

ARTIGO DE PESQUISA/RESEARCH PAPER

OPALATRACER: rastreabilidade das gemas Opala em blockchain

OPALATRACER: Opal gems traceability in blockchain

Leone Rodrigues Santos   [Laboratório de Engenharia de Software | Universidade Estadual do Piauí | leonnerodriguez1@gmail.com]
Alcemir Rodrigues Santos   [Laboratório de Engenharia de Software | Universidade Estadual do Piauí | alcemir@prp.uespi.br]

 Universidade Estadual do Piauí, Av. Pres. Castelo Branco, 180 - Petecas, Piripiri - PI, 64260-000, Brasil.

Resumo. A Opala é uma pedra preciosa encontrada no estado do Piauí. Nessa região, é possível encontrá-la, apenas, na cidade de Pedro II e algumas regiões próximas a esta. A comercialização deste minério é feita, geralmente, como pedra bruta ou em forma de joia. Ela é comercializada assim tanto no comércio local, como também é exportada para outras regiões do Brasil. Contudo, existem outras pedras parecidas com a Opala e formas sintéticas dela, que podem ser facilmente confundidas com a pedra original. Assim, uma possível solução para o problema é a criação de um método certificador da origem do minério. Diante disso, este trabalho propõe o uso de *blockchain* aplicado à cadeia produtiva da Opala em Pedro II como forma de certificar a originalidade desta pedra preciosa. Através disso, obteve-se como resultado um sistema que garante a rastreabilidade e a originalidade da Opala de Pedro II.

Abstract. Opal is a precious stone found in the state of Piauí. In this region, it is possible to find it only in the city of Pedro II and some regions near it. The commercialization of this mineral is generally done as a rough stone or in the form of jewelry. It is sold both in the local market and exported to other regions of Brazil. However, there are other stones similar to Opal and synthetic forms of it that can be easily confused with the original stone. Thus, one possible solution to the problem is the creation of a method to certify the origin of the ore. Therefore, this work proposes the use of blockchain applied to the opal production chain in Pedro II as a way to certify the originality of this precious stone. Through this, a system was obtained that guarantees the traceability and originality of the Pedro II Opal.

Palavras-chave: Opala de Pedro II, *blockchain*, cadeia produtiva, rastreabilidade

Keywords: Opal from Pedro II, blockchain, supply chain, traceability

Recebido/Received: 24 January 2026 • **Aceito/Accepted:** 08 July 2026 • **Publicado/Published:** 11 September 2026

1 Introdução

A mineração de metais e pedras preciosas teve grande importância na perspectiva histórica do Brasil Colônia e do desenvolvimento do Capitalismo no ocidente. O país possui uma riqueza mineral expressiva configurada na presença de minerais metálicos, não metálicos e energéticos [Vale, 2003]. Entre esses minerais não metálicos, destaca-se a gema Opala. No território nacional, a principal categoria de mineração é a de pequena escala, ocorrendo majoritariamente nas localidades onde se encontram as jazidas. Esse tipo de mineração contribui diretamente para a diminuição da pobreza, uma vez que gera emprego, renda e encadeamento com outras atividades locais [Mathis *et al.*, 2018]. Tal realidade pode ser observada nas jazidas de Opala localizadas em Pedro II, no estado do Piauí.

Em Pedro II, existe uma organização com grande participação na produção dessa gema: a Cooperativa dos Garimpeiros de Pedro II (COOGP). Fundada em 2004 com apenas 34 associados, a cooperativa já contava com 180 associados em 2016, conforme apresentado por Saches *et al.* [2015]. Esse crescimento demonstra a relevância econômica da exploração da Opala para o município. A extração e a produção de joias configuram-se entre as principais atividades econômicas da cidade, movimentando também outros setores, como turismo, hotelaria e gastronomia, especialmente durante eventos como o Festival de Inverno.

As pedras extraídas em Pedro II ganharam notoriedade nacional principalmente devido ao seu elevado grau de pureza, favorecendo o desenvolvimento econômico e social da região ao longo do tempo [de Moura Sousa *et al.*, 2020]. Soma-se a isso a Indicação Geográfica concedida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) em 2012 [Sousa e dos Santos, 2021], garantindo um selo de procedência às gemas produzidas na região. A busca pelo fortalecimento desse selo representa o interesse do arranjo produtivo local em agregar valor à produção e ampliar a confiança do consumidor quanto à autenticidade da gema comercializada.

Entretanto, apesar da existência da Indicação Geográfica, ainda existem dificuldades relacionadas à rastreabilidade e à garantia de origem das Opalas comercializadas. A informalidade presente nos processos de extração, beneficiamento e comercialização dificulta o controle da cadeia produtiva e favorece situações em que pedras sintéticas semelhantes à Opala de Pedro II podem ser comercializadas como se fossem autênticas. Esse cenário compromete a valorização da produção local e pode configurar práticas fraudulentas previstas no artigo 171 do Código Penal Brasileiro [Brasil, 1940]. Além disso, a ausência de informações estruturadas sobre a origem e o histórico das gemas limita o controle da produção e a prospecção de novas jazidas [Marques, 2014].

Nesse contexto, tecnologias de rastreabilidade baseadas em *blockchain* têm sido amplamente utilizadas em cadeias produtivas naturais e manufaturadas para garantir integridade,

transparência e segurança das informações registradas. A *blockchain* consiste em uma estrutura distribuída de armazenamento de dados capaz de registrar transações de forma imutável e auditável por meio da utilização de contratos inteligentes. Como exemplo, em 2018, empresas como *Walmart* e *Sam's Club* passaram a exigir que seus fornecedores rastreassem produtos alimentícios utilizando essa tecnologia [Walmart, 2018], reduzindo o tempo de rastreamento da origem de determinados produtos de dias para segundos [Walmart, 2018].

Apesar dos benefícios proporcionados pela *blockchain*, a adoção dessas tecnologias ainda enfrenta importantes barreiras de entrada, especialmente em contextos compostos por usuários não técnicos. Conceitos como contratos inteligentes, *tokens*, carteiras digitais e registros distribuídos ainda não são tão comuns no cotidiano de pessoas que não estudam áreas da Tecnologia da Informação. Isso dificulta a compreensão e utilização por agentes que integram cadeias produtivas artesanais, como garimpeiros, lapidários e comerciantes locais. Dessa forma, a solução baseada em tecnologias descentralizadas não deve apenas garantir rastreabilidade e autenticidade dos ativos registrados, mas também abstrair a complexidade tecnológica inerente a essas ferramentas. Através disso, pretende-se oferecer interfaces acessíveis, intuitivas e compatíveis com a realidade dos usuários finais.

Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento da plataforma OPALATRACER, uma aplicação *Web* voltada para a rastreabilidade da cadeia produtiva da Opala de Pedro II. A solução utiliza recursos de *blockchain* por meio da plataforma *Hyperledger FireFly*, responsável por abstrair parte da complexidade relacionada à interação com contratos inteligentes e à comunicação com a rede distribuída. Dessa forma, o sistema permite que os agentes da cadeia produtiva realizem operações relacionadas ao registro, transferência e acompanhamento das gemas sem a necessidade de conhecimento aprofundado sobre tecnologias *Web3*.

Além da rastreabilidade e do reforço ao selo de Indicação Geográfica, o principal objetivo do OPALATRACER consiste em reduzir a complexidade cognitiva associada ao uso dessas tecnologias pelos usuários finais, de forma a tornar simples e acessível o processo de cadastro e transferência de Opalas. Para isso, optou-se pela utilização das Heurísticas de Nielsen [Nielsen, 1994] como método de avaliação da interface e da experiência do usuário.

O presente trabalho está organizado como segue. Na seção 2, são discutidos os fatores que fundamentam o problema da rastreabilidade, bem como os elementos e tecnologias utilizados para a resolução do problema. Na seção 3, são apresentados trabalhos relacionados à solução proposta e a comparação destes com este trabalho, de forma a colaborar com o desenvolvimento da solução do problema. Na seção 4, mostra-se como o projeto foi implementado para atingir os objetivos propostos. Na seção 5, o sistema é descrito, desde o processo do seu desenvolvimento até o seu uso com transferências de Opalas para exemplificação. Na seção 6, apresenta-se como o projeto foi avaliado. Por fim, na seção 7, são apresentados os resultados obtidos, assim como a conclusão e propostas de trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

Nesta seção, são apresentados o problema da rastreabilidade e da garantia de certificação do selo de indicação geográfica da opala, bem como as ferramentas e tecnologias que envolvem e fundamentam o presente trabalho. Diante disso, utilizou-se *blockchain*, uma tecnologia de alto valor agregado com bons índices de segurança de informações importantes do sistema; contratos inteligentes, *scripts* que automatizam certas ações nos nós da *blockchain*, *Web 3.0* e Aplicações descentralizadas. Além disso, são abordadas a cadeia de suprimento da Opala e o conceito de rastreabilidade e garantia de origem.

2.1 Blockchain

Blockchain, do inglês “corrente de blocos”, é uma tecnologia digital de alto valor agregado amplamente utilizada em criptomoedas. Esta também atua de forma não centralizada e possui altos índices de confiabilidade [Tasatanattakool e Techapanupreeda, 2018]. Suas principais características são: armazenamento, segurança e imutabilidade de informações. A primeira está relacionada ao fato de que é possível inserir dados nos nós da rede para armazená-los, de forma semelhante ao que acontece em bancos de dados. Soma-se a isso o fato de que cada bloco possui uma conexão, em *hash*, do bloco anterior. Com isso, não é possível fazer a remoção de um bloco sem afetar toda a cadeia, visto que o nó que estava adiante do nó removido perde a conexão com ele após a remoção e, uma vez que isto acontece, a rede perde a sua conexão plena entre os elos que a compõem, o que garante o princípio de imutabilidade. A partir disso, também é possível atingir um bom nível de segurança das informações, visto que a impossibilidade de remover um bloco da cadeia dificulta a manipulação das informações inseridas. Além disso, o uso de *blockchain* possibilita que organizações e agentes manipulem a inserção de dados na cadeia, mas não a remoção. Desta maneira, a imutabilidade é um fator que contribui diretamente para evitar possibilidades de falsificação de informações.

