

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Robertta Loise Ferreira Costa

**Análise Comparativa de Flash Loans nas
Redes Ethereum e Polygon: Padrões de Uso e
Implicações para o Ecossistema DeFi**

Uberlândia, Brasil

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Robertta Loise Ferreira Costa

**Análise Comparativa de Flash Loans nas Redes
Ethereum e Polygon: Padrões de Uso e Implicações
para o Ecossistema DeFi**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Computação da Universidade Fe-
deral de Uberlândia, como parte dos requisitos
exigidos para a obtenção título de Bacharel em
Sistemas de Informação.

Orientador: Ivan da Silva Sendin

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Computação

Bacharelado em Sistemas de Informação

Uberlândia, Brasil

2024

Robertta Loise Ferreira Costa

Análise Comparativa de Flash Loans nas Redes Ethereum e Polygon: Padrões de Uso e Implicações para o Ecossistema DeFi

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Computação da Universidade Fe-
deral de Uberlândia, como parte dos requisitos
exigidos para a obtenção título de Bacharel em
Sistemas de Informação.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 12 de dezembro de 2024:

Ivan da Silva Sendin
Orientador

Diego Nunes Molinos

Rodrigo Sanches Miani

Uberlândia, Brasil
2024

Resumo

Este trabalho investiga o uso de *flash loans* no ecossistema de *Decentralized Finance* (DeFi), focando na plataforma *Aave* e comparando sua implementação nas redes *Ethereum* e *Polygon*. O estudo visa compreender os padrões de transação e a eficiência operacional dessas inovadoras operações financeiras em diferentes *blockchains*. A metodologia envolveu a extração e análise de dados transacionais das redes *Ethereum* e *Polygon*, utilizando *Etherscan* e *Polygonscan*. *Scripts* personalizados foram desenvolvidos para identificar e analisar operações de *flash loans*. Os resultados revelaram diferenças significativas entre as redes no volume de transações e na eficiência operacional. Observou-se uma adoção crescente de *flash loans* na *Polygon*, devido aos seus menores custos e maior escalabilidade, enquanto a *Ethereum* manteve sua relevância pela robustez e liquidez. A pesquisa demonstra que ambas as redes são cruciais para operações de *flash loans*, cada uma com características específicas que influenciam a escolha dos usuários. Este estudo contribui para o entendimento da dinâmica dos *flash loans* em diferentes *blockchains*, fornecendo *insights* sobre a evolução das finanças descentralizadas e o papel das infraestruturas de rede na inovação financeira DeFi.

Palavras-chave: *Flash Loans, Blockchain, DeFi, Ethereum, Polygon*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de arbitragem em DeFi	19
Figura 2 – Diagrama de liquidação em DeFi	20
Figura 3 – Diagrama de troca de garantia em DeFi	20
Figura 4 – Distribuição das Funções mais Utilizadas nas Redes <i>Ethereum</i> e <i>Polygon</i>	31
Figura 5 – Percentual do volume de <i>flash loans</i> nas redes <i>Ethereum</i> e <i>Polygon</i>	32
Figura 6 – Quantidade Absoluta de Transações de Flash Loans nas Redes <i>Ethereum</i> e <i>Polygon</i>	34
Figura 7 – Mapa de Calor Flash Loans nas Redes <i>Ethereum</i> e <i>Polygon</i>	35
Figura 8 – Tipos de Interação nas 5 Transações Subsequentes - <i>Polygon</i> e Etherscan	39
Figura 9 – Taxas de Flash Loans (Total e Média por Transação) nas Redes <i>Ethereum</i> e <i>Polygon</i>	41

Listagens

2.1	Exemplo de Função com Reversão em Solidity	14
2.2	Contrato Solidity para Flash Loan na Aave	17
3.1	Controle de Taxa de Requisições	24
3.2	Função para Obter o Número de Bloco a partir de uma Data	24
3.3	Subgrafo para Monitorar Eventos de flash loan na Aave	25
4.1	Função para Analisar o Volume de Flash Loans	30
4.2	Função para Plotar o Volume de Flash Loans	30
4.3	Função para Analisar o Volume de Todas as Transações e de Flash Loans	31
4.4	Função para Plotar o Volume de Flash Loans para Todas as Redes	32
4.5	Carregar Transações de Flash Loans	33
4.6	Função para Extrair Dia da Semana e Hora dos Flash Loans	35
4.7	Seleção de Carteiras e Análise de Interações	37
4.8	Função para Plotar Interações das Carteiras	38
4.9	Cálculo de Taxas Pagas e Métricas por Rede	40

Lista de abreviaturas e siglas

DeFi	Finanças Descentralizadas
dApps	Aplicações Descentralizadas
DEXs	<i>Exchanges</i> Descentralizadas
EVM	Ethereum Virtual Machine
PoW	Proof of Work
ICOs	Initial Coin Offerings

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.2	Justificativas	10
1.3	Organização do Trabalho	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Blockchain	12
2.2	Contratos Inteligentes	13
2.3	Ethereum	14
2.4	Polygon	15
2.5	Finanças Descentralizadas	16
2.6	Flash Loans	17
2.6.1	Desafios e Limitações	21
3	DESENVOLVIMENTO	22
3.1	Plataformas DeFi	23
3.1.1	Aave	23
3.1.2	dYdX	23
3.1.3	Uniswap	23
3.1.4	Análise Comparativa	23
3.2	Coleta de dados com Block Explorers	24
3.3	The Graph	25
4	ANÁLISES E RESULTADOS	28
4.1	Análise de Flash Loans	28
4.1.1	Análises de Volume	29
4.1.1.1	Análise de Volume por Função	30
4.1.1.2	Análise do Percentual de Flash Loans em Relação ao Total de Transações	31
4.1.1.3	Conclusão das Análises de Volume	32
4.1.2	Análise de Frequência	33
4.1.2.1	Evolução Temporal	33
4.1.2.2	Distribuição Temporal	34
4.1.2.3	Conclusão das Análises de Frequencia	36
4.1.3	Análise da Sequência de Transações	37
4.1.3.1	Conclusão das Análise de Sequencia	40
4.1.4	Análise de Taxas	40

4.1.4.1	Conclusão das Análise de Taxas	42
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 Introdução

O ecossistema de *Decentralized Finance* (DeFi) tem experimentado um crescimento notável nos últimos anos, consolidando-se como um dos pilares do mercado financeiro digital. O DeFi representa um conjunto de aplicativos e protocolos financeiros construídos em *blockchain*, que funcionam sem intermediários tradicionais, como bancos, permitindo transações e operações de forma transparente, segura e acessível a qualquer usuário com acesso à Internet (AMLER et al., 2021). Um dos principais indicadores desse crescimento é o *Total Value Locked* (TVL), que representa o valor total de ativos depositados em protocolos DeFi. Esse valor reflete a confiança e o volume de capital comprometido no ecossistema, funcionando como um termômetro da sua popularidade e adoção (WERNER et al., 2021). Em janeiro de 2021, o TVL estava na ordem de 28 bilhões de dólares (WANG et al., 2021), enquanto em novembro de 2024, esse montante já ultrapassava 102 bilhões de dólares (DeFi Llama, 2024), indicando uma expansão significativa e crescente interesse por parte de investidores e desenvolvedores.

Entre os diversos instrumentos financeiros proporcionados pelo ecossistema DeFi, os *flash loans* destacam-se como uma inovação particularmente disruptiva. Um *flash loan* é um tipo de empréstimo que não exige garantia, pois deve ser tomado e devolvido na mesma transação. Essa funcionalidade é possibilitada pelos contratos inteligentes, que garantem a execução automática e segura das condições estabelecidas. Caso o montante não seja integralmente reembolsado ao final da execução, a transação é revertida, garantindo a segurança do protocolo. Essa característica torna os *flash loans* uma ferramenta poderosa para arbitragem, refinanciamento e exploração de oportunidades de mercado de forma eficiente, criando oportunidades inéditas para *traders* e desenvolvedores (WANG et al., 2021).

Neste trabalho, realizou-se análises detalhadas utilizando dados extraídos de transações nas redes *Ethereum* e *Polygon*, possibilitando uma investigação abrangente do uso de *flash loans*. A escolha dessas duas redes distintas permitiu uma comparação valiosa entre uma rede principal, a rede *Ethereum*, e uma solução de segunda camada, a solução *Polygon*, oferecendo informações valiosas sobre como diferentes infraestruturas impactam o uso de *flash loans*. Foram analisadas mais de 300.000 transações desde o surgimento dessa funcionalidade na *Aave*¹, um dos principais protocolos DeFi. Com base nesses dados, buscamos identificar métricas como volumes, frequências, entre outras, que evidenciam a popularização crescente dos *flash loans*, além de explorar padrões de uso.

¹ Disponível em: <https://aave.com/>

1.1 Objetivos

Analisar transações do tipo *flash loans* em diferentes redes *blockchain*, explorando padrões de volume, frequência e uso para oferecer *insights* sobre o desenvolvimento e a popularização desse mecanismo financeiro inovador. Para alcançar o objetivo geral do trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o volume e a distribuição de transações de *flash loans* nas redes *Ethereum* e *Polygon*;
- Examinar a frequência temporal das operações de *flash loans*;
- Investigar as sequências de transações relacionadas a *flash loans*;
- Comparar os custos operacionais entre as redes *Ethereum* e *Polygon*;
- Avaliar a viabilidade de diferentes ferramentas de análise de dados blockchain.

1.2 Justificativas

Este estudo é particularmente relevante dado o rápido crescimento do ecossistema DeFi e a necessidade de entender como diferentes infraestruturas de rede impactam a utilização de instrumentos financeiros avançados. A comparação entre *Ethereum* e *Polygon* permite avaliar como fatores como custos de transação, velocidade de processamento e escalabilidade influenciam a adoção e o uso de *flash loans*.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos principais. O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o tema, definindo os objetivos e justificando a relevância da pesquisa no contexto das finanças descentralizadas.

O Capítulo 2 estabelece o referencial teórico, abordando os conceitos fundamentais de *blockchain*, contratos inteligentes e o ecossistema DeFi. São apresentadas as características das redes *Ethereum* e *Polygon*, além de uma discussão aprofundada sobre *flash loans* e suas aplicações.

O Capítulo 3 detalha a metodologia empregada, descrevendo as ferramentas utilizadas para coleta e análise de dados, incluindo *block explorers* e tentativas de implementação com *The Graph*. São apresentados os critérios de seleção das plataformas e as estratégias de análise adotadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das análises realizadas, divididos em quatro categorias principais:

- Análise de volume de transações nas redes *Ethereum* e *Polygon*;
- Análise de frequência e padrões temporais;
- Análise de sequência de transações;
- Análise comparativa de taxas entre as redes.

Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, discutindo as implicações dos resultados encontrados, limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros no campo de *flash loans* e DeFi.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta revisão bibliográfica, é apresentado os fundamentos tecnológicos e conceituais necessários para compreender o funcionamento e a importância dos *flash loans* no ecossistema de finanças descentralizadas. Iniciamos com uma análise da tecnologia *blockchain*, base fundamental que possibilita a execução de transações atômicas essenciais para os *flash loans*.

Em seguida, exploramos os contratos inteligentes, elementos cruciais que viabilizam a automação e a execução segura dos *flash loans*. A discussão abrange desde sua implementação técnica até seu papel na criação de aplicações financeiras descentralizadas.

Apresentamos também o ecossistema DeFi, focando nos componentes que interagem diretamente com *flash loans*, como as *decentralized exchanges* (DEXs) e os protocolos de empréstimos. Esta seção estabelece o contexto necessário para entender como os *flash loans* se integram ao ambiente mais amplo das finanças descentralizadas.

Analizamos as características específicas das redes *Ethereum* e *Polygon*, destacando como suas particularidades afetam a execução e a eficiência dos *flash loans*. Por fim, exploramos em detalhes o conceito de *flash loans*, suas aplicações práticas e os desafios associados à sua implementação.

Esta revisão fornece o embasamento teórico necessário para compreender as análises e resultados apresentados nos capítulos subsequentes, onde investigamos o comportamento dos *flash loans* nas redes *Ethereum* e *Polygon*.

2.1 Blockchain

A *blockchain* é uma tecnologia de armazenamento de dados descentralizada que garante segurança, integridade e transparência das informações. Introduzida por Satoshi Nakamoto em 2008, um pseudônimo utilizado pelo criador do *Bitcoin*, a primeira criptomoeda descentralizada, seu uso se expandiu para além das criptomoedas devido às suas características exclusivas (NAKAMOTO, 2008).

Na *blockchain*, os dados são organizados em blocos, cada um contendo um conjunto de transações. Esses blocos são vinculados de forma sequencial e cronológica, utilizando *hashes* criptográficos. Qualquer alteração em um bloco invalida todos os subsequentes, pois cada bloco contém o hash do bloco anterior. Essa interconexão cria uma cadeia de blocos imutável e transparente, onde as informações são registradas permanentemente (TABATABAEI; VITENBERG; VEERARAGAVAN, 2022).

Uma característica central da *blockchain* é a descentralização. Em vez de depender de

uma entidade central para gerenciar ou validar informações, a responsabilidade de verificar as transações é distribuída entre os participantes da rede, cada nó possui uma cópia completa da cadeia de blocos e verifica a validade das novas transações, tornando o sistema resistente a fraudes e manipulações, pois não há um único ponto de falha (YAGA et al., 2018).

Além disso, a *blockchain* é imutável. Uma vez que um bloco é adicionado à cadeia, ele não pode ser alterado sem o consenso da maioria dos participantes. Qualquer tentativa de modificação requeria o ajuste de todos os blocos subsequentes, o que é inviável devido à criptografia envolvida. Esta característica é relevante em aplicações financeiras (TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2016).

A transparência é outra vantagem importante da *blockchain*. Todos os registros são acessíveis aos participantes da rede, permitindo auditorias independentes e promovendo maior responsabilidade entre os usuários (SULTAN; RUHI; LAKHANI, 2018). Ao contrário dos sistemas tradicionais, onde apenas autoridades centrais têm acesso, a *blockchain* democratiza o acesso às informações.

Além de registrar transações, a *blockchain* também suporta a execução de contratos inteligentes, que são programas autoexecutáveis que permitem automatizar acordos e operações financeiras, como os *flash loans*, de maneira segura e descentralizada. Redes como *Ethereum* e *Polygon* oferecem suporte robusto a contratos inteligentes, sendo amplamente utilizados no contexto de *DeFi*, que será explorado em mais detalhes ao longo deste trabalho.

Recentemente, a *blockchain* tem encontrado aplicações inovadoras além das finanças, como em cadeias de suprimentos para rastreamento de produtos, sistemas de votações eletrônicas para garantir a integridade de eleições, e na área de saúde para gerenciamento seguro de registros médicos (AN et al., 2023). Essas aplicações demonstram o potencial transformador da tecnologia em diversos setores da sociedade.

2.2 Contratos Inteligentes

O conceito de contratos inteligentes foi proposto inicialmente por Nick Szabo em 1994, muito antes da criação da *blockchain* (SZABO, 1997). No entanto, sua implementação prática só se tornou viável com o advento da tecnologia *blockchain*. Contratos inteligentes são programas autoexecutáveis que residem na *blockchain* e operam de maneira autônoma quando determinadas condições são atendidas. Introduzidos como um conceito essencial para plataformas como a *Ethereum*, eles representam uma das principais inovações que possibilitaram o desenvolvimento de *DeFi* (WOOD, 2014).

Um contrato inteligente assemelha-se a um contrato tradicional, mas, em vez de ser um documento legal escrito, é um código programado que define regras e consequências de maneira clara e precisa. Quando as condições definidas no contrato são atingidas, ele é executado

automaticamente, eliminando a necessidade de intermediários para validar ou processar a operação (WERNER et al., 2021). Isso permite a automação de processos financeiros e a redução de custos operacionais. Por exemplo, um contrato inteligente poderia automatizar um acordo de aluguel, liberando o pagamento ao proprietário apenas quando o inquilino confirma a entrada no imóvel, tudo sem intermediários.

No contexto da *blockchain Ethereum*, os contratos inteligentes são executados pela *Ethereum Virtual Machine (EVM)*, que garante a segurança e integridade da execução dos contratos em uma rede descentralizada (WOOD, 2014). A EVM é um ambiente de execução isolado que processa transações e contratos inteligentes na rede *Ethereum*, assegurando que o código seja executado de forma consistente. Cada operação realizada na EVM durante a execução de um contrato inteligente requer o pagamento de uma taxa, que cobre o custo computacional necessário para processar a transação na rede.

2.3 Ethereum

O *Ethereum* é uma plataforma de *blockchain* descentralizada, lançada em 2015 por Vitalik Buterin (BUTERIN, 2014), que revolucionou o espaço das criptomoedas ao introduzir uma plataforma flexível para execução de código. Diferentemente do Bitcoin, que se concentra principalmente em transferências financeiras, o *Ethereum* implementou a *Ethereum Virtual Machine (EVM)*, um ambiente de execução que permite o processamento de contratos inteligentes de forma descentralizada e segura (BUTERIN, 2014).

Esta infraestrutura possibilitou o desenvolvimento de aplicações descentralizadas (dApps) e estabeleceu as bases para o surgimento do ecossistema DeFi (SCHÄR, 2021). A capacidade de executar código complexo de maneira determinística e segura tornou o *Ethereum* a principal plataforma para inovações financeiras descentralizadas.

O *Ethereum* utiliza o Solidity como sua principal linguagem de programação para desenvolvimento de contratos inteligentes (DANNEN, 2017). O Solidity é uma linguagem de alto nível, estaticamente tipada, que permite a implementação de lógicas complexas através de contratos inteligentes. Um conceito fundamental do Solidity é a capacidade de reverter transações quando condições específicas não são atendidas, como demonstrado na Listagem 2.1:

```
1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity ^0.8.0;
3 contract ExemploReversao {
4     function verificaValor(uint256 valor) public pure returns (bool)
5     {
6         if (valor < 100) {
7             revert("Valor muito baixo");
8         }
9     }
10 }
```

```
8     return true;  
9 }  
10 }
```

Listagem 2.1 – Exemplo de Função com Reversão em Solidity

Esta característica de reversão é fundamental para o *Ethereum*, particularmente relevante para os *flash loans*, pois permite que múltiplas operações sejam realizadas em uma única transação atômica, garantindo que todas sejam bem-sucedidas ou todas falhem (QIN; ZHOU; LIVSHITS, 2020).

O *Ethereum* também possibilita a criação de tokens personalizados, facilitando o surgimento das *Initial Coin Offerings* (ICOs) e, posteriormente, o desenvolvimento do ecossistema DeFi (ADHAMI; GIUDICI, 2019). Essas ofertas iniciais de moedas permitem que novos projetos de *blockchain* levantem capital para o desenvolvimento de suas plataformas, e permitem a criação de protocolos como *Aave* e *dYdX*, que são fundamentais para a implementação de *flash loans*.

Apesar de sua posição dominante no espaço DeFi, o *Ethereum* enfrenta desafios significativos, principalmente relacionados à escalabilidade e altos custos de transação, chamados de *gas fees*. Esses problemas têm implicações diretas para a viabilidade e eficiência dos *flash loans*, especialmente em períodos de alto congestionamento da rede (SCHÄR, 2021).

Para abordar esses desafios, o *Ethereum* está em processo de transição para o *Ethereum 2.0*, que visa melhorar a escalabilidade e eficiência energética. Essas melhorias são cruciais para o futuro dos *flash loans* e do ecossistema DeFi como um todo, potencialmente reduzindo custos e aumentando a velocidade das transações (YOUSUF et al., 2024).

A posição do *Ethereum* como infraestrutura principal para DeFi e *flash loans* é reforçada por sua ampla adoção, robusta comunidade de desenvolvedores e capacidade comprovada de suportar aplicações financeiras complexas. No entanto, o surgimento de *blockchains* concorrentes e soluções de segunda camada, como *Polygon*, apresenta tanto desafios quanto oportunidades para o ecossistema *Ethereum* e o futuro dos *flash loans* (RASOLROVEICY; FOKAEFS, 2022).

2.4 Polygon

A *Polygon* é uma solução de segunda camada compatível com a EVM, o que significa que ela utiliza o mesmo ambiente de execução da *Ethereum* (FERREIRA, 2022). Esta compatibilidade com a EVM permite que contratos inteligentes escritos para a *Ethereum* funcionem nativamente na *Polygon*, sem necessidade de modificações significativas no código.

A compatibilidade da *Polygon* com os sistemas e padrões da *Ethereum* permite que desenvolvedores adaptem facilmente suas aplicações, mantendo funcionalidades existentes. Isso

torna a *Polygon* uma opção atraente para projetos de DeFi que necessitam de transações rápidas e de baixo custo (RASOLROVEICY; FOKAEFS, 2022).

Essa plataforma utiliza uma estrutura de redes paralelas conectadas à *Ethereum*, processando transações de forma independente e enviando apenas os resultados consolidados para a rede principal. Esse modelo aumenta significativamente a eficiência e a capacidade de processamento, aspectos cruciais para aplicações do DeFi, incluindo operações de *flash loans*.

A estrutura da *Polygon*, ao oferecer maior escalabilidade e menores custos de transação, proporciona um ambiente propício para a proliferação e inovação de *flash loans*. Isso permite que usuários e desenvolvedores explorem novas estratégias e aplicações para essa tecnologia, potencialmente aumentando a frequência e o volume dessas operações no ecossistema DeFi (RASOLROVEICY; FOKAEFS, 2022).

