiteturas distribuídas na Web 3.0, especialmente em domínios que exigem governança institucional, segurança robusta e rastreabilidade verificável, como a saúde. Ao contrário de *blockchains* públicas, redes como *Hyperledger Fabric* permitem consórcios com regras explícitas de governança, autenticação via certificados digitais e controle de acesso granular, atendendo a requisitos normativos de privacidade. *Hyperledger Fabric* adota o modelo *execute-order-validate*,⁵ que separa a execução de contratos inteligentes da ordenação e validação de transações, viabilizando desempenho escalável, modularidade no consenso e suporte a linguagens generalistas [Androulaki et al. 2018]. Além disso, *Hyperledger Fabric* adota uma arquitetura modular, com suporte a canais privados, consenso configurável e contratos inteligentes (*chaincodes*) executados de forma isolada, garantindo não apenas a imutabilidade dos dados, mas também desempenho adequado em ambientes regulados. Essas características tornam a infraestrutura especialmente adequada para aplicações em saúde, que demandam políticas de confiança flexíveis, interoperabilidade organizacional, confidencialidade e privacidade seletiva, assim como rastreabilidade e auditoria verificável. A utilização de *blockchain* permissionada nesse contexto possibilita o controle de acesso granular, a responsabilização sobre o uso dos dados e a integridade de registros clínicos sensíveis, como demonstrado na implementação do projeto ICDS4IM, que aplicou *Hyperledger Fabric* para proteger e auditar dados provenientes de sensores de sinais vitais em unidades de terapia intensiva, com ênfase em imutabilidade, responsabilidade e privacidade [Guimarães et al. 2020].

Para suporte à interoperabilidade com os demais elementos que habilitam as funcionalidades da Web 3.0 (como serviços de IA, realidade imersiva e gêmeos digitais), a infraestrutura de *blockchain* pode ser integrada, por meio de uma API RESTful,⁶ com *gateways* de autenticação e serviços de armazenamento *off-chain*. O uso de *frameworks* modernos permite a abstração da lógica desses serviços. Contratos inteligentes em *Hyperledger Fabric* podem ser expostos por meio da API, promovendo a comunicação entre

⁴Internet of Medical Things (IoMT): conjunto de dispositivos médicos conectados que coletam, processam e transmitem dados de saúde em tempo real. [Almalki et al. 2022]

⁵Modelo de execução introduzido pelo *Hyperledger Fabric*, que reorganiza o fluxo tradicional de transações ao antecipar a execução para antes da ordenação e validação, permitindo maior paralelismo, flexibilidade nos modelos de confiança e resiliência a comportamentos não determinísticos [Androulaki et al. 2018].

⁶Interface de programação de aplicações baseada no princípio REST (*Representational State Transfer*), amplamente utilizado para comunicação entre sistemas distribuídos por meio do protocolo HTTP.

os diversos módulos do sistema e os habilitadores da Web 3.0. Em conjunto, esses habilitadores viabilizam a composição de ecossistemas descentralizados baseados em *dApps* (*decentralized applications*)⁷ funcionalmente mais ricos, interoperáveis e responsivos.

Além disso, a separação entre dados *on-chain* e *off-chain* permite gerenciar eficientemente ativos clínicos volumosos, como exames de imagem, vídeos e gráficos gerados por IA. Arquivos grandes são armazenados externamente, por exemplo no MinIO, enquanto seus *hashes* ficam registrados na *blockchain*, garantindo integridade, rastreabilidade e auditabilidade dos dados sensíveis [Muzaffar et al. 2024]. Essa arquitetura modular favorece a escalabilidade e facilita a integração com dispositivos conectados por redes como 5G e Wi-Fi 6E, ampliando o suporte a aplicações clínicas distribuídas e imersivas. Entre essas aplicações estão ambientes de realidade virtual, monitoramento com gêmeos digitais e análise contextual via IA, elementos centrais do metaverso em saúde [Chengoden et al. 2023].

2.3. Trabalhos relacionados

Diversos estudos têm investigado o uso de *blockchain* na gestão de registros eletrônicos de saúde (*EHRs*)⁸ buscando maior rastreabilidade e controle dos pacientes sobre seus dados. Em [Narayan et al. 2024], os autores mostram como a Web 3.0 permite a descentralização do gerenciamento de informações em saúde, favorecendo maior autonomia do paciente e protocolos de criptografia avançada. No entanto, as soluções ainda carecem de convergência com tecnologias emergentes da Web 3.0, como gêmeos digitais, metaverso e IA.

Alguns trabalhos enfatizam recursos imersivos para aprimorar o atendimento clínico. [Rane et al. 2023] destacam o uso de realidade aumentada (AR) e virtual (VR) em cenários de treinamento e interação remota, mas ressaltam a falta de integração com *blockchain* para garantir segurança e rastreabilidade dos dados. Em [Chengoden et al. 2023], os autores reforçam a importância de combinar gêmeos digitais, IA e redes 5G em um ecossistema interoperável, embora as propostas ainda não abordem plenamente a unificação dessas tecnologias em um arcabouço único.

