

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Classificação de Perfis de Usuários do Ethereum sob Impacto de Eventos Externos

Pedro Henrique Filgueiras dos Santos Oliveira

JUIZ DE FORA
DEZEMBRO, 2023

Classificação de Perfis de Usuários do Ethereum sob Impacto de Eventos Externos

PEDRO HENRIQUE FILGUEIRAS DOS SANTOS OLIVEIRA

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Alex Borges Vieira
Coorientador: Heder Soares Bernardino

JUIZ DE FORA
DEZEMBRO, 2023

CLASSIFICAÇÃO DE PERFIS DE USUÁRIOS DO ETHEREUM SOB IMPACTO DE EVENTOS EXTERNOS

Pedro Henrique Filgueiras dos Santos Oliveira

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Alex Borges Vieira
Doutor em Ciência da Computação (UFMG)

Heder Soares Bernardino
Doutor em Modelagem Computacional (LNCC/MCTI)

Saulo Moraes Villela
Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação (UFRJ)

Edelberto Franco Silva
Doutor em Computação (UFF)

JUIZ DE FORA
18 DE DEZEMBRO, 2023

Resumo

Criptomoedas, definidas como plataformas de transações monetárias digitais descentralizadas vastamente utilizadas atualmente, possuem diversas plataformas diferentes, com aquela conhecida como Ethereum sendo uma das mais importantes e influentes dentro desse espectro. O mercado de criptomoedas esteve especialmente aquecido em momentos recentes, atingindo um público cada vez mais vasto e cumprindo um papel de cada vez maior importância em relações econômicas internacionais. Diante disso, passa a ser relevante analisar o comportamento de usuários de tal plataforma diante de importantes eventos externos, que previamente tinham consequências analisadas apenas em ecossistemas financeiros mais tradicionais. Em anos recentes, diversos desses eventos ocorreram de maneira sequencial, o que se apresenta como uma oportunidade ímpar de realização de um estudo empírico que compare o impacto de cada evento dentro da rede de criptomoedas do Ethereum. Dentre os principais eventos, são destaque as duas ondas de valorização do Ethereum, a pandemia da COVID-19, o conflito armado entre Rússia e Ucrânia e uma alteração na infraestrutura do Ethereum, alterando seu protocolo de consenso em um processo chamado “The Merge”. Para analisar e comparar esses eventos, esse trabalho propõe modelar transações entre diferentes contas como grafos direcionados e extrair métricas com o uso de cálculos conhecidos na teoria das Redes Complexas. Foi possível observar um comportamento levemente dissassortativo com baixíssima tendência de geração de grandes grupos para todos os períodos contemplados pelo trabalho. Ademais, com a análise de centralidades de vértices foi possível visualizar a forma com que contas de casas de câmbio e contas de negociação de *tokens* tendem a serem contas centrais em quase todo contexto analisado. Por fim, contas relativas à mineração de novos blocos mostraram uma diminuição em relevância conforme o avanço do tempo.

Palavras-chave: Criptomoeda, Ethereum, *Blockchain*, Redes Complexas, Teoria dos Grafos

Abstract

Cryptocurrencies, defined as digital decentralized monetary transaction platforms vastly used currently, have multiple different platforms, with that one known as Ethereum being one the more important and influent in this sphere. The crypto market has been specially heated in recent moments, hitting an evergrowing public which carry out a lot of importance in international economic relationships. Nonetheless, it is now relevant to analyze the behaviour of the users of that platform upon a important external events, that previously had consequences analyzed only in context of more traditional financial ecosystems. In recent years, a lot of these events happened in sequential manner, which presents itself as a great opportunity to create an empirical study to compare the impact of each event in the Ethereum cryptocurrency network. Among the main events, some of the main ones are the two waves of Ethereum valorization, the COVID-19 pandemic, the conflict between Ukraine and Russia and an alteration in Ethereum infrastructure, by changing the consensus algorithm in a process called The Merge. In order to analyze and compare those events, this work proposes a way to model transactions between accounts as directed graphs and to extract metrics using calculus known by the Complex Networks Theory. It was possible to observe a slightly disassortative behaviour with a very low tendency of formation of large groups within all observed time periods in this work. Furthermore, with the centrality analysis of the vertices, it was possible to visualize the way that exchange accounts and token negotiation accounts tend to be more central in nearly all analysed contexts. Lastly, accounts related to the mining process showed a reduction in relevance as time passed.

Keywords: Cryptocurrency, Ethereum, *Blockchain*, Complex Networks, Graph Theory

Conteúdo

Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas	5
Lista de Abreviações	6
1 Introdução	7
1.1 Apresentação do Tema	7
1.2 Contextualização	8
1.3 Descrição do Problema	9
1.4 Motivação	11
1.5 Objetivos	12
2 Fundamentação Teórica	13
2.1 Blockchain	13
2.1.1 Protocolos de Consenso	14
2.2 Ethereum	15
2.2.1 Contratos Inteligentes	15
2.2.2 The Merge	16
2.3 Redes Complexas	16
2.3.1 Métricas de Centralidade	17
2.3.2 Aglomeração	18
2.3.3 Assortatividade	19
2.4 Considerações Finais	20
3 Trabalhos Relacionados	21
3.1 Métricas de redes complexas usadas para aprendizado de máquina	21
3.2 Caracterização focada em métricas de redes complexas	25
3.3 Considerações Finais	29
4 Metodologia	32
4.1 Descrição e Coleta de Dados	32
4.2 Construção das Redes	34
5 Resultados	35
5.1 Métricas Gerais da Rede	35
5.2 Centralidade de Contas	36
5.3 Distribuição de tipos de contas	40
6 Conclusão	45
Bibliografia	47

Lista de Figuras

1.1	Valor do Ether em função do tempo. Fonte: Etherscan.io	8
2.1	Representação de uma <i>blockchain</i> genérica.	14
2.2	Representação de um grafo.	17
2.3	Exemplo de centralidades em uma rede.	18
5.1	Distribuição de tipos de contas	43

Lista de Tabelas

1.1	Eventos relevantes no Ethereum.	10
3.1	Análise comparativa de trabalhos relacionados	29
4.1	Períodos de Coleta de Dados	33
5.1	Métricas da rede Ethereum em função do período.	36
5.2	Principais contas da primeira ascensão.	37
5.3	Principais contas da primeira queda.	38
5.4	Principais contas durante o início da COVID-19.	39
5.5	Principais contas da segunda ascensão.	40
5.6	Principais contas da segunda queda.	41
5.7	Principais contas durante a invasão da Rússia sob a Ucrânia.	42
5.8	Principais contas durante o <i>The Merge</i>	43

Lista de Abreviações

EOA *Externally Owned Account*

API *Application Programming Interface*

1 Introdução

1.1 Apresentação do Tema

Uma das principais tecnologias recentes no âmbito tecnológico e econômico são as moedas digitais, denominadas criptomoedas. Essas moedas digitais funcionam em cima de plataformas descentralizadas capazes de suportar transações monetárias, sem a necessidade de um membro mediador que controlaria todo o ecossistema econômico.

O conceito de criptomoedas foi criado em 2008, quando uma pessoa com pseudônimo de Satoshi Nakamoto projetou a primeira criptomoeda na história: o Bitcoin (NAKAMOTO, 2008). Até onde se sabe, Bitcoin foi a primeira moeda construída com o uso da tecnologia *blockchain*, que faz uso de uma estrutura de lista de blocos encadeados, contendo de maneira pública e compartilhada todas as informações a respeito de toda a rede desde a sua criação.

Em 2014 foi idealizada uma nova alternativa de rede descentralizada para negociações monetárias: o Ethereum (BUTERIN et al., 2014); que veio a ser implementado no ano seguinte, com apoio de financiamento coletivo¹. O Ethereum veio a se tornar uma das principais opções de mercado posteriormente. Atualmente, Ethereum possui a segunda maior capitalização de mercado entre criptomoedas².

Usuários interagem com o Ethereum por meio de contas: entidades com balanço monetário associado que são armazenadas na *blockchain* e que possuem acesso controlado por chaves criptográficas privadas. Com o uso de contas, pode-se receber, enviar ou armazenar a moeda do Ethereum: o Ether. Dois tipos de contas são contemplados pelo Ethereum: contas de domínio externo, que podem ser controladas por qualquer pessoa que tenha sua chave de acesso; e contas de contratos inteligentes.

Contas de contratos inteligentes é um dos principais diferenciais que o Ethereum traz em relação a outras grandes criptomoedas. Essas contas funcionam com base em

¹<https://blog.ethereum.org/2015/07/30/ethereum-launches>. Acessado em 06 de dezembro de 2023.

²<https://coinmarketcap.com/>. Acessado em 06 de dezembro de 2023.

um código pré-estabelecido por seu autor, e operam na rede unicamente em cima desse código-fonte, realizando transações de maneira automatizada.

A análise de comportamento de contas e o funcionamento de contratos inteligentes compõe um tópico que chama muita atenção para discussões tanto dentro da comunidade científica quanto da comunidade de criptomoedas de maneira geral.

1.2 Contextualização

Nem sempre o Ethereum esteve em alta da maneira que foi se estabelecendo com o passar do tempo. Desde sua implementação em julho de 2015, o valor de mercado da moeda passou por fases de valorização e desvalorização. A Figura 1.1 ilustra a valorização da moeda em função do tempo. O eixo horizontal representa o avanço do tempo, ao passo que o vertical representa o valor em dólares do Ether.



Figura 1.1: Valor do Ether em função do tempo. Fonte: Etherscan.io

Visto que a demanda da moeda depende de usuários que controlam as contas, é relevante analisar a maneira que a evolução do preço médio desta afeta o perfil de usuários que participam da rede, seja por meio de aquisições ou investimento.

Percebe-se que ao final de 2020 há um crescimento de perfil exponencial do valor do Ether, que gera muita discussão em torno do papel do Ethereum nas relações econômicas, bem como um alto nível de especulação. Coincidentemente ou não, o ano de 2020 inicia uma sequência de eventos de grande impacto internacional em diversos aspectos.

Um dos principais acontecimentos à época foi a consolidação da pandemia da COVID-19, com nível de influência na saúde e economia mundial comparável a grandes pandemias de séculos passados. Outro evento externo ao Ethereum que tem potencial de grande impacto é a invasão em 2022 da Rússia à Ucrânia, iniciando um conflito armado de relevância global.

Durante esse período, alguns eventos que ocorreram dentro do próprio ecossistema de criptomoedas e do Ethereum também são importantes. Um extremamente relevante foi a mudança do protocolo de consenso do Ethereum.

Em uma blockchain, um protocolo de consenso é definido pelos critérios aos quais se definem de que forma os nós que compõem a rede escolhem qual a verdadeira sequência de blocos, filtrando tentativas de nós mal intencionados na rede.

Em setembro de 2022, o Ethereum mudou seu protocolo de consenso da prova de trabalho para a prova de participação³, buscando reduzir o seu impacto ambiental negativo. Uma hipótese possível é que tal mudança radical na infraestrutura da rede pode afetar também o perfil de usuários que a utilizam.

1.3 Descrição do Problema

A possibilidade de realização de um estudo empírico envolvendo características da rede de uma criptomoeda e de eventos econômicos globais relevantes se apresenta como um desafio importante para a comunidade acadêmica.

Nota-se, portanto a existência do potencial de pesquisa para análise do Ethereum em função do período específico, bem como em função do cenário econômico vigente, principalmente por conta de eventos relevantes recentes.

A Tabela 1.1 mostra os principais eventos políticos, econômicos e de alteração de infraestrutura do Ethereum que formam o foco de observações para esse trabalho, bem como uma aproximação do momento em que tais eventos aconteceram.

Cada evento mostrado na Tabela 1.1 possui uma motivação específica. Estes são:

- **Primeira ascensão do Ethereum:** Conforme indicam dados históricos de preço

³<https://ethereum.org/pt/upgrades/merge/> Acessado em 06 de dezembro de 2023.