2.5 Finanças Descentralizadas

O termo Finanças Descentralizadas, ou DeFi, refere-se a um novo paradigma de serviços financeiros que utiliza a tecnologia *blockchain* para eliminar intermediários tradicionais, como bancos e corretoras (QIN; ZHOU; LIVSHITS, 2020). Diferentemente dos sistemas financeiros centralizados, o DeFi permite que as operações sejam realizadas diretamente entre os participantes da rede, utilizando contratos inteligentes.

No ecossistema DeFi, dois componentes essenciais são as *decentralized exchanges* (DEXs) e as plataformas de empréstimo descentralizado. As DEXs permitem que usuários troquem criptomoedas diretamente entre si, utilizando *pools* de liquidez gerenciados por contratos inteligentes (LEHAR; PARLOUR, 2022).

As plataformas de empréstimo descentralizado, como *Aave*, possibilitam que usuários emprestem e tomem empréstimos de criptomoedas de forma automatizada (SCHÄR, 2021). Nessas plataformas, os usuários depositam criptomoedas como garantia e podem tomar empréstimos em outras criptomoedas. O processo é gerenciado por contratos inteligentes, que asseguram que os fundos só sejam liberados quando as condições estabelecidas forem cumpridas.

As *stablecoins* desempenham um papel vital no ecossistema DeFi, pois são criptomoedas projetadas para manter um valor estável, geralmente atrelado a moedas fiduciárias (QIN; ZHOU; LIVSHITS, 2020). Elas facilitam negociações mais previsíveis e são amplamente utilizadas em plataformas de empréstimos e DEXs, sendo cruciais para contratos financeiros complexos onde a estabilidade de preços é necessária para minimizar riscos.

Apesar das inovações, o DeFi também enfrenta desafios significativos, principalmente no que diz respeito à segurança. Como os contratos inteligentes são geralmente *open source*, isso pode expor vulnerabilidades no código que atacantes podem explorar. Uma das táticas mais comuns é a manipulação de oráculos. Oráculos são serviços que fornecem dados externos

à *blockchain*, como preços de ativos ou taxas de câmbio, essenciais para o funcionamento de muitos contratos inteligentes em DeFi (ALMEIDA et al., 2020). Se um oráculo for comprometido, um atacante pode distorcer esses dados temporariamente, explorando a discrepância para obter lucro (HU; LIANG; MUKHIJA, 2020). Esses riscos ressaltam a importância de desenvolver soluções mais robustas para proteger os usuários e os fundos alocados em plataformas DeFi.

2.6 Flash Loans

Os *flash loans* representam uma inovação significativa no ecossistema DeFi, permitindo empréstimos sem garantia que devem ser quitados dentro da mesma transação *blockchain* (QIN; ZHOU; LIVSHITS, 2020). Esta característica única é possível graças à natureza atômica das transações em *blockchain* e à execução de contratos inteligentes, que garantem que todas as operações em uma transação sejam completadas com sucesso ou totalmente revertidas.

A segurança deste mecanismo é garantida pela própria estrutura da *blockchain*: se o empréstimo não for quitado ao final da transação, todas as operações são automaticamente revertidas, eliminando o risco de inadimplência (WANG et al., 2021). Para utilizar um *flash loan*, é necessário programar um contrato inteligente que execute a operação desejada de forma automática, seguindo três etapas principais:

1. Solicitar o empréstimo dos Provedores de *Flash Loan*;
2. Interagir com outros contratos inteligentes;
3. Devolver o empréstimo.

A implementação de um contrato *flash loan* pode variar dependendo da plataforma utilizada. Na Listagem 2.2, é apresentado um exemplo de um contrato inteligente real adaptado da plataforma Aave. O código demonstra um contrato inteligente para *flash loans* que implementa duas funções principais, `executeFlashLoan` para iniciar o empréstimo e `executeOperation` para executar a lógica de negócio e realizar o pagamento do empréstimo mais taxa, tudo em uma única transação.

```
1 // SPDX-License-Identifier: MIT
2 pragma solidity ^0.8.0;
3
4 import "@aave/core-v3/contracts/interfaces/IPool.sol";
5
6 contract FlashLoanExample {
```

```
7     address private constant POOL_ADDRESS = 0
8     x7d2768dE32b0b80b7a3454c06BdAc94A69DDc7A9; // Aave v2
9     Ethereum Pool
10
11     function executeFlashLoan(address asset, uint256 amount)
12     external {
13         IPool(POOL_ADDRESS).flashLoanSimple(
14             address(this), // Endereço do contrato
15             asset,          // Token que deseja pegar emprestado
16                             // (por exemplo, DAI)
17             amount,         // Quantidade
18             "",             // Parâmetros adicionais (podem ser
19                             // deixados em branco)
20             0               // Código de referência (0 se não for
21                             // usado)
22         );
23     }
24
25     function executeOperation(
26         address asset,
27         uint256 amount,
28         uint256 premium,
29         address initiator,
30         bytes calldata params
31     ) external returns (bool) {
32         // 1. Execute a operação (por exemplo, arbitragem,
33         // liquidação, etc.)
34         // 2. Pague o empréstimo + taxa (premium)
35         uint256 amountOwed = amount + premium;
36         IERC20(asset).transfer(POOL_ADDRESS, amountOwed);
37         return true;
38     }
39 }
```

Listagem 2.2 – Contrato Solidity para Flash Loan na Aave

De acordo com (WANG et al., 2021) temos algumas aplicações de *flash loans* no ecossistema DeFi:

Arbitragem A arbitragem envolve aproveitar diferenças de preços de um mesmo ativo em diferentes plataformas. No contexto de DeFi, as diferenças de preço entre DEXs podem surgir devido à baixa liquidez ou à atualização mais lenta dos preços. Como ilustrado na

Figura 1, um *trader* pode utilizar um *flash loan* para explorar essas diferenças de preço entre *exchanges*, realizando a operação sem necessidade de capital inicial;

Liquidação Em plataformas de empréstimo DeFi, a liquidação ocorre quando o valor dos ativos depositados como garantia não é mais suficiente para cobrir o empréstimo. Nestes casos, os *flash loans* permitem que liquidadores atuem sem necessidade de capital próprio, tomando emprestado o valor necessário para liquidar posições com garantias insuficientes e obtendo lucro com o desconto oferecido;

Troca de Garantia A troca de garantia é uma estratégia comum no DeFi para proteger posições contra a volatilidade do mercado. Por exemplo, se um usuário tiver um empréstimo garantido por um ativo volátil, ele pode desejar trocar essa garantia por um ativo mais estável, como uma *stablecoin*, para evitar o risco de liquidação. Os *flash loans* facilitam esse processo ao permitir que toda a operação seja realizada em uma única transação, minimizando riscos de variação de preço.

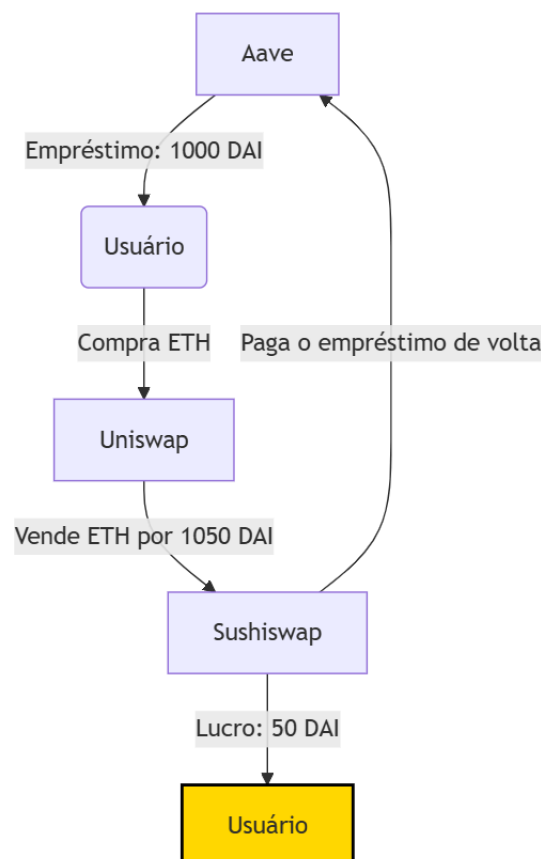


Figura 1 – Diagrama de arbitragem em DeFi

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

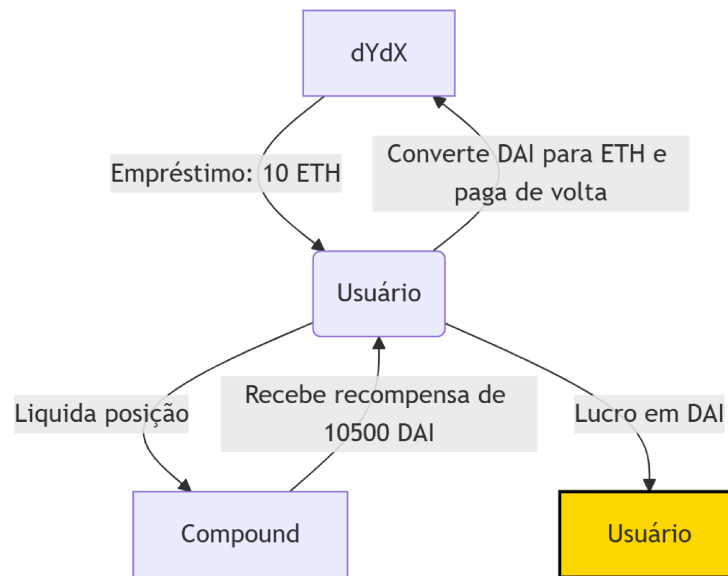


Figura 2 – Diagrama de liquidação em DeFi

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

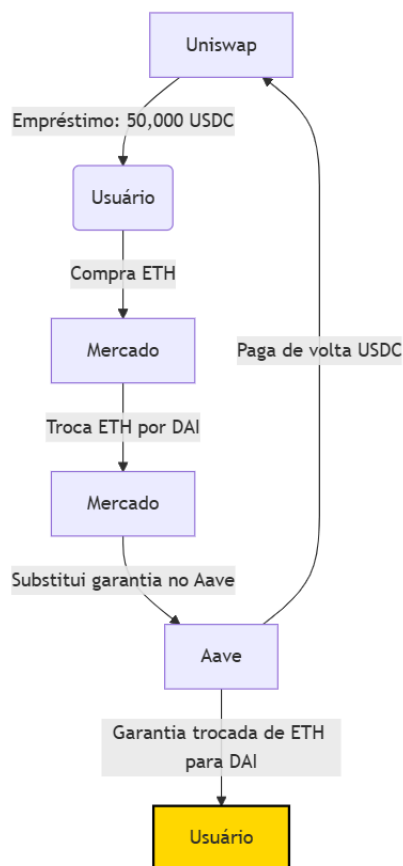


Figura 3 – Diagrama de troca de garantia em DeFi

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

2.6.1 Desafios e Limitações

Apesar de sua inovação, os *flash loans* apresentam desafios significativos. Os custos operacionais, incluindo taxas de gás e taxas do próprio *flash loan*, podem impactar a viabilidade das operações (HE et al., 2021). Além disso, a complexidade técnica na implementação dos contratos inteligentes e os riscos de falhas na execução das operações requerem conhecimento especializado e testes rigorosos.