Existem dois tipos de *blockchain*: permissionada e não-permissionada. A primeira não pode ser acessada publicamente, isto é, apenas usuários com permissão podem acessar para executar ações específicas concedidas a eles pelos administradores da *blockchain* e precisam se identificar mediante certificados ou outros meios digitais aceitos pelos administradores [Investopedia, 2024]. Isso acontece porque este tipo exige mais controle e segurança. Soma-se a isso o fato de que *blockchain* permissionadas são utilizadas, geralmente, para fins empresariais. Já a segunda não possui essa característica, pois, normalmente são utilizadas para finalidades públicas, consequentemente exigem menos transparência e controle [Investopedia, 2024]. Sendo assim, nesse caso, não há a necessidade de identificação pelos usuários que desejam utilizar.

Em aplicações com *blockchain* também é comum o uso de *tokens*. *Tokens* são ativos digitais que podem representar unidades de valor ou um determinado objeto utilizado no contexto de uma rede *blockchain* [Hyperledger, 2025]. Eles também podem ser utilizados de diversas formas em uma rede *blockchain*, a depender dos objetivos que se pretende atingir na utilização desta. Os tipos mais comumente encontrados são fungíveis e não-fungíveis. O primeiro normalmente re-

presenta ativos que podem ser divididos e, consequentemente, os fragmentos podem ser transferidos, ao tempo em que o segundo representa ativos que são únicos e não podem sofrer nenhum tipo de divisão [Konagari *et al.*, 2023].

Uma *blockchain* da rede *Ethereum* é uma solução corporativa que utiliza recursos, protocolos e ferramentas para a plataforma *Ethereum*. Esta, por sua vez, é uma plataforma descentralizada que possibilita a criação e execução de contratos inteligentes e aplicativos descentralizados [Arigela e Voola, 2023]. Nesse sentido, ela oferece uma forma modular e flexível para a implementação e atualização de estados compartilhados, isto é, a manipulação da *blockchain* com uso de mecanismos de contratos inteligentes, além de algoritmos de consenso. Soma-se a isso o fato de que ele é um projeto de código aberto no *GitHub*.

Além disso, não existe administrador central ou mesmo armazenamento de dados de forma centralizada. Ao invés disso, a *blockchain* baseada em *Ethereum* apresenta três características que garantem sua eficiência. A primeira delas é a distribuição: todos os nós da rede possuem as mesmas informações. A segunda, imutabilidade: os nós da *blockchain* possuem *hashes* de bloco, que impedem tentativas de remoção de nós. Por fim, a terceira, segurança: as alterações nos nós da rede só podem ser feitas por organizações e agentes autorizados. Nesse sentido, após adicionar informações nos nós, estas estão protegidas de tentativas de manipulação, remoção e falsificação.

2.2 Rastreabilidade e garantia de origem

Rastreabilidade pode ser definida como a capacidade ou possibilidade de rastrear determinado produto, isto é, saber onde este se encontra em determinado momento e por onde ele passou até chegar àquele ponto. Exemplo disso são compras em determinadas plataformas da *internet*, como a *Amazon*, em que o usuário que compra um produto pode ver, através do *site* ou do aplicativo da empresa, onde este se encontra ao ser transportado até o comprador em um determinado intervalo de dias. Semelhantemente a isso, a rastreabilidade da Opala de Pedro II está relacionada ao monitoramento da mesma enquanto ela se move pela cadeia de suprimento, ao poder ser observada por diferentes agentes que estão envolvidos no processo da cadeia, como lapidadores, joalheiros e consumidores. Em conformidade com isso está a garantia de origem, visto que, por meio desse monitoramento, é possível saber de onde a gema se origina e por onde passou. Assim sendo, um importante exemplo do uso desta rastreabilidade como forma de instrumento legal para a garantia de originalidade e certeza do local de origem de um produto, como forma de proteção da produção cultural proveniente da cultura local, é o selo de Indicação Geográfica [Sousa e dos Santos, 2021].

2.3 Web 3.0 e aplicações descentralizadas

Web 3.0 é um conceito que representa tecnologias que utilizam propriedades descentralizadas e controle de dados na *internet*, geralmente utilizam *blockchain* para atingir essa finalidade. As principais características dessas tecnologias são: descentralização, que permite que os dados possam ser armazenados em diferentes nós ou redes e ainda garantem a consistência das informações; confiança, já que os dados podem ser armazenados em diferentes locais e dificultar ataques;

e interoperabilidade, que torna os dados portáteis, possibilitando aos usuários alternar entre os serviços e manter suas configurações.

Já os *DApps* são aplicativos descentralizados “full-stack”, comumente utilizado no mercado de criptomoedas e de procedimentos financeiros. As principais características desse tipo de aplicação são: descentralização, as informações devem estar distribuídas em nós de uma rede ou mais de uma rede; segurança e privacidade, com a proteção dos dados inseridos. Normalmente, esses aplicativos fazem uso de *blockchain* para atingir esses princípios.

2.4 Cadeia de suprimento da opala

De forma geral, as fases componentes da cadeia de produção de gemas e metais preciosos no Brasil são: extração mineral, lapidação artesanal ou industrial, artesanato mineral e demais serviços de diferentes segmentos, que podem atuar de forma independente no elo da cadeia, como logística de transporte e comércio [da Silva Rodrigues, 2009]. A partir disso, com a finalidade de melhorar as condições de extração e comercialização de Opala em Pedro II, as empresas decidiram se organizar em Arranjo Produtivo Local (APL) [de Moura Sousa *et al.*, 2020].

Nesse sentido, a cadeia de suprimento da Opala de Pedro II segue um modelo semelhante ao processo de extração e comercialização citado. Isso porque, após o processo de extração da gema, a cadeia produtiva é composta por: fornecedor, logística de abastecimento, fabricante, logística de distribuição, varejista e consumidor [de Moura Sousa *et al.*, 2020]. Soma-se a isso o fato de que a gema pode ser comercializada de diferentes formas: transformada em joia, apenas lapidada ou mesmo em forma bruta, isto é, excluindo-se o processo de lapidação. Porém, para o consumidor final, a comercialização da gema ocorre quase sempre em formato de joia ou lapidada. É importante destacar, também, que esse processo ainda ocorre, em muitos casos, de forma informal, em Pedro II.

A Figura 1 mostra a cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II em todas as etapas pelas quais a gema passa até a chegada ao consumidor final: extração mineral, fornecedor, logística de abastecimento, processo de lapidação artesanal ou industrial, logística de distribuição e obtenção por varejista ou consumidor. É importante destacar que existe uma certa independência entre os elos da cadeia, isto é, dada a informalidade desta cadeia de suprimentos, há mais de uma forma desta Opala chegar ao consumidor final, representada pelas setas.

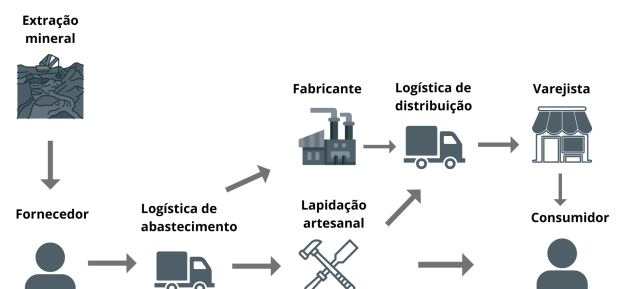


Figura 1. Cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II.

Fonte: Autoria própria.

Além disso, o processo de extração da gema, primeira

etapa da cadeia, é composto de três diferentes partes. A *primeira* delas é a remoção da vegetação, no qual retira-se a cobertura vegetal, caso exista, do local onde possivelmente encontram-se as gemas. A *segunda*, escavação, em que ocorre de fato a procura pelas gemas no solo. Por fim, na *terceira etapa* acontece o beneficiamento e disposição de rejeitos, que consiste em separar as gemas de rejeitos e classificá-las de acordo com sua luminescência, que vai do mais alto grau ao menor, chamados de extra (maior), média e leitosa (menor)[de Moura Sousa *et al.*, 2020].

Após isso, a gema é tomada em posse do fornecedor. Geralmente, o próprio garimpeiro que atua nas etapas citadas anteriormente é o responsável inicial pela Opala extraída. Em seguida, acontece o processo de distribuição, isto é, a logística de transporte. Nela, a gema segue para a etapa de lapidação. Esta pode ocorrer de forma industrial, através de empresas especializadas, ou de forma informal, por meio de lapidadores que tenham realizado o serviço em um ateliê. Em Pedro II, o mais comum é a segunda forma.

É corriqueiro, inclusive, que muitas joalherias utilizem da contratação de mão-de-obra terceirizada informal no processo de lapidação. Este meio, geralmente, possui um custo mais baixo para elas. Depois disso, a gema pode ser encaminhada para a loja de forma lapidada e/ou transformada em jóia, em forma de pingente ou brincos, por exemplo, pronta para a venda para o consumidor final.

3 Trabalhos relacionados

No trabalho de Sousa e dos Santos [2021] é discutida a necessidade de um instrumento de proteção legal que garanta a originalidade e certeza do local de origem de um produto/serviço. O referido estudo aborda o caso da gema da Opala de Pedro II. Isto é, parte-se do pressuposto de que é necessário a proteção da produção proveniente da cultura local, a Opala. Nesse sentido, busca-se mapear a Indicação Geográfica de proveniência da Opala de Pedro II com desenvolvimento territorial local.

A partir disso, é possível afirmar que a Opala é uma produção cultural local de Pedro II, visto que movimenta muitos setores de sua cadeia produtiva, além do fato de que grande parte das jazidas onde se pode encontrar a gema está localizada na cidade. Assim, é necessário que haja um meio de proteção legal que garanta a originalidade e a certeza do local de origem desse produto, conforme discutido por Sousa e dos Santos [2021]. Sem esse tipo de mecanismo, é possível comercializar pedras sintéticas ou semelhantes à Opala como se estas fossem originais para consumidores que acreditam que estão comprando o produto autêntico. Porém, no referido trabalho não é apresentada uma forma de garantir a proteção legal dessa produção local. Diante disso, o OPALATRACER busca meios para atender a essa necessidade, através da rastreabilidade e do uso de tecnologias com alto grau de segurança e imutabilidade.