Tabela 1.1: Eventos relevantes no Ethereum.

Evento	Período
Primeira ascensão do Ethereum	Final 2017
Primeira queda do Ethereum	Início 2018
Início da COVID-19	Início 2020
Segunda ascensão do Ethereum	Início 2021
Segunda queda do Ethereum	Final 2021
Conflito Rússia-Ucrânia	Início 2022
The Merge	Meio-final 2022

do Ethereum⁴, em janeiro de 2018, o Ether alcança sua máxima histórica que só viria a ser superada três anos depois. Em um intervalo de um ano desde janeiro de 2017, o preço do Ether cresceu em duas ordens de grandeza. Pela primeira vez, o Ethereum se estabelecia como uma grande plataforma de criptoativos ao público geral.

- **Primeira queda do Ethereum:** Após o período de valorização extrema, a moeda desvaloriza-se de maneira abrupta, reduzindo seu valor por cerca de 50% entre janeiro e abril de 2018. Desde então, o Ether levaria um longo período até recuperar a alta histórica.
- **Início da COVID-19:** Durante os primeiros meses de 2020, uma doença infecciosa causada pelo vírus SARS-CoV-2 se espalhava de maneira agressiva por todos os países do globo, causando uma pandemia. A urgência da situação causou medidas de contenção (MAZZA et al., 2020) que ocasionam em impactos econômicos.
- **Segunda ascensão do Ethereum:** Durante praticamente todo o ano de 2021 o Ether se valoriza, alcançando em novembro sua máxima histórica até o momento, ainda não superada até o fim de 2023. Pode-se notar que esse crescimento começa no início de 2021, com o antigo máximo histórico de 2018 sendo alcançado ainda em janeiro.
- **Segunda queda do Ethereum:** Com a mesma velocidade que o valor do Ether cresce, ele possui uma queda igualmente forte. Desde a máxima histórica em novembro de 2021, o valor do Ether passa a cair até estabilizar em um valor cerca

⁴<https://etherscan.io/chart/etherprice> Acessado em 29 de outubro de 2022.

de 4 vezes menor do que a máxima histórica. Apesar da queda, a valorização do Ethereum nesse momento ainda é comparável à primeira época de alta.

- **Conflito Rússia-Ucrânia:** Após a invasão russa na Ucrânia em 24 de fevereiro de 2022, o mundo passa a ser afetado por um evento de alto impacto econômico, com sanções e movimentação de dinheiro acontecendo de maneira intensa. Alguns estudos analisam a forma como isso se relaciona com Ethereum, como Oliveira et al. (2022) e Theiri, Nekhili e Sultan (2022). Entretanto, esse evento ainda segue acontecendo no momento de criação desse trabalho, então mais estudos tendem a ser feitos em relação a isso.
- **The Merge:** Em setembro de 2022, o Ethereum muda o seu protocolo de consenso, realizando uma mudança drástica em sua infraestrutura (KAPENGUT; MIZRACH, 2022), que vem a ser nomeado como *The Merge*. Entende-se que tal mudança pode ser um dos principais eventos recentes dentro da comunidade de criptomoedas e que investigar os efeitos de tal evento é importante.

É definido que o problema em questão que esse trabalho busca solucionar consiste em analisar de maneira empírica o impacto de eventos específicos na rede do Ethereum e no comportamento de seus usuários, com o uso de bases de dados construídas a partir de transações obtidas em APIs públicas.

1.4 Motivação

Trabalhos científicos recentes buscam atender a uma demanda de análise de eventos e suas relações com o Ethereum, corroborando essa visão acerca do potencial dessa linha de pesquisa. Por exemplo, Aspembitova, Feng e Chew (2021) contrastam alguns períodos de valorização e de desvalorização do Ethereum e os definem como “Crypto Winter” e “Crypto Bubble”. Tal definição sugere que tais períodos sejam alguns dos objetos de análise interessantes.

Em relação a eventos externos recentes, não faltam também trabalhos analisando a relação de criptomoedas e *blockchain* com a pandemia da COVID-19, como Mariana, Ekaputra e Husodo (2021); Demir et al. (2020) e Abd-alrazaq et al. (2021).

Quanto ao conflito entre Rússia e Ucrânia, por ser um evento ainda muito recente na data de produção desse trabalho, a literatura segue relativamente escassa, mas ainda possui estudos como Theiri, Nekhili e Sultan (2022) e Oliveira et al. (2022). Vale destacar o papel do último como uma contribuição acadêmica nossa, anterior a este trabalho, contribuindo também como alicerce para nossos futuros estudos de natureza similar.

Por meio de análises de eventos específicos, é possível buscar um entendimento de acontecimentos passados no Ethereum, investigando seus respectivos impactos. Além de servir como uma elucidação histórica, isso também oferece um direcionamento para antecipação de possíveis mudanças futuras em caso do acontecimento de novos eventos similares. Dessa forma, a compreensão do passado do Ethereum pode tornar-se uma poderosa ferramenta para previsão e preparação para ocorrências análogas, permitindo tomadas de decisão mais estratégicas e baseadas em dados.

1.5 Objetivos

Diante do problema, surge a seguinte questão de pesquisa: que tipo de transformação estrutural pôde ser observada no Ethereum diante de eventos tão específicos e complexos? Dessa forma, portanto, estabelece-se o seguinte objetivo específico para esse trabalho: Realizar a busca por possíveis correlações, padrões e comportamentos anômalos na rede, por meio de análises mensais da rede de acordo com o período em questão. Para tal, métricas de teoria de redes complexas são utilizadas.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada uma explicação acerca dos conceitos teóricos necessários para compreensão do funcionamento do Ethereum. Algumas explicações sobre métodos utilizados também são apresentadas.

Inicialmente, é fundamental a compreensão acerca do que é uma *blockchain*, de onde surgiu, como funciona e qual sua importância para a proposta de realização de uma moeda que funciona de maneira descentralizada.

Com isso, é possível aprofundar de maneira mais específica na criptomoeda que é o foco desse trabalho: o Ethereum. Nesta seção há um detalhamento a respeito do histórico do Ethereum e de características cuja compreensão é alicerce teórico do trabalho.

É importante também uma seção que explique como funciona o recente processo, chamado de *The Merge*, que altera o protocolo de consenso do Ethereum de prova de trabalho para prova de participação. As diferenças entre esses protocolos também será detalhada devidamente.

Por fim, as análises desse trabalho se baseiam, em sua grande parte, no estudo de redes complexas. Dessa forma, uma seção também fundamenta de que artifícios pode-se usar para modelagem de observações na rede.

2.1 Blockchain

A principal inovação trazida com a criação do Bitcoin em 2008 (NAKAMOTO, 2008) é a aplicação da tecnologia da *blockchain*, que havia sido idealizada anteriormente na década de 90 (HABER; STORNETTA, 1990). Conforme o próprio nome descreve, *blockchain* se trata de uma estrutura de blocos encadeados, cujo objetivo é a realização de um sistema distribuído para armazenamento de dados. A Figura 2.1 ilustra o funcionamento do encadeamento de blocos.

Como redes baseadas em *blockchain* funcionam de maneira ponto-a-ponto descentralizada, não há terceiros que garantam confiança no processo, tampouco um membro

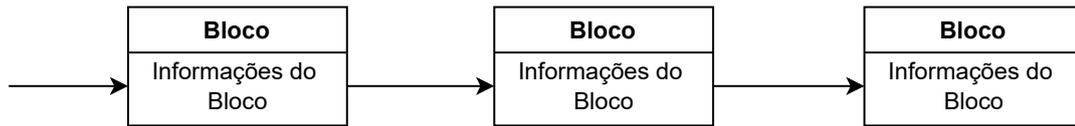


Figura 2.1: Representação de uma *blockchain* genérica.

mediador que garanta que nenhum dado da rede foi retirado ou que todos os dados foram inseridos de maneira concordante por parte dos membros participantes. Em suma, não há ninguém garantindo que dois nós na rede têm a mesma cópia da corrente de blocos. Sendo assim, como solução para esse problema, todos os usuários de uma rede de criptomoedas executam algoritmos em comum, que fazem a administração de criação de novos blocos, garantindo então uma confiança. Esses são os algoritmos de consenso ou protocolos de consenso.

2.1.1 Protocolos de Consenso

Há duas abordagens principais para realização de protocolo de consenso no âmbito de *blockchains*:

- **Prova de Trabalho:** Para que a *blockchain* possa receber novos blocos, vários usuários no mundo competem para fazer a adição de novos blocos. Esse tipo específico de usuários é chamado de minerador. Para que um minerador consiga adicionar um novo bloco com sucesso, ele precisa adivinhar o valor de um número pseudoaleatório. É caro computacionalmente descobrir o valor desse número, denominado nonce. Contudo, por meio de uma função hash, é possível rapidamente verificar a corretude de uma tentativa. A complexidade necessária para criação de um bloco faz com que a rede se torne robusta contra ataques (JAKOBSSON; JUELS, 1999).
- **Prova de Participação:** Dentro da prova de participação, membros da rede que queiram inserir novos blocos devem aportar um valor monetário para se tornarem um validador (esse nome pode variar dependendo da criptomoeda) (SIIM, 2017).

2.2 Ethereum

Assim como outras criptomoedas, o Ethereum é dividido em sequência de blocos. Estes podem ser considerados como agrupamento de transações monetárias, um dos principais focos de análise desse trabalho. Cada transação contempla uma variedade de atributos. Dentre os principais estão:

- **Hash:** Identificador único de transação. Possui 64 caracteres em hexadecimal;
- **Remetente:** Hash identificador da conta que enviou a transação;
- **Destinatário:** Hash identificador da conta que recebeu a transação;
- **Valor:** Valor em Ether que foi enviado na transação. Pode ser zero;
- **Gás:** Unidade que representa a complexidade computacional para efetuar a transação. Transações comuns tendem a usar 21000 em gás, enquanto transações de contratos inteligentes gastam mais;
- **Preço do gás:** Taxa em Ether a ser paga por cada unidade de gás na transação.

É importante ressaltar que o preço do gás é um atributo calculado a partir de outras variáveis. No momento de confecção desse trabalho, a rede executa a cada novo bloco algoritmos que geram uma taxa base para se aplicar a todas as transações em função da demanda e do congestionamento dos blocos recentes (BUTERIN et al., 2019). Caso seja de desejo do usuário, ele também pode pagar um valor superior ao da taxa base para que sua transação seja confirmada com maior prioridade.

2.2.1 Contratos Inteligentes

Um dos principais diferenciais do Ethereum é a presença de contratos inteligentes. Com o uso deles, contas conseguem armazenar código em uma linguagem chamada Solidity. Esses códigos podem ser executados com a realização de transações. Para criação de uma conta com contrato inteligente, uma transação também é utilizada.

Entre aplicações de contratos inteligentes, se destacam distribuição e venda de ativos únicos (NFTs), criação e conversão de outras moedas, transações monetárias programadas, entre outras.

2.2.2 The Merge

O processo de troca de protocolo de consenso do Ethereum de prova de trabalho para prova de participação ficou formalmente conhecido como *The Merge*, e se concluiu em 15 de setembro de 2022. Nesse dia, a rede principal do Ethereum se uniu com uma rede que rodava em paralelo, testando o novo protocolo. Essa rede se chamava Beacon Chain. Após a união, nenhum histórico foi perdido e todas as transações antigas seguiram fazendo parte da *blockchain* principal. Novas transações a partir dessa troca, no entanto, todas cumprem o novo protocolo de prova de participação.

