

OPALATRACER: rastreabilidade das gemas Opala de Pedro II em *blockchain*

Leone Rodrigues Santos¹, Alcemir Rodrigues Santos¹

¹Laboratório de Engenharia de Software (LES)
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)
Piripiri - PI - Brasil

leonesantos@aluno.uespi.br, alcemir@prp.uespi.br

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, torna-se difícil para o consumidor saber se a Opala é realmente proveniente de Pedro II. Situação semelhante pode ser observada no trabalho “Blockchain aplicado à rastreabilidade da cadeia produtiva do cacau da Amazônia”. 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.*

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 tem uma riqueza mineral expressiva configurada na presença de minerais metálicos, não-metálicos e energéticos [Vale 2003]. Um destes minerais não-metálicos é a gema Opala. No território nacional, a principal categoria de mineração é a de pequena escala, isto é, com ocorrência nas localidades onde se encontram as jazidas. Este tipo de mineração contribui diretamente para a diminuição da pobreza, visto que gera emprego, renda e encadeamento com outras atividades locais [de Minas e Energia MME 2018]. Assim acontece nas jazidas de Opala, em Pedro II, no Piauí.

Existe, em Pedro II, uma organização que possui grande participação na produção dessa gema: a Cooperativa dos Garimpeiros de Pedro II (COOGP). Ela foi fundada em 2004, com somente 34 associados e, em 2016, já contava com 180 associados [Saches et al. 2015]. Isso demonstra a tendência do crescimento da exploração da gema na cidade. A extração e a produção de jóias são algumas das principais atividades econômicas da cidade. Isso movimenta, inclusive, outros setores, tais como gastronômico, turístico e hoteleiro em certas datas do ano, como durante a realização anual do Festival de Inverno, época em que, normalmente, as gemas são ainda mais comercializadas. Estimativas do SEBRAE [SEBRAE 2023] apontam que o mercado local chega a movimentar cerca de 70 mil reais mensais.

As pedras extraídas na cidade ganham notoriedade nacional, principalmente, por seu alto grau de pureza. Isso proporcionou-lhes um avanço no desenvolvimento econômico e social ao longo dos tempos baseado no processo de mineração [de Moura Sousa et al 2020]. Soma-se a isto a indicação geográfica concedida pelo Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) em 2012 [Sousa e dos Santos 2021]. Isso, por sua vez, garantiu um selo de procedência das gemas à União das Associações e Cooperativas de Garimpeiros, Produtores, Lapidários e Joalheiros de Opala Preciosa e de Joias Artesanais de Opalas do Município de Pedro II. A busca por esse selo de identificação geográfica representa o interesse do arranjo produtivo local [Sousa e dos Santos 2021] em aumentar o valor agregado da produção na cidade.

Contudo, a informalidade na rastreabilidade na extração e comercialização destas Opalas, apesar da indicação geográfica concedida, impede um maior controle da produção e valorização das gemas produzidas no Piauí. Ademais, a falta de informações quanto à origem e desenvolvimento desses depósitos na região não permitem a prospecção por novas jazidas [Marques 2014]. Portanto, este artigo objetivou desenvolver uma alternativa tecnológica como meio de garantir a procedência e fortalecer o selo de indicação geográfica existente por meio da utilização de *blockchain*, uma tecnologia digital que possui alto valor agregado.

Aplicações de *blockchain* têm sido extensamente utilizadas em soluções de rastreamento de produtos naturais ou manufaturados no decorrer de toda a sua cadeia de suprimentos. Isso porque *blockchain* se trata de uma corrente de blocos de informação na qual é possível adicionar e armazenar informações de forma segura. Para isso, são utilizados contratos inteligentes, *scripts* que promovem a inserção e o acesso seguro às informações inseridas na *blockchain*. Com base nisso, por exemplo, *Walmart* e *San's Club*, em 2018, anunciaram que todos os seus fornecedores de leguminosas precisariam rastrear seus produtos, desde o local de produção destes até a prateleira do supermercado utilizando esta tecnologia [Walmart 2018]. Esta decisão possibilitou que o tempo para rastrear a origem das mangas nos EUA caísse de 7 dias para 2 segundos [Walmart 2018].