Já no trabalho de Moura Sousa *et al.* [2020], foi proposto um estudo acerca da cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II. Nele, o principal objetivo foi apresentar a cadeia de produção da gema na cidade. Esta cadeia é composta por um conjunto de atores: fornecedor, logística de abastecimento, fabricante, logística de distribuição, varejista e consumidor. Somam-se a isso as etapas de extração da gema: remoção da

vegetação, escavação, beneficiamento e disposição de rejeitos. Ademais, o estudo apresenta os tipos de classificação de Opalas, de acordo com o grau de luminescência: extra, média e leitosa, do maior grau para o menor, respectivamente.

Portanto, visto que a cadeia de produção da Opala de Pedro II conta com muitos agentes e diversos processos, desde a extração da gema até a sua disponibilização como joia ou gema bruta, a criação de um sistema que possibilite o rastreamento dela através dessa cadeia de produção é viável. Ou seja, é possível utilizar um meio digital para acompanhar a gema em cada etapa dessa cadeia de modo que seja possível saber da origem e demais informações sobre quais etapas ela já passou. Logo, o OPALATRACER utiliza as bases do referido estudo para considerar a cadeia produtiva, os cenários e a classificação de Opalas.

De forma semelhante a esta possibilidade de rastreamento da Opala em Pedro II, no trabalho de Tejos *et al.* [2022] foi proposto um método com *blockchain* aplicado à cadeia de produção do cacau na Amazônia. A principal motivação para o referido estudo foi o fato de que muito do cacau produzido na Amazônia é vendido em outras cidades ou exportado. Entretanto, não se pode ter certeza de que o cacau obtido após comprado seja realmente da Amazônia ou de outra região. Assim, por meio do uso de *blockchain*, foi possível produzir um sistema no qual se pode registrar cada etapa da cadeia produtiva do cacau e possibilitar ao consumidor final a certeza da origem amazonense do produto. Para isso, o mencionado estudo utiliza, como ferramenta para manipulação da *blockchain*, o *Hyperledger* Hyperledger Fabric [2026] e, em sua arquitetura, utiliza um sincronizador local, com o banco de dados Mongo DB como um intermediário, que recebe os dados inseridos. Após receber esses dados, o sincronizador tenta enviar os dados para a *blockchain*. Caso seja possível, ele envia e o conteúdo é apagado do banco de dados. Diferentemente do que ocorre no OPALATRACER, que utilizou o *Hyperledger* Hyperledger FireFly [2024] como manipulador da *blockchain* e o banco de dados PostgreSQL como um recurso auxiliar para armazenamento de dados mutáveis.

Em de Araújo Mendes Brandão [2022], é apresentada uma discussão sobre a questão da viabilidade econômica, ambiental e social da cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II, com o objetivo de fornecer subsídios para a melhoria contínua desse processo. Com isso, objetivou-se propor a aplicação de práticas inovadoras e ecologicamente sustentáveis aplicadas a cadeia de suprimentos da gema, como meio para melhoria econômica e ambiental. Exemplos citados no trabalho são: o empreendedorismo coletivo, o aprimoramento de estudos geológicos prévios nos locais de extração da gema, a qualificação da mão de obra e os subsídios governamentais locais. No trabalho em questão, foi feita uma revisão bibliográfica, pesquisa de campo e estudo de caso, com a finalidade de levantar dados sobre o desenvolvimento e compreender as relações entre os atores locais e atividade da cadeia de suprimentos no âmbito econômico, social e ambiental. Semelhantemente a isso, o OPALATRACER oferece um mecanismo legal que melhora a transparência, originalidade e confiabilidade na comercialização da gema, agregando no âmbito econômico e formal.

Em Conchon e Lopes [2012], considera-se a rastreabilidade um elemento fundamental no contexto em que a glo-

balização dos mercados comerciais dificulta a identificação da origem das matérias primas. Numa circunstância de surgir um problema de saúde pública com contaminação alimentar, por exemplo, é possível identificar o lote contaminado e investigar a questão. O trabalho objetiva apresentar aspectos importantes do uso da rastreabilidade como fator importante na segurança alimentar. Nesse contexto, pretendeu-se conceituar fatores importantes e necessários para um programa de rastreabilidade. Além disso, demonstrar as diversas necessidades e interesses dos participantes da cadeia de carne bovina no processo.

A Tabela 1 apresenta os trabalhos citados anteriormente, bem como uma breve descrição de cada um. Soma-se a isto, uma comparação ao OPALATracer. Assim, é possível notar semelhanças e contribuições dos artigos citados no sistema, para que este possa atingir os objetivos planejados, bem como ressaltar as capacidades do OPALATracer.

4 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho foi dividida em três etapas: (i) levantamento de requisitos; (ii) modelagem e implementação; (iii) avaliação de usabilidade. Em seguida, descreve-se cada uma destas etapas.

4.1 Levantamento de requisitos

O levantamento de requisitos foi feito baseado principalmente em literatura científica, com base em trabalhos sobre rastreabilidade e exploração de gemas. A partir disso, foi desenvolvido o projeto com as etapas de modelagem, implementação e avaliação. A primeira consistiu na modelagem das telas com inspiração em histórias de usuário. A partir disso, na segunda etapa, ocorreu o desenvolvimento do sistema OPALATracer, com o desenvolvimento do *backend* e do *frontend*. Já a terceira etapa integrou o processo de avaliação da aplicação, com o uso de *Heurísticas de Nielsen* [Nielsen, 1994].

4.2 Modelagem e implementação

O sistema foi modelado e desenvolvido para usuários que se identificam como membros da cadeia de suprimento da Opala de Pedro II, isto é, agentes que atuam na lapidação, transporte, comercialização ou mesmo como consumidor dos produtos produzidos a partir da gema. A partir disso, o sistema permite o cadastro de usuários, também chamados de agentes, para atuar no rastreamento de Opalas, através de cadastro, recebimento ou transferência de Opalas.

Como fator importante na implementação deste trabalho, destaca-se o uso de *blockchain* da rede *Ethereum*, uma *blockchain* pública, utilizada para propósitos gerais para suportar contratos inteligentes e aplicações descentralizadas. Soma-se a isso o fato de que esta é amplamente utilizada em aplicações com *tokens* fungíveis e não-fungíveis, recurso utilizado para representar Opalas no *backend* do sistema. Isso porque Opalas são representadas por *tokens* não fungíveis, isto é, recursos únicos, que não podem se dividir. Essas características foram fundamentais para a escolha do uso dessa *blockchain* neste trabalho ao invés do uso de uma da rede *Hyperledger Fabric* [Hyperledger Fabric, 2026], pois, apesar desta ser frequentemente utilizada, não apresenta tanta flexibilidade no gerenciamento de *tokens*.

No sistema, foi feita uma divisão em relação à persis-

tência dos dados: determinados dados foram persistidos na *blockchain* e outros, no Banco de Dados. Isso ocorreu devido ao fato de que algumas informações devem permitir alterações, como o nome de usuário e a senha, e outras, não. Assim sendo, a persistência de dados imutáveis foi feita com a utilização da *blockchain*, com o armazenamento do identificador (ID) dos usuários, bem como todas as informações referentes à Opalas, tais como ID, local de extração, peso e tipo. Em adição a isso está o fato de que o ID de cada novo usuário no sistema é gerado automaticamente pelo *Hyperledger FireFly* [Hyperledger FireFly, 2024], ferramenta responsável pela manipulação da *blockchain*.

O *Hyperledger Firefly* é uma plataforma que pode ser usada para criar soluções de cadeia de suprimentos com componentes de contabilidade distribuída. Além disso, ele permite o uso de *blockchain* de diferentes redes: *Hyperledger Fabric*, *Ethereum*, *Tezos* ou outros. Esta, por sua vez, fornece alguns recursos para isso: componentes modulares para criar modelos de contratos inteligentes e interfaces de cliente, como a *Firefly sandbox*; lógica de negócios de contratos inteligentes, bibliotecas e SDK's. Além disso, o *Firefly* também é um projeto de código aberto no *GitHub*.

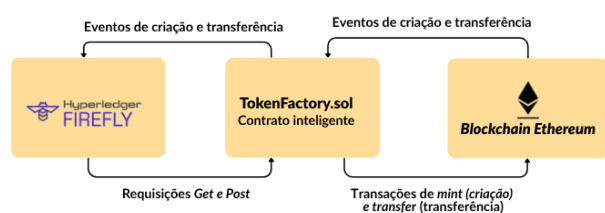
Assim sendo, a principal finalidade do *Hyperledger Firefly* é fornecer recursos para o uso de *blockchain* com aplicação em diversas utilidades que necessitem de segurança e imutabilidade. Exemplos disso são cadeias de suprimento, visto que podem ser usadas para ter certeza de que os lugares por onde determinado produto ou bem passou não podem ser manipulados. Isso significa que não se pode alterar essas informações com o intuito de falsificá-las. Nessa perspectiva, o *Hyperledger Firefly* fornece implementações de referência de itens organizados em conjunto através da criação de *stacks*, ou seja, "pilhas", que contém dependências, modelos de dados e contratos inteligentes. Ademais, a partir da criação destas pilhas, é possível ter acesso a uma interface web chamada *sandbox* e uma *Interface de Programação de Aplicação (API)* com *endpoints* do tipo *Post* e *Get*, em sua maioria, que podem ser utilizados para as mesmas funções através de aplicações que façam requisições nestes *endpoints* para adicionar ou retornar informações.