2.3 Redes Complexas

Dentro da área de estudo das redes complexas, são estabelecidas maneiras por meio das quais é possível representar uma rede, fazendo uso de estruturas de dados provenientes da teoria dos grafos (ALBERT; BARABÁSI, 2002). Seja um grafo definido como um par $G = (V, A)$ tal que V é um conjunto de elementos representados como vértices (também chamados de nós) e A é um conjunto de par de vértices, chamados de arestas. Caso A seja um par ordenado, isto é, os elementos são dispostos sob a condição que $\{a, b\} = \{b, a\}, \forall a, b$ seja falso, o grafo é considerado como um grafo **direcionado** ou **dirigido**.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de representação visual de um grafo. Nesse caso, o conjunto de vértices é $V = \{a, b, c, d, e, f\}$. Note que a presença de setas para a representação de arestas sugere que esse grafo é direcionado. Nesse caso, as arestas são tais que $A = \{(b, a), (b, c), (d, c), (f, d), (e, f)\}$. O par ordenado para cada aresta indica em seu primeiro membro o vértice de saída da aresta, e em seu segundo membro o vértice de entrada da aresta. Nós conectados em uma rede são considerados nós vizinhos, e a vizinhança de um nó consiste no conjunto de todos os nós com os quais há uma conexão direta.

Um grafo é definido como um grafo temporal quando são associados à uma variável t que representa uma unidade temporal que avança (dias, meses, semanas etc.). Conforme o valor de t aumenta, a rede representada pelo grafo é alterada para comportar as mudanças realizadas na rede, geralmente com um comportamento de crescimento.

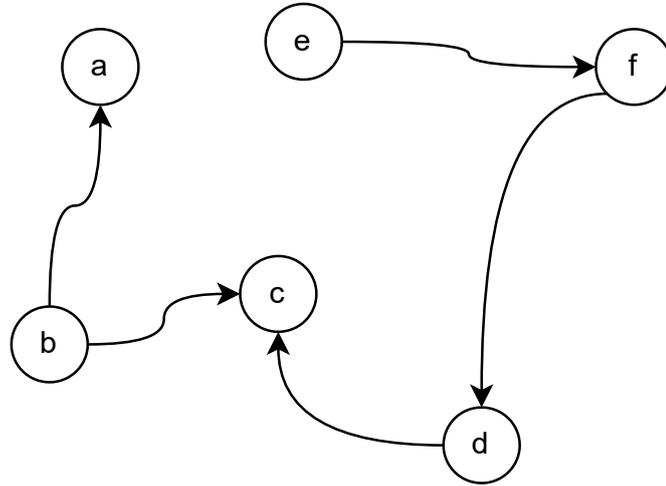


Figura 2.2: Representação de um grafo.

Dentro da teoria das redes complexas, diversas métricas podem ser calculadas para que uma rede possa ser avaliada. A seguir algumas das principais métricas estão apresentadas.

2.3.1 Métricas de Centralidade

A centralidade indica a tendência de concentração de importância do grafo em um único nó, ou em um conjunto de poucos nós. Existem formas diferentes de medir essa importância, mas esse trabalho foca em três métricas principais para centralidade:

- **Grau** é uma métrica que define, para dado vértice, quantas ligações (arestas) ele possui com outros vértices. Para redes direcionadas, há a separação entre métrica de **grau de entrada** e **grau de saída**, referente a contagem de arestas que entram ou que saem do nó. É possível também para o contexto de redes direcionadas calcular o grau geral do nó, somando ambos os graus de entrada e de saída.

Considerando essa abordagem, quanto maior o grau de um vértice, maior sua centralidade. Dessa forma, vértices que fazem muitas conexões são entendidos como importantes (BENZI; KLYMKO, 2014).

- **Proximidade** considera a distância de um vértice em relação aos outros pertencentes à rede. Quanto menor for o número de arestas percorridas para alcançar outros nós, maior a centralidade de proximidade daquele vértice (BAVELAS, 1950).
- **Intermediação** mede quantas vezes um nó faz parte de um caminho mínimo entre dois nós quaisquer na rede (LANDIS, 2016). Pode-se dizer que a importância de nós com alta centralidade de intermediação faz com que a rede possa ter problemas para funcionar devidamente, dada uma possível ausência dos nós centrais.

A Figura 2.3 mostra um grafo de exemplo com os três tipos de centralidade. Observe que o nó “A” tem alta **centralidade de grau**, visto que possui conexões com quatro vizinhos. O nó “B”, por outro lado, possui **centralidade de proximidade**. Sua disposição “central” na figura mostra que a distância de “B” em relação ao restante da rede não é muito grande. Por fim, o nó “C” tem alta **centralidade de intermediação**. Por ser o único vértice que conecta uma parte da rede com a outra, toda ligação de nós entre as duas partes deve passar por “C”.

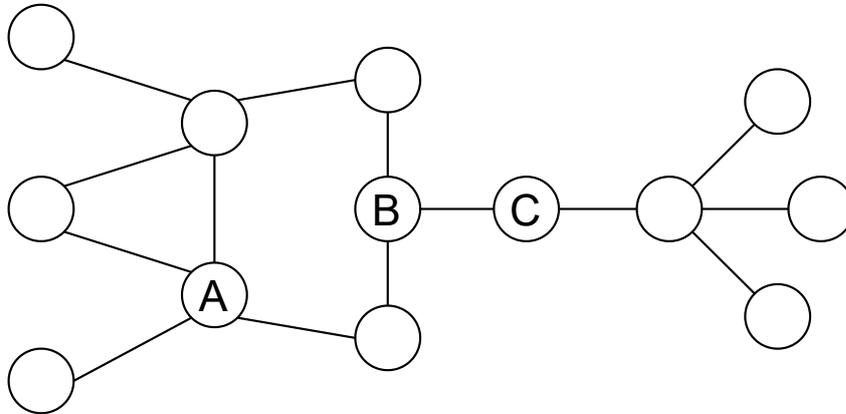


Figura 2.3: Exemplo de centralidades em uma rede.

2.3.2 Aglomeração

O coeficiente de aglomeração ou coeficiente de agrupamento da rede busca identificar a tendência da rede de formar grupos com alta densidade de laços. Caso uma rede tenha alto índice de aglomeração, pode-se inferir que se A tem uma conexão com B e B tem uma conexão com C , a chance de que A tenha uma conexão com C é alta.

Há dois tipos de coeficiente de aglomeração:

- **Coefficiente de aglomeração global:** Consiste em verificar a proporção de trios de nós que fecham um ciclo em relação aos que não fecham (LUCE; PERRY, 1949).

Pode ser calculado como:

$$C = \frac{N_T}{N}$$

sendo N_T o número de trios de vértices completamente conectados entre si e N o número de trios de vértices que tenham alguma conexão.

- **Coefficiente de aglomeração local:** Define o quão perto um nó está de seus vizinhos formarem um grafo completo (que possui todas as conexões possíveis entre eles) (WATTS; STROGATZ, 1998). Seja C_i o coeficiente de aglomeração local de um nó i , k_i o número de nós vizinhos, N_i o conjunto de todos os nós vizinhos, a_{jk} uma aresta de um vértice j para k e v_i um nó i , temos que

$$C_i = \frac{|\{a_{jk} : v_j, v_k \in N_i, a_{jk} \in A\}|}{k_i(k_i - 1)}$$

Caso o grafo seja não-direcionado, o número de arestas possíveis é dividido por 2, visto que:

$$a_{jk} = a_{kj} \quad \forall j, k \in V$$

Portanto, a fórmula passaria a ser:

$$C_i = \frac{2 \cdot |\{a_{jk} : v_j, v_k \in N_i, a_{jk} \in A\}|}{k_i(k_i - 1)}$$

2.3.3 Assortatividade

A assortatividade mede a correlação entre a semelhança de nós com a conexão entre deles. Por exemplo, uma rede com alto nível de assortatividade tem uma tendência de ter vértices com grau semelhante conectados, enquanto vértices com graus diferentes não se conectam. Um valor negativo no coeficiente de assortatividade significaria vértices com grau semelhante não se conectando, enquanto graus diferentes implicariam em conexão. Em caso de falta de correlação identificada, a assortatividade tende a ter um valor próximo a zero (NEWMAN, 2002).

2.4 Considerações Finais

Com esse capítulo, portanto, é estabelecido um alicerce teórico que possibilita a compreensão de análises contextualizadas na rede do Ethereum. A noção de como funciona uma *blockchain* e, especialmente o Ethereum, tem suma importância para compreensão do contexto das análises, e quais as hipóteses e conclusões que podem surgir em cada cenário. Ademais, as técnicas de redes complexas permitem uma noção mais apurada acerca de informações não triviais acerca de uma rede tão vasta quanto é o Ethereum.

É importante ressaltar também que na seção de metodologia, alguns detalhes sobre coleta de dados e métodos de análise destes fazem uso direto de conhecimentos expostos neste capítulo. Entende-se, dessa forma, que devido à base teórica aqui concedida, análises mais aprofundadas e detalhadas são possíveis de maneira mais clara.

3 Trabalhos Relacionados

Este capítulo tem o objetivo de apresentar e fazer uma comparação de trabalhos científicos realizados recentemente que tenham objetivo e metodologia semelhantes ao que este trabalho busca atingir.

Entende-se que há diversas formas de coletar, organizar, e processar dados da rede do Ethereum. Vale também ressaltar que, dentre trabalhos científicos realizados acerca desse criptoativo, diversos objetivos de pesquisa diferentes foram estabelecidos previamente, como a realização de análises históricas da evolução da rede com o passar do tempo, análises temporais de eventos específicos, compreensão de dinâmicas específicas do Ethereum, análises de segurança, entre muitos objetivos.

Pode-se concluir que, com o uso de diferentes ideias e metodologias previamente utilizadas em contextos diferentes, é possível, com este trabalho, fazer novas contribuições por meio de aplicação de tais conceitos em novos cenários.

Dessa forma, as seções subsequentes apresentam alguns dos principais trabalhos realizados com metodologias e objetivos de pesquisa relevantes e, por fim, é feita uma análise comparativa de todos esses trabalhos em relação aos seus atributos divergentes.

3.1 Métricas de redes complexas usadas para aprendizado de máquina

Uma forma de fazer uso das redes complexas para análise de um conjunto de dados é utilizando as métricas extraídas com a modelagem da rede como entrada para algoritmos de aprendizado de máquina a fim de buscar fazer classificações, predições ou observações de padrões dentro da rede.

Zhao et al. (2021) analisaram toda a evolução da rede do Ethereum, considerando as diferenças existentes entre dois tipos de usuários existentes dentro da divisão de contas no Ethereum: contas externas e contratos inteligentes.

O objetivo do trabalho é responder às seguintes perguntas: de que forma a *block-chain* do Ethereum evolui com o passar do tempo? Com qual modelo de crescimento? Qual o comportamento de vértices de alto grau e quanto tempo nós e comunidades mantêm atividade? Quais mudanças significativas ocorrem nas métricas globais de rede com o passar do tempo?

Para responder a esses questionamentos, são usadas quatro redes construídas a partir de dados disponibilizados pelo serviço de *data warehouse* do Google BigQuery. Estas são: (a) **TraceNet**, que contém todos os usuários externos e todos os contratos inteligentes como vértices, bem como todas as transações realizadas com sucesso ligando-nos; (b) **ContractNet**, um subconjunto da TraceNet, contendo apenas nós de contratos inteligentes; (c) **TransactionNet**, que filtra apenas transações que ocorrem partindo de um nó de usuário externo; (d) **TokenNet**, que apenas considera transações com explícitas transações de *tokens*, um tipo de ativo presente em criptomoedas que simbolizam outros tipos de ativos digitais.

Observando o comportamento de cada uma dessas redes, algumas conclusões podem ser levantadas. Analisando que para toda rede, existe uma correlação entre nós de alto grau recebendo uma maior proporção de novas ligações no ano subsequente. Isso é conhecido como um modelo de crescimento da rede baseado em conexão preferencial.

A análise das principais contas no aspecto de centralidade de grau mostram que contas externas tendem a concentrar-se em casas de câmbio e em grandes grupos de mineração, com poucas flutuações entre seus principais usuários entre um ano e outro. Já para contratos inteligentes, nota-se uma variabilidade maior de um ano para o outro.