3 Desenvolvimento

Nesta seção, serão descritas as etapas de desenvolvimento do projeto, detalhando as decisões e justificativas para cada escolha realizada ao longo do processo. O objetivo principal é apresentar a metodologia empregada para a coleta e análise de dados sobre *flash loans* em diferentes plataformas DeFi, evidenciando os critérios adotados para a seleção das redes e plataformas, as ferramentas e bibliotecas de software utilizadas, e as análises desenvolvidas com base nos dados coletados.

Foram desenvolvidos 4 códigos principais para este trabalho, o script para coleta de dados¹, 2 scripts para criar os subgrafos no *The Graph*^{2,3}, e o projeto de análises e geração dos *dashboards*⁴, todos eles se encontram disponíveis no *Github*⁵, permitindo a reprodução das análises e contribuições futuras para o projeto.

O estudo foi conduzido nas redes *Ethereum* e *Polygon*, as quais foram escolhidas por sua popularidade e por fornecerem uma base sólida para análise de transações de *flash loans* em ambientes de alta liquidez e atividade. A *Ethereum* é amplamente utilizada em finanças descentralizadas e foi a primeira rede a oferecer suporte robusto para contratos inteligentes, enquanto a *Polygon* se destaca por suas taxas reduzidas e maior velocidade de processamento, características importantes para operações como *flash loans*. Ambas as redes oferecem uma base rica e diversificada de dados, permitindo explorar diferentes aspectos e padrões de uso dessas operações. Essa complementaridade entre *Ethereum* e *Polygon* é relevante para entender como as diferentes redes afetam o comportamento das operações de *flash loans*, dado que os custos e tempos de confirmação variam significativamente.

Para a coleta de dados, foram utilizados *block explorers*, ferramentas que possibilitam o acesso e a consulta de informações detalhadas sobre transações e eventos em *blockchain*. Optou-se pelas APIs da *Etherscan*⁶ e da *Polygonscan*⁷ devido à confiabilidade, à amplitude de dados oferecidos e à facilidade de integração com o ambiente de desenvolvimento. Além disso, o *The Graph*⁸ foi testado como uma forma de complementar a coleta, fornecendo dados mais estruturados e específicos de contratos e eventos relacionados a *flash loans*.

Dentre as diversas plataformas DeFi disponíveis, foram selecionadas três para análise: *Aave*, *dYdX* e *Uniswap*. Esta seleção baseou-se em critérios específicos, incluindo o volume de

¹ Disponível em: <https://github.com/roberttacosta/script-etherscan>

² Disponível em: <https://github.com/roberttacosta/dydx-subgraph>

³ Disponível em: <https://github.com/roberttacosta/aave-subgraph>

⁴ Disponível em: <https://github.com/roberttacosta/projeto-pratico-tcc>

⁵ Disponível em: <https://github.com>

⁶ Disponível em: <https://etherscan.io/>

⁷ Disponível em: <https://polygonscan.com/>

⁸ Disponível em: <https://thegraph.com/pt/>

transações, a disponibilidade de dados históricos e a representatividade no ecossistema DeFi.

3.1 Plataformas DeFi

Para o desenvolvimento deste projeto, foram selecionadas três plataformas DeFi: *Aave*, *dYdX* e *Uniswap*. A escolha baseou-se na relevância destas plataformas no ecossistema DeFi e em suas diferentes abordagens para *flash loans* (WERNER et al., 2021). Cada plataforma oferece funcionalidades distintas que contribuem para uma análise abrangente do uso de *flash loans*.

3.1.1 Aave

A *Aave* é uma das principais plataformas de empréstimos descentralizados, pioneira na implementação de *flash loans* (Aave Documentation, 2024). Lançada inicialmente como ETHLend em 2017, a plataforma revolucionou o mercado em 2020 ao introduzir o conceito de empréstimos instantâneos sem garantias tradicionais. A *Aave* opera tanto na rede Ethereum quanto na Polygon, permitindo uma análise comparativa do comportamento dos *flash loans* em diferentes ambientes *blockchain* (WANG et al., 2021).

3.1.2 dYdX

A *dYdX* é uma plataforma descentralizada de negociação que combina funcionalidades de uma DEX com as de empréstimos descentralizados (dYdX Foundation, 2024). Embora não ofereça suporte nativo para *flash loans*, a plataforma permite sua implementação através de contratos inteligentes personalizados (dYdX Documentation, 2024). Esta característica apresenta uma oportunidade única para análise, pois demonstra como desenvolvedores podem adaptar e implementar *flash loans* em plataformas que não foram originalmente projetadas para essa funcionalidade.

3.1.3 Uniswap

A *Uniswap*, lançada em 2018, é uma das maiores DEXs do ecossistema DeFi (Uniswap Foundation, 2018). Sua importância para este estudo reside na capacidade de facilitar *flash loans* através de seus *pools* de liquidez, especialmente em operações de arbitragem. A expansão para a rede *Polygon* ampliou sua acessibilidade, permitindo transações com custos reduzidos (Uniswap Foundation, 2023).

3.1.4 Análise Comparativa

A combinação destas três plataformas oferece uma perspectiva abrangente sobre diferentes aspectos dos *flash loans*. A *Aave* fornece uma implementação nativa e robusta, a *dYdX* de-

monstra a adaptabilidade da tecnologia através de implementações personalizadas, e a *Uniswap* ilustra como os *flash loans* podem ser utilizados em conjunto com *pools* de liquidez para operações de arbitragem (WERNER et al., 2021). Esta diversidade de abordagens permite uma análise mais completa do impacto e da utilização dos *flash loans* no ecossistema DeFi.

3.2 Coleta de dados com Block Explorers

Os exploradores de blocos, ou *block explorers*, são ferramentas fundamentais no ecossistema *blockchain*, oferecendo uma interface que facilita a navegação pelas transações e dados registrados de maneira pública e transparente (SCHAARSCHMIDT; WIENER; WATSON-MANHEIM, 2020). Cada *block explorer* está associado a uma rede *blockchain* específica e permite acessar dados de forma organizada através de *APIs* (ZHENG et al., 2018).

Para este estudo, utilizamos as *APIs* do *Etherscan* e *Polygonscan* para coletar e analisar transações relacionadas aos *flash loans* nas redes *Ethereum* e *Polygon*. A escolha dessas *APIs* baseou-se em sua confiabilidade, abrangência dos dados e documentação completa (ETHERSCAN, 2024; Polygonscan, 2024).

O processo de coleta enfrentou dois desafios principais: o volume significativo de dados e as limitações das *APIs*. Para gerenciar o volume de dados, implementamos um sistema de armazenamento em *MongoDB*, substituindo a ideia inicial de utilizar planilhas. Quanto às limitações de requisições das *APIs*, desenvolvemos um sistema de controle de taxa como mostrado na Listagem 3.1.

```
1 ETHERSCAN_RATE_LIMIT = 5 # 5 chamadas por segundo
2 def rate_limit():
3     time.sleep(1 / ETHERSCAN_RATE_LIMIT)
```

Listagem 3.1 – Controle de Taxa de Requisições

Para garantir a precisão temporal da coleta, implementamos uma função que converte datas em números de blocos como mostrado na Listagem 3.2.

```
1 def get_block_by_date(date):
2     timestamp = int(date.timestamp())
3     url = f'{ETHERSCAN_BASE_URL}?module=block&action=
4         getblocknobytime&timestamp={timestamp}&closest=before&apikey
5         ={ETHERSCAN_API_KEY}'
6     response = requests.get(url)
7     data = response.json()
8
9     if data['status'] == '1':
```

```
8         return int(data['result'])
9     else:
10         print(f"Erro ao buscar bloco para data {date}: {data['message']}")
11         return None
```

Listagem 3.2 – Função para Obter o Número de Bloco a partir de uma Data

No caso específico da *Polygonscan*, implementamos um mecanismo adicional utilizando a biblioteca *retrying* para lidar com falhas temporárias e limites de requisição. Esta abordagem garantiu a continuidade da coleta mesmo em casos de interrupções momentâneas (Polygonscan, 2024).

A integração dos *block explorers* permitiu uma visão detalhada das transações de *flash loans*, fornecendo dados cruciais para as análises subsequentes sobre padrões de uso e evolução destes empréstimos no ecossistema *DeFi*. A escolha desta abordagem mostrou-se eficiente para os objetivos específicos deste estudo, permitindo uma análise robusta e confiável das operações de *flash loans* nas redes *Ethereum* e *Polygon*.

3.3 The Graph

O *The Graph* é uma ferramenta de indexação e consulta de dados *blockchain* que permite a criação de subgrafos personalizados para extrair informações relevantes de contratos inteligentes usando GraphQL (The Graph Foundation, 2024). Esta abordagem otimiza o processo de coleta de dados e possibilita consultas eficientes e rápidas, proporcionando uma infraestrutura descentralizada para indexação de eventos complexos (GraphQL Foundation, 2023).

No contexto deste projeto, a escolha pelo *The Graph* se deu pela necessidade de extrair dados complexos e detalhados, como transações de *flash loans*, de maneira eficiente e escalável. Ao contrário dos *block explorers* tradicionais, que fornecem dados em um formato bruto, o *The Graph* permite configurar subgrafos que filtram, processam e organizam os dados em consultas otimizadas (The Graph Foundation, 2024).

O desenvolvimento de subgrafos no *The Graph* envolve a configuração do arquivo `subgraph.yaml` para especificar contratos e eventos a serem monitorados, a definição do `schema.graphql` para estruturar os dados coletados, e a implementação de mapeamentos em *TypeScript* para processar eventos e armazenar dados. Esta estrutura permite o monitoramento preciso de eventos específicos de *flash loans*.

Um exemplo de configuração para monitorar eventos de *flash loan* na *Aave* é apresentado no *code listing 3.3*.

```
1 specVersion: 0.0.2
```

```

2  dataSources:
3    kind: ethereum/contract
4    name: Aave
5    network: mainnet
6    source:
7      # endereço que queremos monitorar as transações
8      address: "0x7d2768dE32b0b80b7a3454c06BdAc94A69DDc7A9"
9      abi: Aave
10   mapping:
11     kind: ethereum/events
12     apiVersion: 0.0.4
13     language: wasm/assemblyscript
14   entities:
15     - FlashLoan
16   eventHandlers:
17     - event: FlashLoan(indexed address,uint256,uint256,uint256)
18       handler: handleFlashLoan

```

Listagem 3.3 – Subgrafo para Monitorar Eventos de flash loan na Aave

Durante o desenvolvimento, identificamos uma oportunidade de utilizar o *The Graph* para monitorar o protocolo *dYdX*, especificamente sua função `operate()`, que permite a implementação de *flash loans* por desenvolvedores terceiros ([dYdX Documentation, 2024](#)). Esta função executa três operações sequenciais: retirada do empréstimo (*withdraw*), execução da lógica de negócio (*call*), e devolução do montante com taxa (*deposit*).