Outros trabalhos priorizam computação de borda e registro em *blockchain*, mas não avançam em aspectos imersivos. Em [Almaliki et al. 2022], os autores propõem uma arquitetura integrada para monitoramento em tempo real, sem contemplar gêmeos digitais. Por sua vez, em [Singh et al. 2020], os autores descrevem BlockIoTIntelligence, uma proposta focada em IA distribuída e *blockchain*, sem explorar AR/VR. Já em [Jameil and Al-Raweshidy 2024], os autores tratam de gêmeos digitais com IA e IoT, porém sem abordarem *blockchain*. A proposta deste trabalho avança ao integrar contratos inteligentes a ambientes imersivos e gêmeos digitais, garantindo auditabilidade na comunicação de dados clínicos.

⁷ Aplicações descentralizadas executadas em redes *blockchain*, nas quais a lógica de negócio é controlada por contratos inteligentes ao invés de servidores centralizados.

⁸ *Electronic Health Records (EHRs)* são registros eletrônicos de saúde que armazenam informações clínicas dos pacientes ao longo do tempo, permitindo acesso estruturado, interoperável e seguro aos dados.

3. Arquitetura geral para aplicações clínicas distribuídas na Web 3.0

Esta seção discute a proposta de arquitetura que dá sustentação às aplicações de cuidado em saúde no contexto da Web 3.0, evidenciando como cada componente (incluindo a *blockchain*, dispositivos de borda, ambientes imersivos e armazenamento *off-chain*) se integra de modo coeso e escalável.

A Figura 1 apresenta a organização estrutural da solução, com blocos funcionais agrupados por níveis conceituais:

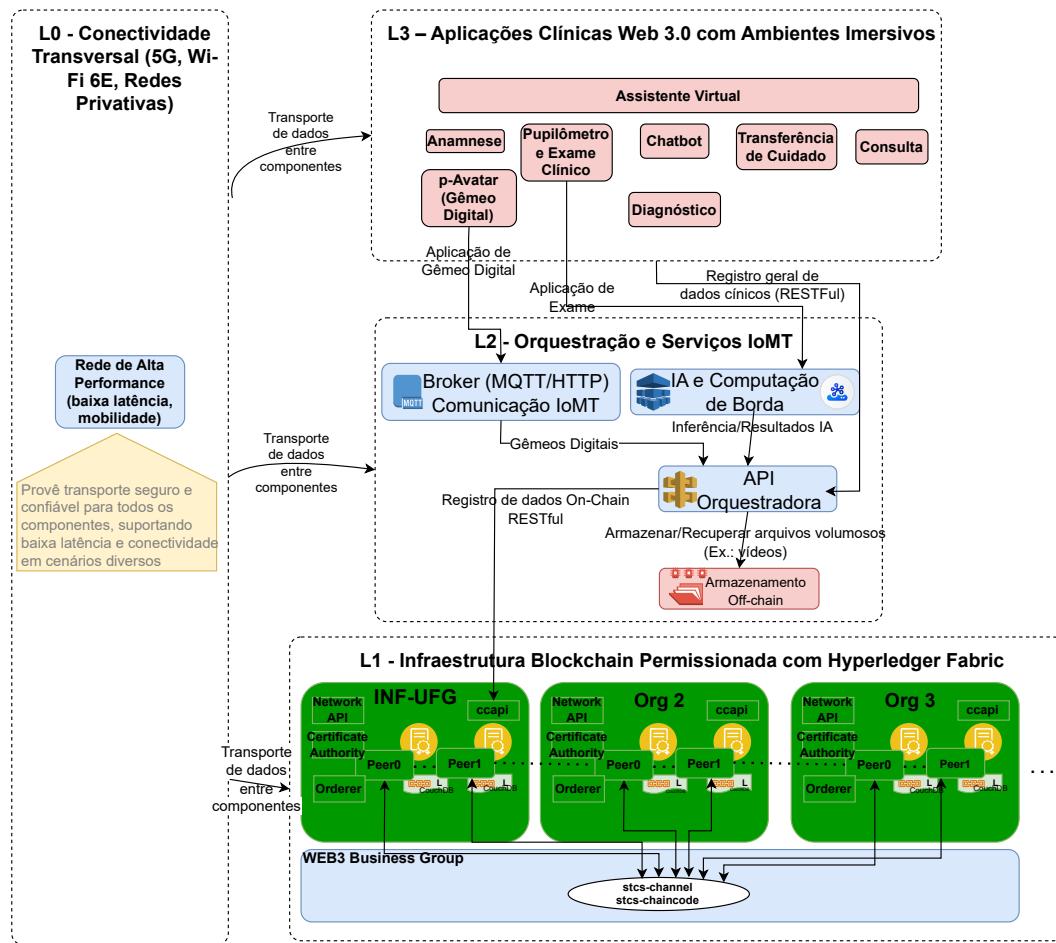


Figura 1. Arquitetura Geral de Aplicações Clínicas Distribuídas em Web 3.0

3.1. L0 – Conectividade Transversal (5G, Wi-Fi 6E, Redes Privativas)

O nível de conectividade opera como uma dimensão transversal em toda a arquitetura, sendo responsável por garantir o transporte seguro, confiável e de baixa latência entre os demais componentes. Tecnologias como 5G, Wi-Fi 6E e redes móveis privativas asseguram mobilidade e conectividade contínua para dispositivos IoMT, viabilizando a transmissão em tempo real de vídeos e dados clínicos, bem como a integração eficiente entre serviços de IA, *blockchain*, aplicações imersivas e *frontends* clínicos.