Essa observação pode ser considerada uma consequência de contratos inteligentes terem um tempo médio de atividade menor do que contas externas. Foi notado que 80% de contratos inteligentes têm um período de atividade de no máximo um mês, enquanto esse número está em cerca de 68% para contas externas.

Outra questão de pesquisa relevante é observar a maneira com que características globais do Ethereum se comportam com o passar do tempo. Com algumas métricas como assortatividade, aglomeração e média de reciprocidade (tendência de um nó receber uma ligação de volta de outro nó), foram realizadas comparações com diferentes granularidades

temporais. Testando cada uma, observou-se que a comparação mensal é capaz de mostrar da melhor forma flutuações anômalas nas propriedades. Eventos como lançamento em massa de *tokens* em 2016 são observáveis nessas análises.

Foram feitas também análises de comunidades na ContractNet. Com o uso de algoritmos de aprendizado de máquina de regressão, objetivou-se criar um modelo preditivo que pudesse determinar o tempo que um grupo de contratos (comunidades) continuaria em atividade. Dentre todas as características coletadas, os algoritmos de Random Forest (HO, 1995) e regressão logística (CRAMER, 2002) – também conhecida como LR – elencou como características mais importantes, em ordem: densidade (proporção de arestas diante de todas as possíveis), número de ligações e assortatividade.

Uma abordagem para extração de métricas da rede para uso de aprendizado de máquina também foi feito de forma comparativa com criptomoedas além do Ethereum. Aspembitova, Feng e Chew (2021) buscam desenvolver um estudo com uma metodologia que seja capaz de analisar o comportamento de usuários das criptomoedas Ethereum e Bitcoin sob a perspectiva do mercado financeiro.

Para tal fim, em relação ao Ethereum, foi usado um *dataset* disponível publicamente⁵, que contém transações do Ethereum desde a gênese, em 2015.

A princípio, os autores definem a intenção inicial de usar os dados para separar períodos em função da tendência de valorização das moedas. Definem-se meses de “crescimento”, “estabilidade” e “queda” a partir do valor calculado de alteração percentual de ambos o preço médio diário médio de cada moeda e do preço total de um mês em relação ao anterior.

Além dessa categorização de meses, são selecionados alguns períodos de alto interesse. O primeiro relativo à bolha de criptomoedas – período de extrema valorização desses ativos –, um segundo referente ao momento após a bolha “estourar” com a subsequente queda; e por fim, o período conhecido como *Crypto Winter*, com um momento estagnação no valor das criptomoedas. A bolha cripto tem seu período aproximado por volta de dezembro de 2017 a janeiro de 2018, enquanto o *Crypto Winter* acontece ao fim de 2018. Delimitações mais detalhas de tais períodos e do período “pós-bolha” não são

⁵(<https://github.com/blockchain-etl/ethereum-etl>). Acessado em 03 de dezembro de 2022.

especificadas pelos autores.

Para cada período estabelecido, foram modeladas redes ponderadas temporais em que arestas representam transações realizadas entre contas. Para cada uma dessas redes, são calculadas métricas de redes complexas como grau médio, coeficientes de aglomeração e assortatividade.

Posteriormente, outra hipótese foi testada no trabalho: os tipos de comportamento conhecidos pelas teorias econômicas diante de um mercado financeiro seguem sendo válidas para o contexto das criptomoedas em diferentes períodos observados? A fim de investigar essa questão, os autores utilizam métricas de cada nó, como graus de saída e de entrada, valor transacionado e valor retido na conta para executar algoritmos de aprendizado de máquina que classifiquem e separem diferentes tipos de usuário.

Inicialmente, faz-se necessário retirar dados ruidosos da base. Dessa forma, estabeleceu-se que usuários com grau menor que 2 e que participaram de transações com menos de 1% do valor total negociado na rede em um dado período são considerados de baixa participação e portanto “*outliers*” na rede.

O problema de identificar grupos de usuários em uma base de dados é considerado um problema de agrupamento com aprendizado não-supervisionado, o que significa que com a análise de padrões de características, os algoritmos são capazes de identificar grupos distintos de usuários, sem a necessidade de rótulos pré-definidos.

Com o uso do algoritmo k -means (MACQUEEN, 1967) para a separação de quatro grupos principais, alimentado com as propriedades de nó supracitadas, um conjunto de regras é encontrado, que define de maneira aproximada as características próprias de cada grupo encontrado.

Após validações estatísticas e uma filtragem de instâncias anômalas, o conjunto de dados, agora com rótulos referentes a quatro grupos, alimenta um algoritmo de aprendizado supervisionado: a máquina de vetores de suporte (BOSER; GUYON; VAPNIK, 1992). Com isso, foi definido um modelo de aprendizado de máquina que é capaz de classificar usuários em uma rede de acordo com seu comportamento de maior compra ou maior venda de ativos. Por fim, a distribuição de comportamentos dos usuários é contrastada em função de cada período coletado inicialmente.

3.2 Caracterização focada em métricas de redes complexas

Uma outra abordagem envolve fazer o uso das estruturas de grafos como foco principal da análise, tornando as métricas extraídas não apenas um meio para uma outra análise, mas o objeto principal do estudo. Chen et al. (2020) propuseram uma separação em três modelos diferentes de rede. Essas foram:

- **MFG (Money Flow Graph):** Busca representar a rede como um grafo direcionado ponderado nas arestas, com os vértices representando o conjunto de todas as contas da rede e as arestas representando as transações que as conectam e a quantidade de dinheiro sendo o peso da aresta.
- **CCG (Contract Creation Graph):** Um usuário cria um contrato inteligente no Ethereum enviando uma transação para o endereço 0x0, processo denominado de criação de contrato. No CCG, os usuários que criam um contrato são nós que têm uma aresta que se conecta no contrato criado, também representado por um nó.
- **CIG (Contract Invocation Graph):** O CIG também é representado como um grafo direcionado ponderado nas arestas. Nesse caso, o peso das arestas representa a quantidade de vezes que um nó usuário invocou o nó contrato que recebeu a conexão da aresta.

Esse trabalho faz a coleta de todas as contas e transações realizadas com sucesso no Ethereum desde o dia de lançamento até 01 de novembro de 2018. Essa coleta é feita por meio de um nó cliente participante da rede do Ethereum.

Com essas redes, os autores unem diversas métricas da teoria das redes complexas para buscar observações acerca do Ethereum. Ademais, algumas aplicações diretas da teoria de grafos foram utilizadas nesse trabalho.

A primeira destas é a capacidade de realizar análise forense em ataques realizados. Dado um contrato inteligente com comportamento malicioso, foi desenvolvida uma metodologia para criação de correlação entre o CIG e o CCG com o fim de verificar contas e usuários por trás do comportamento malicioso.

Outra aplicação é a de verificar e detectar contas com comportamento anômalo na rede. Contratos inteligentes maliciosos podem agir como um agente de ataque de negação de serviço, criando novos contratos sem funcionalidade com o intuito de prejudicar o funcionamento da rede. Os grafos construídos podem auxiliar na detecção desse tipo de atividade.

Dessa forma, mais uma aplicação criada pelos autores é a de desanonimização de endereços Ethereum. Por definição, uma hash pública não provê informações sobre a pessoa que utiliza de uma conta. No entanto, com o uso de análises do CCG, é possível encontrar nós que foram responsáveis pela criação de outros contratos inteligentes, que por sua vez, podem ter informações retiradas de seus códigos-fonte com o uso de processamento de linguagem natural.

A pesquisa realizada por Ferretti e D'Angelo (2020) também faz uso de redes complexas para analisar o contexto do Ethereum, porém com algumas particularidades.

Os autores fazem uso de um *software* chamado EtherNet Galaxy para realizar a coleta de dados, em conjunto com as APIs do Infura e Web3.js para realizar o pré-processamento e coleta dos dados da rede.

Esse trabalho, ao invés de comparar períodos temporais específicos diferentes, faz a comparação de redes com quantidade variada de blocos e transações, buscando observar a maneira que a rede formada pelas transações cresce conforme mais blocos são utilizados.

Para essa análise, os autores optaram pela representação de grafos ponderados com nós sendo contas e arestas sendo transações entre contas, de forma semelhante ao MFG desenvolvido por Chen et al. (2020).

Métricas foram coletadas em amostras da rede com: 1, 10, 100, 1000, 10000 e 100000 blocos coletados. Utilizando um tempo médio de cerca de 14,1 segundos para a mineração de cada bloco, estimam-se amostras de alguns segundos até 16 dias de intervalo.

Uma das observações notadas pelos autores é a maneira como a distribuição de graus de nós na rede aparenta uma tendência a seguir a lei de potência.

O coeficiente de aglomeração de todas as redes foi observado com valores de zero ou muito próximos a zero em todas as amostras. Foi notado também que as maiores distâncias entre nós crescia conforme mais blocos e transações eram adicionados, o que

vai contra a possível associação do Ethereum com redes de mundo pequeno, onde conexões entre nós se concentram em poucos nós e existe uma alta aglomeração e baixa distância entre vértices.

É notório, entretanto, que conforme a amostra da rede cresce, a presença de grande nós centrais de grande importância aumentava, seja por meio de grupos de mineração ou por vértices de casas de câmbio.

Embora a representação de um grafo com contas e transações também seja utilizada por Mascarenhas et al. (2020), cada transação está associada ao momento que ela aconteceu. Com isso, é construído um grafo que varia com o passar do tempo, possibilitando uma análise evolutiva do Ethereum desde a sua origem até 28 de agosto de 2018.

O trabalho em questão tem como objetivo observar o comportamento do Ethereum enquanto criptomoeda, focando portanto nas atividades financeiras próprias de um sistema digital para realização de transações monetárias. Dessa forma, foi utilizado um sub-grafo com transações feitas por usuários externos (filtrando contratos inteligentes) que possuam valor de transferência de Ether (transações sem valor podem ser atividades como criação de contrato ou trocas de *tokens*).

Quanto ao comportamento de usuários, o intervalo de tempo entre a criação de uma conta e a sua última transação – conhecido como ciclo de vida – costuma concentrar-se em baixos valores, com 70% de usuários com um ciclo de vida de um dia ou menos, e apenas 1% mantendo a atividade por mais de um ano. Mais inspeções mostram que cerca de 97% dos usuários têm um perfil de baixa transferência de Ether e baixa frequência de transações.

Como é atestado na literatura, a distribuição de graus gera um padrão com um pequeno número de nós de alto grau e um grande número de nós com pequeno grau. Esse padrão também é observado por Mascarenhas et al. (2020).

Com o uso do método de Louvain (BLONDEL et al., 2008), os autores buscaram categorizar as comunidades que formavam a composição da rede em cada instância de tempo para os três últimos meses coletados. O padrão de muitos nós de pouca conectividade e poucos nós com muita conectividade se confirma nessa situação. Grande parte

das comunidades possui apenas centenas de nós. No entanto, a maior delas representa 17,79% dos vértices.

Uma outra análise evolutiva, porém com uma metodologia diferente pode ser vista por (LIANG, LI e ZENG, 2018). A mesma representação da rede é feita nesse trabalho, porém, nesse caso é feita uma comparação entre as criptomoedas Bitcoin, Ethereum e Namecoin.

Os conjuntos de dados foram construídos por via de exploradores de *blockchain* específicos para cada moeda. No caso do Ethereum, foi usado o Etherscan.io. Nesse caso, os dados coletados coletam conteúdo desde a origem de cada criptomoeda até 31 de outubro de 2017.

A rede é modelada da maneira mais usual, com nós fazendo o papel de contas e arestas representando transações.

Algo a se notar são particularidades no comportamento de redes de criptomoedas em relação a redes comuns. Foi notado que, conforme a rede cresce, a densidade da rede não necessariamente cresce nem mantém-se estável. Nos exemplos observados nas 3 redes, o grau médio da Bitcoin cresceu até 2016, momento em que começou a reduzir o grau médio dos nós. Já o Namecoin, mostra um comportamento de crescimento pelo primeiro ano e alguns altos e baixos, assim como o Ethereum. Uma possível explicação está na tendência das redes de descentralizarem e anonimizarem os usuários, que podem fazer uso de diversos endereços diferentes com uma mesma carteira para fins de segurança.

