

## Chapter

# 6

## **Tokens não Fungíveis (NFTs): Criação, Comercialização, Coleta e Análise de Dados na rede Blockchain Ethereum e na Plataforma de Vendas OpenSea**

Samuel de Oliveira Ribeiro, Saul S. da Rocha, Dayan Ramos Gomes, Nara Raquel D. Andrade, Emanuel Aurélio F. de Miranda, Glauber Dias Gonçalves

### *Abstract*

*The support for smart contracts on the Ethereum blockchain network has enabled the emergence of a new digital market centered around Non-Fungible Tokens (NFTs), unique digital assets that have transformed the way value is assigned and exchanged in the decentralized web. This chapter provides a detailed exploration of three essential aspects that drive the NFT ecosystem: (1) the technical and operational fundamentals of creating and commercializing NFTs, (2) the categorization and automated analysis of collections using the OpenSea API, and (3) the challenges and future opportunities related to scalability, price prediction, and the impact of communities on the NFT market. We present the principles underpinning NFTs, highlighting OpenSea as the largest trading platform for these assets. Subsequently, we discuss data collection and automated categorization techniques, which are crucial for organizing and analyzing the market. Finally, we explore recent research and developments that will address challenges and enhance the growth of the NFT market in the coming years.*

### *Resumo*

*O suporte a contratos inteligentes na rede blockchain Ethereum viabilizou o surgimento de um novo mercado digital baseado em Tokens Não Fungíveis (NFTs), ativos digitais únicos que transformaram a forma como o valor é atribuído e trocado na web descentralizada. Este capítulo aborda de forma detalhada três aspectos essenciais que impulsionam o ecossistema dos NFTs: (1) os fundamentos técnicos e operacionais da criação e comercialização de NFTs, (2) a categorização e análise automatizada de coleções utilizando a API da OpenSea, e (3) os desafios e oportunidades futuras relacionados à escalabilidade, previsão de preços e o impacto das comunidades no mercado de NFTs. Apresentamos os*

*princípios que sustentam os NFTs, com destaque para a OpenSea como a maior plataforma de negociação desses ativos. Em seguida, discutimos as técnicas de coleta de dados e categorização automatizada, fundamentais para a organização e análise do mercado. Finalmente, exploramos as pesquisas e desenvolvimentos mais recentes que enfrentarão os desafios e potencializarão o crescimento do mercado de NFTs nos próximos anos.*

## 6.1. Introdução

Token não fungível ou NFT, do inglês *Non-fungible Token*, é um objeto digital registrado em redes blockchain, tipicamente, associado a conteúdo de texto ou imagem, que o confere características únicas e o torna também um objeto colecionável. Adicionalmente, NFT permite definição de um autor (criador), transferências de propriedade entre usuários, recebimento de royalties pelo autor em transferências, dentre outros recursos do ambiente distribuído de blockchains. Devido a essas características, NFTs vem sendo adotado por artistas para criação e distribuição de conteúdo digital, visando a proteção do direito autoral e o ganho com royalties na revenda de itens.

A credibilidade no comércio de NFTs se baseia nas propriedades da tecnologia blockchain como descentralização, transparência e imutabilidade para o registro transações de compra e venda. Primeiro, a descentralização permite processar e armazenar as transações em computadores organizados em uma rede par-a-par (P2P) sem um controle central, ou seja, todos os computadores participantes gerenciam a rede. Por conseguinte, a transparência decorre de todos os participantes da rede terem a mesma réplica das transações registradas na rede, facilitando o acesso a essas informações. A imutabilidade, por sua vez, ocorre via uma estrutura de dados (o encadeamento de blocos) que garante que uma transação registrada na rede pela maioria dos participantes não possa ser estornada e, gradativamente, todos tenham as mesmas transações. Em suma, a tecnologia blockchain e suas propriedades decorre da unificação de tecnologias computacionais maduras como mecanismos de consenso distribuído, criptografia e comunicação via redes P2P [Greve et al. 2018].

A tecnologia blockchain foi concebida originalmente para garantir segurança às transações da rede P2P de dinheiro eletrônico Bitcoin [Nakamoto 2008]. Contudo, o potencial dessa tecnologia fez com que seu uso se expandisse além do registro de transações para a execução de aplicações na rede blockchain, como é o caso de NFTs atualmente [Casino et al. 2019]. Essas aplicações, conhecidas por *contratos inteligentes* [Szabo 1997], são programas de computador autônomos, desenvolvidos em linguagens de alto nível e suportados desde a segunda geração de redes blockchain como a Ethereum [Wood 2014]. Os contratos inteligentes, uma vez iniciados, executam automaticamente e de acordo com seu código registrado na blockchain.

Vários contratos inteligentes constituem uma aplicação descentralizada ou DApp, do inglês *decentralized application*. Atualmente, DApps ocupam uma posição relevante nas atividades econômicas e financeiras internacionais, e despertam o interesse de governos e empresas [Schär 2021]. Existem uma variedade de DApps que oferecem um intrincado ecossistema de serviços, desde a área de finanças ao entretenimento digital. Tal ecossistema vem propiciando a emergência de uma nova geração da Internet baseada na infraestrutura de blockchain, popularmente intitulada *Web Decentral-*

izada [Murray et al. 2023]. Essa nova geração busca unificar as raízes descentralizadas da primeira geração da Internet, suportadas por conteúdos públicos e protocolos abertos (e.g., TCP/IP e HTTP), com as funcionalidades da geração vigente (dita Web2), baseadas em plataformas centralizadas, a exemplo, serviços em nuvem e redes sociais providas por Amazon, Google, Facebook, etc. A promessa da web descentralizada é que esses serviços tenham versões alternativas em DApps, favorecendo não apenas “Big Techs” mas todo um ecossistema de vários pequenos provedores de serviços tecnológicos na web.

A essência dos negócios em DApps, e por conseguinte NFT, se baseia no conceito de *token*, que é um objeto digital registrado na blockchain. Um *token* é único e está associado a um usuário, que é o seu proprietário, e somente este pode transferir a propriedade do *token* a outro usuário. Isso garante a possibilidade de valor ao *token*, i.e., a sua escassez ou impossibilidade de posses duplicadas (gasto duplo), diferentemente de objetos digitais tradicionais da web. Assim, blockchain atua como a tecnologia base que permite a posse de *tokens* em redes de acesso público e confiável com segurança garantida por criptografia.

A rede blockchain Ethereum é a pioneira na emissão de NFTs e concentra a vasta maioria de coleções desses *tokens* atualmente. Ela oferece padrões de contratos inteligentes específicos para esse tipo de token. A maioria desses padrões estabelecem um único contrato para uma coleção de NFTs. Por sua vez, cada NFT da coleção é vinculado de forma imutável a atributos que o tornam único. Esses atributos incluem em especial um link para um arquivo de mídia temático (e.g., jogos, fotos, vídeos ou desenhos), identificadores do autor e proprietário, valores de venda e royalties para o autor. Toda transferência de propriedade, i.e., venda, de NFT é automaticamente registrada como uma transação na rede blockchain.

Nesse contexto, NFTs abrem um novo caminho para utilização e veiculação de objetos digitais, i.e., tokens, sob a Internet, onde o aspecto mais relevante é a autoria ou propriedade do token. Por exemplo, em 11 de março de 2021, o artista Beeple realizou a venda de sua obra de arte digital em formato de NFT na blockchain Ethereum pelo valor de US\$ 69 milhões. Em 22 de março de 2021, o fundador do Twitter Jack Dorsey vendeu o NFT do seu famoso primeiro tweet pelo valor de US\$ 2,9 milhões. Essas obras podem ser acessadas gratuitamente na Internet e facilmente replicadas. Contudo, quanto mais popular e copiado na Internet é o token, mais benefícios ele pode trazer ao seu proprietário, que em tese possui direitos exclusivos sobre a sua comercialização e imagem [Okonkwo 2021].

Uma plataforma de comercialização de NFTs é um ambiente virtual onde são oferecidos vários serviços e facilidades para divulgação e vendas desses tokens. OpenSea é uma das plataformas de comercialização de NFTs pioneiras, que iniciou suas operações nessa área em 2018 e já negociou milhões de dólares em NFTs. Outras plataformas, contudo, vem crescendo em termos de negociações e comunidades de usuários que as suportam, se destacando as plataformas Blur, SuperRare e Rarible. Elas competem por melhores preços de venda, tarifas e royalties para os criadores de NFT. Esse mercado é extremamente dinâmico, e é difícil prever quais plataformas terão a liderança, atraindo maior volume de negociações futuramente.

Esse capítulo versa sobre os principais tópicos tecnológicos e de pesquisa envol-

vendo NFT. Nesse sentido, iniciamos descrevendo os principais fundamentos técnicos sobre a tecnologia blockchain na Seção 6.2. Como uma sequência desses fundamentos, apresentamos tópicos sobre o desenvolvimento de NFTs na Seção 6.3. A comercialização de NFTs via plataformas de exposição, compra e venda entre usuários são discutidas na Seção 6.4. Na Seção 6.5, são discutidos os desafios e oportunidades de pesquisa e inovação em NFTs. Finalmente, apresentamos nossas considerações finais com um resumo do capítulo na Seção 6.6. Importante mencionar que materiais adicionais, atualizações desse capítulo, códigos fonte, artigos e resultados de pesquisa desenvolvidos pelos autores podem ser obtidos no repositório [https://github.com/LABPAAD/blockchain\\_nft](https://github.com/LABPAAD/blockchain_nft).

