

# Indo além da primeira camada: Modelagem e Avaliação de Desempenho de ZK-Rollups na plataforma Ethereum

Carlos Melo<sup>1</sup>, José Miqueias<sup>1</sup>, Glauber Gonçalves<sup>1</sup>, Francisco Airton Silva<sup>1</sup>,  
André Soares<sup>1</sup>, Johnnatan Messias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Caixa Postal – 64607-670 – Picos – PI – Brazil

<sup>2</sup>MPI-SWS  
Saarbrücken and Kaiserslautern, Germany.

{carlos.alexandre, jmiqueias, ggoncalves}@ufpi.edu.br

{faps, andre.soares}@ufpi.edu.br, johnme@mpi-sws.org

**Resumo.** Embora a transição da plataforma Ethereum para Proof-of-Stake e o surgimento de sidechains ofereçam soluções parciais para os problemas de escalabilidade, essas abordagens apresentam trade-offs entre segurança e complexidade de implementação. Para mitigar esses desafios, os ZK-Rollups surgiram como soluções de escalabilidade de Layer-2, combinando computação off-chain com verificação on-chain, garantindo segurança e descentralização na plataforma Ethereum. Este artigo propõe uma abordagem baseada em Redes de Petri Estocásticas para avaliar a viabilidade dos ZK-Rollups, considerando os principais fatores que impactam métricas de desempenho essenciais, como vazão e latência. Também analisamos a relação entre custo e benefício, incluindo o custo médio por transação e como este é impactado pelas métricas de desempenho. Os resultados mostram que uma maior adoção de transações na Layer-2 pode aumentar a vazão do sistema em até 20%, passando de 85 tps em um ambiente sem Layer-2 para 105 tps quando 90% das transações seguem por esse caminho. Por outro lado, a latência pode sofrer um aumento superior a 100% com a utilização de batches maiores na Layer-2.

**Abstract.** Although Ethereum's transition to Proof-of-Stake and the emergence of sidechains offer partial solutions to scalability issues, these approaches often introduce trade-offs related to security or implementation complexity. To address these challenges, ZK-Rollups have emerged as Layer-2 scalability solutions, combining off-chain computation with on-chain verification, ensuring both security and decentralization on the Ethereum platform. This paper proposes an approach based on Stochastic Petri Nets to assess the feasibility of ZK-Rollups, considering the key factors that impact essential performance metrics such as throughput and latency. We also analyze the cost-benefit relationship, including the average transaction cost and how it is affected by performance metrics. The results show that an increased adoption of transactions in Layer-2 can increase system throughput by up to 20%, rising from 85 tps in an environment without Layer-2 to 105 tps when 90% of transactions follow this path. On the other hand, latency can increase by more than 100% when larger batches are used in Layer-2.

## 1. Introdução

Blockchain é uma tecnologia descentralizada baseada em segurança e transparência de registros imutáveis distribuídos entre múltiplos nós em uma rede *peer-to-peer* [Nakamoto et al. 2008]. Desde a concepção do Bitcoin, a tecnologia blockchain evoluiu para englobar uma gama de aplicações, impulsionada principalmente pela introdução de *smart contracts* em plataformas como a Ethereum [Wood et al. 2014].

Apesar das inovações contínuas, as blockchains públicas enfrentam limitações de desempenho relacionadas ao trilema da escalabilidade [van Steen et al. 2021]. Esse trilema destaca o desafio de alcançar simultaneamente altos níveis de segurança, descentralização e escalabilidade [Hafid et al. 2020]. Implementações iniciais que utilizam mecanismos de consenso baseados em Proof-of-Work (PoW) priorizam segurança e descentralização em detrimento da escalabilidade, o que proporciona um impacto significativo na percepção do usuário. Como resultado, essas redes apresentam baixa vazão transacional e tempos médios de resposta (MRT) elevados em comparação com outras alternativas, como o Hyperledger Fabric [Thakkar et al. 2018]. Durante os períodos de alta demanda, isso resulta em congestionamento da rede e aumento nas taxas, dificultando uma adoção mais ampla, especialmente em domínios de computação intensiva com um alto número de transações concorrentes, como nas finanças descentralizadas.