Outro detalhe percebido reside no fato de que a taxa de sobrevivência mensal dos nós era consideravelmente baixa para todas as redes. Isto é, grande parte dos vértices com participação em uma criptomoeda em um mês não teria participação no mês seguinte. As variabilidades que podem surgir com o surgimento de novos nós e o “desaparecimento” de outros levaram os autores a focar análises em redes construídas de maneira mensal.

Estudos em redes mensais trazem alguns resultados. Inicialmente, nota-se que para Bitcoin e Ethereum, a distribuição de graus pode ser aproximada com a lei de potências, como é defendido na literatura por trabalhos como Ferretti e D’Angelo (2020). No entanto, a longo prazo, a distribuição parece se comportar mais como uma distribuição de cauda longa. Já a Namecoin, no entanto, possui um grande número de nós com grau

alto, impossibilitando a aproximação com distribuição com lei de potências.

A análise de coeficiente de aglomeração é feita também com o intuito de verificar a hipótese de redes de mundo pequeno, assim como foi feito por Ferretti e D’Angelo (2020). Nesse caso, a comparação de aglomeração de cada criptomoeda com redes usuais aleatórias mostra que apenas o Bitcoin possui um comportamento associado a uma rede de mundo pequeno.

3.3 Considerações Finais

Para encerrar esse capítulo, a Tabela 3.1 mostra uma análise comparativa de todos os trabalhos citados, principalmente em relação à metodologia para análise.

Tabela 3.1: Análise comparativa de trabalhos relacionados

Trabalho	Método de coleta	Período de análise	Criptomoeda (s) adicional (is) analisada (s)	Análise de Contratos Inteligentes
Aspembitova; Feng;Chew	github.com /blockchain-etl/ ethereum-etl	2015 -2018	Bitcoin	Junto com contas comuns
Zhao et al.	Google BigQuery	2015-2019	Nenhuma	Separado de contas comuns
Chen et al.	Nó Cliente	2015-2017	Nenhuma	Separado de contas comuns
Ferretti;D’Angelo	EtherNet Galaxy / Infura com web3js	2015-2020	Nenhuma	Junto com contas comuns
Liang;Li;Zeng	API Etherscan	2015-2017	Bitcoin e Namecoin	Junto com contas comuns
Mascarenhas et al.	API Etherscan	2015-2018	Nenhuma	Retiradas do <i>dataset</i>
Este Trabalho	API Etherscan	2017-2022	Nenhuma	Junto com contas comuns

Há disponível publicamente na Internet bases de dados que contemplam transações públicas da *blockchain* do Ethereum, como as que são usadas em Aspembitova, Feng e Chew (2021) e Zhao et al. (2021). Contudo, alguns autores optam por construir a própria base de dados com o uso de um nó próprio ou de APIs. A API do Etherscan é uma forma bem popular, usada por Liang, Li e Zeng (2018) e Mascarenhas et al. (2020) e que também será utilizada por esse trabalho. Já Ferretti e D’Angelo (2020) usam APIs para permitir a captura de um nó da rede Ethereum, enquanto Chen et al. (2020) usa um nó “autoral”.

De maneira geral, todos os trabalhos usam uma base de dados focada em um período semelhante, iniciando a análise desde os primeiros blocos em 2015. A análise mais ampla é feita por Ferretti e D'Angelo (2020), encerrando a base de dados apenas em 2020. Por fim, Zhao et al. (2021) conclui os dados em 2019, Mascarenhas et al. (2020) e Aspembitova, Feng e Chew (2021) em 2018 e Chen et al. (2020) e Liang, Li e Zeng (2018) em 2017. Considerando esse aspecto, este trabalho faz análises em períodos mais específicos, focando a modelagem do conjunto de dados em períodos de um mês. Contemplando todos os períodos analisados, temos períodos iniciando em 2017 até períodos que terminam em 2022.

Grande parte dos trabalhos focaram suas investigações apenas no Ethereum, focando em observar comportamentos específicos para essa criptomoeda. Contudo, outra possibilidade é realizar uma análise comparativa entre a estrutura de diferentes criptomoedas. Uma comparação com Bitcoin é realizado em Aspembitova, Feng e Chew (2021) e Liang, Li e Zeng (2018), embora o segundo tenha também comparações realizadas com Namecoin.

Alguns trabalhos fazem uso de aprendizado de máquina para enriquecer análises que foram feitas com as métricas de redes complexas. Em Aspembitova, Feng e Chew (2021), o método k -means é usado para separar os usuários em grupos conforme o comportamento de transações, e a máquina de vetores de suporte é usada para montar um modelo preditivo em cima das separações encontradas. Já Zhao et al. (2021) usa Floresta Aleatória e LR para encontrar as propriedades mais importantes que definem a sobrevivência de uma comunidade de contratos inteligentes.

Uma das mais importantes funcionalidades que a plataforma do Ethereum oferta é a de utilizar contas para armazenar código executável na *blockchain*. Essas contas são conhecidas como contratos inteligentes, em contraste a contas comuns, que são operadas por seres humanos para propósitos puramente financeiros⁶.

Devido às diferentes naturezas de análise, alguns trabalhos podem se beneficiar mais ou menos de uma observação mais minuciosa de tais contas especiais. Nota-se que Chen et al. (2020) e Zhao et al. (2021) usam grafos próprios cujo objetivo é observar

⁶<https://ethereum.org/en/developers/docs/smart-contracts/> Acessado em 23 de janeiro de 2023.

o comportamento específico de contas de contrato inteligente. Essa é uma abordagem comum para trabalhos que analisam exclusivamente o Ethereum, ao contrário do que fazem Aspembitova, Feng e Chew (2021) e Lian, Li e Zeng (2018), visto que comparam seus resultados com o Bitcoin, uma plataforma que não possui suporte para esse tipo de conta.

Ferretti e D'Angelo (2020) também não fazem nenhum tipo de distinção entre contas externas e contratos inteligentes, concentrando suas observações no aspecto de métricas gerais de rede em função do tamanho da amostragem utilizada para a construção do *dataset*.

O estudo realizado por Mascarenhas et al. (2020), por outro lado, opta por analisar apenas a perspectiva financeira do Ethereum, propositalmente ignorando tais funcionalidades adicionais e retirando esse tipo de conta do *dataset*.

Considerando nosso objetivo de compreender o papel e possíveis mudanças de comportamento de todas as contas ativas na rede em determinados períodos, esse trabalho não separa nem exclui contratos inteligentes de sua análise.

4 Metodologia

Esse trabalho utiliza conceitos teóricos de redes aplicados em um cenário real. Para tal, são necessários dados reais a respeito de cada evento abordado, bem como uma metodologia bem-definida de métricas buscadas para encontrar e tirar conclusões.

Para coleta dos dados, há APIs públicas que permitem a coleta de praticamente todas as características de cada transação que já foi realizada, o que viabiliza a construção de bases de dados específicas para esse trabalho.

Quanto às análises, há diversas maneiras de se abordar um evento específico, mas esse trabalho busca construir uma rede simplificada que consiga representar as contas do Ethereum, e capturar métricas a respeito da rede com o uso de estudos sobre redes complexas.

A seguir é abordada a maneira como esse trabalho busca realizar análises da rede do Ethereum em cada período, detalhando a coleta, processamento e modelagem dos dados em grafos.

4.1 Descrição e Coleta de Dados

Há diversas formas diferentes de se realizar a coleta de dados de uma *blockchain* pública como o Ethereum, como pode ser observado nos trabalhos na Seção 3.3.

Para esse trabalho, considerando o objetivo de construção de base de dados próprias para cada período de interesse, a opção de maior praticidade que possibilita a coleta de transações é o uso de uma API que extraia tais informações⁷.

Devido às limitações de tempo e de poder computacional, as bases de dados utilizadas para análise dos períodos dos eventos têm um foco de um período de um a dois meses, buscando alcançar o momento específico de inflexão no comportamento da rede para cada evento selecionado.

Considerando condições específicas de cada evento estudado, os períodos de coleta

⁷<https://etherscan.io/apis> Acessado em 18 de dezembro de 2023.

são definidos de forma diferente para cada um, objetivando unir transações em uma janela de tempo de um a dois meses, como mencionado anteriormente.

A Tabela 4.1 mostra os dias definidos para início e final do período de coleta de dados para construção dos *datasets*, bem como o número de blocos total de blocos a ser coletado. Todos os blocos adicionados à *blockchain* durante os dias pertencentes aos intervalos (inclusive os dias de início e fim) serão inseridos na base de dados. O fuso horário considerado para definir o início e o final de cada dia é o Tempo Médio de Greenwich (GMT).

Tabela 4.1: Períodos de Coleta de Dados

Evento	Dia Início	Dia Final	Número de Blocos	Tamanho de Intervalo
Primeira ascensão do Ethereum	10/12/2017	13/01/2018	198 802	35 dias
Primeira queda do Ethereum	14/01/2018	05/02/2018	133 938	23 dias
Início da COVID-19	11/03/2020	11/04/2020	207 203	32 dias
Segunda ascensão do Ethereum	01/02/2021	01/05/2021	584 494	90 dias
Segunda queda do Ethereum	01/04/2022	01/06/2022	390 761	62 dias
Conflito Rússia-Ucrânia	01/02/2022	15/03/2022	277 496	43 dias
The Merge	01/09/2022	30/09/2022	199 976	30 dias

Para os períodos de crescimento e de queda de valorização da moeda, foram delimitadas datas de maneira arbitrária, de acordo com picos de valor do Ether em função do dia. Nota-se que o Segunda ascensão do Ethereum possui um período de análise de 90 dias, visto que houve maior duração de crescimento constante diário no valor da moeda.

Em relação ao período referente ao início da pandemia da COVID-19, foi utilizado como ponto de partida o dia 11 de março, dia em que a Organização Mundial da Saúde declara a COVID-19 como uma pandemia (LIU; KUO; SHIH, 2020). A partir disso, a coleta é feita considerando o mês seguinte à confirmação do fato, momento em que as primeiras medidas de contenção passaram a acontecer em todo o mundo, ocasionando em possíveis consequências econômicas.

Já a invasão da Rússia na Ucrânia, iniciando oficialmente um conflito armado, acontece em 24 de fevereiro de 2022⁸, data que serve como ponto de base para a criação de *datasets* para análises. A fim de buscar entender os efeitos relativos à especulação e tensão que antecederam à invasão, o início do período de coleta se estabelece como o início do mês de fevereiro. Para compreensão dos efeitos pós-invasão, entendeu-se que um

⁸<https://www.reuters.com/world/europe/russias%2Dputin%2Dauthorises%2Dmilitary%2Doperations%2Donbass%2Ddomestic%2Dmedia%2D2022%2D02%2D24/> Acessado em 06 de dezembro de 2023.

período que se estenda até a metade de março oferece transações suficientes para análise.

Por fim, o processo que passou a ser conhecido como *The Merge* de alteração de infraestrutura na rede do Ethereum se consolida em 15 de setembro de 2022⁹. Para analisar igualmente o comportamento da rede antes e depois da alteração, foram divididos 30 dias, com 15 antes da mudança e 15 após a mudança.

4.2 Construção das Redes

Para extrair resultados dos *datasets* construídos, esse trabalho busca compreender o comportamento de usuários e da rede do Ethereum em um determinado período por meio de métricas da teoria das Redes Complexas.

Esse trabalho busca realizar comparações entre o comportamento da rede durante os períodos de interesse entre eles e entre períodos previamente analisados na literatura. Portanto, cada evento estudado e, conseqüentemente, cada *dataset* corresponde a um grafo, que representa a rede durante aquele período específico.