## 6.2. Fundamentos

### 6.2.1. Blockchain

A tecnologia blockchain é fundamentada em uma estrutura de encadeamento de blocos, como ilustra a Figura 6.1, onde cada bloco contém um conjunto de transações registradas e é ligado ao bloco anterior através de um *hash* criptográfico. Essa estrutura garante que qualquer alteração em um bloco invalide todos os blocos subsequentes, tornando qualquer modificação na blockchain auditável, por conseguinte, imutável e resistente a fraudes. O *hash* de cada bloco é gerado a partir dos dados contidos nele e do *hash* do bloco anterior, criando uma cadeia contínua e segura de registros.

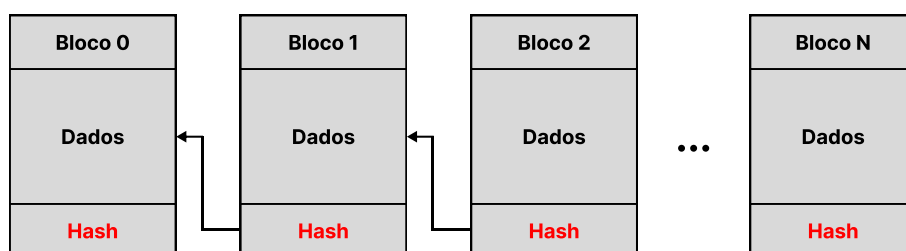


Figure 6.1: Estrutura de uma Blockchain.

Essa estrutura de dados contendo blocos encadeados (i.e., a blockchain) é replicada em vários computadores para ser armazenada de forma descentralizada. A replicação da blockchain é feita por meio de uma rede de computadores par-a-par (P2P), onde cada computador (i.e., nó da rede) possui uma cópia completa da blockchain, como mostra a Figura 6.2. Quando um novo bloco é adicionado, ele é transmitido para todos os nós na rede, e esses o validam de acordo com as regras de um mecanismo de consenso antes de incorporá-lo às suas cópias da blockchain. Esse modelo de replicação descentralizada garante que a blockchain seja resistente a falhas, pois não depende de um único ponto de controle, e qualquer tentativa de ataque requereria o comprometimento simultâneo de muitos nós.

Os principais mecanismos de consenso utilizados para validar as transações e adicionar novos blocos à blockchain incluem o *Proof of Work* (PoW) e o *Proof of Stake* (PoS), ilustrados na Figura 6.3. No PoW, os nós da rede competem para resolver prob-

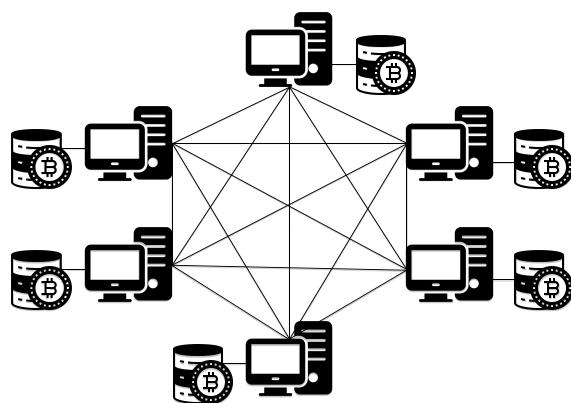


Figure 6.2: Replicação de uma Blockchain.

letras matemáticas complexas, e o primeiro a resolver se torna o proponente do novo bloco à blockchain, sendo recompensado por isso. Já no PoS, a probabilidade de um nó ser o proponente de um novo bloco é proporcional à quantidade de criptomoeda que ele possui e está disposto a "apostar" como garantia. Ambos os mecanismos visam garantir a segurança e integridade da blockchain, mesmo em ambientes descentralizados e potencialmente hostis.

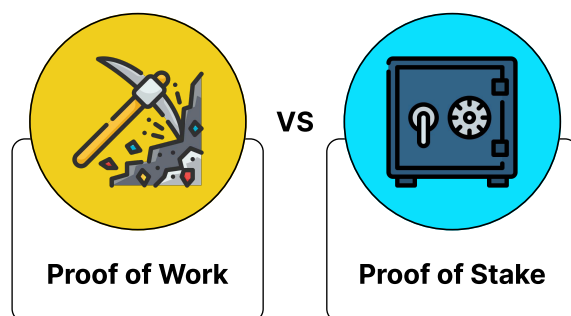


Figure 6.3: Representação de Proof of Work e Proof of Stake.

### 6.2.2. Contratos Inteligentes

Os contratos inteligentes [Szabo 1997] desempenham um papel essencial no ecossistema de Finanças Descentralizadas (DeFi), permitindo a automação e execução de acordos financeiros sem a necessidade de intermediários. Esses contratos são programas de computador autônomos registrados em uma blockchain, onde estabelecem regras e condições que orientam as interações entre as partes envolvidas. A execução é determinada pela lógica programada, o que resulta em maior previsibilidade e redução de custos nos acordos financeiros.

A rede blockchain Ethereum foi a primeira a suportar contratos inteligentes, possibilitando a criação de aplicações descentralizadas que funcionam sem intermediários centralizados [Wood 2014]. Contratos inteligentes, uma vez implantados na blockchain, tornam-se imutáveis e recebem um endereço exclusivo que permite a interação dos usuários. Esses contratos são escritos em linguagens de programação como Solidity, compilados em

*bytecode*, e executados por qualquer nó da rede, garantindo a segurança e a eficiência das transações.

Mais especificamente, um contrato inteligente é um programa de computador escrito em uma linguagem de alto nível, como ilustrado no Algoritmo 6.1, adaptado de [Palma et al. 2022], que exemplifica um contrato inteligente em Solidity chamado C. Ele possui uma variável de estado `nome` do tipo `bytes32` e duas funções. A função `get` recebe um parâmetro `_nome` e o atribui à variável `nome`, alterando o estado do contrato. A função `set` retorna o valor atual de `nome` sem modificar o estado, pois é marcada como `view`. O contrato demonstra operações básicas de leitura e escrita na blockchain, e a linha `pragma solidity >=0.7.0 <0.9.0;` especifica a versão do compilador compatível. Note que, após ser desenvolvido e testado, um contrato necessita ser implantado, ou seja, registrado de forma imutável, na blockchain.

```
1 // SPDX-License-Identifier: GPL-3.0
2 pragma solidity >=0.7.0 <0.9.0;
3
4 contract C{
5     bytes32 nome;
6     function get (bytes32 _nome) public{
7         nome = _nome;
8     }
9     function set () public view returns (bytes32) {
10        return nome;
11    }
12 }
```

Algoritmo 6.1: Exemplo de código fonte de contrato inteligente tomando com referência a linguagem Solidity Ethereum, adaptado de [Palma et al. 2022].

O contrato implantado na blockchain, junto com suas respectivas aplicações clientes, que transmitem as requisições dos usuários, constitui o que é conhecido como aplicação descentralizada ou DApp. Para interagir com o DApp, é necessário submeter uma transação à blockchain, especificando o endereço do contrato e a função desejada. Conforme ilustrado na Figura 6.4 proposta por [Palma et al. 2022], uma vez que o contrato inteligente é implantado, como demonstrado no bloco  $B_i$  pela transação "deploy C", os usuários podem interagir com ele em blocos subsequentes, como  $B_{i+1}$  e  $B_{i+2}$ , através de funções específicas do contrato, como `get()` e `set(true)`. Essas interações são realizadas por meio de uma aplicação cliente conectada à rede blockchain, equipada com as interfaces de comunicação necessárias para enviar as transações, garantindo que as operações programadas sejam executadas e registradas de forma imutável na blockchain.

As principais propriedades de segurança dos contratos inteligentes e da blockchain são descentralização, transparência e imutabilidade. A descentralização é garantida pela replicação da blockchain em uma rede de pares (P2P), onde cada nó mantém uma cópia completa do histórico de transações. Essa estrutura descentralizada distribui o poder de decisão entre todos os participantes da rede, eliminando a possibilidade de controle centralizado e tornando o sistema resistente a falhas e ataques. Mesmo que alguns nós sejam comprometidos, a integridade da blockchain permanece intacta, pois a maioria dos nós segue as regras de consenso estabelecidas.

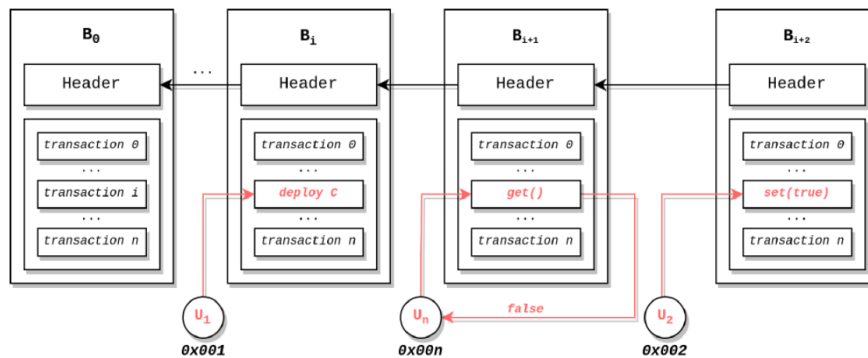


Figure 6.4: Exemplo de execução de uma transação que modifica um estado definido pelas variáveis programadas no contrato [Palma et al. 2022].