3.2. L1 – Infraestrutura *blockchain* Permissionada com *Hyperledger Fabric*

Este nível é estruturado como um consórcio com múltiplas organizações. Cada organização possui: *peers* (que executa transações) com *CouchDB* (para armazenamento do Ledger distribuído e descentralizado), que viabilizam os contratos inteligentes (*chain-codes*) e armazenam ativos clínicos de forma replicada; *Orderers*, responsáveis pela ordenação das transações; e *Certificate Authorities (CAs)*, que emitem certificados digitais para autenticação e controle de acesso. O canal `stcs-channel` hospeda o *chaincode* `stcs-chaincode`, responsável pela lógica de ativos clínicos como `Exam`, `Diagnosis`, `DigitalTwin` e `Consent`, garantindo rastreabilidade, imutabilidade e governança descentralizada.

3.3. L2 – Orquestração e Serviços IoMT

Este nível atua como elo para o fluxo de informações entre dispositivos, sensores, IA, *blockchain* e aplicações clínicas, assegurando consistência e interoperabilidade. Seus principais componentes incluem: *Broker MQTT/HTTP*, que gerencia a comunicação em tempo real com sensores e dispositivos médicos, transmitindo dados clínicos como sinais vitais e informações dos gêmeos digitais; IA e Computação de Borda, por meio da qual algoritmos como YOLO e KNN processam localmente vídeos e sinais clínicos, com menor latência e maior privacidade; API Orquestradora (NestJS), que expõe operações RESTful seguras para registrar, consultar e atualizar ativos clínicos na *blockchain*; e Armazenamento *Off-chain* (MinIO), que gerencia arquivos volumosos, como vídeos, cujos *hashes* criptográficos são registrados na *blockchain* para garantir integridade e auditabilidade.

3.4. L3 – Aplicações Clínicas Web 3.0 com Ambientes Imersivos

O nível superior da arquitetura abriga as aplicações clínicas utilizadas por pacientes e profissionais de saúde. Dentre os exemplos, destaca-se o Assistente Virtual, que atua como interface auxiliar de interação sobre os módulos clínicos. A solução também contempla serviços como Anamnese, *Chatbot*, Consulta e Transferência de Cuidado, que acessam dados estruturados para compor o histórico clínico e apoiar a tomada de decisão. O componente Pupilômetro e Exame Clínico consiste em um dispositivo que realiza a coleta e o envio de dados biomédicos para análise por um serviço baseado em IA (executado em servidores de borda). Por fim, o Gêmeo Digital representa o paciente, com sincronização de sinais vitais e eventos históricos, sendo utilizado em ambientes de realidade aumentada e virtual (AR/VR). Todas essas aplicações se conectam à API Orquestradora para registrar ou consultar dados na *blockchain*, promovendo uma jornada clínica segura, auditável e transparente.

4. Tecnologias utilizadas

Nesta seção, detalhamos os principais componentes tecnológicos específicos empregados na infraestrutura proposta (incluindo a própria rede *blockchain*, a camada de orquestração, o armazenamento *off-chain*, dispositivos de IA e conectividade em tempo real) de modo a dar suporte à arquitetura descrita na Seção 3.

4.1. *Hyperledger Fabric* e estrutura modular da rede

A adoção de uma rede *blockchain* permissionada como base da infraestrutura visa garantir integridade, rastreabilidade e auditabilidade de dados clínicos sensíveis em um ambiente distribuído. Em cenários como a transferência de cuidado em saúde, é fundamental

que eventos clínicos (como registros de exames, diagnósticos e consentimentos) sejam imutáveis, verificáveis e associados a entidades autenticadas. A *blockchain* permite eliminar intermediários de confiança, assegurar governança descentralizada e atender a requisitos regulatórios por meio de controle de acesso granular, autenticação via certificados digitais e histórico completo das transações.

Hyperledger Fabric foi escolhida como plataforma de *blockchain* permissionada para a PoC, por seu suporte a redes privadas, controle de acesso baseado em certificados e arquitetura modular. A rede pode ser composta por múltiplas organizações, como a organização INF-UFG (nesta *PoC*), que possui um *peer*,⁹ uma autoridade certificadora (*CA*)¹⁰ e conexão com o serviço de ordenação (*Orderer*).¹¹ O banco de dados *CouchDB*¹² é utilizado como *state database*,¹³ permitindo indexação e consultas ricas aos ativos clínicos registrados. O canal *stcs-channel* abriga o *stcs-chaincode*, responsável pela modelagem e manipulação de ativos como *Exam*, *Diagnosis*, *DigitalTwin* e *Consent*, assim como suas transações associadas.