No momento da criação da "pilha" pelo *Hyperledger Firefly*, é possível escolher a *blockchain* que se pretende utilizar. No caso específico deste trabalho, ao iniciar uma "pilha" com a *blockchain* da rede *Ethereum*, o *Firefly* implanta, de forma automática, o contrato inteligente *Token Factory Smart Contract (TokenFactory.sol)*, responsável direto para a criação e manipulação de *tokens*. A partir disso, o *Firefly* abstrai as solicitações de *mint* (criação) e *transfer* (transferência) de *tokens* ao traduzir requisições *Get* e *Post* em transações *Ethereum* para monitorar eventos emitidos pelos contratos. A figura 2 ilustra esse cenário. É importante ressaltar que o OPALATracer utiliza somente o contrato nativo citado e não insere nenhum contrato inteligente adicional no projeto.

Inicialmente, foi desenvolvida uma plataforma web do sistema, isto é, um *website*. A escolha desse tipo de plataforma se deu com a finalidade de estar mais acessível para usuários, de forma geral. Isso acontece porque é possível acessá-la de diversos dispositivos diferentes, como computador, *tablets* e *smartphones*, considerando que o *frontend* contém responsividade e possibilita uma utilização adequada do sistema.

Tabela 1. Comparação dos trabalhos relacionados com o OPALATracer.

Autor(es)	Objetivos	Semelhanças com o OPALATracer	Diferenças com o OPALATracer
Sousa e dos Santos [2021]	Busca mapear a Indicação Geográfica de proveniência da Opala de Pedro II com desenvolvimento territorial local, discutindo a necessidade de criação de um instrumento de proteção legal que garanta a procedência da gema.	Assim como o OPALATracer, reconhece a importância da proteção da procedência da Opala de Pedro II e da valorização territorial associada à gema.	Não apresenta uma solução tecnológica para garantir a rastreabilidade ou a autenticidade da origem da Opala. O OPALATracer propõe um sistema baseado em <i>blockchain</i> para esse fim.
de Mousa Sousa <i>et al.</i> [2020]	Apresenta a cadeia de suprimento da Opala em Pedro II, identificando os atores envolvidos e as formas de transferência da gema ao longo da cadeia, além de classificar os tipos de Opala conforme o grau de luminosidade.	O OPALATracer utiliza a cadeia de suprimentos descrita como base para a modelagem da rastreabilidade, considerando os atores e cenários de transferência da gema.	O trabalho não propõe um sistema computacional para rastreabilidade da cadeia de suprimentos. O OPALATracer implementa um sistema digital para esse propósito.
Tejos <i>et al.</i> [2022]	Propõe um método utilizando <i>blockchain</i> aplicado à cadeia de suprimento do cacau na Amazônia para garantir a origem do produto por meio da plataforma <i>Hyperledger Fabric</i> .	Assim como o OPALATracer, utiliza tecnologia <i>blockchain</i> para garantir transparência e rastreabilidade na cadeia de suprimentos.	Aplica-se à cadeia produtiva do cacau, utiliza <i>Hyperledger Fabric</i> para manipulação de <i>blockchain</i> e Mongo DB para armazenamento temporário de dados. Já o OPALATracer foca na Opala de Pedro II e utiliza <i>Hyperledger Firefly</i> para manipulação da <i>blockchain</i> e o PostgreSQL para armazenamento de dados mutáveis.
de Araújo Mendes Brandão [2022]	Apresenta uma discussão sobre a viabilidade econômica, ambiental e social da cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II, além de propor melhorias econômicas e ambientais para a formalização e aprimoramento do processo.	Ambos os trabalhos analisam aspectos relacionados à cadeia de suprimentos da Opala na região de Pedro II e reconhecem a necessidade de aprimoramento técnico e formal do processo.	O estudo concentra-se na análise de viabilidade econômica, social e ambiental da cadeia produtiva, enquanto o OPALATracer propõe um sistema digital para rastreabilidade e garantia de procedência.
Conchon e Lopes [2012]	Apresenta aspectos importantes do uso da rastreabilidade como fator relevante para a segurança alimentar.	Assim como o OPALATracer, destaca a importância da rastreabilidade para garantir a origem e confiabilidade de produtos.	O trabalho aborda rastreabilidade no contexto da segurança alimentar, enquanto o OPALATracer aplica o conceito à cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II.

**Figura 2.** Interação do Hyperledger Firefly com a blockchain.

Fonte: Autoria própria.

Consequentemente, as páginas e recursos visuais do sistema adequam-se a diferentes proporções de tela e navegadores.

4.3 Avaliação

Para a avaliação deste projeto, utilizaram-se as *Heurísticas de Nielsen* [Nielsen, 1994], um método amplamente empregado na avaliação de usabilidade de interfaces computacionais. Esse conjunto de heurísticas tem como objetivo auxiliar no desenvolvimento de interfaces mais intuitivas, eficientes e compatíveis com as necessidades dos usuários, contribuindo para a redução da complexidade cognitiva durante a interação com o sistema.

A adoção desse método mostrou-se particularmente rele-

vante no contexto deste trabalho, considerando que o OPALATracer utiliza tecnologias *Web3* e recursos de *blockchain*, tradicionalmente associados a elevada complexidade técnica para usuários não especializados. Dessa forma, as heurísticas foram empregadas como diretrizes para verificar se as interfaces do sistema apresentavam mecanismos adequados de navegação, clareza visual, *feedback* ao usuário, consistência e facilidade de uso.

Com base nisso, as dez heurísticas propostas por Nielsen foram utilizadas como critérios de avaliação das páginas, fluxos de navegação e elementos visuais presentes no sistema. A partir da análise realizada, buscou-se identificar possíveis problemas de usabilidade e realizar as adequações necessárias, garantindo maior conformidade da interface com os princípios de interação humano-computador. Assim, pretendeu-se assegurar que o OPALATracer oferecesse uma experiência de uso acessível e simplificada, especialmente para usuários sem familiaridade prévia com conceitos relacionados à *blockchain* e aplicações descentralizadas.

5 OPALATRACER

O OPALATRACER é um sistema de rastreabilidade de opalas pela cadeia de suprimentos da gema extraída na cidade de Pedro II. O sistema permite que os usuários verifiquem, na tela de “Rastreamento”, a origem de uma determinada opala por meio de um mecanismo de transição da tela “Opalas” para a tela de “Rastreamento”. Isso pode ser feito por meio de um botão intitulado de “Rastreamento”, presente em todas as Opalas listadas na tela “Opalas”. Além disso, é possível visualizar todo o histórico da referida opala com os proprietários da gema desde a sua origem até chegar ao ponto do qual se verifica. Um ponto diferencial do sistema é que ele armazena informações críticas de rastreabilidade em *blockchain*, tais como local de extração, peso, tipo, índice, data e hora da Opala selecionada. O objetivo desta prática é garantir aos usuários a veracidade e a transparência da informação.

O sistema foi desenvolvido com a linguagem de programação *Typescript*, o *framework React*, banco de dados *PostgreSQL* e *blockchain* da rede *Ethereum*. Para isto, utilizou-se o *Hyperledger Firefly*, uma ferramenta que possibilita a criação e a manipulação de *blockchain* da rede *Fabric*, *Ethereum* ou mesmo padrão, isto é, somente com contratos inteligentes provenientes da ferramenta. Em adição a isso, faz-se o uso de uma plataforma web desenvolvida com o *framework React* que permite o rastreamento da cadeia produtiva. Assim, obteve-se como característica do sistema, também, a garantia de segurança e imutabilidade dos dados inseridos.

É importante ressaltar que o OPALATRACER considera a criação de uma nova opala a partir do processo de lapidação, podendo este ser artesanal ou industrial, como ilustrado na Figura 1. Isso porque, nos processos anteriores, extração mineral e custódia inicial, a gema nem sempre se encontra em estado puro, isto é, com a possibilidade de ter detritos minerais agregados. Além disso, considera-se o fato de que a gema, após extraída, pode ser quebrada em novos pedaços e, a partir disso, cada pedaço passaria a ser uma nova opala no sistema, porém ainda não em estado puro. Em seguida, apresentamos detalhes do sistema desenvolvido como sua arquitetura, interface de usuário e funcionalidades.

Para a implementação, criou-se uma aplicação *web* que mostra as informações da cadeia de produção da Opala de Pedro II. Esses recursos foram utilizados para a implementação da criação da API (Interface de Programação de Aplicação), através de um servidor local e comunicação com a *blockchain* no *back-end*, bem como da interface *web*, *front-end*. Além do mais, faz-se o uso do Banco de Dados *PostgreSQL* como recurso auxiliar para armazenamento de informações que não seriam inseridas diretamente na *blockchain* e que poderiam ser alteradas, como o nome de usuário e senha.

5.1 Requisitos do sistema

Os requisitos foram extraídos e listados na forma de histórias de usuário. A Tabela 2 lista uma parte das histórias de usuário definidas. Nela, alguns fatores são considerados a fim de uma análise mais precisa das histórias listadas: “Ator”, “Cenário”, “Estória”, “Dependência”, “Prioridade” e “Complexidade”. O primeiro indica o responsável por executar determinada ação no sistema, as histórias que estão com um ator do tipo “Usuário” indicam que qualquer usuário do sistema pode atuar naquela história. O segundo indica onde a ação pode ser executada. No

caso, todas devem ser executadas no *website*, no sistema. A terceira mostra a estória. A quarta indica as histórias da qual a referente história é dependente, ou seja, aquelas que precisam ser executadas antes ou em conjunto com a história específica. A quinta representa o nível de prioridade do desenvolvimento do requisito, alguns recursos do sistema devem ser desenvolvidos primeiro que outros com menor grau de prioridade. Já a sexta representa o quão complexa a história é, ao considerar que histórias mais complexas levam mais tempo para serem desenvolvidas.

5.2 Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema contém uma Interface de Programação de Aplicação (do inglês, *Application Programming Interface*, API) desenvolvida com a linguagem de programação *Typescript*, o banco de dados *PostgreSQL*; classes, métodos e objetos da ferramenta *Hyperledger Firefly*. A partir do uso destes recursos, é possível fazer manipulações no banco de dados e na *blockchain*, de forma a atingir os objetivos esperados, como o cadastro de usuários e de opalas e a movimentação delas na cadeia de suprimento.