Assim, é possível afirmar que toda a cadeia de suprimentos da Opala poderá se beneficiar de uma plataforma que possibilite o reforço do selo de indicação geográfica, por meio da rastreabilidade dessas gemas, desde a extração até a comercialização, com passagem pelo processo de beneficiamento e produção. Nesse sentido, este artigo propõe a criação de uma ferramenta que possibilite esse rastreamento como forma de garantir a originalidade da gema de Pedro II.

Nesse sentido, obteve-se uma plataforma “Web” capaz de cumprir essa função chamada de OPALATRACER. Através dela, o selo de Indicação Geográfica e a certificação de originalidade poderão ser garantidos, visto que é possível verificar que uma determinada Opala é de fato proveniente de Pedro II. Soma-se a isso o fato de que a proposta poderá ser replicada posteriormente a outros setores produtivos do estado do Piauí, que também possam se beneficiar de uma plataforma semelhante.

Para avaliar este trabalho, foram utilizadas *Heurísticas de Nielsen* [Nielsen e Molich 1994] para auxiliar no desenvolvimento das interfaces, de forma a obter uma interface simples, amigável e eficiente para os usuários do sistema OPALATRACER. Diante disso, foi proposto um método que envolve dez características a serem

observadas para atingir essa finalidade e os objetivos pretendidos com a aplicação.

O presente trabalho está organizado nas seguintes seções: Fundamentação teórica, Trabalhos relacionados, Metodologia, Sistema, Avaliação Heurística, Considerações finais e trabalhos futuros. 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 opala para exemplificação. Na seção 6, apresenta-se como o projeto foi avaliado. Na seção 7, são apresentados os resultados obtidos, assim como apresenta-se, também, a conclusão e proposta 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 cripto moedas. 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 perderá a conexão com este 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 representa 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, ele 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 s 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 cripto moedas e de operações financeiras. 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 esta pode ser comercializada de diferentes formas: transformada em joia, apenas lapidada ou mesmo em forma bruta, isto é, excluindo-se o processo de lapidação. 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.

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 lumi-

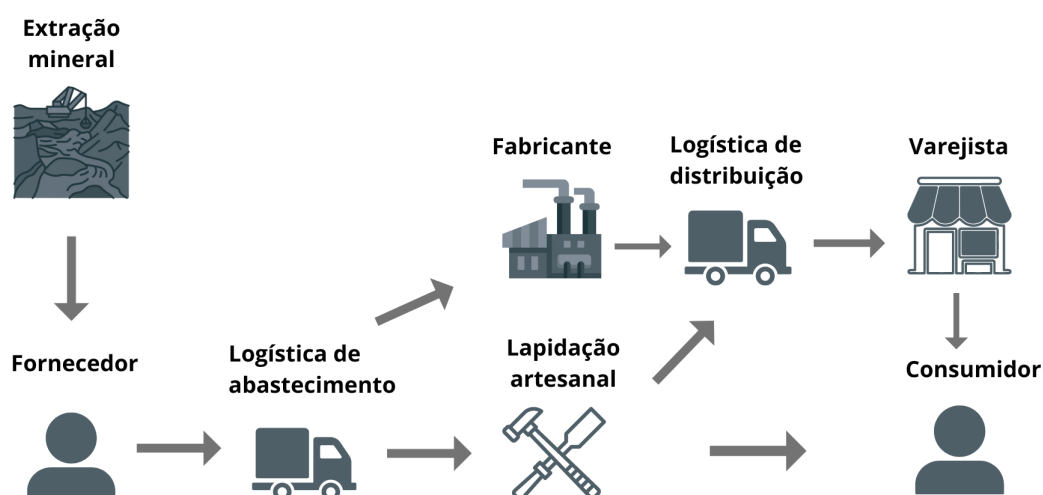


Figura 1. Cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II.

Fonte: Autoria própria.

nescência, 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 distribuição, isto é, a logística de transporte, pode acontecer de duas maneiras: venda direta para o consumidor em forma de gema bruta ou transporte da gema 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 [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 [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 preocupados em comprar o produto autêntico.

Já no trabalho de Moura Sousa *et al.* [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.

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 disponibilização desta 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 esta já passou.