Cada grafo é modelado como um grafo direcionado sem pesos. É comum na literatura o uso de grafos temporais para abordar desse tipo de problema. Esse trabalho, entretanto, foca em comparar somente o resultado agregado de todas as transações realizadas no Ethereum ao final de cada período, não fazendo comparações intra-evento ao comparar a rede com o passar dos dias, por exemplo.

Para cada período de interesse, um grafo é construído com o intuito de se calcular as métricas de coeficiente de assortatividade, coeficiente de aglomeração global, além de obter as contas com maior centralidade de grau, intermediação e proximidade.

Para a realização deste experimento, foi utilizada a linguagem de programação Python com a biblioteca *igraph* em sua versão 0.10.2.

⁹<https://ethereum.org/en/upgrades/merge/> Acessado em 01 de janeiro de 2023.

5 Resultados

Para cada período distinto de interesse, foi realizada uma análise para avaliar a estrutura da rede e a centralidade dos nós dentro da rede Ethereum. As métricas gerais de coeficiente de assortatividade e de aglomeração puderam ser calculadas com base na totalidade de transações de cada período, proporcionando uma compreensão mais completa do comportamento da rede dentro de cada período. Da mesma forma, a centralidade de grau de cada nó foi computada considerando todas as transações do período.

No entanto, o cálculo da centralidade de intermediação e proximidade apresenta desafios computacionais significativos, considerando períodos que podem chegar a centenas de milhões de transações (segunda ascensão possui 112.020.364 transações). Como a complexidade computacional dos algoritmos que calculam essas centralidades é da ordem de $O(V \cdot E)$, com V sendo o número de vértices e E o número de arestas (FREEMAN et al., 2002), uma análise direta com conjuntos tão extensos tornou-se inviável.

Para superar essas limitações computacionais, foi adotada uma abordagem com pragmatismo. A rede foi dividida em fatias sequenciais, cada uma composta por 200 blocos. Posteriormente, foi realizado o cálculo da centralidade de intermediação e proximidade para todas as contas dentro das redes construídas a partir de cada fatia. Ao segmentar a rede desta forma, a complexidade computacional foi mitigada, permitindo o cálculo destas métricas.

Reconhecendo um potencial erro inerente introduzido por esta abordagem devido a aproximações de cálculos baseados em fatias, foram identificadas as 10 principais contas para todas as centralidades em cada período, buscando uma visão mais ampla dos principais agentes da rede.

5.1 Métricas Gerais da Rede

Valores calculados para as métricas gerais da rede podem ser vistas na Tabela 5.1. Observando os diferentes períodos, é notável a forma que o coeficiente de assortatividade se

mantém estável oscilando com um valor levemente abaixo de zero para todos os períodos observados. Esse valor sugere uma tendência geral da rede para um padrão de comportamento ligeiramente disassortativo, visto que o comportamento se manteve em um nível similar apesar de eventos globais significativos e alterações na infraestrutura do Ethereum e em flutuações do comportamento do Ether enquanto moeda.

Tabela 5.1: Métricas da rede Ethereum em função do período.

Período	Assortatividade	Aglomerção
Primeira ascensão	-0,1192	1,1E-5
Primeira queda	-0,1379	8,9E-6
COVID-19	-0,0050	6,4E-6
Segunda ascensão	-0,1419	7,6E-6
Segunda queda	-0,1370	1,3E-5
Invasão Rússia	-0,1128	7,7E-6
The Merge	-0,0637	6,2E-6

Ainda mais notavelmente consistente foi o grau de agrupamento, permanecendo efetivamente em zero para todos os períodos, o que destaca uma característica de falta de interconectividade ou de formação de grupos fortemente unidos entre contas nos períodos analisados diante de todo o volume transacional da rede.

De maneira geral, o baixo valor para coeficiente de agrupamento e o sutilmente negativo valor para assortatividade ao longo de períodos extremamente diferentes e importantes, sugerem uma natureza descentralizada, mas homogênea e robusta, das interações e transações da rede, moldando potencialmente a resiliência da rede a choques externos.

5.2 Centralidade de Contas

Por meio da análise de métricas de centralidade, foi possível identificar de maneira mais consistente contas específicas como focos centrais dentro de uma plataforma descentralizada de transações como o Ethereum. As principais contas observadas para cada período estão mostradas nas Tabelas 5.2 até 5.8.

Considerando como a maioria das contas são contratos inteligentes de larga escala, em sua maioria tratam-se de contas bem documentadas acerca de suas funções. Para o propósito das análises, a coluna “Rótulo” contém informações obtidas na plataforma Etherscan.io. Contas que não são contratos inteligentes, mas operadas manualmente de

Tabela 5.2: Principais contas da primeira ascensão.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0x829bd824b016326a401d083b33d09229333a830	F2Pool Old
	2	0x876eabf441b2ee5b5b0554fd502a8e0600950cfa	Bitifinex 3
	3	0x86fa049857e0209aa7d9e616f7eb3b3b78ecfdb0	EOS Old Token
	4	0xd26114cd6ee289accf82350c8d8487fedb8a0c07	OMGNetwork: OMG Token
	5	0x52bc44d5378309ee2abf1539bf71de1b7d7be3b5	Nanopool
	6	0x5a0b54d5dc17e0aacdc383d2db43b0a0d3e029c4c	Sparkpool
	7	0x000000000b3f879cb30fe243b4dfee438691c04	GasToken: GST2 Token
	8	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bitrex Exchange
	9	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	10	0x8d12a197cb00d4747a1fe03395095ce2a5cc6819	Etherdelta 2
Proximidade	1	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	2	0x876eabf441b2ee5b5b0554fd502a8e0600950cfa	Bitifinex 3
	3	0xd26114cd6ee289accf82350c8d8487fedb8a0c07	OMGNetwork: OMG Token
	4	0x86fa049857e0209aa7d9e616f7eb3b3b78ecfdb0	EOS Old Token
	5	0x52bc44d5378309ee2abf1539bf71de1b7d7be3b5	Nanopool
	6	0x4c34ae54dc716808e94af3d1d638b8ea3a23fa9b	—
	7	0x8d12a197cb00d4747a1fe03395095ce2a5cc6819	Etherdelta 2
	8	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	9	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bitrex Exchange
	10	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
Grau	1	0x06012c8cf97bead5deae237070f9587f8e7a266d	CryptoKitties: Core
	2	0x52bc44d5378309ee2abf1539bf71de1b7d7be3b5	Nanopool
	3	0x829bd824b016326a401d083b33d09229333a830	F2Pool Old
	4	0x86fa049857e0209aa7d9e616f7eb3b3b78ecfdb0	EOS Old Token
	5	0x876eabf441b2ee5b5b0554fd502a8e0600950cfa	Bitifinex 3
	6	0x5a0b54d5dc17e0aacdc383d2db43b0a0d3e029c4c	Sparkpool
	7	0x000000000b3f879cb30fe243b4dfee438691c04	GasToken: GST2 Token
	8	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bitrex Exchange
	9	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	10	0x8d12a197cb00d4747a1fe03395095ce2a5cc6819	Etherdelta 2

maneira externa são chamadas de “EOA” (*Externally Owned Accounts*). Em sua maioria, esse tipo de conta não possui rótulo disponível publicamente.

Observa-se que as mesmas contas proeminentes tendem a aparecer de forma consistente em todas as medidas de centralidade, enunciando ainda mais o comportamento central e importante de tais contas. Notavelmente, essas contas centrais pertencem predominantemente a casas de câmbio, *pools* de mineração e entidades associadas a negociação de tokens ERC-20, incluindo principalmente *stablecoins* amplamente utilizadas. A prevalência de tais contas como entidades centrais dentro da rede Ethereum indica suas influências duradouras e seus papéis fundamentais na facilitação de transações, liquidez e estabilidade dentro do ecossistema.

Nota-se também como contas de propriedade externa, isto é: contas que não fazem uso de um contrato inteligente e possuem um controlador externo à rede; raramente apareciam como as entidades mais centrais dentro da rede Ethereum, com exceções mais notáveis principalmente durante o período que coincidiu com o início da pandemia

Tabela 5.3: Principais contas da primeira queda.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	2	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bitrex Exchange
	3	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	4	0x8d12a197cb00d4747a1fe03395095ce2a5cc6819	Etherdelta 2
	5	0x86fa049857e0209aa7d9e616f7eb3b3b78ecfdb0	EOS Old Token
	6	0x829bd824b016326a401d083b33d092293333a830	F2Pool Old
	7	0x5a0b54d5dc17e0aacdc383d2db43b0a0d3e029c4c	Sparkpool
	8	0x52bc44d5378309ee2abf1539bf71de1b7d7be3b5	Nanopool
	9	0x876eabf441b2ee5b5b0554fd502a8e0600950cfa	Bitfinex 3
	10	0xd26114cd6ee289accf82350c8d8487fedb8a0c07	OMGNetwork: OMG Token
Proximidade	1	0x000000000b3f879cb30fe243b4dfee438691c04	GasToken: GST2 Token
	2	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	3	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bitrex Exchange
	4	0x8d12a197cb00d4747a1fe03395095ce2a5cc6819	Etherdelta 2
	5	0x86fa049857e0209aa7d9e616f7eb3b3b78ecfdb0	EOS Old Token
	6	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	7	0x52bc44d5378309ee2abf1539bf71de1b7d7be3b5	Nanopool
	8	0x876eabf441b2ee5b5b0554fd502a8e0600950cfa	Bitfinex 3
	9	0xd26114cd6ee289accf82350c8d8487fedb8a0c07	OMGNetwork: OMG Token
	10	0x2b5634c42055806a59e9107ed44d43c426e58258	KuCoin
Grau	1	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	2	0x8d12a197cb00d4747a1fe03395095ce2a5cc6819	Etherdelta 2
	3	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	4	0x52bc44d5378309ee2abf1539bf71de1b7d7be3b5	Nanopool
	5	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bitrex Exchange
	6	0x829bd824b016326a401d083b33d092293333a830	F2Pool Old
	7	0x5a0b54d5dc17e0aacdc383d2db43b0a0d3e029c4c	Sparkpool
	8	0x2b5634c42055806a59e9107ed44d43c426e58258	KuCoin
	9	0x86fa049857e0209aa7d9e616f7eb3b3b78ecfdb0	EOS Old Token
	10	0x2a0c0d6eccc7e4d658f48e01e3fa353f44050c208	IDEX

da COVID-19. Esta anomalia sugere uma mudança potencial no comportamento dos usuários durante tempos de perturbação global significativa e de impactos mais diretos na economia por meio de períodos de quarentena. Ademais, o período da COVID-19 apresentou um padrão menos dissociativo na assortatividade, marcado por um valor de $-0,005$, divergindo do mais consistente $-0,1$ observado em outros períodos. Essas anomalias sutis podem indicar uma alteração na dinâmica da rede durante esse período, mas análises mais detalhadas são necessárias.