4.1.1. Uso de CC-Tools para modelagem e exposição de ativos clínicos

Para facilitar o desenvolvimento e a exposição de ativos na rede *Hyperledger Fabric*, utilizou-se a ferramenta CC-Tools (*Chaincode Tools*),¹⁴ uma biblioteca desenvolvida para automatizar tarefas comuns na criação de *chaincodes*, incluindo operações CRUD, definição de relacionamentos entre ativos e exposição automática via API RESTful. Através do módulo *cc-api*, a solução permite que aplicações externas interajam com a *blockchain* sem necessidade de lidar diretamente com o SDK do Fabric. O uso de CC-Tools foi essencial na prototipação dos ativos clínicos *Exam*, *Diagnosis*, *Consent* e *DigitalTwin*, entre outros, assim como suas transações associadas, promovendo abstração da complexidade e ganho de produtividade no desenvolvimento.

4.2. Orquestração e exposição via APIs REST NestJS

O nível de orquestração foi implementado com NestJS, um *framework backend* em Node.js com estrutura modular, injeção de dependências e integração nativa com bibliotecas de autenticação e segurança. Esse nível orquestra a comunicação entre os diferentes habilitadores da Web 3.0, bem como com a *blockchain* e com o Servidor de Arquivos MinIO, expondo seus serviços por meio de uma API RESTful padronizada. Desta forma, a API oferece rotas (*endpoints*) para criação de exames, atualizações de consentimento de acesso, leitura de histórico de ativos, entre outras. A *API Orquestradora* viabiliza a autenticação (via JWT e PIN), roteamento de requisições e comunicação com serviços externos, como dispositivos AR/VR e armazenamento *off-chain*.

4.3. Armazenamento *off-chain* com MinIO

Arquivos clínicos volumosos, como vídeos de exames de imagem e gráficos gerados por IA, são armazenados fora da *blockchain* utilizando o sistema de arquivos MinIO.

⁹Nó que mantém o *ledger* e executa contratos inteligentes.

¹⁰Emite e valida certificados digitais.

¹¹Ordena transações antes da validação e inclusão no *ledger*.

¹²Banco NoSQL orientado a documentos, usado como *state database*.

¹³Armazena os estados atuais dos ativos na *blockchain*.

¹⁴<https://github.com/hyperledger-labs/cc-tools-demo>.

O conteúdo dos arquivos não é registrado diretamente na *blockchain*; apenas seus *hashes* criptográficos são vinculados aos ativos na rede para garantir integridade e rastreabilidade. O uso do MinIO permite versionamento, autenticação por chave e replicação dos dados sensíveis em infraestrutura privada, contribuindo para a eficiência do *ledger*.

4.4. Ambientes imersivos e gêmeos digitais

O ambiente de metaverso da PoC possui salas clínicas imersivas desenvolvidas na plataforma Unity, utilizando o SDK Meta XR para dispositivos de realidade aumentada e virtual. Nessas salas, pacientes e profissionais de saúde interagem entre si por meio de suas representações digitais. No caso do paciente, por exemplo, essa representação toma a forma do ativo *Digital Twin*, que agrupa dados provenientes de sinais vitais e eventos clínicos registrados ao longo do histórico do paciente. Essas interfaces imersivas fornecem suporte avançado ao diagnóstico e melhoram a experiência de uso em cenários de telemedicina e treinamento clínico.

4.5. IA em servidores de borda e processamento de exames

A análise automatizada de exames clínicos é realizada por algoritmos de IA executados em servidores de borda equipados com unidades de processamento gráfico (*GPUs*). Modelos como *YOLO* (*You Only Look Once*) e *KNN* (*K-Nearest Neighbors*) são empregados para processar vídeos de exames (como o exame pupilometria) e extrair parâmetros fisiológicos relevantes. Essa arquitetura descentralizada, baseada em computação de borda, reduz significativamente a latência do sistema e elimina a necessidade de envio de dados sensíveis para nuvens públicas, reforçando a privacidade dos pacientes.

4.6. Conectividade móvel de alto desempenho com 5G e Wi-Fi 6E

A infraestrutura de conectividade da PoC utiliza redes baseadas em tecnologias 5G e Wi-Fi 6E, com o objetivo de assegurar comunicação estável, de baixa latência e alta largura de banda entre os componentes do ecossistema distribuído. Esse nível de conectividade é essencial para viabilizar desempenho adequado em sessões imersivas em tempo real, assim como a sincronização de sensores biométricos com os gêmeos digitais e a transmissão contínua de dados clínicos, como vídeos de exames e gráficos gerados por IA.