De forma semelhante a esta possibilidade de rastreamento da Opala em Pedro II, no trabalho de Tejos *et al.* [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.

Em Brandão *et al.* [de Araújo Mendes Brandão e de Oliveira Costa Neto 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. 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.

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

Tabela 1. Comparação dos trabalhos relacionados com o OPALATRACER.

Autor(es)	Ano	Descrição	OPALATRACER
Sousa e dos Santos	2021	Busca mapear a Indicação Geográfica de proveniência da Opala de Pedro II com desenvolvimento territorial local.	Busca garantir o selo de Indicação Geográfica da Opala de Pedro II.
de Moura Sousa <i>et al.</i>	2020	Apresentar a cadeia de suprimento da gema na cidade.	Utiliza a cadeia de suprimento descrita como base para a rastreabilidade.
Tejos <i>et al.</i>	2022	Foi proposto um método com <i>blockchain</i> aplicado à cadeia de suprimento do cacau na Amazônia.	Foi proposto um método com utilização de <i>blockchain</i> para a garantia do selo de Indicação Geográfica da Opala em Pedro II.
Brandão <i>et al.</i>	2022	Apresenta uma discussão sobre a questão da viabilidade econômica, ambiental e social da cadeia de suprimentos da Opala de Pedro II.	Analisa a viabilidade do uso de um sistema digital com atuação na cadeia de suprimento da Opala de Pedro II.
Conchon e Lopes	2012	Objetiva apresentar aspectos importantes do uso da rastreabilidade como fator importante na segurança alimentar.	Objetiva apresentar a importância da rastreabilidade para a garantia de origem da Opala de Pedro II.

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 moldagem das telas com inspiração em estórias 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*.

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, 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*, pois, apesar desta ser frequentemente utilizada, não apresenta tanta flexibilidade no gerenciamento de *tokens*.

No sistema, foi feita uma divisão em relação à persistência 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*, 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*.

Nesse sentido, 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, tais como cadeias de suprimento, visto que podem ser usadas para ter certeza de que os lugares por onde determinado produto ou bem passou não pode ser manipulado, isto é, não se pode alterar essas informações com o intuito de falsificá-las. Nesse contexto, ele fornece implementações de referência de itens organizados em conjunto através da criação de *stacks*, isto é, “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 *endpoints* que podem ser utilizados para as mesmas funções através de aplicações que façam requisições nestes.

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

4.3. Avaliação

Para avaliar este projeto, utilizou-se *Heurísticas de Nielsen*, um método que auxilia no desenvolvimento de interfaces com o objetivo de garantir a criação de interfaces simples, amigáveis e eficientes para os usuários do sistema. A partir disso, as dez Heurísticas propostas pelo método são utilizadas como base para verificação nas páginas e recursos visuais do sistema, a fim de verificar se estas estão em conformidade com o que é proposto pelo método, além de serem feitas as devidas correções, de forma a garantir que as telas estão em consonância com esta metodologia de avaliação.

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, a partir da tela “Opalas” para a tela de “Rastreamento”, por meio de um botão intitulado de “Rastreamento”, presente em todas as Opalas listadas; a origem de uma determinada opala. Além disso, é possível visualizar todo o histórico do 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 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. Soma-se a isso 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. Soma-se a isso o fato de que a gema, após extraída, pode ser quebrada em novos pedaços e, a partir disso, cada opala 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 produção da Opala de Pedro II. Para atingir essa finalidade, utilizou-se a linguagem de programação *Typescript* e o *framework React*. 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*. Soma-se a isso 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.

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 estória. 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 estória é dependente, ou seja, aquelas que precisam ser executadas antes ou em conjunto com a

estória 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 estória é, ao considerar que estórias mais complexas levam mais tempo para serem desenvolvidas.