O *The Graph* oferece três mecanismos principais de monitoramento ([The Graph Foundation, 2024](#)):

- *eventHandlers*: monitoram eventos emitidos por contratos inteligentes;
- *callHandlers*: monitoram funções específicas chamadas nos contratos;
- *blockHandlers*: Monitoram novos blocos adicionados à *blockchain*.

Ao analisar o contrato do *dYdX*, identificamos limitações significativas no uso de *callHandlers* com estruturas de dados complexas, como as utilizadas na função `operate()` ([ABOUDOC, 2023](#)). Esse tipo de *handler* funciona de forma mais confiável com funções públicas simples, sendo menos adequado para contratos complexos que utilizam estruturas de dados aninhadas, como é o caso do *dYdX*.

Embora existam abordagens alternativas para monitorar contratos complexos através do *The Graph*, como a implementação de lógicas personalizadas de processamento de eventos

ou a criação de subgrafos específicos para cada padrão de transação ([GraphQL Foundation, 2023](#)), a complexidade adicional necessária para implementar essas soluções, combinada com a disponibilidade de alternativas mais diretas através de *block explorers*, nos levou a optar por uma abordagem mais pragmática para este estudo.

Para os objetivos específicos deste projeto, a utilização de *block explorers* mostrou-se mais adequada, permitindo uma coleta de dados direta e eficiente. No entanto, é importante ressaltar que o *The Graph* permanece como uma ferramenta poderosa para análise de dados em *blockchain*, especialmente em cenários que exigem consultas complexas e processamento em tempo real de eventos em contratos inteligentes ([The Graph Foundation, 2024](#)).

4 Análises e Resultados

Nesta seção, apresentamos a análise detalhada dos *flash loans* com base nos dados coletados durante o estudo. Inicialmente, a proposta envolvia a análise de três plataformas DeFi: *Aave*¹, *dYdX*² e *Uniswap*³. Contudo, o volume significativo de dados obtidos da *Aave* mais de sete milhões de transações e as limitações técnicas encontradas na coleta com o *The Graph* nos levaram a focar exclusivamente na *Aave* (WANG et al., 2021).

A escolha da *Aave* como plataforma central de análise justifica-se por sua posição pioneira na implementação de *flash loans* e sua presença em múltiplas redes *blockchain* (QIN; ZHOU; LIVSHITS, 2020). Esta abordagem permitiu uma análise comparativa entre a rede *Ethereum*, reconhecida por sua segurança e maturidade, e a *Polygon*, que se destaca por suas taxas reduzidas e maior escalabilidade (WERNER et al., 2021).

As análises desenvolvidas nesta seção focam em três aspectos principais:

1. Padrões de utilização dos *flash loans* em diferentes redes;
2. Impacto das taxas de transação no comportamento dos usuários;
3. Evolução temporal do volume e frequência das operações.

Esta investigação contribui para o entendimento dos *flash loans* como inovação financeira no ecossistema DeFi (SCHÄR, 2021). Os resultados apresentados visam fornecer *insights* sobre tendências e oportunidades associados a estas operações, beneficiando tanto a comunidade acadêmica quanto os participantes do mercado.

4.1 Análise de Flash Loans

Para as análises de *flash loans*, estabelecemos uma metodologia focada na identificação de padrões e métricas relevantes nas redes *Ethereum* e *Polygon* (WANG et al., 2021). O estudo concentrou-se na plataforma *Aave*, que forneceu uma base de mais de 7.000.000 de transações, permitindo uma análise robusta do comportamento desses empréstimos instantâneos no ecossistema DeFi (QIN; ZHOU; LIVSHITS, 2020).

¹ Disponível em: <https://aave.com/>

² Disponível em: <https://dydx.exchange/>

³ Disponível em: <https://app.uniswap.org/>

Para a implementação da análise utilizamos *Python*⁴ como linguagem principal, aproveitando bibliotecas especializadas em análise de dados como *pandas*⁵, *plotly*⁶ e *Dash*⁷. A estrutura do projeto foi organizada de forma modular, permitindo:

- Escalabilidade na adição de novas análises;
- Independência entre diferentes componentes;
- Flexibilidade na manipulação dos dados;
- Simplicidade na depuração e testes.

O armazenamento dos dados foi implementado em *MongoDB*⁸, com otimizações específicas através de índices e cache em *Redis*⁹, garantindo performance adequada para o volume de transações analisado (HE et al., 2021). Esta arquitetura permitiu a execução eficiente das seguintes análises:

1. Análises de Volume: Investigação dos padrões de quantidade e valor das transações;
2. Análise de Frequência: Estudo da distribuição temporal das operações;
3. Análise da Sequência de Transações: Identificação de padrões comportamentais;
4. Análise de Taxas: Avaliação do impacto dos custos operacionais.

Cada categoria de análise será detalhada nas subseções seguintes, apresentando metodologia específica, resultados obtidos e insights relevantes para a compreensão do comportamento dos *flash loans* no ecossistema DeFi.

4.1.1 Análises de Volume

Para analisar o volume das transações de *flash loans*, desenvolvemos duas visualizações complementares que exploram diferentes aspectos dos dados coletados nas redes *Ethereum* e *Polygon*. As análises focaram na distribuição das funções e na proporção relativa dos *flash loans* no total de transações.

⁴ Disponível em: <https://docs.python.org/3/>

⁵ Disponível em: <https://pandas.pydata.org/docs/>

⁶ Disponível em: <https://plotly.com/python/>

⁷ Disponível em: <https://dash.plotly.com/>

⁸ Disponível em: <https://www.mongodb.com/pt-br>

⁹ Disponível em: <https://redis.io/docs/latest/>

4.1.1.1 Análise de Volume por Função

A primeira análise identificou a distribuição das funções mais utilizadas na plataforma Aave, com foco específico em *flashLoan* e *flashLoanSimple*. Para isso, desenvolvemos scripts que agrupam as transações por função e rede:

No arquivo `flash_loan_volume.py`, a função `analyze_flash_loan_volume` realiza a extração dos dados diretamente do *MongoDB*. A função coleta todas as transações agrupadas por nome da função e pela rede, conforme a Listagem 4.1

```
1 def analyze_flash_loan_volume():
2     client = MongoClient()
3     db = client['defi_data']
4     collection = db['transactions']
5
6     function_names = collection.distinct("function_name")
7     networks = collection.distinct("network")
8
9     results = []
10    for function_name in function_names:
11        for network in networks:
12            count = collection.count_documents({'function_name':
13            function_name, 'network': network})
14            results.append({'function_name': function_name, '
15            network': network, 'count': count})
16
17    return pd.DataFrame(results)
```

Listagem 4.1 – Função para Analisar o Volume de Flash Loans

No `visualization.py`, a função `plot_flash_loan_volume` cria o gráfico que ilustra o volume de transações para cada função, destacando as redes *Ethereum* e *Polygon* igual mostrado na Listagem 4.2.

```
1 def plot_flash_loan_volume(volume_data):
2     fig = px.bar(volume_data, y='function_name', x='count',
3     color='network',
4     title="Volume de Transações por Função e Rede (
5     Escala Logarítmica)",
6     log_x=True)
7     return fig
```

Listagem 4.2 – Função para Plotar o Volume de Flash Loans



Figura 4 – Distribuição das Funções mais Utilizadas nas Redes *Ethereum* e *Polygon*.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os gráficos representados na Figura 4 revelam que as funções *flashLoan* e *flashLoanSimple* estão entre as dez funções mais utilizadas, ocupando as posições 6 e 7. Além disso, foi observado que a função *flashLoanSimple* é significativamente mais utilizada na rede *Polygon* em comparação à *Ethereum*.

Essa diferenciação entre as redes indica que a *Polygon* pode ser mais atraente para operações de *flash loans* devido a menores taxas de transação.

4.1.1.2 Análise do Percentual de Flash Loans em Relação ao Total de Transações

Enquanto a análise anterior detalha o volume de transações por função, esta análise foca em entender a proporção que os *flash loans* representam em relação ao total de transações realizadas em cada rede. Aqui, buscamos quantificar o impacto relativo das operações de *flash loans* no uso geral das plataformas.

No arquivo `flash_loan_volume.py`, a função `analyze_flash_loan_volume_all` calcula a proporção de transações de *flash loans* em relação ao total de transações. Essa função, representada na Listagem 4.3, agrega todas as transações e separa o volume de operações que envolvem *flash loans* (*flashLoan* e *flashLoanSimple*) das demais.

```

1 def analyze_flash_loan_volume_all():
2     client = MongoClient()
3     db = client['defi_data']
4     collection = db['transactions']
5
6     all_transactions = collection.count_documents({})
7     flash_loans = collection.count_documents({'function_name': {'$in': ['flashLoan', 'flashLoanSimple']}})
8
9     return {'all': all_transactions, 'flash_loans': flash_loans}

```

Listagem 4.3 – Função para Analisar o Volume de Todas as Transações e de Flash Loans

A visualização é criada utilizando a função `plot_flash_loan_volume_all` do arquivo `visualization.py`, que gera um gráfico de barras horizontais para comparar o percentual de transações de *flash loans* com o total visto na Listagem 4.3.

```
1 def plot_flash_loan_volume_all(volume_data):
2     fig = go.Figure()
3     fig.add_trace(go.Bar(x=volume_data['percent'], y=volume_data
4                          ['network'], orientation='h'))
5     return fig
```

Listagem 4.4 – Função para Plotar o Volume de Flash Loans para Todas as Redes

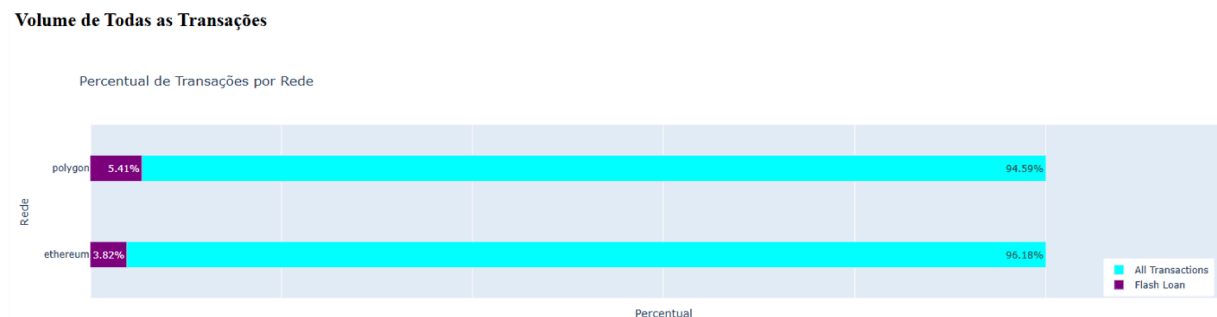


Figura 5 – Percentual do volume de *flash loans* nas redes *Ethereum* e *Polygon*

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O gráfico de percentual mostrado na Figura 5, revelou que os *flash loans* representam aproximadamente 3,82% das transações na rede *Ethereum* e 5,41% na *Polygon*. Embora esses percentuais possam parecer pequenos à primeira vista, eles são expressivos quando considerados no contexto de centenas de milhares de transações diárias.