Para mitigar as limitações de escalabilidade, a plataforma Ethereum adotou um mecanismo de consenso baseado em Proof-of-Stake (PoS) como solução de *Layer-1*. Essa mudança trouxe melhorias na eficiência e escalabilidade, reduzindo a demanda por recursos computacionais na validação de transações. Além das otimizações na *Layer-1*, soluções de escalabilidade *off-chain* ganharam destaque. As chamadas *sidechains*, que operam paralelamente à blockchain principal, oferecem maior vazão transacional. No entanto, muitas implementações de *sidechains* levantam preocupações de segurança devido ao uso de protocolos de consenso alternativos, que podem comprometer as garantias de segurança da blockchain principal. Em contrapartida, os *rollups* surgiram como uma solução popular de *Layer-2*, aproveitando os mecanismos de segurança da blockchain principal [Negka and Spathoulas 2021]. Os *rollups* processam transações *off-chain* e registram apenas as alterações de estado na *Layer-1* da Ethereum [Tas et al. 2022, Thibault et al. 2022]. Neste trabalho, utilizamos modelagem estocástica para avaliar o impacto real de uma solução baseada em *rollups* sobre o desempenho de um ambiente altamente volátil e descentralizado: a plataforma Ethereum.

Embora métodos empíricos sejam amplamente utilizados para avaliar o desempenho de blockchains [Hafid et al. 2020, Thakkar et al. 2018], eles frequentemente enfrentam dificuldades em capturar as complexidades dinâmicas de soluções de escalabilidade da *Layer-2*, como os *rollups*. Diversos estudos exploraram o desempenho dos *rollups* utilizando redes de teste [Gluchowski 2020], ferramentas de *benchmarking* [Chaliasos et al. 2024] e simulações [Thibault et al. 2022]. Essas abordagens, embora valiosas, podem demandar recursos computacionais e financeiros significativos [Sguanci et al. 2021] e apresentar limitações na generalização dos resultados obtidos para diferentes configurações de parâmetros ou condições de rede.

Este artigo utiliza Redes de Petri para simular condições de rede e cargas transacionais com base nos dados extraídos de [Chaliasos et al. 2024] e [Silva et al. 2024]. Nossa análise identifica os principais fatores que impactam o desempenho dos *rollups* e como

esses mecanismos influenciam a *Layer-1*, destacando seus pontos fortes e limitações em termos de latência e vazão. Além disso, avaliamos como parâmetros arquiteturais, como o tamanho do *batch* (número de transações em um lote da *Layer-2*) e seu tempo de processamento, afetam o custo diário e o custo transacional, ambos diretamente relacionados à vazão da *Layer-2*.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 revisa trabalhos relacionados sobre modelagem e avaliação de desempenho em blockchain. A Seção 3 apresenta uma visão geral do fluxo de transações na Ethereum, considerando uma *Layer-2*. A Seção 4 introduz o modelo proposto e suas aplicações. A Seção 5 apresenta estudos de caso e resultados de avaliação. Por fim, a Seção 6 conclui com considerações finais, limitações e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

O desempenho de serviços é essencial para sua adoção em qualquer segmento, isto também se aplica às aplicações hospedadas na blockchain. Embora um número significativo de pesquisas tenha explorado o desempenho de blockchains públicas, ainda falta uma estrutura abrangente para determinar a viabilidade e quantificar o impacto proporcionado por *sidechains* e *rollups*. Esta seção posiciona nosso trabalho no contexto da literatura existente, destacando as distinções entre nossa abordagem e a abordagem utilizada por outras pesquisas relevantes, com ênfase em contribuições que auxiliam na compreensão, utilização ou hospedagem de soluções de *Layer-2* para a plataforma Ethereum.