5.2.1 Cadastro de usuário

O cadastro de usuários no sistema é realizado por meio de uma requisição *HTTP* do tipo *POST*, enviada pelo *frontend* da aplicação. Inicialmente, o usuário informa os dados na interface do sistema: “nome”, “e-mail”, “senha” e “função”, campo em que o usuário escolhe qual função desempenha na cadeia de suprimento (Lapidador Artesanal, Transportador, etc). Em seguida, essas informações são encaminhadas para a API, responsável por validar os dados recebidos e verificar sua consistência.

Cadastro de usuário no OpalaTracer

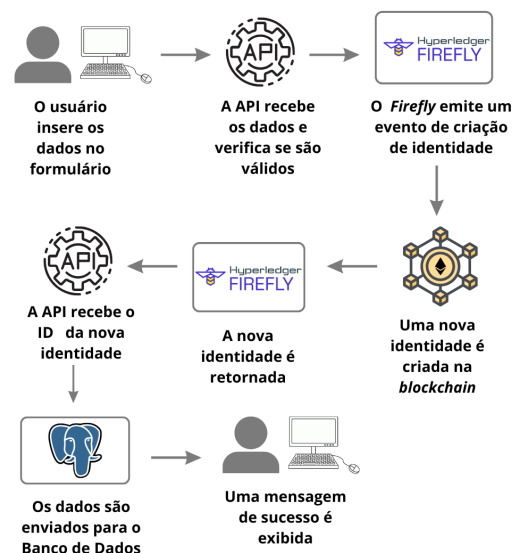


Figura 3. Cadastro de um usuário no OPALATRACER.

Fonte: Autoria própria.

Após a validação, a API realiza uma chamada ao *Hyperledger FireFly* para a criação de uma identidade descentralizada (*Decentralized Identity – DID*), que será utilizada para representar o usuário na rede *blockchain*. A criação da identidade descentralizada é abstraída pelo sistema de geren-

Tabela 2. Tabela de histórias de usuário do sistema OPALATracer.

#	Ator	Cenário	Estória	D	P	C
1	Usuário	Website	ES01: Eu, como usuário, quero fazer cadastro no sistema, para que possa compor uma cadeia de suprimento de Opala.	-	Alta	13
2	Lapidador	Website	ES02: Eu, como lapidador, quero adicionar Opalas no sistema para que elas possam ser visualizadas no sistema.	4	Alta	3
3	Usuário	Website	ES03: Eu, como usuário, quero transferir opalas entre os agentes cadastrados no sistema, para que elas possam ser rastreadas.	4	Alta	5
4	Usuário	Website	ES04: Eu, como usuário, quero poder fazer login no sistema para que possa utilizar as funcionalidades do sistema como um agente da cadeia.	1	Alta	13
5	Usuário	Website	ES05: Eu, como usuário, quero adicionar uma função da cadeia de suprimento da opala ao criar o login para que eu possa fazer parte da rede e transferir opalas.	-	Alta	3
6	Usuário	Website	ES06: Eu, como usuário, quero poder ver as opalas cadastradas no sistema para saber quais opalas podem ser transferidas.	4	Alta	5
7	Usuário	Website	ES07: Eu, como usuário, quero poder visualizar os agentes cadastrados no sistema para saber para quais agentes as opalas podem ser transferidas.	4	Alta	5
8	Usuário	Website	ES08: Eu, como usuário, quero poder modificar as informações pessoais no sistema para que possa fazer correções e/ou adequações.	4	Média	5
9	Usuário	Website	ES09: Eu, como usuário, quero cadastrar um novo usuário tanto no Banco de Dados quanto na <i>blockchain</i> , para que, assim, possa garantir a segurança e confiabilidade do sistema.	1	Alta	5

D: Dependência; P: Prioridade; C: Complexidade.

ciamento de identidades do *Hyperledger FireFly*, responsável por registrar e validar DIDs associados aos participantes da rede blockchain.

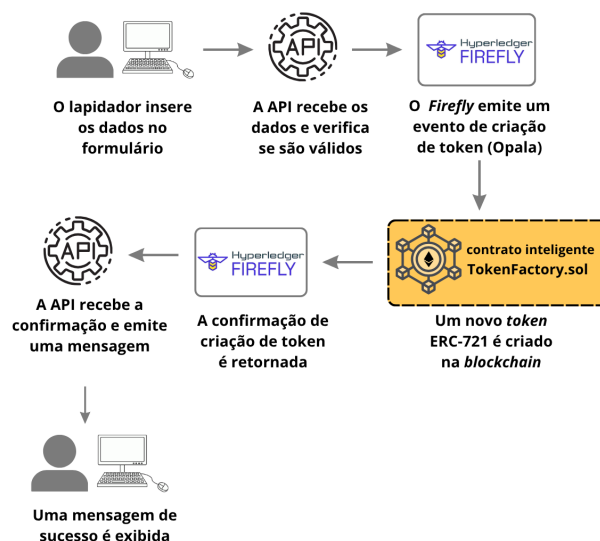
Após a criação da identidade, o *FireFly* retorna à *API* o identificador correspondente ao usuário na *blockchain*. Por fim, a aplicação realiza o cadastro do usuário no banco de dados local, armazenando os dados fornecidos na interface juntamente com o identificador da identidade descentralizada gerada pelo *FireFly*. Esse processo permite integrar os dados da aplicação tradicional com os mecanismos de autenticação e rastreabilidade providos pela infraestrutura *Web3* utilizada pelo sistema. A figura 3 ilustra o processo de cadastro de um usuário no OPALATracer.

5.2.2 Cadastro de Opala

No processo de cadastro de Opala, apenas usuários com a função “Lapidador industrial” ou “Lapidador artesanal” podem fazer o cadastro de Opalas no sistema. Isso acontece porque parte-se do princípio de que uma determinada Opala só se torna única após a lapidação, visto que nos processos anteriores ela ainda se encontra em estado bruto, com possíveis detritos agregados a ela. A representação digital das Opalas é realizada por meio do mecanismo de *tokenização* provido pelo *Hyperledger FireFly*, utilizando o contrato inteligente *TokenFactory.sol*, responsável pela criação e gerenciamento dos *tokens* do tipo *ERC-721*. Estes são caracterizados como indivisíveis pelo *Firefly*, e, por esse motivo, são empregados para representar cada gema na blockchain.

Após inserir as informações “Local de extração”, “Peso” e “Tipo” no formulário, o usuário envia essas informações para a *API*, que verifica se os dados inseridos são válidos. No formulário, o “índice” da Opala é gerado automaticamente pela *blockchain* e representa o identificador (ID) da Opala. Em seguida, a *API* envia os dados para o *Firefly* para que ele possa emitir um evento de criação de *token* (Opala). O contrato inteligente *TokenFactory.sol* cria um novo *token ERC-721* com as informações inseridas. O *Firefly* então recebe a

Cadastro de OPala no OpalaTracer

**Figura 4.** Cadastro de Opala no OPALATracer.

Fonte: Autoria própria.

confirmação do evento e retorna-a. Por fim, a *API* recebe a confirmação retornada e envia para o *frontend*. A figura 4 representa esse processo.

5.2.3 Transferência de Opalas

Já no processo de transferência de Opalas, o usuário insere informações para transferir uma determinada Opala que está em sua posse para outro usuário do sistema. Para isso, ele informa ao sistema o identificador da Opala, chamado de “índice” e a “carteira digital” do agente para o qual a Opala será transferida, chamada de “ID Ethereum”. Após isso, a *API* verifica se os dados inseridos são válidos. Caso sejam, o *Firefly* emite um evento de transferência de *token*. Então o contrato *TokenFactory.sol* promove a transferência de um usuário para o outro. Em seguida, o *Firefly* retorna uma confirmação para

a API e esta retorna ao *frontend* uma mensagem de transação bem sucedida. A figura 5 ilustra esse processo.

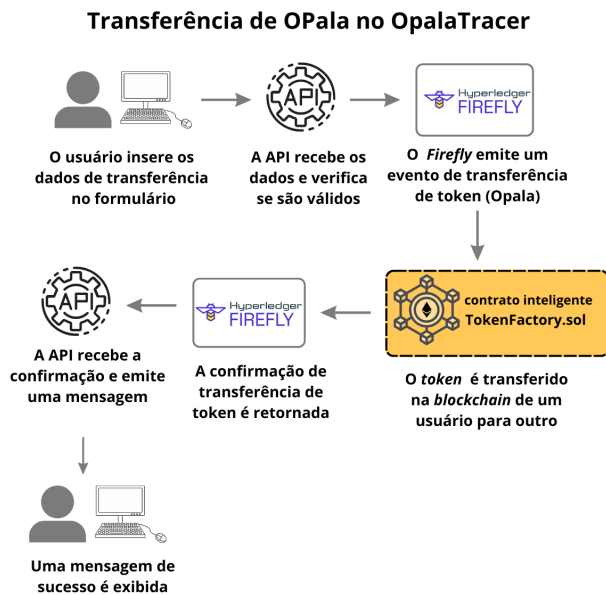


Figura 5. Transferência de Opalas no OPALATRACER.

Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que a gestão das identidades digitais dos usuários no sistema é realizada por meio de endereços *Ethereum* chamados de *ID Ethereum*, utilizados como carteiras digitais associadas às operações de custódia e transferência das Opalas. Cada usuário possui uma carteira digital única na rede *blockchain*, vinculada às transações realizadas no sistema, permitindo rastreabilidade e autenticação das operações executadas.

No contexto desta aplicação, as carteiras digitais são criadas e gerenciadas pela infraestrutura integrada ao *Hyperledger FireFly*, responsável por abstrair a complexidade operacional relacionada ao gerenciamento de identidades *Web3*. Dessa forma, a API da aplicação atua como intermediária entre o usuário e a *blockchain*, realizando as interações necessárias com os contratos inteligentes sem exigir que os participantes da cadeia produtiva manipulem manualmente chaves privadas ou utilizem aplicações externas de carteira digital. Sendo assim, cabe ao usuário do sistema apenas inserir o *ID Ethereum* quando for necessário.