Em meio às flutuações dentro da rede Ethereum, o Ethermine emergiu como uma conta central notavelmente consistente em todos os períodos. Mesmo durante o *The Merge*, em que o protocolo de prova de trabalho e, subsequentemente todos os serviços de mineração, foram substituídos por um protocolo diferente, a Ethermine manteve uma posição central, embora com uma relevância ligeiramente diminuída. Um serviço de investimento no novo protocolo veio a ser posteriormente ofertado pela Ethermine, mas é incerto se isso foi determinante para que a conta tivesse mantido um grande impacto no

Tabela 5.4: Principais contas durante o início da COVID-19.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	3	0xac08809df1048b82959d6251fbc9538920bed1fa	MSDToken
	4	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	5	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	USDC Token
	6	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bittrex Exchange
	7	0x5f214c7ccf677914affd9026df79968c68c12ed3	—
	8	0xac8b30bfca3ce01bba9312571c15f4c6c8fd3a82	—
	9	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase Exchange
	10	0x8fd00f170fd3772c5ebdcd90bf257316c69ba45	Sparkpool Distributor
Proximidade	1	0x00	NULL
	2	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	3	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	4	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	5	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	USDC Token
	6	0xfbb1b73c4f0bda4f67dca266ce6ef42f520fbb98	Bittrex Exchange
	7	0x000000000000541e251335090ac5b47176af4f7e	dex.blue
	8	0xac08809df1048b82959d6251fbc9538920bed1fa	MSDToken
	9	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase Exchange
	10	0xd551234ae421e3bcba99a0da6d736074f22192ff	Binance Exchange 2
Grau	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0xac08809df1048b82959d6251fbc9538920bed1fa	MSDToken
	3	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	4	0x9e9801bace260f58407c15e6e515c45918756e0f	WorldUnitedCoinsToken
	5	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	6	0x8a91c9a16cd62693649d80afa85a09dbbdc8508	MMM BSC
	7	0x7dbc5395d1cb5f829bc8eca20f16bed7bceca504	—
	8	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase Exchange
	9	0xd1ceeeee83f8bcf3bedad437202b6154e9f5405	Dice2Win
	10	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	USDC Token

nosso período de análise, visto que ele ainda contempla um momento prévio à mudança.

Uma observação intrigante durante períodos específicos – notadamente, ao período da COVID-19, o segundo aumento de popularidade do Ethereum e o período do *The Merge* - em que endereços nulos assumiram uma posição notável na centralidade de proximidade dentro da rede Ethereum. Estes endereços nulos são concebidos com o propósito de possibilitar um processo conhecido como “queima” da moeda Ether, muitas vezes com o objetivo de deflacionar esta. Nesse processo, as transações são enviadas para contas sem dono, conhecidas como contas com endereço nulo, tornando o acesso ao recurso monetário efetivamente impossível. A presença de tais endereços entre as principais contas em centralidade de proximidade demonstra uma relevância considerável durante estas fases cruciais. Em contraste com o padrão consistente observado entre outras contas centrais, os endereços nulos se destacaram por exercerem influência predominantemente no domínio da centralidade de proximidade. Uma possível explicação para isso está no comportamento desse tipo de conta, que não realiza transações para outros endereços,

Tabela 5.5: Principais contas da segunda ascensão.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x7a250d5630b4cf539739df2c5dacb4c659f2488d	Uniswap V2: Router 2
	3	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	4	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	5	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	6	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	7	0x1ad91ee08f21be3de0ba2ba6918e714da6b45836	Hiveon Pool
	8	0x8fd00f170fd3772c5ebdcd90bf257316c69ba45	Sparkpool Distributor
	9	0xa1d8d972560c2f8144af871db508f0b0b10a3fbf	Kucoin 3
	10	0x829bd824b016326a401d083b33d09229333a830	F2Pool Old
Proximidade	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	3	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	4	0x7a250d5630b4cf539739df2c5dacb4c659f2488d	Uniswap V2: Router 2
	5	0x000000000000006f6502b7f2bbac8c30a3f67e9a	MEV Bot
	6	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	7	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	8	0x00	NULL
	9	0x514910771af9ca656af840dff83e8264ecf986ca	Chainlink: LINK Token
	10	0xa1d8d972560c2f8144af871db508f0b0b10a3fbf	Kucoin 3
Grau	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x7a250d5630b4cf539739df2c5dacb4c659f2488d	Uniswap V2: Router 2
	3	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	4	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	5	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	6	0x3f5ce5fbfe3e9af3971dd833d26ba9b5c936f0be	Binance Exchange
	7	0x514910771af9ca656af840dff83e8264ecf986ca	Chainlink: LINK Token
	8	0xa1d8d972560c2f8144af871db508f0b0b10a3fbf	Kucoin 3
	9	0x85b931a32a0725be14285b66f1a22178c672d69b	Binance 10
	10	0x708396f17127c42383e3b9014072679b2f60b82f	Binance 11

tornando uma relevância de intermediação improvável e reduzindo o seu potencial para grau total.

Somado a isso, surpreendentemente, em contraste às fortes flutuações no valor monetário do Ethereum entre os períodos de ascensão e de queda subsequentes, nossas análises não revelaram diferenças substanciais na estrutura da rede ou nas entidades centrais. Isto sugere uma resiliência da rede Ethereum, indicando que a pequena disparidade temporal entre estes períodos pode ter se sobreposto ao impacto da reversão extrema de tendência da valorização monetária na formação da estrutura da rede e de suas principais entidades.

5.3 Distribuição de tipos de contas

Como forma de observar o comportamento das contas em função do período analisado de maneira mais ampla, foi realizada uma categorização de todas as contas com maior centralidade que puderam ser observadas nas Tabelas 5.2 até 5.8. Entre tais contas, todas

Tabela 5.6: Principais contas da segunda queda.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x7f268357a8c2552623316e2562d90e642bb538e5	OpenSea: Wyvern Exchange v2
	3	0x68b3465833fb72a70ecd4f85e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0x28c6c06298d514db089934071355e5743bf21d60	Binance 14
	5	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	6	0xb5d85cbf7cb3ee0d56b3bb207d5fc4b82f43f511	Coinbase 5
	7	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	8	0x3cd751e6b0078be393132286c442345e5dc49699	Coinbase 4
	9	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	10	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f2ead9083c756cc2	Wrapped Ether
Proximidade	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x7f268357a8c2552623316e2562d90e642bb538e5	OpenSea: Wyvern Exchange v2
	3	0x68b3465833fb72a70ecd4f85e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	5	0x28c6c06298d514db089934071355e5743bf21d60	Binance 14
	6	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f2ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	7	0xb5d85cbf7cb3ee0d56b3bb207d5fc4b82f43f511	Coinbase 5
	8	0x3cd751e6b0078be393132286c442345e5dc49699	Coinbase 4
	9	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	10	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
Grau	1	0x7f268357a8c2552623316e2562d90e642bb538e5	OpenSea: Wyvern Exchange v2
	2	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	3	0x68b3465833fb72a70ecd4f85e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	5	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	6	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	7	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f2ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	8	0x3cd751e6b0078be393132286c442345e5dc49699	Coinbase 4
	9	0x283af0b28c62c092c9727f1ee09c02ca627eb7f5	ENS: Old ETH Registrar Controller
	10	0xb5d85cbf7cb3ee0d56b3bb207d5fc4b82f43f511	Coinbase 5

puderam ser divididas conforme seus propósitos documentados por seus rótulos e por seus códigos-fonte da seguinte maneira:

- **Casas de Câmbio:** Uma plataforma com a qual um usuário consegue comprar e vender Ether, a moeda utilizada para realização de transações;
- **Pool de Mineração:** Por meio de *pools* de mineração, indivíduos distintos combinam recursos computacionais para realizar o trabalho de criar novos blocos para a *blockchain*. Os ganhos de cada bloco são distribuídos pela *pool* de acordo com a quantidade de poder computacional usado por cada um;
- **EOA:** Sigla para *Externally Owned Account*. Refere-se a contas que não são operadas de maneira automática por um contrato inteligente, mas por um agente externo à *blockchain*. Geralmente, uma pessoa ou um grupo de pessoas;
- **Negociação de Token:** Contas relacionadas à compra e venda de *tokens*. *Tokens* são ativos digitais paralelos à moeda principal da rede, e são operados por contratos inteligentes;

Tabela 5.7: Principais contas durante a invasão da Rússia sob a Ucrânia.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x7f268357a8c2552623316e2562d90e642bb538e5	OpenSea: Wyvern Exchange v2
	3	0x68b3465833fb72a70ecdf485e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	5	0xb5d85cbf7cb3ee0d56b3bb207d5fc4b82f43f511	Coinbase 5
	6	0x3cd751e6b0078be393132286c442345e5dc49699	Coinbase 4
	7	0x7be8076f4ea4a4ad08075c2508e481d6c946d12b	OpenSea: Wyvern Exchange v1
	8	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	9	0x28c6c06298d514db089934071355e5743bf21d60	Binance 14
	10	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
Proximidade	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x00	NULL
	3	0x68b3465833fb72a70ecdf485e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xb5d85cbf7cb3ee0d56b3bb207d5fc4b82f43f511	Coinbase 5
	5	0x3cd751e6b0078be393132286c442345e5dc49699	Coinbase 4
	6	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	7	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f27ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	8	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	9	0x7f268357a8c2552623316e2562d90e642bb538e5	OpenSea: Wyvern Exchange v2
	10	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
Grau	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x7f268357a8c2552623316e2562d90e642bb538e5	OpenSea: Wyvern Exchange v2
	3	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	4	0x68b3465833fb72a70ecdf485e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	5	0x7be8076f4ea4a4ad08075c2508e481d6c946d12b	OpenSea: Wyvern Exchange v1
	6	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	7	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	8	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f27ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	9	0xb5d85cbf7cb3ee0d56b3bb207d5fc4b82f43f511	Coinbase 5
	10	0x3cd751e6b0078be393132286c442345e5dc49699	Coinbase 4

- **Outro:** Refere-se a contratos inteligentes que possuem propósitos específicos e não envolvem apenas negociação de *tokens*;
- **Endereço Nulo:** Contas que não possuem dono, cujo único propósito é o descartar/queima de Ether por meio de um endereço inativo e inacessível.

A Figura 5.1 mostra a distribuição da quantidade de cada categoria de conta em função do período de análise observado, ressaltando que o eixo horizontal do gráfico está ordenado de um período mais antigo (Primeira ascensão) até o período mais recente (*The Merge*).

Consistentemente em todos os períodos analisados, as casas de câmbio são as entidades mais centrais dentro do Ethereum. O seu domínio duradouro nas métricas de centralidade corrobora com o seu papel fundamental como facilitadores de transações e pontos de acesso primários para participantes no mercado.

Uma tendência é notada com os contratos relacionados a negociação de *tokens* ganhando mais destaque nas classificações de centralidade. Nossa análise sugere um au-

Tabela 5.8: Principais contas durante o *The Merge*.

Tipo de Centralidade	Ranking	Endereço	Rótulo
Intermediação	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x000000000006c3852cbef3e08e8df289169ede581	Seaport 1.1
	3	0x68b3465833fb72a70ecdf485e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	5	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	6	0x28c6c06298d514db089934071355e5743bf21d60	Binance 14
	7	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f2ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	8	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	9	0xe42cad6fc883877a76a26a16ed92444ab177e306	Consensys: MERGE Token
	10	0xc098b2a3aa256d2140208c3de6543aaef5cd3a94	FTX Exchange 2
Proximidade	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x000000000006c3852cbef3e08e8df289169ede581	Seaport 1.1
	3	0x68b3465833fb72a70ecdf485e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	5	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f2ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	6	0x28c6c06298d514db089934071355e5743bf21d60	Binance 14
	7	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	8	0x00	NULL
	9	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	10	0x00dead	NULL
Grau	1	0xdac17f958d2ee523a2206206994597c13d831ec7	Tether: USDT Stablecoin
	2	0x000000000006c3852cbef3e08e8df289169ede581	Seaport 1.1
	3	0x68b3465833fb72a70ecdf485e0e4c7bd8665fc45	Uniswap V3: Router 2
	4	0xa090e606e30bd747d4e6245a1517ebe430f0057e	Coinbase: Miscellaneous
	5	0xa0b86991c6218b36c1d19d4a2e9eb0ce3606eb48	Circle: USDC Token
	6	0xea674fdde714fd979de3edf0f56aa9716b898ec8	Ethermine
	7	0xc02aaa39b223fe8d0a0e5c4f2ead9083c756cc2	Wrapped Ether
	8	0x7a250d5630b4cf539739df2c5dacb4c659f2488d	Uniswap V2: Router 2
	9	0x283af0b28c62c092c9727f1ee09c02ca627eb7f5	Binance 14
	10	0xe42cad6fc883877a76a26a16ed92444ab177e306	Consensys: MERGE Token