A transparência é assegurada pelo fato de que todas as transações e contratos registrados na blockchain são públicos e auditáveis por qualquer pessoa. Isso cria um ambiente em que todas as operações são visíveis e verificáveis, reduzindo significativamente o risco de fraudes ou manipulações. A transparência não apenas promove a confiança entre os usuários, mas também facilita a auditoria e a conformidade regulatória, elementos essenciais para a aceitação da tecnologia blockchain em sistemas mais amplos. A imutabilidade, garantida pelo uso de *hash* criptográficos, assegura que uma vez que um bloco é adicionado à blockchain, ele não pode ser alterado sem modificar todos os blocos subsequentes. Isso torna as transações e os contratos registrados permanentes e inalteráveis, garantindo a integridade dos acordos realizados. A imutabilidade elimina a possibilidade de alterações retroativas nos registros, garantindo que os dados armazenados permaneçam confiáveis ao longo do tempo.

Essas três propriedades — descentralização, transparência e imutabilidade — combinadas fornecem um ambiente seguro e confiável para a execução de contratos inteligentes. Eles não apenas aumentam a eficiência das transações, mas também democratizam o acesso a serviços financeiros e jurídicos, permitindo que indivíduos e organizações em qualquer parte do mundo participem de mercados globais de forma segura e eficiente.

### 6.2.3. Tokens

No contexto de Finanças Descentralizadas os *tokens* desempenham um papel central, atuando como objetos digitais registrados em uma blockchain. Esses *tokens* podem ser fungíveis ou não fungíveis, cada um com suas características e funcionalidades específicas. De forma simplificada, um *token* pode ser entendido como uma representação digital de um ativo, seja ele tangível ou intangível. Cada *token* é associado a um proprietário, e apenas este pode transferir sua propriedade a outro usuário, o que assegura a escassez e a impossibilidade de duplicações, evitando o problema do "gasto duplo". Essa propriedade exclusiva torna os *tokens* valiosos dentro do ecossistema blockchain.

A ideia geral dos *tokens* é tornar ativos mais acessíveis e facilitar as transferências ou negociações desses ativos de maneira eficiente e segura. Por exemplo, um ativo do mundo real pode ser representado na blockchain por um *token*, e a transação que altera a propriedade desse *token* refletirá a mudança de propriedade do próprio ativo no mundo

real. Esses *tokens* podem ser transferidos globalmente em questão de segundos e podem ser utilizados por diversas aplicações descentralizadas, desde que estejam vinculados a contratos inteligentes que controlam sua emissão e transferência.

Os *tokens* fungíveis foram os primeiros a serem desenvolvidos na plataforma Ethereum, por meio do padrão [ERC-20](#). Esses *tokens* são intercambiáveis, ou seja, cada unidade de um *token* fungível é igual a qualquer outra unidade do mesmo *token*, assim como cada unidade de uma moeda é igual a outra. O padrão ERC-20 estabelece um conjunto de regras e funcionalidades que permitem a criação, emissão e transferência de *tokens* fungíveis de forma consistente e segura. O padrão [ERC-20](#) define funcionalidades essenciais para que um objeto digital seja considerado um *token* fungível, como o nome, símbolo, número de decimais, total de *tokens* emitidos (*total supply*), e eventos como *Transfer* e *Approval*. O *Transfer* permite a transferência de *tokens* entre usuários, enquanto o *Approval* permite que o proprietário de um *token* autorize outra conta a gastar uma quantidade específica de seus *tokens*. Além disso, o padrão também inclui mecanismos de emissão (*minting*) e queima (*burning*) de *tokens*, controlados pelo contrato inteligente que emitiu o *token*.

Os *tokens* não fungíveis, conhecidos como NFTs, são um tipo específico de *token* que representa a propriedade de um ativo único ou colecionável na blockchain. Diferente dos *tokens* fungíveis, cada NFT é único e não pode ser trocado por outro de forma equivalente. O padrão [ERC-721](#), amplamente utilizado na Ethereum, define um conjunto de regras para a criação e interação com esses *tokens* digitais únicos e indivisíveis. Os principais aspectos do padrão ERC-721 incluem a unicidade e indivisibilidade dos *tokens*, permitindo que cada NFT tenha atributos exclusivos, como a propriedade de uma obra de arte digital ou um item de jogo. As transferências de NFTs são realizadas individualmente, com cada *token* possuindo seu histórico de propriedade e rastreabilidade na blockchain. O padrão também define métodos de interface, como *balanceOf* (saldo de *tokens* de um proprietário), *ownerOf* (proprietário de um *token*), e *transferFrom* (transferência de propriedade de um *token*), além de permitir o armazenamento de metadados adicionais que descrevem o ativo representado pelo *token*.

O padrão [ERC-1155](#) foi introduzido como uma evolução dos padrões anteriores, combinando as características dos *tokens* fungíveis e não fungíveis em um único contrato inteligente. Esse padrão permite a criação de múltiplos tipos de ativos digitais dentro de um único contrato, o que é especialmente útil em jogos e outras aplicações que requerem a gestão de diferentes tipos de itens, como moedas, armas, e acessórios. Uma das principais vantagens do [ERC-1155](#) é a eficiência nas transferências e na gestão de ativos, permitindo que várias instâncias de *tokens* sejam criadas e gerenciadas com menos custo e complexidade. Além disso, esse padrão oferece maior flexibilidade aos desenvolvedores, que podem criar e gerenciar diferentes tipos de *tokens* dentro de um único contrato inteligente, e também proporciona maior segurança, pois os ativos digitais são registrados na blockchain, garantindo sua autenticidade e imutabilidade.

Cada um dos padrões ERC-20, ERC-721 e ERC-1155 tem sua importância e aplicabilidade dentro do ecossistema blockchain. Enquanto o ERC-20 é fundamental para a criação de *tokens* fungíveis usados em diversas aplicações financeiras e utilitárias, o ERC-721 é crucial para o crescimento do mercado de NFTs, que permite a criação e comercial-



ização de ativos digitais únicos. O ERC-1155, por sua vez, oferece uma solução híbrida que combina o melhor dos dois mundos, permitindo uma gestão eficiente de múltiplos tipos de ativos digitais em um único contrato. Esses padrões, ao definirem regras claras para a criação, emissão e transferência de *tokens*, desempenham um papel vital na construção de um ecossistema blockchain robusto, seguro e interoperável, que suporta uma ampla variedade de aplicações descentralizadas e casos de uso inovadores.

### 6.3. Desenvolvimento de NFTs

#### 6.3.1. Principais Conceitos

A concepção inicial das NFTs surgiu em 2012 com as "Moedas Coloridas" do Bitcoin, que consistiam em *tokens* representando diversos ativos físicos, como imóveis, carros e títulos, tendo como principal característica a exclusividade [Rosenfeld et al. 2012]. Este conceito evoluiu para o meio digital como ferramenta de compra e venda de artigos de jogos digitais em 2017, mas atualmente está inserido em uma vasta rede de negociações [Valeonti et al. 2021]. Os NFTs são implementados por meio de contratos inteligentes na rede blockchain Ethereum, que é a plataforma pioneira na criação e disponibilização de NFTs.

Atualmente os NFTs são compreendidos como uma forma de representação e comercialização de ativos únicos e indivisíveis, garantindo autenticidade e propriedade por meio da tecnologia blockchain. As negociações de NFTs acontecem em uma plataforma online onde as transações de compra e venda, bem como leilões e outros tipos de negociações, podem ocorrer. Um NFT pode ser uma versão digital de um item físico ou um registro digital de uma imagem, um vídeo, um som ou qualquer outro formato eletrônico. [Yilmaz et al. 2023]. Ao contrário dos *tokens* fungíveis (por exemplo, criptomoedas ou moedas fiduciárias), um NFT não é intercambiável com outro NFT em uma base um para um.

Aos NFTs são atribuídos códigos de identificação e metadados que os distinguem uns dos outros e garantem sua propriedade de unicidade. Existem duas partes em um NFT [Wlasinsky 2023]:

- Item NFT: O item digital associado a um NFT é descrito em metadados. O item, i.e a mídia ou bem ao qual o NFT está associado, não está armazenada diretamente dentro da blockchain Ethereum.
- Metadados de NFT (*token*): São armazenados em uma blockchain e geralmente incluem informações que identificam o item NFT, sua localização online, propriedade e informações de transações.

De modo a simplificar os conceitos apresentados, considere a icônica obra intitulada Mona Lisa, criada pelo renomado pintor italiano Leonardo da Vinci<sup>1</sup>. Como amplamente conhecido, essa pintura é exibida no Museu do Louvre, em Paris [Le Louvre 2024].