Além disso, ao detalharmos as operações, observou-se que, apesar de seu volume relativamente menor, os *flash loans* concentram um valor significativo de liquidez em transações pontuais, o que é um indicativo da importância dessas operações para estratégias financeiras avançadas, como arbitragem e otimização de garantias.

4.1.1.3 Conclusão das Análises de Volume

A combinação dessas duas análises nos fornece um panorama detalhado sobre o uso de *flash loans* nas plataformas DeFi. Embora os *flash loans* representem uma pequena fração do total de transações, seu impacto em termos de liquidez e estratégias financeiras é significativo, especialmente em redes como a *Polygon*, que oferece um ambiente mais favorável para operações de alta frequência devido aos custos mais baixos.

Essas análises demonstram a importância de se utilizar diferentes abordagens para entender o uso de funcionalidades complexas nas plataformas DeFi, possibilitando a identificação de padrões e estratégias que podem ser otimizadas para o futuro.

4.1.2 Análise de Frequência

A análise de frequência dos *flash loans* foi estruturada em duas abordagens complementares: evolução temporal das transações e distribuição por períodos do dia. Esta análise visa compreender padrões de utilização e possíveis fatores que influenciam o comportamento dos usuários.

4.1.2.1 Evolução Temporal

O objetivo desta análise foi observar a evolução temporal das transações de *flash loans* nas duas redes analisadas: *Ethereum* e *Polygon*. Para realizar a análise, o *script* foi desenvolvido de forma a carregar todas as transações relacionadas aos métodos `flashLoan` e `flashLoanSimple`, filtrando os dados por timestamp e agrupando-os por data e rede como mostrado na Listagem 4.5.

```
1 flash_loans = load_all_transactions(function_name=['flashLoan',  
    'flashLoanSimple'])  
2 flash_loans['timestamp'] = pd.to_datetime(flash_loans['timestamp'  
    ''], unit='s')  
3 frequency_data = flash_loans.groupby(  
4     [flash_loans['timestamp'].dt.date, 'network']  
5 ).size().reset_index(name='count')
```

Listagem 4.5 – Carregar Transações de Flash Loans

Para representar a evolução temporal das transações de *flash loans* nas redes *Ethereum* e *Polygon*, optamos por utilizar um gráfico de linha. A escolha desse tipo de gráfico se justifica pela sua capacidade de destacar tendências ao longo do tempo, permitindo uma análise clara do comportamento dessas transações em períodos específicos.

Quantidade Absoluta de Flash Loans

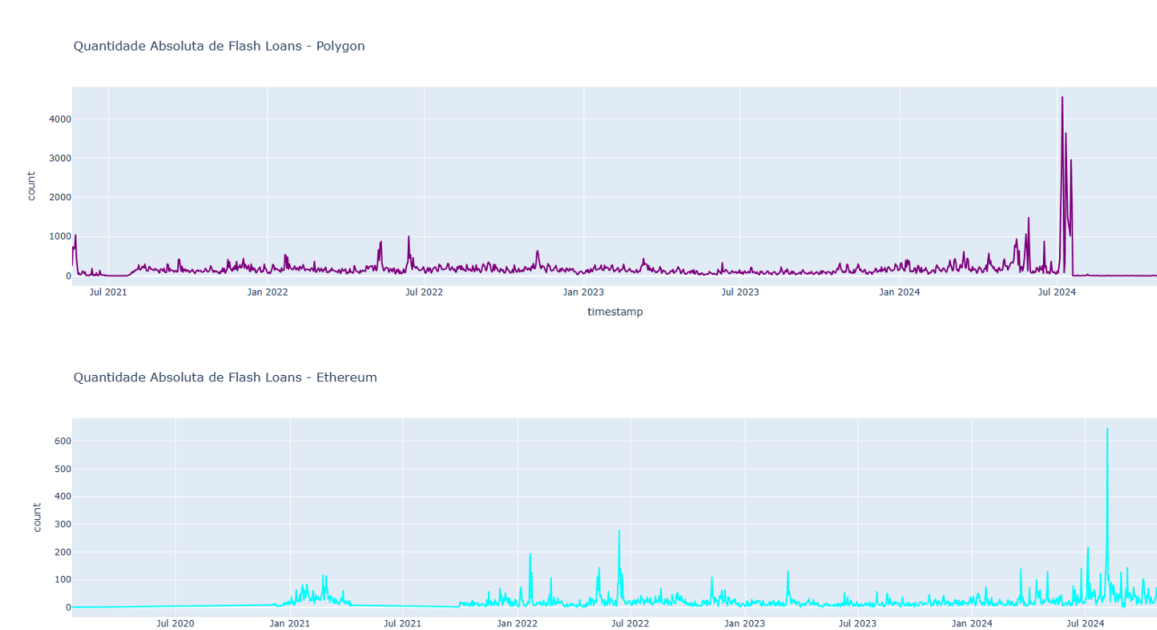


Figura 6 – Quantidade Absoluta de Transações de Flash Loans nas Redes *Ethereum* e *Polygon*.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A análise temporal mostrada na Figura 6, revelou tendências significativas no uso de *flash loans*:

- Crescimento exponencial na rede *Polygon* a partir de meados de 2023, possivelmente relacionado à popularização de aplicações que demandam baixas taxas de transação;
- Uso consistente na rede *Ethereum*, indicando sua relevância para operações que priorizam segurança;
- Variações significativas no volume de transações, sugerindo correlação com eventos do mercado e oportunidades de arbitragem.

4.1.2.2 Distribuição Temporal

A análise de distribuição temporal de *flash loans* foi realizada com o objetivo de identificar padrões de uso nas redes *Ethereum* e *Polygon*. Através dessa análise, foi possível observar o comportamento dos usuários em diferentes períodos, destacando-se horários de maior atividade para essas operações.

Para realizar essa análise, o *script* foi estruturado para extrair as transações dos métodos *flashLoan* e *flashLoanSimple*, utilizando as funções `extract_day_hour` e `group_by_day_hour` localizadas no arquivo `flash_loan_frequency.py` demonstrado na Listagem 4.6. Consideramos o período completo de registros de flash loans realizados na Aave até o dia 31-10-2024.

Os dados foram classificados por dia da semana e horário, com o objetivo de identificar padrões recorrentes entre os dias. Essa segmentação permitiu uma análise mais granular do comportamento temporal das transações, possibilitando verificar concentrações em determinados dias ou intervalos de horário e inferir potenciais tendências de uso dos *flash loans* ao longo do período analisado.

```

1 def extract_day_hour():
2     flash_loans = load_all_transactions(function_name=['
flashLoan', 'flashLoanSimple'])
3     flash_loans['timestamp'] = pd.to_datetime(flash_loans['
timestamp'], unit='s')
4
5     flash_loans['day_of_week'] = flash_loans['timestamp'].dt.
day_name()
6     flash_loans['hour'] = flash_loans['timestamp'].dt.hour
7
8     grouped_data = flash_loans.groupby(['network', 'day_of_week'
, 'hour']).size().reset_index(name='count')
9     return grouped_data

```

Listagem 4.6 – Função para Extrair Dia da Semana e Hora dos Flash Loans

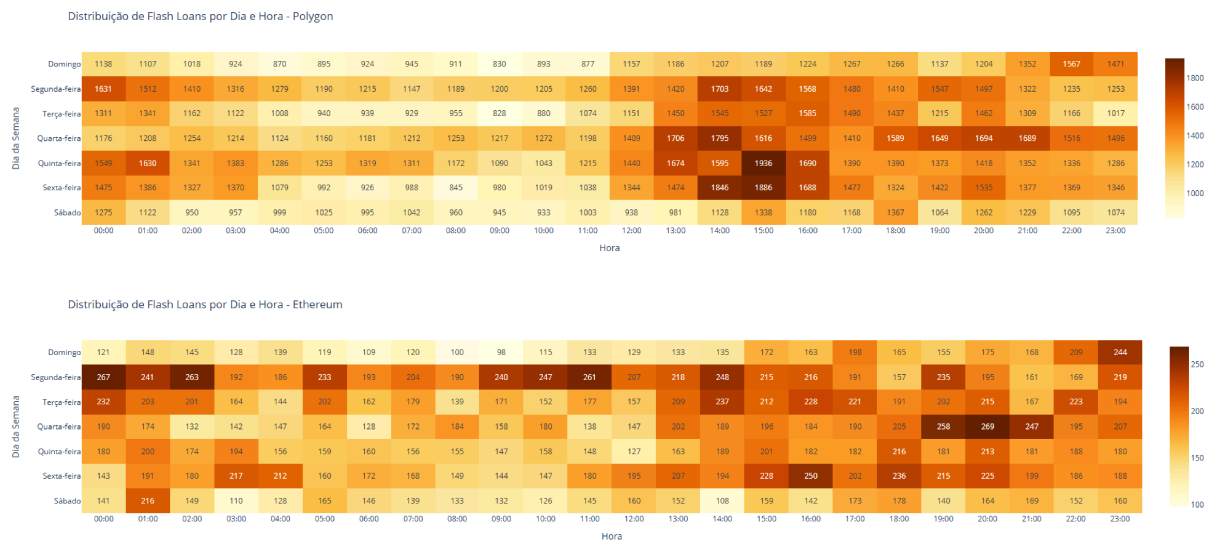


Figura 7 – Mapa de Calor Flash Loans nas Redes *Ethereum* e *Polygon*.

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os gráficos gerados para essa análise apresentados na figura 7 revelou padrões, distintos entre as redes:

1. Rede *Polygon*:

- Distribuição mais intensa ao longo do dia;
- Picos durante as tardes de segunda e quinta-feira;
- Maior atividade entre 14h e 18h.

2. Rede *Ethereum*:

- Atividade mais concentrada em horários específicos;
- Maior movimento às sextas-feiras;
- Concentração durante a madrugada e início da manhã.