5.2. Arquitetura do sistema

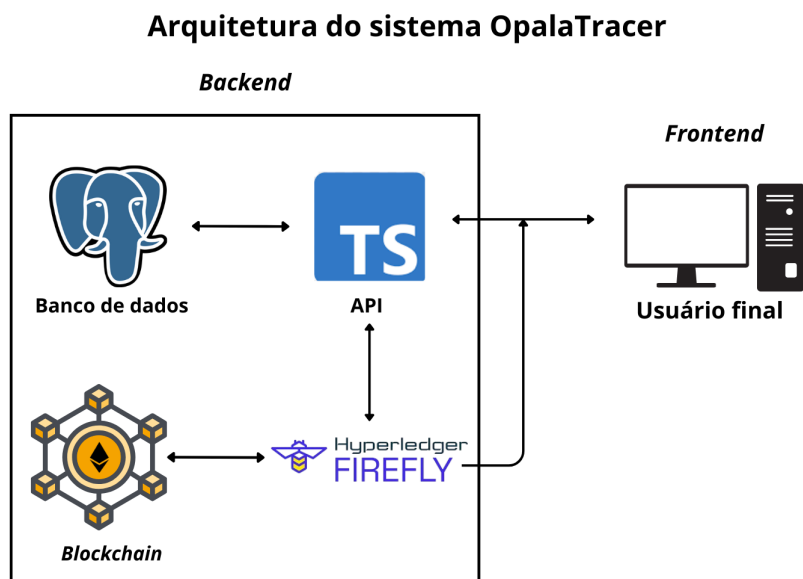


Figura 2. Arquitetura do OPALATRACER.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 ilustra a arquitetura do OPALATRACER. Esta, por sua vez, 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 destas na cadeia de suprimento.

O *backend* do projeto contém a API, responsável por fazer requisições diretas do tipo *get*, *post* e *put* no banco de dados, para cumprir as funções de adicionar, atualizar e recuperar informações. Estas informações são: nome, *ID*, *e-mail*, senha e função dos usuários cadastrados. A API também faz requisições do tipo *post* e *get* nos métodos e nas rotas fornecidos pelo *Hyperledger Firefly*, com a finalidade de cadastrar e recuperar informações persistidas na *blockchain* relacionadas a Opalas, tais como local de extração, peso, tipo, data, hora e transferências; bem como dados referentes ao usuário, como o *ID Ethereum*, dado importante na realização de uma transferência de Opala.

Já no *frontend*, as interfaces fazem o consumo das duas API's: aquela desenvolvida para o sistema e a do *Hyperledger FireFly*. Isso acontece porque determinados dados precisam ser adicionados e/ou recuperados de cada uma de forma separada, isto é, determinadas informações são recuperadas da *blockchain* e outras, do banco de dados.

Tabela 2. Tabela de estórias 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.

Exemplo disso acontece na página “Opalas”, em que são mostradas as Opalas em posse ou transferidas do usuário autenticado. Nela, a informação *ID* da Opala é resgatada diretamente da *blockchain* através de uma requisição direta do *FireFly*, e as informações “Custodiante” e “Função”, do banco de dados.

5.3. Back-end

5.3.1. Ethereum: a rede *blockchain* escolhida

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se uma rede *blockchain* da rede *Ethereum* criada por meio da criação de uma pilha com *Hyperledger FireFly* com dois *Supernodes*, um conjunto de recursos que podem ser utilizados na manipulação direta da *blockchain*. Uma pilha é um conjunto de *Supernodes*, que permite a escolha de uma rede *Ethereum*, *Hyperledger Fabric* ou uma rede padrão, proveniente do próprio *FireFly*. Através desses *Supernodes*, o sistema pode fazer cadastro de usuários e de Opalas, bem como transferências destas. Nesse contexto, também adicionou-se informações importantes sobre as Opalas cadastradas com dados persistidos na *blockchain*: local de extração, peso e tipo da Opala.

5.3.2. 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; “Agentes”, que lista os usuários cadastrados no sistema; e, por fim, a tela de “Configurações”, em que 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 destas. A partir disso, o sistema foi desenvolvido com o intuito de possibilitar que os usuários possam realizar ações relacionadas a isso, 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 poderá ter acesso ao serviço e visualizar, através da interface da tela “Opalas”, as opalas que estão em sua custódia, através de um filtro em que é possível selecionar a visualização na tela de Opalas, “em custódia”, ou “transferidas”, as que estiveram

em sua custódia anteriormente e foram transferidas. Também 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