---

<sup>1</sup>Visualize e aprenda mais sobre essa famosa obra de arte [https://pt.wikipedia.org/wiki/Mona\\_Lisa](https://pt.wikipedia.org/wiki/Mona_Lisa)

Embora a Mona Lisa seja uma obra de arte física, ela, assim como outras peças artísticas, pode ser transformada em um NFT e armazenada em uma blockchain, possibilitando a digitalização e comercialização de sua representação no ambiente digital. Assim, o quadro seria o correspondente ao que definimos anteriormente como Item NFT. O item continuaria a ser armazenado no museu onde se encontra, porém, os metadados associados a ele seriam armazenados na rede Blockchain. O quadro seria descrito em metadados únicos e armazenados em Blockchain, contendo diversos tipos de informações de identificação do NFT, como localização, proprietário, autor, informações sobre histórico de transações, entre outras informações importantes.

Além das duas partes fundamentais já citadas (Item NFT e Metadados NFT), existe um atributo essencial que contribui para diversidade dos NFTs dentro de uma coleção: Os *Traits* (Traços). Os *Traits* são atributos específicos que definem as características visuais de um NFT e o diferenciam de outros da mesma coleção. Esses atributos podem incluir elementos visuais, como cor de fundo, formas, ou padrões, bem como características de raridade, como é apresentado na Figura 6.5, a seguir.

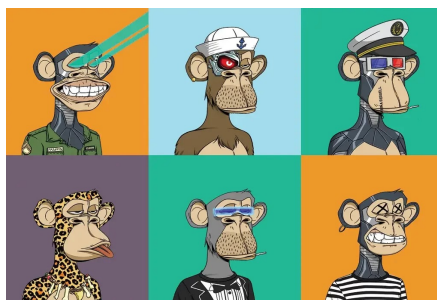


Figure 6.5: Exemplos de NFTs da coleção Bored Ape Yacht Club, adaptado de [Bored Ape Yacht Club 2024]

Todos os NFTs apresentados fazem parte da mesma coleção, intitulada Bored Ape Yacht Club. Porém, pode-se observar que eles possuem atributos visuais que os diferenciam entre si, como a cor de fundo, vestimentas, pelagem, formato dos olhos e boca, estes atributos são os *traits*. Além disso, os NFTs também possuem características que asseguram a manutenção dos princípios fundamentais que os regem, que são:

- Prova de propriedade e autenticidade: O NFT, por ser armazenado em blockchain, permite que a propriedade seja comprovada por históricos imutáveis armazenados na rede, bem como impede a falsificação.
- Indivisibilidade: Diferentemente das criptomoedas, os NFTs não podem ser divididos ou fracionado em partes menores, de modo que toda transação que envolva um NFT, utiliza a sua totalidade.
- Interoperabilidade: Os NFTs possibilitam interoperabilidade de ativos através de diversas plataformas devido ao padrão de *tokens* utilizados em sua criação.

- Imutabilidade: Uma vez criado e registrado em uma blockchain, os dados associados a um NFT são imutáveis, o que significa que eles não podem ser alterados ou apagados, garantindo a permanência das informações.

### 6.3.2. Exemplo Prático

A seguir temos a implementação de um código em Solidity que segue o padrão ERC-721 para criar e gerenciar *tokens* não fungíveis. Este contrato, ilustrado no Algoritmo 6.2, é construído utilizando as bibliotecas da *OpenZeppelin*, que oferecem uma base segura e robusta para o desenvolvimento de contratos baseados em Ethereum. O contrato exige que o compilador Solidity seja de versão 0.8.20 ou superior, garantindo que recursos e otimizações específicas desta versão estejam disponíveis. As bibliotecas da OpenZeppelin utilizadas incluem *ERC721URIS storage*, que estende o padrão básico ERC-721 ao permitir que cada *token* tenha um URI único associado, e *Ownable*, que facilita o controle de propriedade sobre o contrato, permitindo que certas funções sejam restritas ao proprietário [Entriiken et al. 2018].

A estrutura principal do contrato é definida como *MyNFT*, que herda as funcionalidades de *ERC721URISStorage* e *Ownable*. Dentro desta estrutura uma variável privada *tokenIds* é declarada, responsável por armazenar o número de *tokens* criados, assegurando que cada novo *token* receba um ID único. O construtor do contrato é executado no momento da implantação e tem duas funções principais. Ele define o nome "*MyNFT*" e o símbolo "*NFT*" da coleção de tokens, e também atribui a propriedade inicial do contrato ao endereço fornecido como argumento *initialOwner*.

Isso estabelece quem terá controle administrativo sobre o contrato desde o início. A função principal do contrato, *mintNFT*, permite a criação de novos NFTs. Essa função pode ser chamada apenas pelo proprietário do contrato, graças ao modificador *onlyOwner*. Dentro da função, o contador *tokenIds* é incrementado para gerar um novo ID de token. Em seguida, o *token* é emitido e atribuído ao endereço especificado como *recipient*. Após isso, a URI de metadados para o *token* recém-criado é configurada, associando informações descritivas ao token. Finalmente, a função retorna o ID do novo token.

```

1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity ^0.8.20;
3
4 import "@openzeppelin/contracts/token/ERC721/extensions/
  ERC721URISStorage.sol";
5 import "@openzeppelin/contracts/access/Ownable.sol";
6
7 contract MyNFT is ERC721URISStorage, Ownable {
8     uint256 private _tokenIds;
9
10    constructor(address initialOwner) ERC721("MyNFT", "NFT")
11        Ownable(initialOwner) {}
12
13    function mintNFT(address recipient, string memory tokenURI)
14        public
15        onlyOwner
16        returns (uint256)
17    {
18        _tokenIds++;
  
```

```

18
19     uint256 newItemId = _tokenIds;
20     _mint(recipient, newItemId);
21     _setTokenURI(newItemId, tokenURI);
22
23     return newItemId;
24 }
25 }

```

Algoritmo 6.2: Exemplo de código fonte de contrato inteligente tomando com referência a linguagem Solidity Ethereum, adaptado de [Alchemy API 2024].

O Algoritmo 6.3 mostra a implementação de uma função em Solidity que é responsável por ampliar a funcionalidade de emissão, permitindo a criação de múltiplos NFTs em uma única transação. Ela recebe como parâmetros dois arrays: um contendo os endereços dos destinatários (*recipients*) e outro contendo os URIs de metadados correspondentes (*tokenURIs*). A função garante que o número de destinatários corresponda ao número de URIs, evitando erros de inconsistência. Dentro de um laço de repetição, a função incrementa o ID do *token* para cada nova emissão, atribui o *token* ao destinatário correspondente e associa o URI apropriado. Após o término do laço, o contador *tokenIds* é atualizado para refletir o número total de tokens cunhados. A função retorna o ID do último *token* criado.

```

1 function mintMultipleNFTs(address[] memory recipients, string[]
  memory tokenURIs)
2     public onlyOwner
3     returns (uint256)
4     {
5         require(recipients.length == tokenURIs.length, "
          Recipients and tokenURIs length mismatch");
6
7         uint256 newItemId = _tokenIds;
8         for (uint256 i = 0; i < recipients.length; i++) {
9             newItemId++;
10            _mint(recipients[i], newItemId);
11            _setTokenURI(newItemId, tokenURIs[i]);
12        }
13        _tokenIds = newItemId; // Atualiza _tokenIds uma vez
          ap s o loop
14        return newItemId;
15    }

```

Algoritmo 6.3: Exemplo de código fonte de contrato inteligente tomando com referência a linguagem Solidity Ethereum, adaptado de [Alchemy API 2024].

#### 6.4. Comercialização de NFTs na plataforma OpenSea

A OpenSea se destaca como a maior e mais influente plataforma de comercialização de NFTs no mercado global. Desde seu lançamento em 2017, a OpenSea tem desempenhado um papel crucial no desenvolvimento e na popularização dos NFTs, oferecendo um marketplace acessível tanto para criadores quanto para colecionadores. A importância da OpenSea reside não apenas em seu tamanho e volume de transações, mas também em sua capacidade de suportar uma ampla variedade de ativos digitais, desde obras de arte e

música até itens de jogos e imóveis virtuais. Essa versatilidade, aliada à facilidade de uso, tornou a OpenSea a escolha preferida de milhões de usuários, consolidando sua posição como líder no ecossistema de NFTs.

Como serviço web centralizado, a OpenSea oferece uma interface intuitiva que simplifica o processo de criação, compra e venda de NFTs. Ao contrário de outras plataformas descentralizadas, a OpenSea centraliza suas operações, o que permite maior controle sobre a experiência do usuário e a implementação de funcionalidades adicionais, como criação automática de contratos inteligentes sem a necessidade de codificação manual. Esse modelo centralizado facilita o gerenciamento de usuários e transações, proporcionando uma experiência mais estável e segura. Além disso, a plataforma garante compatibilidade com uma ampla gama de carteiras digitais, como MetaMask, Coinbase Wallet, Fortmatic, entre outras, o que amplia o acesso e a conveniência para seus usuários, permitindo que operem com a carteira de sua preferência [Bhujel and Rahulamathavan 2022].

Embora a OpenSea seja a plataforma dominante, outras alternativas como Rarible e Foundation também oferecem recursos exclusivos que atraem diferentes públicos. A Rarible, por exemplo, adota uma abordagem mais descentralizada, permitindo que os usuários tenham maior controle sobre o processo de criação e venda de NFTs, além de oferecer um *token* de governança nativo (RARI) que permite aos usuários participar das decisões sobre o futuro da plataforma [Bhujel and Rahulamathavan 2022]. Já a Foundation se destaca por seu foco em obras de arte digital de alta qualidade e curadoria rigorosa, atraindo artistas renomados e colecionadores exigentes [Bhujel and Rahulamathavan 2022]. Essas plataformas, embora menores em volume de transações em comparação com a OpenSea, oferecem características e vantagens únicas que atendem a nichos específicos dentro do mercado de NFTs.