4.1.2.3 Conclusão das Análises de Frequencia

Os resultados revelam padrões importantes no uso de *flash loans*:

1. Diferenças significativas entre redes:

- *Polygon*: maior volume e distribuição mais uniforme, indicando uso mais diversificado;
- *Ethereum*: padrão mais concentrado, sugerindo operações mais específicas e de maior valor.

2. Padrões temporais:

- Maior atividade no início da semana;
- Distribuição horária relacionada possivelmente a fatores de mercado;
- Ausência de padrões rígidos, indicando resposta a oportunidades em tempo real.

3. Implicações para o ecossistema:

- Crescente preferência pela *Polygon* para operações frequentes;
- Manutenção da *Ethereum* para operações estratégicas;
- Adaptação do mercado à demanda por operações rápidas e econômicas.

Esta análise contribui para a compreensão do comportamento dos usuários de *flash loans* e suas preferências em relação às diferentes redes blockchain, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento futuro de protocolos DeFi.

4.1.3 Análise da Sequência de Transações

A análise de sequência teve como objetivo identificar padrões comportamentais após a execução de *flash loans*, examinando as cinco transações subsequentes de 20 carteiras selecionadas em cada rede. Esta abordagem permite compreender as estratégias típicas empregadas pelos usuários de *flash loans*.

Para cada rede (*Ethereum* e *Polygon*), foram selecionadas 20 carteiras que realizaram operações de *flash loan* ou *flashLoanSimple*. A análise focou nas cinco transações imediatamente posteriores ao *flash loan*, permitindo identificar padrões comportamentais específicos.

A escolha de focar nas primeiras cinco transações foi uma hipótese que levantamos de que as ações imediatamente após um *flash loan* são críticas para entender a estratégia utilizada. A análise foi feita separadamente para as redes *Ethereum* e *Polygon*, permitindo uma comparação detalhada entre elas.

A análise foi realizada utilizando o *script* `transaction_sequence.py`, o *script* começa consultando o banco de dados para identificar todas as carteiras que realizaram *flash loans*. Em seguida, para cada uma das carteiras selecionadas, foram obtidas as próximas cinco transações realizadas na mesma rede após a execução do *flash loan*, conforme demonstrado na Listagem 4.7.

```
1 # Selecionar 20 carteiras de cada rede
2 polygon_wallets = flash_loan_wallets_data[
    flash_loan_wallets_data['network'] == 'polygon'].head(20)['
    wallet'].tolist()
3 ethereum_wallets = flash_loan_wallets_data[
    flash_loan_wallets_data['network'] == 'ethereum'].head(20)['
    wallet'].tolist()
4
5 # Analisar as próximas 5 interações dessas carteiras
6 for wallet in polygon_wallets:
7     flash_loan_transactions = list(collection.find(
8         {"from": wallet, "network": "polygon", "function_name":
9         {"$in": ["flashLoan", "flashLoanSimple"]}}
10        ).sort("timestamp", 1))
11
12     for transaction in flash_loan_transactions:
13         # Capturar as próximas 5 transações após o flash loan
14         next_transactions = list(collection.find(
15             {"from": wallet, "network": "polygon", "timestamp":
16             {"$gt": transaction['timestamp']}}
17             ).sort("timestamp", 1).limit(5))
```

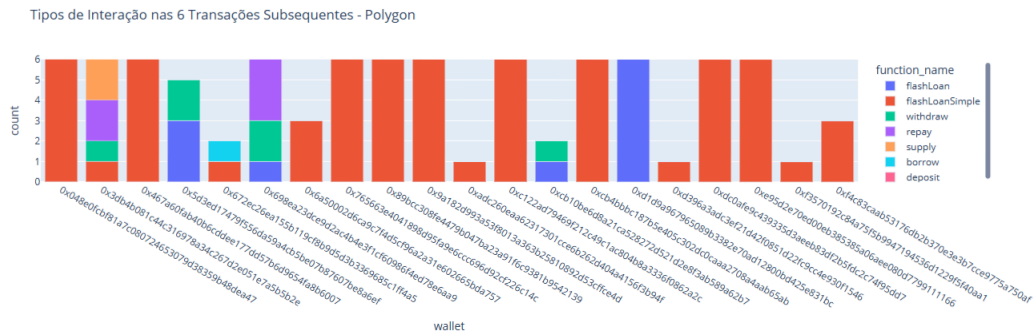
Listagem 4.7 – Seleção de Carteiras e Análise de Interações

Para visualizar os resultados dessa análise, foi criado um gráfico de barras empilhadas utilizando a biblioteca *Plotly*. A função `plot_wallet_interactions` foi utilizada para criar os gráficos a partir dos dados coletados como mostrado na Listagem 4.8.

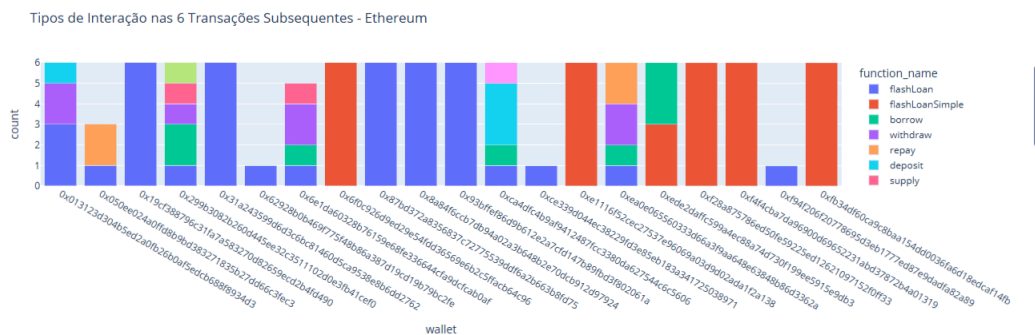
```
1 def plot_wallet_interactions(transactions_data, network):
2     transactions_data['order'] = transactions_data.groupby('
wallet').cumcount() + 1
3     transactions_data = transactions_data[transactions_data['
order'] <= 6]
4     interaction_counts = transactions_data.groupby(['wallet', '
function_name']).size().reset_index(name='count')
5
6     fig = px.bar(interaction_counts, x='wallet', y='count',
color='function_name',
7                 title=f'Tipos de Interação nas 6 Transações
Subsequentes - {network.capitalize()}')
8     fig.update_layout(barmode='stack')
9     return fig
```

Listagem 4.8 – Função para Plotar Interações das Carteiras

Tipos de Interação nas 5 Transações Subsequentes - Polygon



Tipos de Interação nas 5 Transações Subsequentes - Ethereum

Figura 8 – Tipos de Interação nas 5 Transações Subsequentes - *Polygon* e Etherscan

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os gráficos mostrados na Figura 8, mostra a distribuição dos tipos de transações realizadas após um *flash loan* para ambas as redes. A análise dos dados revelou padrões distintos entre as redes:

1. Rede Polygon

- Predominância da função *flashLoanSimple*;
- Maior frequência de operações subsequentes;
- Padrões indicativos de estratégias de arbitragem.

2. Rede Ethereum

- Preferência pela função *flashLoan* tradicional;
- Operações mais focadas e menos frequentes;
- Maior incidência de retiradas *withdraws* após *flash loans*.

3. Padrões Comportamentais Identificados

- Repetição de Operações:

- Carteiras tendem a repetir padrões similares de transações;
- Indicativo de estratégias automatizadas ou bem estabelecidas.
- Comportamentos Específicos:
 - Carteiras dedicadas exclusivamente a *flash loans*;
 - Sequências de operações sugerindo arbitragem;
 - Padrões de retirada imediata após operações.

4.1.3.1 Conclusão das Análise de Sequencia

A análise de sequência revelou diferenças significativas no uso de *flash loans* entre as redes *Ethereum* e *Polygon*, sugerindo adaptações estratégicas às características específicas de cada rede. Os resultados reforçam a utilidade de técnicas de rastreamento para entender melhor os movimentos no mercado de DeFi e como diferentes redes têm padrões distintos de uso para operações complexas, como *flash loans*.

4.1.4 Análise de Taxas

A análise das taxas pagas nas transações de *flash loans* focou na comparação entre as redes *Ethereum* e *Polygon*, considerando tanto as moedas nativas (ETH) e (MATIC) respectivamente, quanto sua conversão para dólares (USD). Esta análise é fundamental para compreender os fatores econômicos que influenciam a escolha da rede para operações de *flash loans*.

Para realizar a análise, foram coletadas todas as transações relacionadas aos métodos *flashLoan* e *flashLoanSimple*, calculando:

- Total acumulado de taxas pagas.
- Média de taxas por transação.
- Conversão para USD (data de referência: 31-10-2024):
 - ETH: \$2515.87
 - MATIC: \$0.32

O cálculo realizado é mostrado na Listagem 4.9.

```
1 # Calcular a taxa paga (gas_used * gas_price)
2 df['fee_paid'] = df.apply(lambda row: Decimal(row['gas_used']) *
3                             row['gas_price'], axis=1)
4 # Calcular métricas para Ethereum e Polygon
```

```
5 metrics = {}
6 for network in ['ethereum', 'polygon']:
7     filtered_df = df[df['network'] == network]
8     if network == 'ethereum':
9         network_metrics = calculate_metrics(filtered_df,
10 eth_price_usd)
11     elif network == 'polygon':
12         network_metrics = calculate_metrics(filtered_df,
13 pol_price_usd)
14 metrics[network] = network_metrics
```

Listagem 4.9 – Cálculo de Taxas Pagas e Métricas por Rede

Optamos por utilizar uma única data de referência para os preços, em vez de pegar os valores das moedas no momento exato de cada transação, pois isso tornaria o processo significativamente mais complexo e não era o foco da análise.

Os dados foram representados em uma tabela utilizando o `plot_flash_loan_fees` no `visualization.py`. A tabela mostra:

- **Total Acumulado de Taxas Pagas:** O total de taxas em ETH/MATIC.
- **Média de Taxas por Transação:** O custo médio por transação.
- **Total Acumulado e Média em USD:** Conversão para dólares.

Taxas Flash Loans (Total e Média por Transação)

Rede	Total Acumulado de Taxas Pagas (ETH/MATIC)	Media de Taxas Paga Por Transação (ETH/MATIC)	Total Acumulado de Taxas Pagas (USD)	Media de Taxas Paga Por Transação (USD)
ethereum	1541.5933000392233	0.05136247418002343	\$ 3.878.448,34	\$ 129,22
polygon	34642.31455261322	0.16265830212142787	\$ 11.085,54	\$ 0,05

Figura 9 – Taxas de Flash Loans (Total e Média por Transação) nas Redes *Ethereum* e *Polygon*

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

A análise, apresentada na Figura 9, revelou diferenças significativas entre as redes:

1. Rede Ethereum
 - Total acumulado: \$3.878.448,34;

- Média por transação: \$129,22;
- Menor volume de transações, mas maior custo individual.

2. Rede Polygon

- Total acumulado: \$11.085,54;
- Média por transação: \$0,05;
- Maior volume de transações com custo significativamente menor.