5. Interface de gerenciamento da *blockchain*

A infraestrutura proposta contempla uma interface gráfica de gerenciamento automaticamente gerada a partir da modelagem de ativos clínicos realizada com a ferramenta CC-Tools. Essa interface proporciona um ambiente funcional para a administração dos dados registrados na *blockchain*, permitindo a visualização, manipulação e auditoria de ativos como Paciente, Exame, Diagnóstico, Consentimento, Médico e Gêmeo Digital. A Figura 2 mostra o *dashboard* autogerado pela CC-Tools com base no *chaincode* Hyperledger Fabric. Nela, é possível ver a lista de *assets* definidos, com opções de *history*, *view*, *edit* e *delete*, cujas manipulações são controladas pela API Orquestradora, em comunicação direta com a CC-API. O histórico completo de qualquer *asset* pode ser acessado via *ReadAssetHistory*, e cada alteração gera uma nova versão ancorada no *ledger*. A interface explicita que o modelo de dados é incremental: alguns registros são apenas acrescentados, enquanto outros admitem versões sucessivas, mantendo a rastreabilidade. Na versão atual, não há regra que restrinja modificações em certos *assets*, embora todas as ações permaneçam auditáveis.

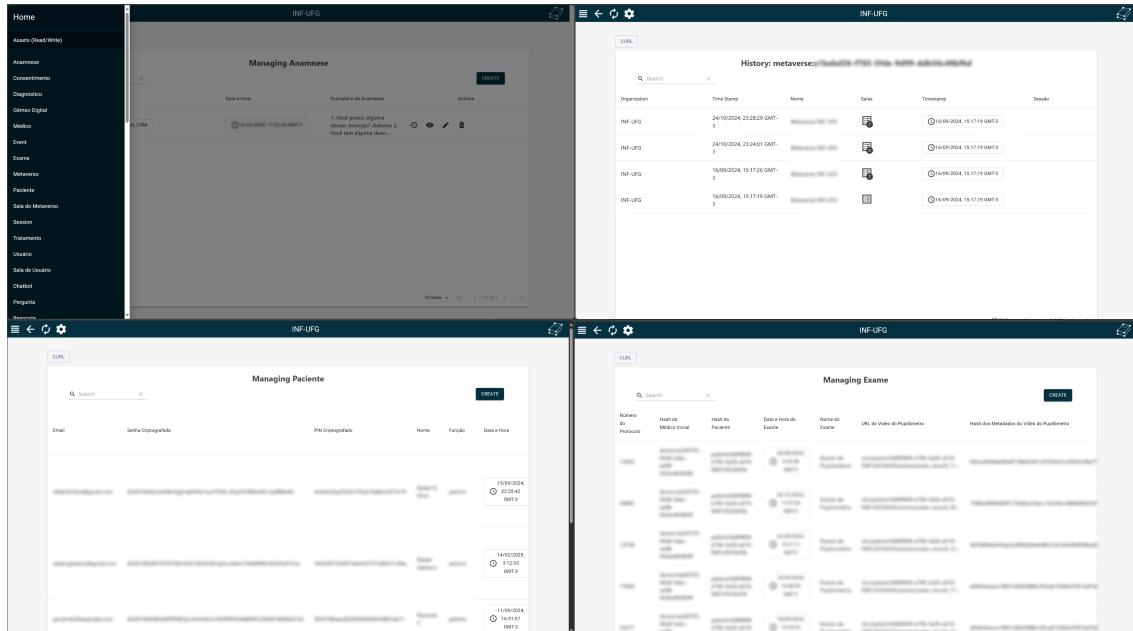


Figura 2. Interface de gerenciamento da Blockchain

Embora seja especialmente útil em fases de prototipação, testes e demonstrações técnicas, essa interface não deve ser utilizada em ambientes de produção com dados reais de pacientes. Por expor diretamente ativos clínicos sensíveis e funcionalidades críticas da rede, seu uso deve ser restrito a contextos controlados, com políticas rigorosas de segurança, autenticação e conformidade com legislações de proteção de dados, como a LGPD¹⁵ e a GDPR.¹⁶

Adicionalmente, a interface oferece funcionalidades de auditoria e histórico de modificações, com exibição de metadados como data, hora, organização responsável e conteúdo alterado, promovendo rastreabilidade e transparência. Relações entre ativos, como os vínculos entre Exam, Patient e DigitalTwin, são apresentadas de forma interativa por meio de tabelas e ícones de ação intuitivos, facilitando a navegação e a operação por usuários com diferentes níveis de familiaridade técnica.

6. Avaliação da proposta: Caso de uso na transferência de cuidado

Foi desenvolvida uma Prova de Conceito (PoC) aplicada ao processo de transferência de cuidado em saúde. Nesse fluxo, a integridade e a segurança dos dados são essenciais. Abaixo são descritas as principais etapas e o modelo de dados de *blockchain* adotado.