5.2.4 Dados on-chain e off-chain

Já no *frontend*, as interfaces realizam o consumo de duas APIs: a API desenvolvida para o sistema e a API disponibilizada pelo *Hyperledger FireFly*. Essa separação ocorre devido à necessidade de manipular dados com características distintas de mutabilidade e persistência. Dessa forma, informações mutáveis são armazenadas no banco de dados tradicional da aplicação, enquanto informações imutáveis e relacionadas à rastreabilidade são registradas e recuperadas diretamente da *blockchain*.

Os dados mutáveis correspondem às informações que podem sofrer alterações ao longo do tempo, como nome de usuário, endereço de e-mail e senha. Esses dados são armazenados no banco de dados da aplicação, permitindo operações

de atualização e gerenciamento de usuários de forma mais eficiente. Por outro lado, informações que necessitam de integridade, imutabilidade e rastreabilidade são mantidas na *blockchain* por meio do *Hyperledger FireFly*. Entre esses dados estão o identificador do usuário, o endereço *Ethereum* (*ID Ethereum*) associado ao participante, o local de extração da Opala, o peso da gema, o tipo da Opala, bem como os registros de data e hora relacionados ao cadastro inicial da gema e às suas transferências entre custodiante.

Essa arquitetura híbrida permite que o sistema combine a flexibilidade e desempenho de bancos de dados tradicionais com as propriedades de transparência, auditabilidade e imutabilidade proporcionadas pela *blockchain*. Como exemplo, na página “Opalas”, são exibidas as gemas em posse ou previamente transferidas pelo usuário autenticado. Nessa interface, o identificador da Opala e as informações relacionadas à rastreabilidade da gema são recuperados diretamente da *blockchain* por meio de requisições realizadas ao *Hyperledger FireFly*. Já informações complementares, como o nome do custodiante e sua respectiva função no sistema, são obtidas a partir do banco de dados da aplicação, recuperadas através de requisições feitas para a API desenvolvida para o sistema.

5.3 Back-end

5.3.1 Ethereum: a rede blockchain escolhida

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se uma rede *blockchain* baseada na rede *Ethereum*, configurada por meio de uma pilha do *Hyperledger FireFly* composta por dois *Supernodes*. Esses *Supernodes* representam conjuntos de serviços responsáveis pela interação direta com a infraestrutura distribuída, permitindo operações como cadastro de usuários, registro de Opalas e transferência de custódia das gemas tokenizadas. Além disso, informações relevantes relacionadas às Opalas — como local de extração, peso e tipo da gema — também são persistidas na *blockchain*, garantindo integridade, transparência e rastreabilidade dos dados registrados.

A escolha da rede *Ethereum* ocorreu devido à ampla adoção do ecossistema, à maturidade de seus contratos inteligentes e à compatibilidade nativa com os mecanismos de tokenização utilizados pelo *Hyperledger FireFly*, especialmente por meio do padrão *ERC-721*, empregado para representar digitalmente cada Opala cadastrada. Soma-se a isso a elevada interoperabilidade proporcionada pela *Ethereum*, permitindo que soluções desenvolvidas sobre sua infraestrutura possam futuramente integrar-se a outras aplicações *Web3* e serviços descentralizados já consolidados no mercado.

5.3.2 Análise crítica

Embora o *Hyperledger FireFly* permita a utilização de outras arquiteturas, como *Hyperledger Fabric* e *Hyperledger Besu*, a adoção da *Ethereum* mostrou-se mais adequada aos objetivos do projeto. O *Hyperledger Fabric*, por exemplo, possui uma arquitetura fortemente permissionada e orientada a consórcios privados, exigindo maior complexidade administrativa relacionada ao gerenciamento de organizações, canais e políticas de autenticação. Além disso, sua estrutura não possui suporte nativo ao padrão de contratos inteligentes e tokenização amplamente difundido no ecossistema *Web3* baseado em *Ethereum*. Já o *Hyperledger Besu*, apesar de compatível com a Máquina Virtual da rede *Ethereum* (EVM), consti-

tui uma implementação cliente da própria *Ethereum*, sendo mais frequentemente empregado para construção de redes permissionadas privadas. Nesse contexto, a utilização direta de uma infraestrutura compatível com o ecossistema *Ethereum* mostrou-se suficiente para os requisitos do sistema proposto.

Adicionalmente, a utilização de uma rede pública baseada em *Ethereum* favorece características importantes para o contexto de rastreabilidade e certificação de origem das Opalas, especialmente no que se refere à transparência, auditabilidade e descentralização dos registros. Em uma rede pública, os dados registrados podem ser auditados independentemente por diferentes participantes da cadeia produtiva, reduzindo a dependência de uma entidade central controladora e aumentando a confiabilidade do processo de certificação da gema.

Entretanto, a adoção de redes públicas implica custos transacionais associados à execução de operações na *blockchain*, denominados *gas fees*. Esses custos estão relacionados à execução de contratos inteligentes e ao armazenamento de informações na rede. No contexto deste trabalho, tais custos são reduzidos devido ao armazenamento restrito apenas de informações essenciais e imutáveis na *blockchain*, enquanto dados mutáveis e administrativos permanecem armazenados em banco de dados tradicional. Dessa forma, operações como cadastro de usuários, emissão de *tokens* representando Opalas e transferências de custódia geram custos transacionais pontuais e relativamente baixos quando comparados ao volume reduzido de operações esperado para o sistema.

Além disso, considera-se que os custos de interação com os contratos inteligentes podem ser assumidos pela própria plataforma ou pelas organizações participantes da cadeia produtiva, como cooperativas, lapidários ou entidades responsáveis pela certificação das gemas. Essa abordagem evita que usuários finais, como clientes, precisem lidar diretamente com mecanismos de pagamento de taxas da rede *Ethereum*, permitindo que a complexidade operacional da *Web3* seja abstraída pelo sistema desenvolvido. Dessa forma, o *Hyperledger FireFly* atua como camada intermediária responsável por simplificar a comunicação com a *blockchain*, contribuindo para a viabilidade prática da solução proposta mesmo em um contexto composto predominantemente por usuários não técnicos.

5.3.3 Hyperledger Firefly

O sistema utiliza o *Hyperledger FireFly* como ferramenta para manipular a *blockchain*, ao adicionar e recuperar informações importantes. Por meio deste recurso, tanto o *backend* quanto o *frontend* do OPALATRACER podem enviar e resgatar informações sobre Opalas e usuários, tais como *ID Ethereum* dos usuários, *ID* e informações sobre o cadastro e transferências de Opalas, como peso, tipo, data, hora, origem e destino da Opala. Essas informações podem ser retornadas para o usuário no *frontend* e enviadas para o *backend* por meio do *frontend* através da ferramenta de requisições *HTTP Axios*.

5.4 Front-end: a interface de usuário

Após o processo de autenticação, o usuário é direcionado para a tela intitulada “Opalas”, onde é possível visualizar as Opalas que estão em sua custódia ou que já estiveram e foram transferidas, pois há um filtro na parte de cima da tela a partir

do qual o usuário pode escolher uma das duas opções. As outras telas disponíveis, que podem ser acessadas por meio de uma *navbar* que se encontra na parte superior da maioria das telas, são: “Rastreamento”, que mostra a rastreabilidade das Opalas; e “Agentes”, que lista os usuários cadastrados no sistema. Por fim, a tela de “Configurações”, o usuário pode verificar suas informações e alterar algumas caso considere necessário, como nome de usuário, *e-mail* e senha.

Os principais casos de uso do sistema são referentes ao cadastro de usuários, assim como de Opalas, e da transferência das gemas. Com base nesse aspecto, o sistema foi desenvolvido com o intuito de possibilitar que os usuários possam realizar ações relacionadas a esse fator, com formulários para cadastro de usuários, na tela de cadastro, e de Opalas, na tela “Opalas”, após autenticação, bem como para as transferências.

O usuário final pode ter acesso ao serviço e visualizar, através da tela “Opalas”, as opalas que estão ou estiveram em sua custódia, através de um filtro em que é possível selecionar para visualização na tela: “em custódia” ou “transferidas”. A primeira possibilidade mostra as que estão em sua posse no momento, ao passo em que a segunda, as que estiveram em sua custódia anteriormente e foram transferidas. Ele também pode acessar o rastreamento de Opalas, na tela “Rastreamento”; os agentes, isto é, usuários cadastrados, na tela “Agentes”; e as configurações, na tela “Configurações”. Adiante, apresenta-se as telas construídas para o OPALATRACER de acordo com os casos de uso apresentados.

5.4.1 Registro de gemas de Opala

A Figura 6 exibe o formulário de cadastro de uma nova gema de Opala no sistema. Para isso, são solicitadas algumas informações importantes para a adição, que são persistidas na *blockchain* e ficam disponíveis para visualização na tela “Opalas”, em cada uma cadastrada: local de extração, peso e tipo. É importante considerar que o índice é definido automaticamente pelo sistema e apenas usuários com função “Lapidador industrial” ou “Lapidador artesanal” podem cadastrar novas gemas no sistema.

Figura 6. Captura da tela de Cadastro de Opala no OPALATRACER.

Fonte: Autoria Própria

5.4.2 Custódia de Opalas

A Figura 7 mostra a tela de custódia de gemas de Opala que estão ou passaram pela custódia do usuário, dependendo da posição acionada no menu de seleção, que se encontra na parte superior da tela. Enquanto a Figura 7a mostra aquelas que continuam sob custódia, a Figura 7b mostra aquelas que já foram transferidas a outro usuário.

No caso ilustrativo da Figura 7a, como o usuário fictício “Usuario 19” é um Lapidador Industrial, ele tem permissão

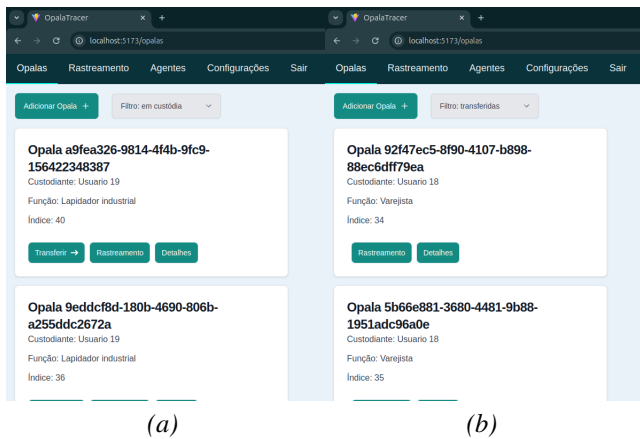


Figura 7. Telas da custódia de gemas de Opala no OPALATracer.