A OpenSea também se destaca pelo robusto suporte para uso de API, o que a torna uma ferramenta poderosa para desenvolvedores e pesquisadores interessados em acessar e analisar dados do mercado de NFTs. A API da OpenSea permite que os usuários obtenham informações detalhadas sobre ativos digitais, como metadados de NFTs, histórico de transações, preços de mercado e muito mais. Essa funcionalidade é particularmente útil para aqueles que desejam integrar os dados da OpenSea em suas próprias aplicações ou realizar análises avançadas sem precisar interagir diretamente com a interface da plataforma. Embora a API seja específica para o marketplace da OpenSea e não ofereça acesso direto à blockchain Ethereum, ela oferece um meio eficiente e acessível de trabalhar com os dados de NFTs em grande escala.

Além disso, a OpenSea simplifica o processo de comercialização de NFTs com um formulário que automatiza a criação de contratos inteligentes, permitindo que mesmo usuários sem conhecimentos técnicos possam criar e listar seus ativos digitais. A plataforma oferece diversas opções de venda, incluindo preço fixo, leilão e ofertas, o que dá flexibilidade aos vendedores para escolherem a estratégia que melhor atende às suas necessidades. No entanto, devido à popularidade dos NFTs, houve um aumento significativo em incidentes de segurança, como ataques a carteiras de criptomoedas e fraudes em marketplaces [Bhujel and Rahulamathavan 2022]. A OpenSea implementa medidas de segurança rigorosas para proteger seus usuários, como a verificação de contratos inteligentes e práticas de segurança cibernética. Contudo, é essencial que os usuários estejam cientes dos riscos,

como fraudes e questões de direitos autorais, e tomem as devidas precauções ao comercializar NFTs na plataforma.

#### 6.4.1. API OpenSea

A API da OpenSea é uma ferramenta poderosa e amplamente utilizada para coletar e analisar dados relacionados a NFTs na plataforma. Como uma das maiores plataformas de comercialização de NFTs, a OpenSea oferece uma *API REST* que permite o acesso a uma vasta gama de informações, como preços, histórico de transações, detalhes sobre propriedade, e dados específicos de coleções. Essa API é particularmente útil para desenvolvedores e pesquisadores que desejam automatizar a coleta de dados e integrá-los em suas próprias aplicações ou estudos. Entre os diversos *endpoints* disponíveis, alguns dos mais utilizados incluem `/api/v1/collections` para obter listas de coleções, `/api/v1/collection/collection-name` para detalhes de coleções específicas, e `/api/v1/collection/collection-name/stats` para estatísticas em tempo real dessas coleções, conforme ilustrado na Tabela 6.1.

<b>Código</b>	<b>Endpoint</b>	<b>Parâmetros</b>
endpoint-1	<code>/api/v2/collections?offset=offset&amp;limit=limit</code>	offset, limit
endpoint-2	<code>/api/v1/collection/collection-name</code>	collection-name
endpoint-3	<code>/api/v1/collection/collection-name/stats</code>	collection-name

Table 6.1: Exemplos de *Endpoints* da *OpenSea* utilizados para coletar os dados.

Para utilizar a API da OpenSea de maneira eficaz, é essencial configurar corretamente o ambiente de desenvolvimento e realizar chamadas HTTP para os *endpoints* desejados. A documentação oficial<sup>2</sup> da OpenSea fornece instruções detalhadas sobre como configurar a chave da API, que é necessária para autenticação e acesso aos dados. Após a configuração, os desenvolvedores podem realizar requisições programáticas para coletar dados específicos, como metadados de NFTs, histórico de vendas, e preços de mercado. Um exemplo prático seria utilizar o *endpoint* `/api/v1/asset/contract-address/token-id` para obter informações detalhadas sobre uma NFT específica, incluindo seu proprietário atual e o histórico de transações.

Durante o processo de coleta de dados, é comum configurar intervalos de tempo entre as requisições para evitar o bloqueio de chamadas pela API devido a limitações de taxa. Por exemplo, em um estudo típico, as requisições podem ser configuradas para ocorrer a cada segundo para *endpoints* que retornam listas de coleções e a cada 0,5 segundos para *endpoints* que fornecem detalhes específicos de coleções e suas estatísticas. Após a coleta, os dados são geralmente salvos em formatos estruturados, como *JSON*, que facilitam o processamento e a análise posterior. Esses dados podem ser armazenados em drives ou bancos de dados, dependendo da necessidade do projeto.

A estruturação dos dados coletados é crucial para garantir que as informações sejam facilmente acessíveis e processáveis. Ao salvar os dados em arquivos *JSON*, por exemplo, é possível manter a integridade das informações e garantir que todos os atributos

<sup>2</sup><https://docs.opensea.io/reference/api-overview>

importantes sejam capturados de forma organizada. Essa abordagem permite que desenvolvedores e pesquisadores possam realizar análises mais profundas posteriormente, seja para estudos acadêmicos ou para o desenvolvimento de aplicações que dependem de informações atualizadas e precisas do mercado de NFTs.

#### 6.4.2. Atributos e Categorias de NFTs

A API da OpenSea permite acessar uma ampla gama de metadados associados às coleções de NFTs, os quais são cruciais para a categorização e análise desses ativos digitais. Esses metadados incluem informações detalhadas sobre o desempenho, a popularidade e as características específicas das coleções de NFTs na plataforma. A partir dos dados coletados, é possível identificar diferentes categorias de NFTs e os atributos que as definem, permitindo uma análise mais profunda do mercado e facilitando a curadoria desses ativos.

Categoria	Descrição
<i>Art</i>	Obra de arte cunhada em Blockchain, podem ser obras de arte físicas digitalizadas ou podem ser criadas nativamente usando ferramentas digitais.
<i>PFPs</i>	<i>Profile pictures</i> são itens digitais que representam a propriedade de uma imagem ou obra de arte única e colecionável que pode ser usada como foto de perfil.
<i>Memberships</i>	Tipo de <i>token</i> não fungível que fornece acesso a uma experiência, utilidade ou comunidade e, em alguns casos, todos os três.
<i>Music</i>	Utilizado como um certificado digital de propriedade que usa blockchain para verificar e proteger a propriedade de um conteúdo relacionado à música.
<i>Photography</i>	Item digital que representa uma fotografia digital ou imagem em movimento.
<i>Gaming</i>	NFTs associados a qualquer item digital do reino dos jogos virtuais e do meta-verso como personagens, <i>skins</i> , personalizações, mapas, itens colecionáveis - qualquer criação digital que alguém usaria em ambientes de jogos virtuais.
<i>Virtual Worlds</i>	Ambientes digitais dentro de mundos virtuais ou metaversos, representando uma parte do espaço virtual que os usuários podem possuir, desenvolver e interagir.
<i>Domain Names</i>	Um <i>domain name</i> NFT é um <i>token</i> que armazena um nome de domínio no blockchain em vez de no tradicional Sistema de Nomes de Domínio, ou DNS.
<i>Sports</i>	Coleções de NFTs relacionados a esportes, como cartões colecionáveis digitais, arte esportiva e momentos históricos em formato digital.

Table 6.2: Categorias de coleções de NFTs utilizados na *OpenSea*, adaptado de [Ribeiro et al. 2024].

A Tabela 6.2 apresenta as principais categorias de coleções de NFTs disponíveis na OpenSea, como arte, música, fotografia, e outras. Cada uma dessas categorias é definida com base em atributos específicos, como o tipo de conteúdo representado e o uso pretendido dos NFTs. Por exemplo, a categoria "PFPs" (*Profile Pictures*) representa itens digitais que podem ser usados como fotos de perfil e possuem características visuais distintas, que são altamente valorizadas dentro da comunidade de colecionadores.

Além das categorias, os atributos das coleções de NFTs, detalhados na Tabela 6.3, desempenham um papel fundamental na análise e categorização dessas coleções. Esses atributos, como o volume total de vendas (*total-volume*), o número de proprietários (*num-owners*), e o preço médio de venda (*average-price*), oferecem *insights* importantes sobre a popularidade e o valor de uma coleção na plataforma. A combinação desses atributos permite uma compreensão mais completa das dinâmicas do mercado de NFTs na OpenSea, facilitando o desenvolvimento de ferramentas automatizadas para a curadoria e recomendação de NFTs. Esses dados são essenciais para construir modelos preditivos e para a implementação de sistemas de categorização que melhorem a experiência do usuário na plataforma.

Atributo	Descrição
<i>total-volume</i>	Total de vendas no <i>OpenSea</i> em ETH.
<i>total-sales</i>	Número total de transações de venda que ocorreram dentro da coleção.
<i>total-supply</i>	Total de NFTs criados para uma coleção.
<i>num-owners</i>	Número de proprietários de NFTs distintos na coleção.
<i>average-price</i>	Preço médio de venda dos itens da coleção no <i>OpenSea</i> .
<i>num-reports</i>	Número de relatórios de abuso no <i>OpenSea</i> sobre NFTs da coleção.
<i>market-cap</i>	Capitalização de mercado da coleção no <i>OpenSea</i> .
<i>qtd-traits</i>	Número de características visuais de todos os NFTs da coleção.
<i>floor-price</i>	Preço mínimo de venda dos NFTs da coleção no <i>OpenSea</i> .
<i>qtd-editors</i>	Quantidade de editores da coleção.
<i>category</i>	Categoria da coleção utilizada no <i>OpenSea</i> .