3. Implicações para o Ecosystema DeFi

Os resultados demonstram que:

a) Diferencial de Custos:

- A diferença de 2.584% no custo médio por transação (\$129,22 vs \$0,05) explica a preferência pela *Polygon*;
- Este diferencial é crucial para operações que exigem múltiplas interações, como arbitragem.

b) Padrões de Uso:

- *Ethereum*: utilizada para operações de maior valor onde a segurança é prioritária;
- *Polygon*: preferida para operações frequentes e de menor valor.

c) Impacto no Ecosystema:

- A diferença nas taxas influencia diretamente a viabilidade de diferentes estratégias de *flash loans*;
- O menor custo na *Polygon* permite a experimentação com novas aplicações e casos de uso.

4.1.4.1 Conclusão das Análise de Taxas

A análise das taxas demonstra que o custo das transações é um fator determinante na escolha da rede para operações de *flash loans*. A significativa diferença nos custos entre *Ethereum* e *Polygon* explica os padrões de uso observados nas análises anteriores e sugere uma tendência contínua de crescimento no uso da *Polygon* para operações que priorizam eficiência em custos.

5 Conclusão

Esta pesquisa apresentou uma análise abrangente do uso de *flash loans* em plataformas DeFi, focando nas redes *Ethereum* e *Polygon*. Os resultados revelaram padrões significativos no uso dessa inovação financeira, com *flash loans* representando 3,82% das transações na *Ethereum* e 5,41% na *Polygon* no período estudado.

As análises quantitativas demonstraram diferenças marcantes entre as redes. Na *Ethereum*, o custo médio por transação de \$129,22 contrasta significativamente com os \$0,05 na *Polygon*, explicando a crescente preferência por esta última para operações frequentes. Esta diferença de custos mostrou-se determinante nos padrões de uso, com a *Polygon* apresentando maior volume de transações e distribuição mais uniforme ao longo do dia.

Os padrões temporais identificados revelaram comportamentos distintos dos usuários em cada rede. A *Ethereum* manteve um uso mais concentrado em operações específicas, possivelmente priorizando segurança, enquanto a *Polygon* demonstrou maior versatilidade e frequência de uso, especialmente em estratégias que exigem múltiplas interações.

A análise sequencial das transações evidenciou que os *flash loans* são frequentemente utilizados em estratégias complexas, incluindo arbitragem e otimização de garantias. Este comportamento sugere uma sofisticação crescente no uso dessa ferramenta, indicando sua consolidação como elemento estratégico no ecossistema DeFi.

Para trabalhos futuros, é sugerido:

1. Análise aprofundada das estratégias específicas empregadas em *flash loans*;
2. Estudo comparativo com outras redes emergentes;
3. Aprofundamento no uso do *The Graph* e desenvolvimento de subgrafos especializados para análise de transações complexas em DeFi;
4. Uso das técnicas desenvolvidas neste trabalho em outros serviços e contextos de contratos inteligentes.

Esta pesquisa contribui significativamente para a compreensão dos *flash loans* no contexto DeFi, fornecendo *insights* valiosos sobre padrões de uso, preferências dos usuários e implicações para o desenvolvimento futuro do setor financeiro descentralizado.

Referências

- Aave Documentation. **Aave Documentation**. 2024. Acesso em: 3 nov. 2024. Disponível em: <https://docs.aave.com/>. Citado na página 23.
- ABOUDOC. **dYdX Flashloan Implementation**. 2023. Acesso em: 3 nov. 2024. Disponível em: <https://github.com/Aboudoc/dydx-Flashloan>. Citado na página 26.
- ADHAMI, S.; GIUDICI, G. Initial coin offerings: Tokens as innovative financial assets. In: _____. **Blockchain Economics and Financial Market Innovation: Financial Innovations in the Digital Age**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 61–81. ISBN 978-3-030-25275-5. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25275-5_4. Citado na página 15.
- ALMEIDA, G. H.; MARTINS, D. M.; MOTA, R.; CUNHA, F.; MACEDO, D. F.; NOGUEIRA, M. Autenticação de oráculos em um blockchain usando contexto físico como segundo fator de autenticação. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO (SBC). **Anais do XX Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais**. Brasil, 2020. Citado na página 17.
- AMLER, H.; ECKEY, L.; FAUST, S.; KAISER, M.; SANDNER, P.; SCHLOSSER, B. Defi-ning defi: Challenges & pathway. **arXiv preprint arXiv:2101.05589**, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2101.05589>. Citado na página 9.
- AN, M.; FAN, Q.; YU, H.; ZHAO, H. Blockchain technology research and application: a systematic literature review and future trends. **arXiv preprint arXiv:2306.14802**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2306.14802>. Citado na página 13.
- BUTERIN, V. **A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform**. 2014. <https://ethereum.org/en/whitepaper/>. Citado na página 14.
- DANNEN, C. Introducing ethereum and solidity: Foundations of cryptocurrency and blockchain programming for beginners. **arXiv preprint arXiv:1711.09437**, 2017. Citado na página 14.
- DeFi Llama. **DeFi Llama - DeFi TVL Aggregator**. 2024. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <https://defillama.com/>. Citado na página 9.
- dYdX Documentation. **dYdX Documentation**. 2024. Acesso em: 3 nov. 2024. Disponível em: <https://docs.dydx.exchange/>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 26.
- dYdX Foundation. **Introducing dYdX: The Future of Decentralized Finance**. 2024. Acesso em: 3 nov. 2024. Disponível em: <https://dydx.foundation/>. Citado na página 23.
- ETHERSCAN. **Etherscan API Documentation**. 2024. Último acesso em 5 de outubro de 2024. Disponível em: <https://etherscan.io/apis>. Citado na página 24.
- FERREIRA, M. M. M. **A volatilidade das criptomoedas: Os casos da Polygon, Solana, BitTorrent Token e VeChain**. Dissertação (Mestrado) — Universidade dos Açores, Ponta Delgada, Portugal, 2022. Dissertação de Mestrado em Gestão de Empresas (MBA). Disponível em: <https://repositorio.uac.pt/handle/10400.3/6715?locale=en>. Citado na página 15.

- GraphQL Foundation. **GraphQL Documentation**. 2023. Acesso em: 3 nov. 2024. Disponível em: <https://graphql.org/learn>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- HE, D.; WU, X.; GAO, L. et al. Modeling and analyzing the impact of flash loans on financial markets. **arXiv preprint arXiv:2102.00626**, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.
- HU, X.; LIANG, J.; MUKHIJA, K. Defi security: Oracles and smart contract vulnerabilities. **Cryptoeconomics Research Journal**, v. 2, n. 3, p. 201–215, 2020. Citado na página 17.
- LEHAR, A.; PARLOUR, C. A. Decentralized exchanges. **Review of Financial Studies**, Oxford University Press, v. 35, n. 12, p. 5547–5586, 2022. Disponível em: http://ewfs.org/wp-content/uploads/2022/01/228_01.pdf. Citado na página 16.
- NAKAMOTO, S. **Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System**. 2008. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Citado na página 12.
- Polygonscan. **Polygonscan API Documentation**. 2024. Available at: <https://polygonscan.com/apis>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- QIN, K.; ZHOU, L.; LIVSHITS, B. Attacking the defi ecosystem with flash loans for fun and profit. **arXiv preprint arXiv:2003.03810**, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 17 e 28.
- RASOLROVEICY, M.; FOKAEFS, M. Performance and cost evaluation of public blockchain: An nft marketplace case study. In: **2022 4th Conference on Blockchain Research & Applications for Innovative Networks and Services (BRAINS)**. Paris, France: IEEE, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- SCHAARSCHMIDT, M.; WIENER, M.; WATSON-MANHEIM, M. B. Exploring the transparency of blockchain. **Journal of Business Research**, v. 116, p. 259–264, 2020. Citado na página 24.
- SCHÄR, F. Decentralized finance: On blockchain- and smart contract-based financial markets. **Federal Reserve Bank of St. Louis Review**, v. 103, n. 2, p. 153–174, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.20955/r.103.153-74>. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 16 e 28.
- SULTAN, K.; RUHI, U.; LAKHANI, R. Conceptualizing blockchains: Characteristics & applications. **arXiv preprint arXiv:1806.03693**, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1806.03693>. Citado na página 13.
- SZABO, N. Formalizing and securing relationships on public networks. **First Monday**, v. 2, n. 9, 1997. Citado na página 13.
- TABATABAEI, M. H.; VITENBERG, R.; VEERARAGAVAN, N. R. Understanding blockchain: definitions, architecture, design, and system comparison. **arXiv preprint arXiv:2207.02264**, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2207.02264>. Citado na página 12.
- TAPSCOTT, D.; TAPSCOTT, A. **Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World**. New York, USA: Penguin, 2016. Citado na página 13.
- The Graph Foundation. **The Graph Documentation**. 2024. Acesso em: 3 nov. 2024. Disponível em: <https://thegraph.com/docs>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

Uniswap Foundation. **Uniswap: Decentralized Exchange Protocol**. 2018. Accessed: 2024-11-03. Disponível em: <<https://uniswap.org>>. Citado na página 23.

_____. **Uniswap on Polygon Documentation**. 2023. Accessed: 2024-11-03. Disponível em: <<https://docs.uniswap.org/protocol/V3/reference/deployments>>. Citado na página 23.

WANG, D.; WU, S.; LIN, Z.; WU, L.; YUAN, X.; ZHOU, Y.; WANG, H.; REN, K. Towards a first step to understand flash loan and its applications in defi ecosystem. **arXiv preprint arXiv:2010.12252**, Association for Computing Machinery, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2010.12252>>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 17, 18, 23 e 28.

WERNER, S. M.; PEREZ, D.; GUDGEON, L.; KLAGES-MUNDT, A.; HARZ, D.; KNOTTENBELT, W. J. Sok: Decentralized finance (defi). **arXiv preprint arXiv:2101.08778**, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2101.08778>>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 14, 23, 24 e 28.

WOOD, G. **Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger**. 2014. <<https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

YAGA, D.; MELL, P.; ROBY, N.; SCARFONE, K. Blockchain technology overview. **arXiv preprint arXiv:1906.11078**, 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1906.11078>>. Citado na página 13.

YOUSUF, R.; JEELANI, Z.; BHAT, O.; BHAT, J. I. Exploring defi: Foundations, applications, and challenges. In: _____. **Intelligent Signal Processing and RF Energy Harvesting for State of art 5G and B5G Networks**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 179–196. ISBN 978-981-99-8771-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-99-8771-9_11>. Citado na página 15.

ZHENG, Z.; XIE, S.; DAI, H.; CHEN, X.; WANG, H. An overview of blockchain explorers. In: **Proceedings of the IEEE International Conference on Blockchain**. Halifax, Canada: IEEE, 2018. p. 108–117. Citado na página 24.