Fonte: Autoria Própria

para cadastrar uma nova Opala no sistema. É importante ressaltar que apenas os usuários com função Lapidador Industrial ou Lapidador Artesanal podem cadastrar Opalas no sistema. Assim como na tela anterior, na Figura 7b também é possível visualizar o nome do custodiante atual da Opala, bem como a função que ele exerce na cadeia de suprimentos da gema. Contudo, diferentemente Figura 7a, não é possível transferir as Opalas listadas.

5.4.3 Rastreabilidade de Opalas

A Figura 8 mostra a tela de Rastreamento de Opalas. É possível navegar para esta tela através de um menu com o título de “Rastreamento” encontrado em cada componente de Opala na tela “Opalas”. A partir disso, o usuário é direcionado para a tela de “Rastreamento” para visualizar onde a Opala selecionada se encontra e por quais agentes ela passou na cadeia de suprimentos.



Figura 8. Tela de rastreamento de Opalas cadastradas no OPALATracer.

Fonte: Autoria Própria

6 Avaliação

O processo de avaliação do protótipo desenvolvido no presente trabalho utilizou como base *Heurísticas de Nielsen*, criadas por Jakob Nielsen e Rolf Molich [1994] para auxiliar no desenvolvimento de interfaces, de forma a obter uma interface simples, amigável e eficiente para os usuários do sistema utilizado. Diante disso, foi proposto um método que envolve dez características a serem observadas para atingir essa finalidade. A Tabela 3 apresenta as Heurísticas de Nielsen utilizadas.

A primeira característica é visibilidade do *status* do sistema. Isso significa que o sistema deve ser capaz de manter o usuário informado em qual etapa do processo solicitado pelo usuário está. Isso pode ser observado no procedimento de

transferir uma Opala no sistema, por exemplo. Isso porque, ao navegar para a tela Opalas, o usuário pode ver aquelas que estão em sua posse, seja a partir de um cadastro feito por ele ou do recebimento desta de outro agente. A partir disso, ele pode transferir uma Opala que está em sua posse, através da opção “Transferir”. Feito isso, o “status” da página muda, com a atualização do *card* da Opala então transferida.

A segunda trata de compatibilidade entre o sistema e o mundo real, isto é, o sistema deve se comunicar com o usuário, apresentar termos, palavras e conceitos que são familiares ao usuário. Além disso, as informações devem ser apresentadas seguindo uma lógica e de forma natural. Isso pode ser observado, por exemplo, nos recursos de informação disponíveis na tela de “Opalas” e “Rastreamento”, que contam com botões de “Detalhes” das Opalas e do rastreamento das gemas. Neles, são apresentados dados importantes de forma clara e simples.

A terceira está relacionada a controle e liberdade para o usuário. A partir disso permitir ao usuário a certeza de que está fazendo o que gostaria de fazer. Essa característica pode ser observada na transferência de uma Opala, ao sistema apresentar o identificador da Opala e solicitar as informações para transferência na opção de transferir, de forma a garantir que ele realize a transferência da gema para o agente que realmente deseja. Outrossim, leva-se em consideração o fato de que ele pode consultar os agentes a partir da tela “Agentes”, na qual ele pode verificar informações sobre os agentes cadastrados, tais como o nome, *e-mail* e o “ID Ethereum”, essencial para a transferência.

Já a quarta se trata de consistência e padronização, ou seja, manter um padrão e uma constância no sistema. Isso inclui a padronização no uso de fontes, cores, estruturas e demais elementos visuais que estejam em consonância entre si. No OPALATracer, pode-se observar essas características na estrutura das páginas, nos modais e formulários. Todos apresentam formas semelhantes entre si. Exemplo disso são os formulários de “Login” e cadastro de novo usuário e os modais de cadastro e transferência de Opalas.

A quinta característica se trata de prevenção de erros, o usuário pode ter a certeza de que está fazendo o que gostaria de fazer. Como consequência disso, o sistema faz verificações que garantem que os processos só ocorram se as informações fornecidas forem compatíveis. Como, por exemplo, no cadastro e na transferência de Opalas, são feitas diversas verificações internas antes de concluir os processos.

A sexta característica se trata de reconhecimento em vez de memorização. Isso significa oferecer a possibilidade de reconhecer determinado ajuste ao invés de memorizar. Isso pode ser observado nas validações nos diversos campos de formulários do sistema, em que as informações inseridas nos campos são verificadas se estão de acordo com o tipo de entrada solicitado e se nenhum campo está vazio.

Já a sétima está relacionada a eficiência e flexibilidade de uso, ou seja, a aplicação deve ser eficiente tanto para usuários experientes quanto inexperientes. Nesse sentido, o sistema OPALATracer oferece uma linguagem simples, clara e acessível para estes dois tipos de usuários, ao utilizar conceitos, termos e palavras comuns no processo de extração e comercialização da gema em Pedro II.

A oitava característica se trata de estética e *design* minimalista. Deixar visível na página somente informações que

Tabela 3. Heurísticas de Nielsen.

Identificador	Heurística	Descrição
H01	Visibilidade do estado do sistema	O sistema mantém o usuário sempre informado sobre o que está acontecendo no mesmo.
H02	Consistência de padrões	Evitar que o usuário tenha que pensar se ações ou situações diferentes significam a mesma coisa.
H03	Flexibilidade e eficiência de uso	Fornece opções que otimizam a experiência de usuário (atalhos, teclas de funções, abreviações).
H04	Estética e design minimalista	Evita o uso de informações irrelevantes.
H05	Compatibilidade do sistema e o mundo real	O sistema utiliza uma linguagem aos usuários, em vez de termos técnicos e específicos.
H06	Reconhecimento de erros	Utilizar linguagem simples para apresentar os erros e mostrar como contorná-los.
H07	Controle do usuário e liberdade	Oferece saída de emergência, permitindo que os usuários saiam facilmente de situações inesperadas.
H08	Reconhecimento e memorização	Fazer com que as ações e opções, sejam visíveis, o usuário não tem a obrigação de lembrar de tudo.
H09	Prevenção de erros	Prevenir a ocorrência de erros.
H10	Ajuda e documentação	Fornece informações que podem ser facilmente encontradas e orienta os usuários.

são realmente importantes. Isso evita excesso de informações, cansaço visual, desvio de foco e mal entendidos por parte do usuário. Esses fatores podem ser observados nos “Cards” de Opalas na tela “Opalas”, nos componentes de informação da tela “Rastreamento” e nas informações do usuário na tela “Configurações”. Todas essas “páginas web” apresentam somente informações relevantes e possuem recursos que disponibilizam informações adicionais, como é o caso dos botões de “Detalhes”, encontrados nas duas primeiras citadas.

A nona característica se trata de ajudar os usuários a reconhecerem, diagnosticarem e se recuperarem de erros. Isso significa mostrar ao usuário que ele errou em algum momento, informar o erro e possibilitar a correção. Sendo assim, é possível observar essa característica, por exemplo, nas validações dos campos dos formulários, em que, ao deixar um campo em branco ou não inserir os dados corretos nestes, o usuário é informado que tipo de validação não foi atendida, para que, assim, possa corrigir o erro e tentar a requisição novamente.

Por fim, a décima se trata de ajuda e documentação: Possibilitar ao usuário acessar informações sobre o funcionamento de recursos do sistema e documentar o sistema. Exemplos disso são descrições, que podem ajudar o usuário a compreender melhor os recursos que ele está utilizando no momento. No presente sistema, isso pode ser notado nas descrições encontradas em diversos recursos do sistema, como os modais, que garantem uma maior transparência do recurso ao usuário.

Somado a isso, uma análise de severidade foi feita acerca das tarefas de desenvolvimento durante as fases de desenvolvimento deste projeto. Ela foi utilizada para analisar e caracterizar *bugs* que ocorreram durante o processo, isto é, falhas, problemas ou acidentes. A Tabela 4 apresenta as severidades observadas e a descrição de cada uma. Ademais, a Tabela 5 analisa limitações do sistema com base nas Heurísticas apresentadas e na escala de severidade.

Os problemas apresentados na Tabela 5 foram corrigidos, de forma a adequar melhor o projeto às *Heurísticas de Nielsen*, utilizadas como base para a avaliação deste trabalho. Assim, os modais de cadastro e transferência de Opala, bem como o de cadastro de usuário, fecham e atualizam a página, de

forma a mostrar o estado atual dos modais. Além disso, o tipo de entrada no campo de inserção de texto para “peso” foi ajustado, de forma a aceitar somente números e evitar o envio de informações inadequadas no sistema.

7 Considerações finais e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou o OPALATRACER, uma plataforma baseada em *blockchain* voltada para a rastreabilidade de gemas de Opala extraídas na região de Pedro II, no estado do Piauí. Além de possibilitar o reforço da indicação geográfica concedida pelo INPI, a proposta tem como principal objetivo reduzir a barreira de entrada e a complexidade inerentes às tecnologias *Web3* para usuários não técnicos pertencentes ao arranjo produtivo local, como garimpeiros, lapidários e comerciantes.

Nesse contexto, o sistema foi desenvolvido de forma a abstrair os detalhes técnicos relacionados à utilização da *blockchain*, contratos inteligentes, *tokens* e carteiras digitais. Para isso, utilizou-se o *Hyperledger FireFly* como camada intermediária responsável por simplificar a comunicação entre a aplicação e a rede *Ethereum*. Dessa maneira, os usuários conseguem realizar operações de cadastro, custódia e transferência de Opalas por meio de interfaces acessíveis e intuitivas, sem a necessidade de conhecimento especializado sobre tecnologias descentralizadas.