Table 6.3: Atributos contidos em metadados de coleções de NFTs extraídos da plataforma *OpenSea*, adaptado de [\[Ribeiro et al. 2024\]](#).

### 6.4.3. Análise de Dados de NFTs

Nesta seção, exploramos duas abordagens fundamentais para a análise de dados, cada uma baseada em diferentes paradigmas de classificação. Inicialmente, discutimos a abordagem de classificação supervisionada, que se baseia nos modelos de aprendizagem de máquina. Essa abordagem requer um conjunto de dados rotulados, onde o objetivo é treinar um modelo para prever a classe de novos dados. Em seguida, exploramos a abordagem de classificação não supervisionada, utilizando o método de classificação *K-Means*. Ao contrário da abordagem supervisionada, esse método permite identificar padrões nos dados para classificá-los utilizando apenas seus atributos, sem a necessidade de dados rotulados para treino.

#### 6.4.3.1. Classificação Supervisionada

Existem diversas abordagens para as quais podem ser utilizadas técnicas de análise de dados de NFTs, em [\[Ribeiro et al. 2024\]](#) são apresentadas técnicas de classificação de NFTs a partir de dados coletados via API *OpenSea*, utilizando técnicas de aprendizado de máquina. O estudo demonstra como os dados de NFTs podem ser processados e analisados utilizando técnicas de aprendizagem de máquina e outras metodologias avançadas. Essas abordagens possibilitam uma compreensão mais profunda das dinâmicas de mercado e dos fatores que influenciam o valor e o comportamento de NFTs.

O artigo explora diversas técnicas que podem ser aplicadas para processar e analisar dados de NFTs. Entre as principais abordagens estão:

- **Filtragem e Limpeza de Dados:** Foram aplicadas técnicas de filtragem para remover dados inconsistentes ou irrelevantes, garantindo a qualidade do conjunto de dados final.
- **Análise Estatística:** Ferramentas de análise estatística foram utilizadas para identificar correlações entre as características dos NFTs e seu valor de mercado. Isso incluiu análise de regressão e cálculo de métricas como média, mediana e variância.
- **Clusterização e Categorização:** Os dados de NFTs foram submetidos ao algoritmo



*K-Means* e agrupados com base em suas coleções e características estruturais, permitindo uma análise comparativa entre diferentes grupos.

- **Visualização de Dados:** Para facilitar a interpretação dos resultados, foram criadas diversas visualizações gráficas, como histogramas, gráficos de dispersão e mapas de calor, que ilustram a distribuição de valores e a relação entre diferentes características dos NFTs.

Essas técnicas quando combinadas com as ferramentas corretas, permitem a extração de informações importantes, como a identificação de padrões de compra, a previsão de valorização de NFTs e a otimização de estratégias de venda em plataformas de mercado, bem como a classificação dos NFTs de acordo com seus atributos.

Os autores utilizam um conjunto de classificadores para identificar de forma ternária as categorias de coleções, considerando as duas maiores em número de coleções (i.e., *art* e *PFPs*) e todas as demais categorias minoritárias em uma única classe, identificada como *outros*. Os modelos de classificação utilizados foram: K-Vizinhos mais Próximos (KNN), Floresta Aleatória (RF) e Máquinas de Vetor de Suporte (SVM). Adicionalmente, foi realizado o balanceamento de classes com *undersampling*, de modo que foram removidas aleatoriamente amostras da classe majoritária para igualar à minoritária, e *oversampling*, que suplementa as classes minoritárias com instâncias de dados sintéticos que seguem a distribuição das instâncias reais.

Para conduzir a classificação, os dados foram organizados em 75% para treino e 25% para teste, treinando os classificadores com e sem balanceamento de classes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.4, a seguir. Os autores optaram por apresentar apenas os melhores resultados para cada modelo.

Modelos	Art			PFPs			Outros			Acc	F1-macro
	P	R	F1	P	R	F1	P	R	F1		
KNN	0,70	0,68	0,69	0,38	0,20	0,26	0,51	0,61	0,56	0,61	0,50
SVM	0,68	0,87	0,76	0,60	0,09	0,16	0,67	0,51	0,58	0,67	0,50
RF (oversampling)	0,72	0,72	0,72	0,30	0,45	0,36	0,65	0,54	0,69	0,64	0,56

Table 6.4: Desempenho dos modelos avaliados com as métricas Precisão (P), Revocação (R), F1-score (F1), Acurácia (Acc) e F1-macro, adaptado de [Ribeiro et al. 2024].

Os resultados obtidos pelo estudo mostram que o modelo RF com *oversampling* obteve um desempenho equilibrado e estável em todas as métricas, destacando-se na classificação das categorias *art* e *outros*. Comparativamente, os modelos KNN e SVM obtiveram desempenhos inferiores, especialmente na categoria *PFPs*, ao passo que o uso da técnica de *oversampling* melhora o desempenho do classificador RF, tornando-o mais adequado para a classificação ternária.

A Figura 6.6 reporta as matrizes de confusão para o classificador RF, que obteve o melhor desempenho, e o classificador SVM, que obteve o segundo melhor desempenho. Na Figura 6.6a, observa-se que o modelo RF obtém maior número de acertos classificando a classe *Outros*, mas enfrenta maior dificuldade na diferenciação entre as classes *PFPs* e *Art*, bem como entre *Art* e *PFPs*. Já na Figura 6.6b observa-se que o modelo SVM possui maior erro na distinção entre as classes *Art* e *PFPs* e também na distinção da classe *Outros* com *Art* e *PFPs*, evidenciando o menor desempenho em relação a RF.

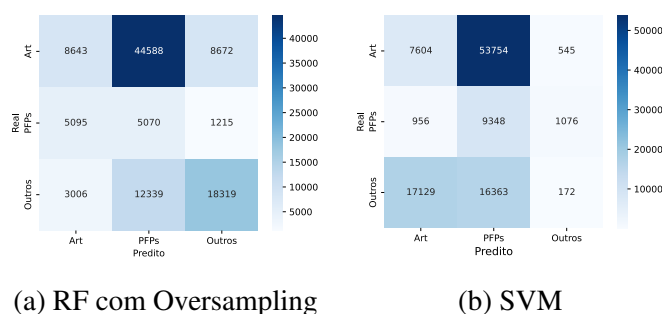


Figure 6.6: Matriz de confusão, adaptado de [\[Ribeiro et al. 2024\]](#)

### 6.4.3.2. Classificação Não Supervisionada

Em [\[Ribeiro et al. 2023\]](#), os autores realizaram uma análise detalhada das características estruturais dos NFTs no Ethereum. Os autores Utilizaram uma abordagem de classificação não supervisionada para conhecer propriedades estruturais dessas coleções. Isso nos permitiu definir quatro classes de coleções de NFTs que podem ser facilmente compreendidas por usuários para facilitar o comércio e a valoração de seus tokens. Assim como o trabalho citado na subseção anterior, este também faz uso de alguma técnicas que são aplicadas para o processamento e análise de dados, que são apresentadas a seguir:

- Filtragem e Limpeza de Dados: Foram aplicadas técnicas de filtragem para remover dados inconsistentes ou irrelevantes, garantindo a qualidade do dataset final.
- Agrupamento e Categorização: Os NFTs foram agrupados com base em suas coleções e características, permitindo uma análise comparativa entre diferentes grupos.
- Análise Estatística: Ferramentas de análise estatística foram utilizadas para identificar correlações entre as características dos NFTs e seu valor de mercado. Isso incluiu análise de regressão e cálculo de métricas como média, mediana e variância.
- Visualização de Dados: Para facilitar a interpretação dos resultados, foram criadas diversas visualizações gráficas, como histogramas, gráficos de dispersão e mapas de calor, que ilustram a distribuição de valores e a relação entre diferentes características dos NFTs.

Para a seleção das características a serem utilizadas, os autores realizaram o cálculo da correlação de Pearson entre todas as características obtidas na coleta, e em seguida definiram 3 grupos distintos de coleções com base nesses valores:

- Conjunto-1: todas as características.
- Conjunto-2: todas as características, removendo as que apresentaram alta correlação.
- Conjunto-3: Contendo apenas as características não correlacionadas com nenhuma outra característica

Considerando que os dados utilizados pelos autores não são rotulados, o uso do algoritmo de classificação não supervisionada definido requer a determinação do valor K (número de clusters). Para isso foi utilizado o método do cotovelo (também conhecido como *elbow method*), que funciona traçando um gráfico que mostra a variação da soma dos erros quadráticos em relação ao número de *clusters*. O objetivo é encontrar o ponto no gráfico onde a adição de mais um *cluster* não resulta em uma redução significativa na soma dos erros quadráticos. Combinando com esse método outras métricas, como Coeficiente de *Silhouette*, Índice de Calinski-Harabasz, Índice Davies-Bouldin, que são métricas de avaliação da qualidade da clusterização.