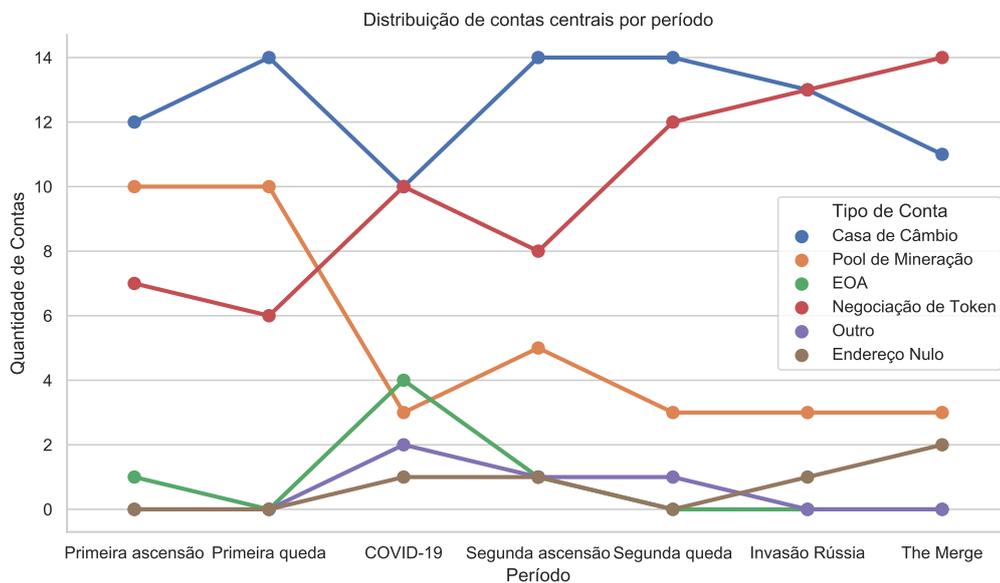


Figura 5.1: Distribuição de tipos de contas

mento gradual em sua importância, potencialmente atribuído à recente popularidade de tokens não fungíveis (NFTs) exibidos em plataformas como OpenSea: Wyvern Exchange,

juntamente com a crescente adoção de Stablecoins (ativo cujo valor está atrelado a outra classe de ativos, como moeda fiduciária ou ouro, com o fim de manter um valor estável) como Tether: USDT Stablecoin, Circle: USDC Token e outras alternativas.

Por outro lado, os *pools* de mineração exibiram um nível decrescente de centralidade ao longo de períodos sucessivos. Curiosamente, este declínio começou mesmo antes da implementação do The Merge, que fez a transição do Ethereum de prova de trabalho para prova de participação, interrompendo efetivamente as atividades de mineração tradicionais. Possíveis hipóteses de motivos para essa queda podem ser uma redução de variedade de grupos de mineração devido à uma dominância do Ethermine ou uma tendência espontânea de descentralização na atividade da mineração, desfavorecendo grandes grupos. Mais estudos são necessários para tirar conclusões mais assertivas.

As demais categorias de endereços na rede não mostraram grande momento de relevância em contraste às outras contas supracitadas, mantendo-se consistentemente como casos isolados de endereços centrais em períodos específicos.

6 Conclusão

Esse trabalho buscou compreender, por fim, a maneira que o Ethereum se adapta em nível de comportamento de usuários diante de eventos singulares e impactantes mundialmente. Para tal, o uso de métricas baseadas na teoria das redes complexas se mostrou capaz de revelar nuances e possíveis direcionamentos acerca da evolução do Ethereum quando impactado por um evento de larga escala futuramente.

Conclui-se, portanto, que através de uma extensa investigação empírica abrangendo diversos períodos de tempo dentro da rede Ethereum, foi possível realizar a observação de padrões recorrentes e notáveis.

Ao longo destes períodos, o coeficiente de assortatividade exibiu consistentemente um valor ligeiramente negativo, enquanto o coeficiente de agrupamento oscilou perto de zero, sutilmente positivo, indicando uma leve disassortatividade estável com uma tendência de formação de fortes e grandes grupos efetivamente nula.

Notavelmente, as entidades mais centrais da rede compreendiam predominantemente contratos de *tokens* ou contas de casas de câmbio bem conhecidas e estabelecidas. Valores discrepantes intrigantes, como contas anônimas de propriedade externa e contas nulas projetadas para queima de Ether, participaram como coadjuvantes dentro da dinâmica principal da rede.

Uma tendência notável surgiu à medida que contas proeminentes de *pools* de mineração testemunharam uma relevante decrescente, contrastando com o aumento da popularidade de negociação de *tokens*, fungíveis ou não.

Apesar dos períodos apresentarem diferenças intrigantes, como um distinto padrão para contas centrais observado durante o período relativo à COVID-19, a rede apresentou uma evolução gradual ao longo do tempo na sua estrutura, que parece mostrar um impacto maior do que alterações bruscas externas às suas dinâmicas. Isto sugere resiliência e adaptabilidade.

Conforme observado na literatura, o uso de técnicas de redes complexas é prática usual para análise de criptomoedas. Contudo, até onde se pôde observar, nenhum trabalho

fazia comparações de diferentes períodos e de eventos externos da forma que este trabalho propõe. Por meio disso, entendemos que essa é uma contribuição relevante para a discussão dentro da comunidade de criptomoedas.

As principais limitações desse estudo envolvem o alto volume de dados utilizado para a computação de certos algoritmos que são caros demais para uma análise viável e completa. Buscamos mitigar esse problema subdividindo ainda mais os períodos, reduzindo a quantidade de transações e de contas em cada período. É incerto se isso causou desvios relevantes em contraste a uma análise completa da rede em cada período.

Ideias alternativas em relação a isso envolvem testar outras heurísticas que ainda permitam o cálculo de principais valores de centralidade dentro de um período, ou fazer o uso de outras métricas, que não causem complicações referentes ao custo computacional.

Mais possíveis pontos de evolução para análises dentro de tal linha de pesquisa envolvem combinar técnicas de modelagem de redes complexas com técnicas de aprendizado de máquina, possibilitando fazer o uso de características extraídas das redes como entrada para algoritmos com extensa aplicação documentada na literatura com o fim de detectar padrões e características sutis na rede em qualquer dado momento.

Bibliografia

- ALBERT, R.; BARABÁSI, A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, APS, v. 74, n. 1, p. 47, 2002.
- ASPEMBITOVA, A. T.; FENG, L.; CHEW, L. Y. Behavioral structure of users in cryptocurrency market. *Plos one*, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 16, n. 1, p. e0242600, 2021.
- BAVELAS, A. Communication patterns in task-oriented groups. *The journal of the acoustical society of America*, Acoustical Society of America, v. 22, n. 6, p. 725–730, 1950.
- BENZI, M.; KLYMKO, C. A matrix analysis of different centrality measures. *arXiv preprint arXiv:1312.6722*, Citeseer, 2014.
- BLONDEL, V. D.; GUILLAUME, J.-L.; LAMBIOTTE, R.; LEFEBVRE, E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of statistical mechanics: theory and experiment*, IOP Publishing, v. 2008, n. 10, p. P10008, 2008.
- BOSER, B. E.; GUYON, I. M.; VAPNIK, V. N. A training algorithm for optimal margin classifiers. In: *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 144–152.
- BUTERIN, V.; CONNER, E.; DUDLEY, R.; SLIPPER, M.; NORDEN, I.; BAKHTA, A. Eip-1559: Fee market change for eth 1.0 chain. *Ethereum Improvement Proposals*, no. v. 1559, April 2019. Disponível em: <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-1559>. Acesso em: 06/12/2023.
- BUTERIN, V. et al. A next-generation smart contract and decentralized application platform. *white paper*, v. 3, n. 37, p. 2–1, 2014.
- CHEN, T.; LI, Z.; ZHU, Y.; CHEN, J.; LUO, X.; LUI, J. C.-S.; LIN, X.; ZHANG, X. Understanding ethereum via graph analysis. *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*, ACM New York, NY, USA, v. 20, n. 2, p. 1–32, 2020.
- CRAMER, J. S. The origins of logistic regression. Tinbergen Institute Working Paper, 2002.
- FERRETTI, S.; D'ANGELO, G. On the ethereum blockchain structure: A complex networks theory perspective. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Wiley Online Library, v. 32, n. 12, p. e5493, 2020.
- FREEMAN, L. C. et al. Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social network: critical concepts in sociology*. Londres: Routledge, v. 1, p. 238–263, 2002.
- HABER, S.; STORNETTA, W. S. How to time-stamp a digital document. In: SPRINGER. *Conference on the Theory and Application of Cryptography*. [S.l.], 1990. p. 437–455.
- HO, T. K. Random decision forests. In: IEEE. *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition*. [S.l.], 1995. v. 1, p. 278–282.

- JAKOBSSON, M.; JUELS, A. Proofs of work and bread pudding protocols. In: *Secure information networks*. [S.l.]: Springer, 1999. p. 258–272.
- KAPENGUT, E.; MIZRACH, B. *An Event Study of the Ethereum Transition to Proof-of-Stake*. [S.l.], 2022.
- LANDIS, B. Personality and social networks in organizations: A review and future directions. *Journal of Organizational Behavior*, Wiley Online Library, v. 37, p. S107–S121, 2016.
- LIANG, J.; LI, L.; ZENG, D. Evolutionary dynamics of cryptocurrency transaction networks: An empirical study. *PloS one*, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 13, n. 8, p. e0202202, 2018.
- LIU, Y.-C.; KUO, R.-L.; SHIH, S.-R. Covid-19: The first documented coronavirus pandemic in history. *Biomedical Journal*, v. 43, n. 4, p. 328–333, 2020. ISSN 2319-4170.
- LUCE, R. D.; PERRY, A. D. A method of matrix analysis of group structure. *Psychometrika*, Springer, v. 14, n. 2, p. 95–116, 1949.
- MACQUEEN, J. Classification and analysis of multivariate observations. In: *5th Berkeley Symp. Math. Statist. Probability*. [S.l.: s.n.], 1967. p. 281–297.
- MASCARENHAS, J. Z. G.; ZIVIANI, A.; WEHMUTH, K.; VIEIRA, A. B. On the transaction dynamics of the ethereum-based cryptocurrency. *Journal of Complex Networks*, Oxford University Press, v. 8, n. 4, p. cnaa042, 2020.
- MAZZA, M.; MARANO, G.; LAI, C.; JANIRI, L.; SANI, G. Danger in danger: Interpersonal violence during covid-19 quarantine. *Psychiatry research*, Elsevier, v. 289, p. 113046, 2020.
- NAKAMOTO, S. A peer-to-peer electronic cash system. *Bitcoin.–URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>*, v. 4, p. 2, 2008.
- NEWMAN, M. E. Assortative mixing in networks. *Physical review letters*, APS, v. 89, n. 20, p. 208701, 2002.
- OLIVEIRA, P. H. F.; REZENDE, D. M.; BERNARDINO, H. S.; VILLELA, S. M.; VIEIRA, A. B.; GONÇALVES, G. D. Análise do comportamento de contas no ethereum durante um evento de impacto na economia. In: SBC. *Anais do V Workshop em Blockchain: Teoria, Tecnologias e Aplicações*. [S.l.], 2022. p. 54–67.
- SIIM, J. Proof-of-stake. In: *Research seminar in cryptography*. [S.l.: s.n.], 2017.
- THEIRI, S.; NEKHILI, R.; SULTAN, J. Cryptocurrency liquidity during the russia-ukraine war: the case of bitcoin and ethereum. *The Journal of Risk Finance*, Emerald Publishing Limited, n. ahead-of-print, 2022.
- WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *nature*, Nature Publishing Group, v. 393, n. 6684, p. 440–442, 1998.
- ZHAO, L.; GUPTA, S. S.; KHAN, A.; LUO, R. Temporal analysis of the entire ethereum blockchain network. In: *Proceedings of the Web Conference 2021*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 2258–2269.