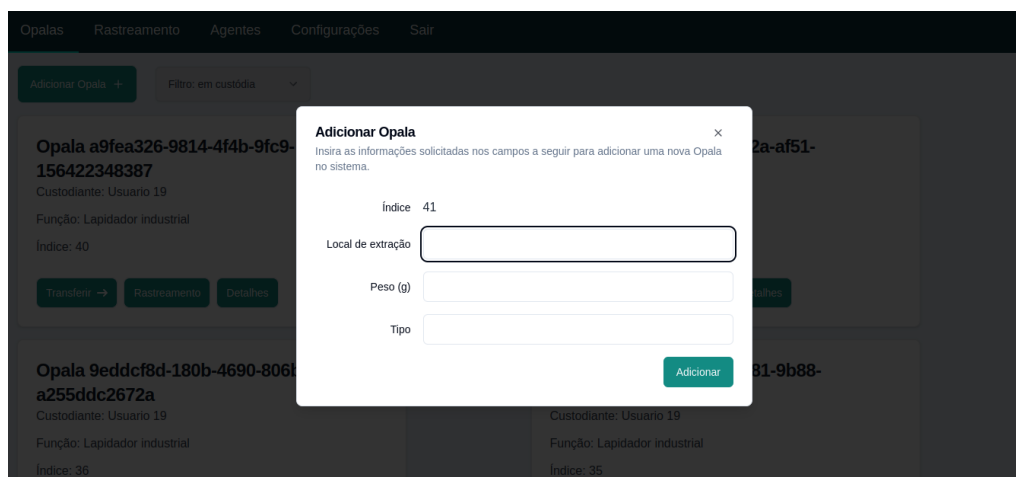


Figura 3. Captura da tela de Cadastro de Opala no OPALATRACER.

Fonte: Autoria Própria

A Figura 3 exibe o formulário de cadastro de uma nova gema de Opala no sistema. Para isso, são solicitadas algumas informações importantes para a adição, que serão persistidas na *blockchain* e ficarão 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.

5.4.2. Custódia de Opalas

A Figura 4 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 da parte superior da tela. Enquanto a Figura 4(a) mostra aquelas que continuam sob custódia, a Figura 4(b) mostra aquelas que já foram transferidas a outro usuário.

No caso ilustrativo da Figura 4(a), como o usuário fictício “Usuario 19” é um Lapidador Industrial, ele tem permissão 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 4(b) também é possível visualizar o nome do custodiante atual da Opala, bem como a função que este exerce na cadeia de suprimentos da gema. Contudo, diferentemente Figura 4(a), não é possível transferir as Opalas listadas.

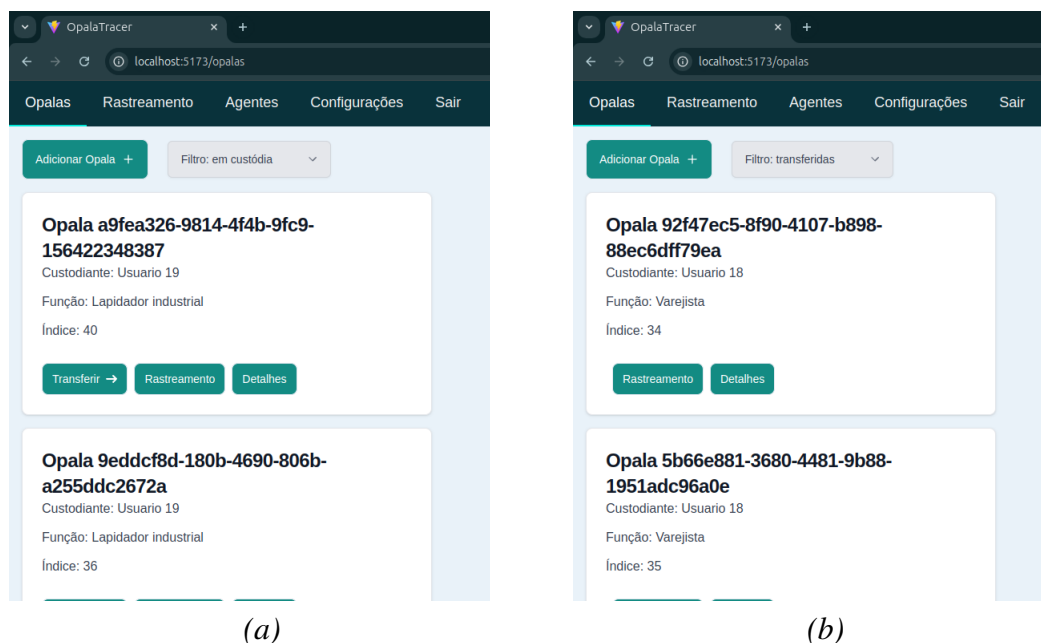


Figura 4. Telas da custódia de gemas de Opala no OPALATRACER.