6.1. Fluxo de Operações e Transferência de Cuidado

O caso de uso foi delineado a partir de requisitos obtidos de uma análise do problema da transferência de cuidado [Mello et al. 2021]. Trata-se de uma fase sensível do percurso assistencial em saúde, na qual integridade, rastreabilidade e confidencialidade dos

¹⁵Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018): regulamenta o tratamento de dados pessoais no Brasil, assegurando direitos fundamentais de liberdade, privacidade e proteção aos dados dos cidadãos.

¹⁶General Data Protection Regulation (Regulamento (UE) 2016/679): legislação da União Europeia que estabelece normas para o tratamento de dados pessoais, aplicando-se a qualquer organização que processe dados de indivíduos localizados na UE.

dados são vitais. Toda a experimentação baseou-se em registros de simulação gerados manualmente a partir desses requisitos. Apesar de terem sido realizadas discussões com profissionais da área, ainda não se colocou em prática testes com pacientes em ambientes reais. No cenário controlado, em simulações, mostrou-se como uma rede *blockchain* permissionada pode viabilizar, de ponta a ponta, o percurso informacional: da coleta inicial (anamnese, exames, gêmeo digital) até a transferência efetiva do cuidado, preservando controle de acesso granular, trilha de auditoria imutável e governança distribuída.

6.2. Diagrama de ativos e suas relações

O modelo de dados da solução foi cuidadosamente definido para refletir as entidades críticas do domínio da saúde. A Figura 3 apresenta o diagrama de ativos (*Chaincode*) e suas relações, detalhando as principais entidades, como User, Exam, Diagnosis, Consent, Patient, DigitalTwin e Doctor.

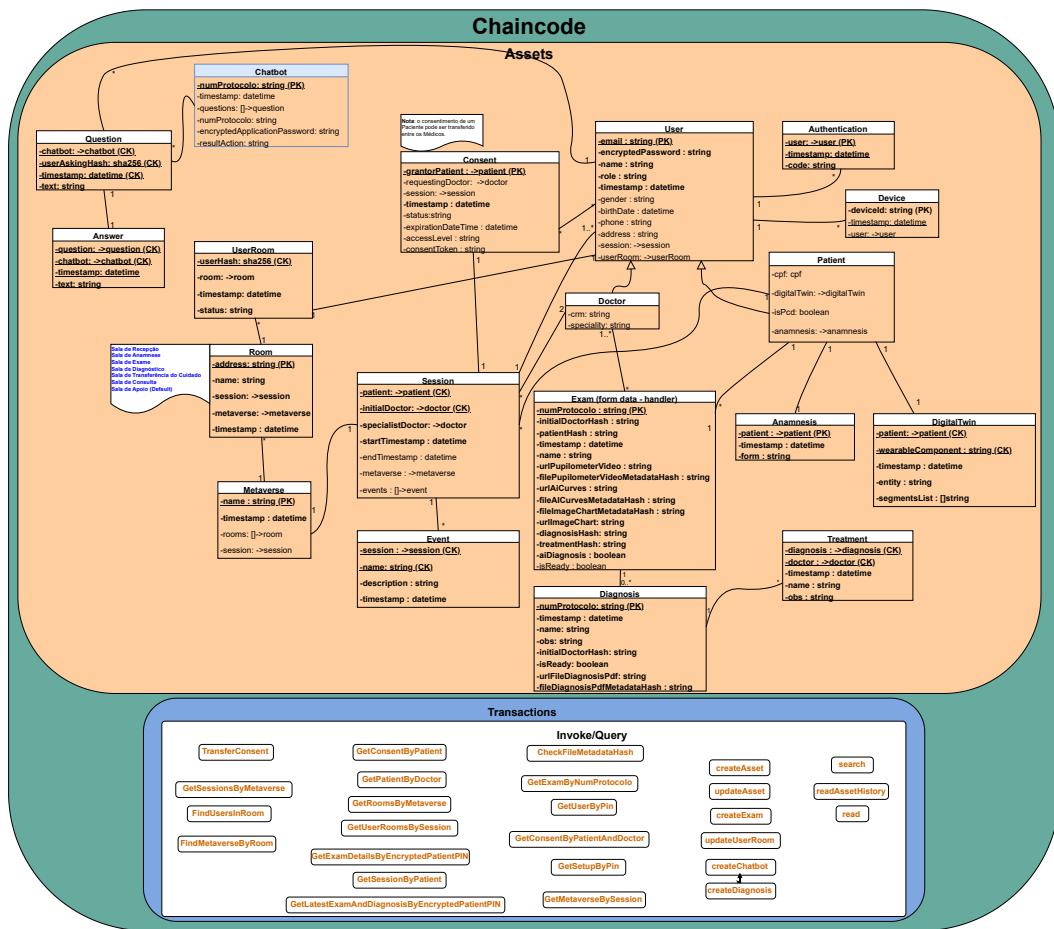


Figura 3. Diagrama de Ativos (*Chaincode*) e suas relações.