Além disso, o OPALATRACER pode contribuir para a redução da informalidade presente na comercialização da Opala de Pedro II. O registro imutável das operações realizadas na *blockchain* permite acompanhar o histórico das gemas desde sua “tokenização” até as transferências de custódia realizadas ao longo da cadeia produtiva. Dessa forma, o consumidor final pode verificar informações relacionadas à autenticidade e procedência da gema adquirida, aumentando a confiabilidade do produto comercializado e fortalecendo o valor agregado associado à indicação geográfica da Opala de Pedro II. Consequentemente, diferentes agentes da cadeia produtiva podem se beneficiar do sistema, especialmente no fortalecimento da confiança entre produtores, comerciantes e consumidores finais.

Tabela 4. Escala de severidade.

Identificador	Severidade	Descrição
S01	Problema cosmético ou superficial	Problema normalmente estético, corrigido quando se tem tempo sobrando.
S02	Problema de usabilidade pequeno	Problema que pode ser contornado pelo usuário e possui baixa severidade para ser solucionado.
S03	Problema de usabilidade grande	Problema com impacto considerado alto na funcionalidade do sistema e por isso deve ser solucionado rápido.
S04	Problema de usabilidade crítico	Problema crítico que deve ser solucionado antes do lançamento do sistema.

Tabela 5. Análise heurística do sistema.

Problema	Severidade	Violação	Descrição
Fechar modal de cadastro de Opala	S04	H01	Ao concluir o cadastro de Opala, o modal não é fechado.
Fechar modal de transferência de Opala	S02	H01	Ao transferir uma Opala, o modal de transferência não fecha.
Exibir mensagem de cadastro de usuário	S02	H01	Ao se concluir o cadastro de um usuário, nenhuma mensagem é exibida
Exibir mensagem de cadastro de Opala	S02	H01	Ao se cadastrar uma nova Opala, nenhuma mensagem é exibida
Tipo de entrada em cadastrar Opala	S02	H01, H02, H06, H08	No cadastro de Opala, o usuário não possui limitação no tipo de dados que pode ser inserido no campo “peso” do formulário.

Outro aspecto relevante do trabalho consiste na preocupação com a usabilidade da solução proposta. A adoção das Heurísticas de Nielsen contribuiu para o desenvolvimento de interfaces mais intuitivas e compatíveis com o perfil dos usuários do sistema, permitindo minimizar dificuldades relacionadas à interação com recursos tradicionalmente complexos no contexto *Web3*. Assim, a contribuição do OPALATracer não se restringe apenas ao uso da *blockchain* para rastreabilidade de gemas, mas também à investigação de estratégias para tornar aplicações descentralizadas mais acessíveis a públicos sem experiência técnica.

Entretanto, embora o *Hyperledger FireFly* contribua para abstrair parte da complexidade de integração com a infraestrutura *blockchain*, a arquitetura proposta ainda depende de componentes auxiliares *off-chain*, como a *API* local da aplicação e o banco de dados *PostgreSQL*. Esses componentes introduzem requisitos específicos relacionados à segurança da informação, autenticação, armazenamento de credenciais e comunicação entre serviços, demandando uma modelagem de ameaças própria e mais abrangente. Nesse contexto, abordagens como o modelo STRIDE podem ser empregadas futuramente para identificação e mitigação de ameaças relacionadas à arquitetura híbrida do sistema. Contudo, essa análise foge do escopo deste trabalho, cujo foco concentrou-se principalmente na avaliação de usabilidade e na redução da complexidade cognitiva associada à utilização de tecnologias *Web3* por usuários não técnicos.

Por fim, ainda é possível aprimorar o OPALATracer em trabalhos futuros por meio de melhorias capazes de agregar valor comercial e ampliar a qualidade da solução proposta. Entre elas destacam-se: (i) adicionar imagens das Opalas durante o processo de cadastro, facilitando a identificação visual e aumentando a confiabilidade da gema adquirida; (ii) conduzir estudos qualitativos e quantitativos junto ao arranjo produtivo local para avaliar a viabilidade prática, aceitação e impacto da utilização do sistema; (iii) realizar estudos comparativos de viabilidade utilizando arquiteturas permissionadas, como o *Hyperledger Fabric*, investigando possíveis impactos relacionados à privacidade, governança e custos operacionais

da infraestrutura *blockchain*; e (iv) desenvolver uma análise formal de ameaças da arquitetura *off-chain* utilizada pela aplicação, considerando aspectos de segurança relacionados à *API*, banco de dados e gerenciamento de identidades digitais.

Declarações complementares

Contribuições dos autores

LRS é o principal contribuidor e escritor deste manuscrito e contribuiu para a curadoria dos dados, investigação, software e escrita – rascunho original. ARS contribuiu para a concepção, metodologia, supervisão e escrita – revisão e edição, deste estudo. Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito final.

Conflitos de interesse

Os autores declaram que não têm nenhum conflito de interesses.

Disponibilidade de dados e materiais

Os conjuntos de dados (e/ou softwares) gerados e/ou analisados durante o estudo atual serão feitos mediante solicitação.

Referências

- Arigela, S. S. D. e Voola, P. (2023). Blockchain open source tools: Ethereum and hyperledger fabric. In *2023 International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Discovery in Concurrent Engineering (ICECONF)*, pages 1–8. DOI: 10.1109/ICECONF57129.2023.10084256.
- Brasil (1940). Decreto-lei nº 2.848, de 7 de dezembro de 1940. código penal. artigo 171. Planalto. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEL&numero=2848&ano=1940&ato=1bb0za61ENNRkTf8b>.
- Conchon, F. L. e Lopes, M. A. (2012). Rastreabilidade e segurança alimentar. Technical Report 91, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. Disponível em: http://www.cidasc.sc.gov.br/defesasaniaanimal/files/2012/08/rastreabilidade_fabricio.pdf.
- da Silva Rodrigues, A. F. (2009). *Mineração de Metais e Pedras Preciosas*, pages 297–303. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/>

- assuntos/economia-mineral/publicacoes/outras-publicacoes-1.
- de Araújo Mendes Brandão, L. (2022). *Análise da viabilidade econômica, social e ambiental do processo produtivo da opala no município de Pedro II, PI*. Tese (doutorado em engenharia de produção), Universidade Paulista, São Paulo, SP. Disponível em: <https://repositorio.unip.br/wp-content/uploads/tainacan-items/198/97915/LILANE-DE-ARAJO-MENDES-BRANDO.pdf>.
- de Moura Sousa, L., de Oliveira Costa Neto, P. L., Dias, S. C., e das Chagas Oliveira, F. (2020). Arranjo produtivo local - apl de base mineral: Estudo da cadeia de suprimentos da opala de pedro ii - pi. *Research, Society and Development*, 9(8):e83984875. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.4875.
- Hyperledger (2025). Use tokens. Hyperledger FireFly. Disponível em: <https://hyperledger.github.io/firefly/latest/tutorials/tokens/>.
- Hyperledger Fabric (2026). A blockchain platform for the enterprise. Disponível em: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/>.
- Hyperledger FireFly (2024). Use tokens. Hyperledger FireFly. Disponível em: <https://hyperledger.github.io/firefly/latest/tutorials/tokens/>.
- Investopedia (2024). Blockchain com permissão: Definição, exemplos, vs. sem permissão. Investopedia. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/p/permissioned-blockchains.asp>.
- Konagari, A., Kusuma, H., Chetharasi, S., Kuchipudi, R., Babu, P., e Murthy, S. (2023). Nft marketplace for blockchain based digital assets using erc-721 token standard. In *2023 International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)*, pages 1394–1398. DOI: 10.1109/ICSCSS57650.2023.10169350.
- Marques, G. T. (2014). Opalas gemológicas do piauí: gênese revelada por microtermometria e minerais associados. Dissertação (mestrado em geologia e geoquímica), Universidade Federal do Pará, Belém, PA. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/handle/2011/6366>.
- Mathis, A., Chaves, A. P., de Tomi, G., Seccatore, J., Rosa, M. R., de Theije, M., e Elis, V. (2018). Diagnóstico socioeconômico e ambiental da mineração em pequena escala no brasil (mpe): Relatório 8: Relatório final. Technical report, Ministério de Minas e Energia, São Paulo, SP. Disponível em: <https://research.vu.nl/en/publications/diagn%C3%B3stico-socioecon%C3%B4mico-e-ambiental-da-minera%C3%A7%C3%A3o-em-pequena-es-2>.
- Nielsen, J. (1994). *Usability Engineering*. Academic Press, San Diego, CA.
- Saches, L. L. B., Brilhante, J. R., Braga, I. F., Batista, I. H., e Amaral, E. S. (2015). Projeto avaliação dos depósitos de opalas de pedro ii: estado do piauí. Technical Report 8, CPRM, Teresina, PI. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15705>.
- Sousa, L. M. e dos Santos, M. J. C. (2021). Indicação geográfica e desenvolvimento territorial: um estudo sobre o caso da gema opala em pedro ii no piauí. *Revista INGI - Indicação Geográfica e Inovação*, 5(1):1162–1178.
- Tasatanattakool, P. e Techapanupreeda, C. (2018). Blockchain: Challenges and applications. In *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pages 473–475. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2018.8343163>. DOI: 10.1109/ICOIN.2018.8343163.
- Tejos, R. A. G., de Brito Carvalho, T. C. M., Júnior, M. A. S., Santos, B. J., e Nobre, I. (2022). Blockchain aplicado à rastreabilidade da cadeia produtiva do cacau da amazônia. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais*. Sociedade Brasileira de Computação. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/sbseg.2022.225338>. DOI: 10.5753/sbseg.2022.225338.
- Vale, E. (2003). Simulação do impacto econômico da mineração: relatório final. Technical Report CDD 338.2, SMM/MME, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.bamburra.com/Impacto.pdf>.
- Walmart (2018). In wake of romaine e. coli scare, walmart deploys blockchain to track leafy greens. *Walmart*. Disponível em: <https://corporate.walmart.com/news/2018/09/24/in-wake-of-romaine-e-coli-scared-walmart-deploys-blockchain-to-track-leafy-greens>.