Fonte: Autoria Própria

5.4.3. Rastreabilidade de Opalas

A Figura 5 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.

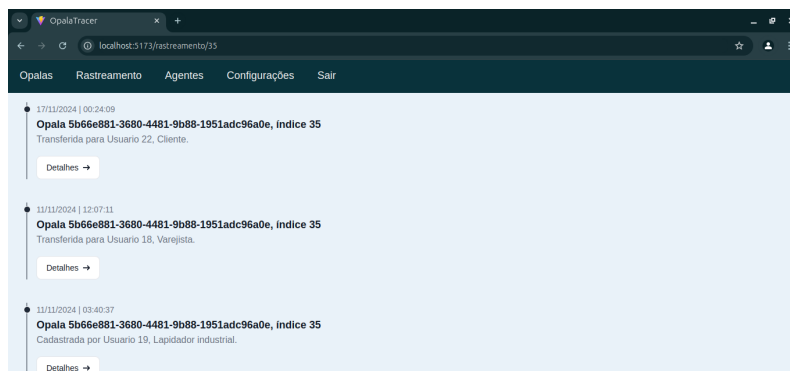


Figura 5. Tela de rastreamento de Opalas cadastradas no OPALATRACER.

Fonte: Autoria Própria

5.4.4. Gestão do sistema

A Figura 6 apresenta duas telas referentes aos caso de uso de cadastro e alteração de dados de usuário do OPALATRACER. A Figura 6(a) exhibe o formulário de cadastro de um novo usuário no sistema. Para isso, são solicitadas algumas informações dele para o processo de *login*: nome de usuário, *e-mail* e senha. Ademais, é solicitada a função que ele exerce na cadeia de suprimento da Opala em Pedro II, que pode ser Lapidador Industrial, Lapidador Artesanal, Transportador, Varejista ou Cliente. A Figura 6(b) mostra as informações importantes do usuário autenticado e permite a ele verificar algumas informações pessoais adicionadas na *blockchain*, como o *ID Ethereum*. Além disso, há a possibilidade de poder alterar algumas destas informações, como nome, *e-mail* e função.