Cada ativo (*Asset*) possui atributos essenciais, como chaves primárias, *timestamps*, referências e *hashes* de arquivos, assegurando a imutabilidade e a integridade das informações registradas. A modelagem dos ativos permite o gerenciamento detalhado de cada etapa do fluxo de atendimento. Por exemplo, o ativo *Exam* armazena informações do exame de imagem (pupilometria, neste caso), incluindo URLs para vídeos e gráficos

gerados por IA, enquanto o ativo `Consent` gerencia o consentimento dos pacientes para compartilhamento de dados, possibilitando a transferência de cuidado.

A parte inferior do diagrama ilustra as principais transações implementadas no *chaincode*, tais como `TransferConsent`, `CreateDiagnosis`, `GetConsentByPatient`, `ReadAssetHistory` e `GetSessionsByMetaverse`, entre outras. Essas transações viabilizam a auditoria completa das operações, pois cada modificação é registrada na rede *blockchain*, permitindo rastreabilidade e segurança.

7. Discussão

Esta seção discute as principais características da arquitetura proposta, destacando seus benefícios no contexto da saúde digital distribuída. A infraestrutura baseada em *Hyperledger Fabric* demonstrou ser eficaz para aplicações Web 3.0, assegurando rastreabilidade, imutabilidade e segurança dos dados clínicos sensíveis, como exames, diagnósticos e consentimentos. O uso de contratos inteligentes (*chaincodes*) garantiu transparência e conformidade com requisitos regulatórios, além de facilitar auditorias completas.

A integração com tecnologias emergentes, como ambientes imersivos (AR/VR) e gêmeos digitais, ampliou a experiência do usuário, com potencial de contribuir para uma interação contextualizada e realista entre profissionais de saúde e pacientes. Dados capturados por sensores vestíveis foram processados em servidores de borda com modelos de IA e integrados ao ativo `DigitalTwin`, possibilitando o monitoramento contínuo e em tempo real do estado clínico dos pacientes. Essa abordagem colaborativa e descentralizada favorece a tomada de decisão e a continuidade do cuidado, mesmo em cenários multi-institucionais.

A composição modular da arquitetura (com camadas de conectividade 5G/Wi-Fi 6E, processamento local, APIs RESTful e armazenamento *off-chain*) promove interoperabilidade, escalabilidade e auditabilidade, requisitos essenciais para ecossistemas clínicos distribuídos e imersivos. Além disso, a abstração promovida por ferramentas como CC-Tools acelerou o desenvolvimento e facilitou a exposição de ativos da *blockchain* por meio de interfaces acessíveis e reutilizáveis.

8. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma arquitetura distribuída baseada em *blockchain* permissional (Hyperledger Fabric) como infraestrutura para aplicações Web 3.0 no cuidado em saúde. A solução integrou tecnologias emergentes (como gêmeos digitais, ambientes imersivos, IA, computação de borda e redes 5G/Wi-Fi 6E) por meio de uma abordagem híbrida *on/off-chain*, orquestrada via APIs RESTful. A Prova de Conceito validou a viabilidade técnica da proposta, evidenciando ganhos em segurança, rastreabilidade, interoperabilidade e suporte à decisão clínica em processos de transferência de cuidado.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas e devem ser consideradas em trabalhos futuros. Em cenários com alta carga transacional, a latência pode se tornar um fator limitante, demandando otimizações na infraestrutura da rede *blockchain*. A dependência de SDKs específicos em ambientes imersivos pode afetar a interoperabilidade entre dispositivos. Além disso, a operação contínua da rede exige uma camada de

orquestração e governança descentralizada, cuja implementação adequada ainda representa um desafio. Por fim, a cobertura parcial de dispositivos 5G exige soluções híbridas, o que pode comprometer a uniformidade e o desempenho da comunicação em tempo real.

Como direções futuras, propõe-se a integração de identidade digital descentralizada autossobrana, que confere ao indivíduo controle direto sobre sua identidade digital sem intermediários, modelo este que baseia-se em padrões para identificadores descentralizados (DIDs), que permitem identificação persistente sem autoridade central, e credenciais verificáveis (VCs), que viabilizam a comprovação seletiva de atributos com preservação da privacidade. Também prevê-se a criação de mecanismos de tokenização reputacional, representando reputação, desempenho e engajamento por meio de *tokens* simbólicos ou financeiros, aplicáveis a votações e governança distribuída. Outra linha promissora é a adoção de assinaturas múltiplas nos registros clínicos *on-chain*, permitindo corresponsabilidade de equipes por meio de coautorias digitais verificáveis e validação de consenso nos contratos inteligentes. Essas direções visam fortalecer a robustez, a governança distribuída e a conformidade regulatória da arquitetura proposta, aproximando a solução de contextos reais de adoção em redes clínicas interoperáveis, auditáveis e seguras.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