A Figura 6.7 mostra o resultado das métricas analisadas para cada conjunto de dados.

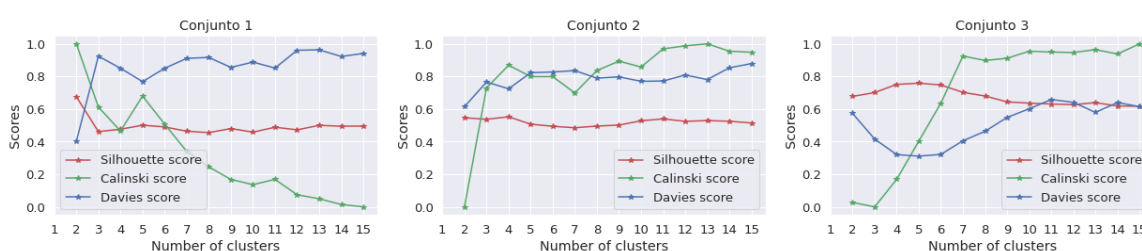


Figure 6.7: Resultado das métricas Coeficiente de *Silhouette*, Índice de Calinski-Harabasz e Índice Davies-Bouldin aplicadas aos 3 conjuntos de dados, adaptado de [Ribeiro et al. 2023].

A melhor escolha de K é aquela que maximiza o Coeficiente de *Silhouette* e o Índice de Calinski-Harabasz e minimiza o Índice Davies-Bouldin, então com base nisso, para prosseguir nas análises os autores optaram por utilizar os dados do conjunto-2, visto que ele foi o grupo que melhor obteve o valor K observando as métricas utilizadas e é o grupo que possui número intermediário de atributos. A partir dessas técnicas de avaliação e clusterização, os autores identificaram 4 clusters distintos e suas características estruturais, que apresentados a seguir:

- *Cluster 0*: Tem um volume de transações relativamente baixo em comparação com os outros *clusters*. No entanto, as vendas totais são bastante significativas (i.e., média de US\$ 246.75). Isso sugere que as transações desse *cluster* envolvem itens de alto valor. O número de relatórios (característica *num-reports*) é zero, o que pode indicar que a comunidade que negocia neste *cluster* é menos ativa em termos de relatar problemas. A quantidade média de características (i.e., característica *qtd-traits*) é intermediária, aproximadamente 5.04, sugerindo que este *cluster* pode ter alguns *traits* distintos, mas não é tão segmentado quanto o *cluster 3*.
- *Cluster 1*: Os membros deste *cluster* possuem uma quantidade total de *tokens* (característica *total-supply*) relativamente baixa de NFTs (média de 580.70 *tokens*), vendas e possuem 0 *traits*. Isso pode indicar que esses NFTs não são tão distintos ou interessantes para os compradores em comparação com os outros *clusters*, e também que a comunidade que negocia neste *cluster* é relativamente pequena e pode não ter uma demanda significativa por NFTs.

- *Cluster 2*: Este *cluster* tem o menor volume total entre os *clusters*, mas possui um número relativamente alto de vendas totais (i.e, 314.37) em comparação com outros *clusters*, o que indica que, apesar do baixo volume, os dados agrupados nesse *cluster* têm um alto valor de transações. A quantidade média de características é baixa (i.e, 0.70), sugerindo que este *cluster* pode não ter características únicas.
- *Cluster 3*: Este *cluster* tem o maior volume total, bem como o maior número de vendas e proprietários em comparação com os outros *clusters*. A quantidade média de *traits* é a mais alta (média de 11.32), sugerindo que este *cluster* possui características mais distintas e únicas em comparação com os outros. Além disso, este *cluster* tem um número significativo de relatórios (média de 0.88), indicando uma forte atividade em torno dele.

<i>Cluster</i>	<i>total-volume</i>	<i>total-sales</i>	<i>total-supply</i>	<i>num-reports</i>	<i>qtd-traits</i>
0	13.40	246.75	1347.60	0.00	5.04
1	9.26	74.42	580.70	0.00	0.00
2	0.00	314.37	644.59	0.00	0.70
3	61885.75	22064.33	13414.64	0.88	11.32

Table 6.5: Valor médio das características para cada *cluster*. Adaptado de [Ribeiro et al. 2023]

Na Tabela 6.5, a seguir, são apresentadas o valor médio das características consideradas para cada *cluster* identificado. Ainda de acordo com os autores, as características médias de cada *cluster* podem ajudar a entender melhor a natureza dos NFTs em cada grupo e informar decisões de investimento ou comercialização. Por exemplo, um investidor pode optar por focar em NFTs do *cluster 2*, que possuem um valor total de vendas relativamente alto, mas baixo volume total, enquanto pode decidir evitar NFTs do *cluster 3* devido ao número médio de relatórios negativos que eles receberam.

## 6.5. Desafios e Oportunidades Futuras dos NFTs

Os NFTs têm mostrado um crescimento impressionante, mas também enfrentam uma série de desafios que precisam ser abordados para garantir sua sustentabilidade e evolução. Esta seção discutirá alguns dos principais desafios e oportunidades no ecossistema de NFTs, considerando a concorrência à rede Ethereum, a categorização e automação de NFTs, a predição de preços, e as dinâmicas de comunidades e efeitos de rede no comércio de NFTs.

- **Concorrência à rede Ethereum:** A Ethereum é indiscutivelmente a plataforma mais popular para NFTs devido à sua capacidade de executar contratos inteligentes, que são fundamentais para a criação, venda e transferência de NFTs. Os contratos inteligentes da Ethereum permitem que transações sejam realizadas de forma autônoma e sem intermediários, garantindo segurança e transparência. No entanto, a popularidade da Ethereum tem vindo acompanhada de desafios significativos. Um dos maiores problemas enfrentados pela rede é a escalabilidade. Conforme

o número de transações cresce, a rede torna-se congestionada, resultando em altos custos de transação, conhecidos como *gas fees*. Esses custos podem ser proibitivos, especialmente para pequenos criadores e compradores, limitando a acessibilidade e a adoção em massa dos NFTs.

Devido a esses desafios, alternativas à Ethereum têm surgido, oferecendo soluções mais eficientes em termos de escalabilidade e custos. Solana, por exemplo, é uma blockchain de alta performance que promete transações rápidas e taxas baixas<sup>3</sup>, o que a torna atraente para criadores e colecionadores de NFTs. Outra alternativa, a Tezos, destaca-se por sua governança em cadeia, permitindo que a rede evolua sem a necessidade de hard forks, e por sua abordagem sustentável com um mecanismo de consenso proof-of-stake, que consome menos energia. Essas plataformas emergentes estão ganhando popularidade e podem representar uma concorrência significativa para a Ethereum no futuro próximo, especialmente se continuarem a oferecer vantagens claras em termos de custo e eficiência<sup>4</sup>.

- **Categorização de NFTs e sua automação:** A categorização eficiente de NFTs é um desafio fundamental para melhorar a experiência do usuário nas plataformas de comercialização, como a OpenSea. Com a explosão do número de NFTs disponíveis, a dificuldade em navegar e encontrar itens de interesse aumenta. Para enfrentar esse problema, nossa pesquisa [Ribeiro et al. 2024], propõe um sistema automatizado de categorização de NFTs usando técnicas de *machine learning*. Essa abordagem visa classificar NFTs de acordo com seus metadados e atributos visuais, facilitando a descoberta de coleções e auxiliando na curadoria dos conteúdos disponíveis nas plataformas.

Os resultados preliminares da nossa pesquisa mostram que a automação da categorização não apenas economiza tempo, mas também melhora a precisão na classificação de NFTs em categorias relevantes. Esse avanço é crucial para lidar com o volume crescente de NFTs, permitindo que plataformas como a OpenSea mantenham uma organização eficiente e que os usuários encontrem facilmente os ativos que procuram. Além disso, a categorização automatizada pode ajudar a identificar novas tendências no mercado de NFTs, permitindo que coleções emergentes ganhem visibilidade mais rapidamente e que os criadores adaptem suas estratégias conforme as preferências dos usuários evoluem.

- **Predição de preços de NFTs:** A predição de preços de NFTs é uma tarefa complexa, devido à natureza especulativa e altamente volátil desse mercado. Estudos recentes, como os de [Costa et al. 2023, Nadini et al. 2021]), têm explorado métodos para prever os preços dos NFTs utilizando uma combinação de análise de dados e aprendizado de máquina. Esses estudos focam em variáveis como o histórico de vendas, a popularidade do criador e os atributos específicos dos NFTs, como a raridade, para construir modelos preditivos que podem auxiliar investidores e criadores a tomar decisões mais informadas.