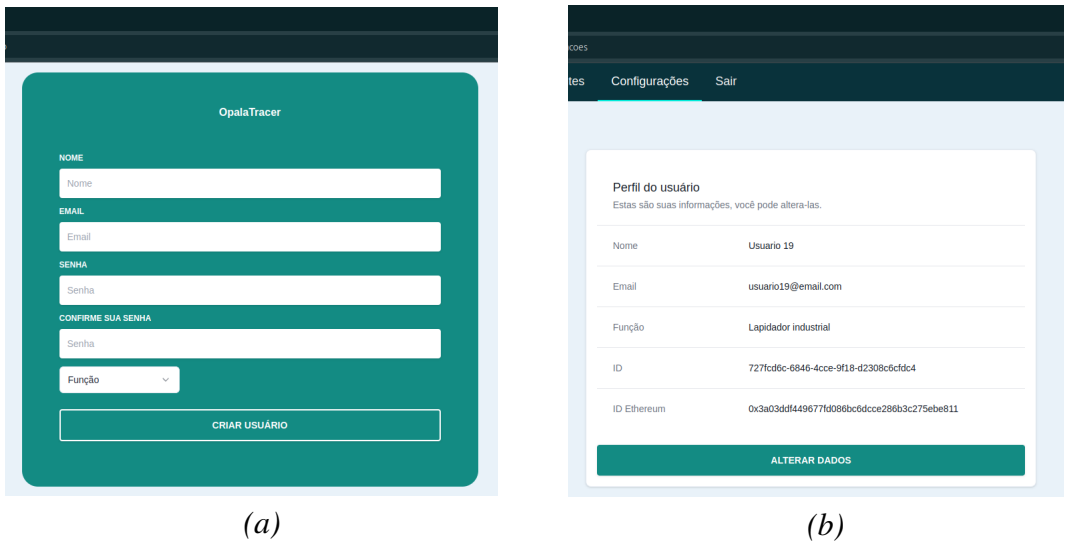


Figura 6. Telas da gestão de usuário do OPALATRACER.
Fonte: Autoria Própria

Nome	Função	Email	ID Ethereum
Usuario 3	Lapidador	usuario3@email.com	0xb37b34cc43e51e762c9304b59956af7bfe7d3f2b
Usuario 8	Lapidador	usuario8@email.com	0xf327c111d2833311b431b18300291e43623349b
Usuario 9	Lapidador	usuario9@email.com	0xa906be275820122428244ed1f4ae0e2541489d6f
Usuario 10	Lapidador	usuario10@email.com	0x5673aa33ddcd926b9c170c218fe4069d7a8477f5
Usuario 11	Lapidador industrial	usuario11@email.com	0xcd4c693f4021d582e896d6bbe19e1219eabeab71
Usuario 12	Lapidador industrial	usuario12@email.com	0x7bd81db1f02ab6a0d5c7d5cf5100bb11872f7ad6
usuario 13	Lapidador industrial	usuario13@email.com	0x480da9bdbc1d55b1d0396433bd265bdcff7d3088
Usuario 14	Lapidador industrial	usuario14@email.com	0xcd877248bd5783580e354385c0035229a0cc17b7
Alcemir	Lapidador industrial	alcemir@email.com	0xe57e1db84d3fe761a1e72abf86586bb9c73755
Usuario 15	Lapidador	usuario15@email.com	0x98b2b4bc4132e88014805b13c99c163296050ca

Figura 7. Captura da tela de Agentes no OPALATRACER
Fonte: Autoria Própria

Por fim, a Figura 7 mostra os usuários cadastrados no sistema. A partir desta

tela, o usuário pode visualizar informações importantes para transferir uma Opala, como o nome, a função e o “ID Ethereum” de cada agente cadastrado, o que facilita ao agente autenticado no sistema identificar para qual agente ele pretende transferir a Opala que está em sua custódia no momento.

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 [Nielsen e 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.

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	Fornecer opções que otimizam a experiência de usuário (atalhos, teclas de funções, abreviações).
H04	Estética e design minimalista	Evitar 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	Fornecer informações que podem ser facilmente encontradas e orientar os usuários.

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 mesmas. 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. Soma-se a isso o fato de que ele pode consultar os agentes a partir da tela “Agentes”, a qual ele pode verificar informações sobre os agentes cadastrados, 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 input 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 extração e comercialização da gema em Pedro II.

A oitava característica se trata de estética e design minimalista. Deixar visível na página somente aquilo que é realmente importante. 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 de Rastreamento e nas informações do usuário na tela de Configurações. Todos estes 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.

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.

Somado a isso, uma análise de severidade foi feita acerca das tarefas de desenvolvimento durante as fases de desenvolvimento deste projeto. Esta 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.

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.

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, assim como o de cadastro

de usuário fecham e atualizam a página, de forma a mostrar o estado atual dos mesmos. 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, um sistema baseado em *blockchain* para rastreabilidade de gemas de Opala extraídas na região da cidade Pedro II do Piauí. O sistema permite que os diferentes atores do arranjo produtivo local reforcem a indicação geográfica concedida pelo INPI, uma vez que o OPALATRACER possibilita um maior controle das transações e monitoramento da custódia das gemas extraídas e beneficiadas na região. Assim, diversos agentes da cadeia podem se beneficiar desse recurso, tendo em vista que tem garantia da origem das gemas e podem dispor de legitimidade do produto ao passar a gema adiante aos demais elos da cadeia.

O OPALATRACER poderá contribuir para que a comercialização da Opala de Pedro II torne-se menos informal. Graças ao uso da tecnologia *blockchain*, o OPALATRACER possibilita o controle, garante a origem e a transparência de informações referente às movimentações de cada gema produzida para todos os setores envolvidos nesta cadeia produtiva e principalmente para o cliente final, que espera que o artigo adquirido conte com uma gema original da cidade de Pedro II. De fato, diversos produtos derivados das gemas extraídas na cidade podem se beneficiar dos recursos disponibilizados pelo sistema.