- [Almalki et al. 2022] Almalki, J., Al Shehri, W., Mehmood, R., Alsaif, K., Alshahrani, S. M., Jannah, N., and Khan, N. A. (2022). Enabling blockchain with iomt devices for healthcare. *Information*, 13(10).
- [Androulaki et al. 2018] Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., Caro, A. D., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., Muralidharan, S., Murthy, C., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, C., Vukolić, M., Cocco, S. W., and Yellick, J. (2018). Hyperledger fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains. *EuroSys '18*, pages 30:1–30:15, New York, NY, USA. ACM.
- [Antwi et al. 2021] Antwi, M., Adnane, A., Ahmad, F., Hussain, R., Habib ur Rehman, M., and Kerrache, C. A. (2021). The case of hyperledger fabric as a blockchain solution for healthcare applications. *Blockchain: Research and Applications*, 2(1):100012.
- [Chengoden et al. 2023] Chengoden, R., Victor, N., Huynh-The, T., Yenduri, G., Jhaveri, R. H., Alazab, M., Bhattacharya, S., Hegde, P., Maddikunta, P. K. R., and Gadekallu, T. R. (2023). Metaverse for healthcare: A survey on potential applications, challenges and future directions. *IEEE Access*, 11:12765–12795.
- [Eren et al. 2025] Eren, H., Karaduman, O., and Gençoglu, M. T. (2025). Security challenges and performance trade-offs in on-chain and off-chain blockchain storage: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 15(6).
- [Guimarães et al. 2020] Guimarães, T., Silva, H., Peixoto, H., and Santos, M. (2020). Modular blockchain implementation in intensive medicine. *Procedia Computer Science*, 170:1059–1064.

- [Jameil and Al-Raweshidy 2024] Jameil, A. K. and Al-Raweshidy, H. (2024). A digital twin framework for real-time healthcare monitoring: Leveraging ai and secure systems for enhanced patient outcomes. *Research Square*.
- [Mello et al. 2021] Mello, T. S. d., Miorin, J. D., Camponogara, S., Paula, C. C. d., Pinno, C., and Freitas, E. d. O. (2021). Factors that influence for effective intra-hospital care transfer: Integrative review. *Research, Society and Development*, 10(9):e38910918153.
- [Muzaffar et al. 2024] Muzaffar, M. S. P. A., Afianti, F., and Rokatenda, E. B. (2024). Implementation and performance analysis of non-blockchain-based and blockchain-based business licensing systems using hyperledger fabric. *The Indonesian Journal of Computer Science*, 13(5).
- [Narayan et al. 2024] Narayan, A., Weng, K., and Shah, N. (2024). Decentralizing health care: History and opportunities of web3. *JMIR Form Res*, 8:e52740.
- [Pandey et al. 2020] Pandey, A. K., Khan, A. I., Abushark, Y. B., Alam, M. M., Agrawal, A., Kumar, R., and Khan, R. A. (2020). Key issues in healthcare data integrity: Analysis and recommendations. *IEEE Access*, 8:40612–40628.
- [Rane et al. 2023] Rane, N., Choudhary, S., and Rane, J. (2023). Enhanced product design and development using artificial intelligence (ai), virtual reality (vr), augmented reality (ar), 4d/5d/6d printing, internet of things (iot), and blockchain: A review. *SSRN Electronic Journal*, pages 1–33.
- [Raso et al. 2024] Raso, E., Loreti, P., Ravaziol, M., and Bracciale, L. (2024). Anonymization and pseudonymization of fhir resources for secondary use of healthcare data. *IEEE Access*, 12:44929–44939.
- [Rowan 2024] Rowan, N. J. (2024). Digital technologies to unlock safe and sustainable opportunities for medical device and healthcare sectors with a focus on the combined use of digital twin and extended reality applications: A review. *Science of The Total Environment*, 926:171672.
- [Satybaldy et al. 2022] Satybaldy, A., Hasselgren, A., and Nowostawski, M. (2022). Decentralized identity management for e-health applications: State-of-the-art and guidance for future work. *Blockchain in Healthcare Today*, 5.
- [Siddiqi et al. 2025] Siddiqi, S. J., Saleh, S., Jan, M. A., and Tariq, M. (2025). Securing the vetaverse: Web 3.0 for decentralized digital twin-enhanced vehicle–road safety. *Future Generation Computer Systems*, 164:107555.
- [Singh et al. 2020] Singh, S. K., Rathore, S., and Park, J. H. (2020). Blockiotintelligence: A blockchain-enabled intelligent iot architecture with artificial intelligence. *Future Generation Computer Systems*, 110:721–743.
- [Song and Qin 2022] Song, Y.-T. and Qin, J. (2022). Metaverse and personal healthcare. *Procedia Computer Science*, 210:189–197.
- [Vasiliu-Feltes et al. 2023] Vasiliu-Feltes, I., Mylrea, M., Zhang, C. Y., Wood, T.-C., and Thornley, B. (2023). Impact of blockchain-digital twin technology on precision health, pharmaceutical industry, and life sciences: Conference proceedings, conv2x 2023. *Blockchain in Healthcare Today*, 6. Acesso em: 24 mar. 2025.