Apesar do progresso significativo, a predição de preços de NFTs continua a enfrentar desafios devido à imprevisibilidade das tendências de mercado e à influên-

---

<sup>3</sup><https://br.cointelegraph.com/news/solana-beats-ethereum-weekly-total-fees-research>

<sup>4</sup><https://blockzeit.com/pt/rivais-do-ethereum-os-4-maiores-concorrentes>

cia de fatores externos, como o comportamento das comunidades e as flutuações no interesse público. Os modelos desenvolvidos até agora conseguem capturar padrões de curto prazo com razoável precisão, mas a previsão a longo prazo permanece uma área de grande incerteza. Isso indica que, enquanto as ferramentas de predição podem fornecer *insights* valiosos, elas devem ser usadas com cautela e complementadas por outras formas de análise e monitoramento contínuo do mercado [Nadini et al. 2021]

- Comunidades e efeitos de rede no comércio de NFTs: As comunidades formadas em torno dos NFTs e os efeitos de rede que surgem dessas interações são fundamentais para o sucesso e a valorização desses ativos digitais. O trabalho de [Nadini et al. 2021] explora como as redes de compradores e vendedores afetam o valor dos NFTs, mostrando que a dinâmica social dentro dessas comunidades pode impulsionar o crescimento do mercado de maneira exponencial. Efeitos de rede ocorrem quando o valor de um NFT aumenta à medida que mais pessoas se envolvem com ele, criando um ciclo de valorização sustentado pelo engajamento da comunidade.

[Vasan et al. 2022] ampliam essa análise ao investigar como as características das comunidades impactam diretamente o sucesso das coleções de NFTs. Eles observam que as coleções apoiadas por comunidades ativas e engajadas tendem a ter volumes de negociação mais altos, o que não só aumenta a liquidez dos NFTs, mas também fortalece a marca da coleção. O estudo de [Colavizza 2023] vai além, sugerindo que as comunidades em torno de NFTs estão se tornando centros de inovação dentro do metaverso, onde a propriedade e o comércio de ativos digitais são integrados em experiências sociais imersivas. Colavizza argumenta que o futuro dos NFTs não se limita à sua função como colecionáveis digitais, mas se estende à criação de ecossistemas digitais onde a interação social e o comércio se fundem.

Esses estudos mostram que o valor dos NFTs está intrinsecamente ligado à força das comunidades que os sustentam e ao impacto dos efeitos de rede. Para plataformas de NFTs, entender e fomentar essas dinâmicas é crucial para manter o crescimento sustentável e a relevância no mercado. As comunidades não apenas criam valor financeiro para os NFTs, mas também estabelecem laços sociais e culturais que podem definir o futuro dos mercados digitais. Assim, a capacidade de uma plataforma de construir e nutrir comunidades fortes pode ser um diferencial significativo no cenário competitivo dos NFTs [Nadini et al. 2021, Vasan et al. 2022, Colavizza 2023].

## 6.6. Considerações Finais

Este trabalho explorou os principais aspectos tecnológicos e de pesquisa relacionados aos NFTs, com foco na criação, comercialização, coleta e análise de dados na rede blockchain Ethereum e na plataforma OpenSea. A tecnologia blockchain, ao oferecer propriedades como descentralização, transparência e imutabilidade, tem se mostrado fundamental para o desenvolvimento e sucesso dos NFTs. A Ethereum, como a principal

rede para a emissão e transação desses tokens, continua sendo a escolha dominante, embora enfrente desafios em termos de escalabilidade e custos, que abrem espaço para a concorrência de outras blockchains emergentes.

No decorrer do capítulo, foram discutidos os fundamentos técnicos da blockchain e dos contratos inteligentes, que são essenciais para a operação e segurança dos NFTs. A comercialização de NFTs na plataforma OpenSea foi analisada detalhadamente, destacando-se como a maior e mais influente plataforma nesse mercado, oferecendo uma interface centralizada, suporte para múltiplas carteiras digitais, e diversas opções de comercialização. A seção de coleta e análise de dados demonstrou a importância da API da OpenSea para a obtenção de metadados e informações críticas para a pesquisa e desenvolvimento de ferramentas automatizadas.

Além disso, foram discutidos os desafios e oportunidades futuras no campo dos NFTs, incluindo a necessidade de melhorar a categorização e automação desses tokens, prever seus preços e entender as dinâmicas das comunidades que os suportam. A pesquisa e o desenvolvimento contínuos nesses aspectos são cruciais para o avanço e a sustentabilidade do ecossistema de NFTs, oferecendo novas oportunidades de inovação e exploração dentro do mercado digital global.

Em suma, este trabalho fornece uma visão abrangente dos NFTs, desde seus fundamentos técnicos até as perspectivas futuras, contribuindo para um melhor entendimento e desenvolvimento deste campo emergente na interseção entre tecnologia e economia digital.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Piauí (FAPEPI) processo no. 00110.000235/2022-78, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) da Universidade Federal do Piauí.

## **References**

- [Alchemy API 2024] Alchemy API (2024). How to create an nft on ethereum tutorial. <https://docs.alchemy.com/docs/how-to-create-an-nft> (Accessed on 05/26/2024).
- [Bhujel and Rahulamathavan 2022] Bhujel, S. and Rahulamathavan, Y. (2022). A survey: Security, transparency, and scalability issues of nft's and its marketplaces. *Sensors*, 22(22):8833.
- [Bored Ape Yatch Club 2024] Bored Ape Yatch Club (2024). Bored Ape Yatch Club. <https://opensea.io/collection/boredapeyachtclub>. Accessed: 2024-08-26.
- [Casino et al. 2019] Casino, F., Dasaklis, T. K., and Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and informatics*, 36:55–81.

- [Colavizza 2023] Colavizza, G. (2023). Seller-buyer networks in nft art are driven by preferential ties. *Frontiers in Blockchain*, 5:1073499.
- [Costa et al. 2023] Costa, D., La Cava, L., and Tagarelli, A. (2023). Show me your nft and i tell you how it will perform: Multimodal representation learning for nft selling price prediction. In *Proceedings of the ACM Web Conference 2023*, pages 1875–1885.
- [Entriken et al. 2018] Entriken, W., Shirley, D., Evans, J., and Sachs, N. (2018). Eip-721: Non-fungible token standard," ethereum improvement proposals, no. 721, january 2018. <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>.
- [Greve et al. 2018] Greve, F., Sampaio, L., Abijaude, J., Coutinho, A. A., Brito, I., and Queiroz, S. (2018). Blockchain e a Revolução do Consenso sob Demanda. In *Proc. of SBRC Minicursos*.
- [Le Louvre 2024] Le Louvre (2024). From the 'Mona Lisa' to 'The Wedding Feast at Cana'. <https://www.louvre.fr/en/explore/the-palace/from-the-mona-lisa-to-the-wedding-feast-at-cana>. Accessed: 2024-08-26.
- [Murray et al. 2023] Murray, A., Kim, D., and Combs, J. (2023). The promise of a decentralized internet: What is web3 and how can firms prepare? *Business Horizons*, 66(2):191–202.
- [Nadini et al. 2021] Nadini, M., Alessandretti, L., Giacinto, F. D., Martino, M., Aiello, L. M., and Baronchelli, A. (2021). Mapping the nft revolution: market trends, trade networks and visual features.
- [Nakamoto 2008] Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.
- [Okonkwo 2021] Okonkwo, I. E. (2021). Nft, copyright; and intellectual property commercialisation. *SSRN*. <https://ssrn.com/abstract=3856154>.
- [Palma et al. 2022] Palma, L., Martina, J., and Vigil, M. (2022). On and off: Extracting the transaction history of permissioned blockchain networks. Universidade Federal de Santa Catarina. Computing Science PhD Candidate Dissertation.
- [Ribeiro et al. 2024] Ribeiro, S. d. O., Gomes, D. R., Andrade, N. R. D., de Miranda, E. A. F., and Gonçalves, G. D. (2024). Classificação de coleções de nfts explorando metadados e aprendizagem de máquina. In *Colóquio em Blockchain e Web Descentralizada (CBlockchain)*, pages 50–55. SBC.
- [Ribeiro et al. 2023] Ribeiro, S. O., Gomes, D. R., Coutinho, E., and Gonçalves, G. D. (2023). Análise de características estruturais de tokens não fungíveis no ethereum. In *Anais do VI Workshop em Blockchain: Teoria, Tecnologias e Aplicações*, pages 1–14. SBC.
- [Rosenfeld et al. 2012] Rosenfeld, M. et al. (2012). Overview of colored coins. *White paper; bitcoil. co. il*, 41:94.
- [Schär 2021] Schär, F. (2021). Decentralized finance: On blockchain-and smart contract-based financial markets. *FRB of St. Louis Review*.



- [Szabo 1997] Szabo, N. (1997). Formalizing and securing relationships on public networks. *First monday*.
- [Valeonti et al. 2021] Valeonti, F., Bikakis, A., Terras, M., Speed, C., Hudson-Smith, A., and Chalkias, K. (2021). Crypto collectibles, museum funding and openglam: challenges, opportunities and the potential of non-fungible tokens (nfts). *Applied Sciences*, 11(21):9931.
- [Vasan et al. 2022] Vasan, K., Janosov, M., and Barabási, A.-L. (2022). Quantifying nft-driven networks in crypto art. *Scientific reports*, 12(1):2769.
- [Wlasinsky 2023] Wlasinsky, O. (2023). Literature review on the most popular of nfts types. *International Journal of Educational Technology and Artificial Intelligence*, 2(1):8–12.
- [Wood 2014] Wood, G. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum project yellow paper*, 151:1–32.
- [Yilmaz et al. 2023] Yilmaz, T., Sagfossen, S., and Velasco, C. (2023). What makes nfts valuable to consumers? perceived value drivers associated with nfts liking, purchasing, and holding. *Journal of Business Research*, 165:114056.