Ademais, ainda é possível melhorar o OPALATRACER em trabalhos futuros com melhorias que podem agregar valor comercial e impactar positivamente na qualidade do sistema. Entre elas: (i) adicionar uma imagem da Opala no momento do cadastro da mesma no sistema – o que pode facilitar a identificação desta e aumentar ainda mais a confiabilidade da gema adquirida; (ii) conduzir estudos qualitativos e quantitativos de validação com arranjo produtivo local para identificar a viabilidade e o impacto da implantação do sistema.

Referências

- Arigela, S. S. D. and 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.
- Conchon, F. L. and Lopes, M. A. (2012). Rastreabilidade e segurança alimentar. Technical Report 91, UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS/MG.
- da Silva Rodrigues, A. F. (2009). *MINERAÇÃO DE METAIS E PEDRAS PRECIOSAS (prólogo)*, pages 297–303. Brasília, DF.
- de Araújo Mendes Brandão, L. and de Oliveira Costa Neto, P. L. (2022). Análise da viabilidade econômica, social e ambiental do processo produtivo da opala no município de pedro ii - pi. *Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista*.
- de Minas e Energia MME, M. (2018). Diagnóstico socioeconômico e ambiental da mineração em pequena escala no brasil (mpe). Technical report, MPE.

- de Moura Sousa et al, L. (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). Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4875>.
- Hyperledger (2025). Use tokens. <https://hyperledger.github.io/firefly/latest/tutorials/tokens/>. Accessed: 2025-01-10.
- Investopedia (2024). Blockchain com permissão: Definição, exemplos, vs. sem permissão. <https://www.investopedia.com/terms/p/permissioned-blockchains.asp#:~:text=A%20permissioned%20blockchain%20requires%20user,require%20less%20transparency%20and%20control>. Acessado em 13-12-2024.
- Konagari, A., Kusuma, H., Chetharasi, S., Kuchipudi, R., Babu, P., and Murthy, S. (2023). Nft marketplace for blockchain based digital assets using erc-721 token standard. pages 1394–1398.
- Marques, G. T. (2014). Opalas gemológicas do piauí: gênese revelada por microtermometria e minerais associados. Master's thesis, Universidade Federal do Pará (UFPA). Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4875>.
- Nielsen, J. and Molich, R. (1994). *Usability Engineering*. Academic Press, San Diego, CA.
- Saches, L. L. B., Brilhante, J. R., Braga, I. F., Batista, I. H., and Amaral, E. S. (2015). Projeto avaliação dos depósitos de opalas de pedro ii. *INFORME DE RECURSOS MINERAIS: Série Pedras Preciosas, nº 08. Teresina*, 8(8).
- SEBRAE (2023). Opalas preciosas e joias artesanais de opalas. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/origens/opalas-preciosas-e-joias-artesanais-de-opalas,ddc8e71b5a208710VgnVCM100000d701210aRCRD>. Acessado em: 26-11-2024.
- Sousa, L. M. and 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. and Techapanupreeda, C. (2018). Blockchain: Challenges and applications. In *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pages 473–475.
- Tejos, R. A. G., de Brito Carvalho, T. C. M., Júnior, M. A. S., Santos, B. J., and Nobre, I. (2022). Blockchain aplicado à rastreabilidade da cadeia produtiva do cacau da amazônia. In *Blockchain aplicado à rastreabilidade da cadeia produtiva do cacau da Amazônia*. SBSEG.
- Vale, E. (2003). Simulação do impacto econômico da mineração: relatório final. Technical Report CDD 338.2, SMM/MME. Disponível em: <http://www.bamburra.com/Impacto.pdf>.
- Walmart (2018). Walmart and sam's club. food traceability initiative - fresh leafy greens. *Walmart*. Disponível em: <https://corporate.walmart.com/newsroom/2018/09/24/in-wake-of-romaine-e-coli-scare-walmart-deploys-blockchain-to-track-leafy-greens>.