### 2.1. Avaliação de Desempenho em Blockchain

[Schäffer et al. 2019] investigam otimizações de desempenho em infraestruturas privadas da Ethereum. Embora seus resultados forneçam uma visão geral deste ambiente em microinfraestruturas gerenciáveis de blockchain, o presente trabalho concentra-se na rede pública da Ethereum e aos desafios específicos relacionados à escalabilidade com *rollups*. Diferentemente das blockchains privadas, as redes públicas exigem uma avaliação mais ampla e consideram fatores como descentralização e custos associados às transações.

Em trabalho anterior [Melo et al. 2024] nós estabelecemos uma base para a avaliação de desempenho da plataforma Hyperledger Fabric demonstrando a viabilidade do uso de modelos estocásticos na avaliação de blockchains. O presente trabalho amplia essa base ao se concentrar em blockchains públicas, particularmente a Ethereum, incorporando o aspecto crítico dos custos associados às soluções de escalabilidade da *Layer-2*, com foco em *rollups*.

### 2.2. Ethereum e *rollups*

Já [Ernstberger et al. 2024] avaliou o desempenho de *rollups* por meio da ferramenta zk-Bench. Essa ferramenta fornece os meios necessários à avaliação de desempenho em diferentes construções de *rollups*. No entanto, nosso trabalho foca no desenvolvimento de um modelo estocástico generalizável para avaliar o desempenho de um tipo específico de *rollup*, o Zero-Knowledge Rollup ou *ZK-Rollup*. Enquanto o zk-Bench visa o *micro-benchmarking* de *rollups*, nossa abordagem busca capturar a dinâmica de desempenho dos ZK-Rollups no contexto mais amplo de redes blockchain, considerando fatores como fluxo de transações, custos, utilização de recursos e condições de rede.

Estudos como o de [Chaliasos et al. 2024] analisam o *benchmarking* de ZK-Rollups, fornecendo dados sobre vazão e custo por transação de implementações específicas. Este artigo adota uma abordagem diferente ao construir modelos estocásticos que permitem uma avaliação generalizada de desempenho para diferentes tipos de ZK-Rollups, considerando a influência dos custos na escolha entre L1 e L2 na rede Ethereum. Essa abordagem oferece uma perspectiva mais ampla e flexível para otimizar o desempenho dos ZK-Rollups. É importante destacar que os dados de desempenho e infraestrutura extraídos de [Chaliasos et al. 2024] serão utilizados para alimentar e avaliar o modelo proposto pelo presente trabalho.

[Spain et al. 2020] investigam o impacto de períodos de alta demanda, particularmente durante *Initial Coin Offering* (ICOs) sobre a vazão e a latência transacional na rede Ethereum. Embora seu trabalho destaque a importância dos custos na Ethereum, nossa pesquisa se diferencia ao focar nas implicações de desempenho e custos do uso de ZK-Rollups como solução de escalabilidade. Ao incorporar a probabilidade de uma transação ser processada em *Layer-1* ou na *Layer-2*, nosso modelo busca oferecer uma compreensão mais abrangente de como os ZK-Rollups podem manter uma relação de custo-benefício considerando latência e vazão em relação ao custo de uma infraestrutura.

Por fim, [Silva et al. 2024] compilaram um conjunto de dados públicos para o *rollup* ZKsync Era, fornecendo dados do mundo real que possibilitam melhor compreender as características de desempenho dos ZK-Rollups. Embora nosso trabalho também se concentre na avaliação do desempenho do Ethereum com ZK-Rollups, adotamos uma abordagem diferente ao empregar modelos estocásticos que podem ser alimentados pelos dados de [Silva et al. 2024]. Essa abordagem permite explorar uma gama de cenários por meio de um conjunto de parâmetros ajustáveis com base nos requisitos do sistema. Este trabalho propõe um modelo estocástico generalizável para avaliar o desempenho e os custos transacionais associados aos ZK-Rollups.

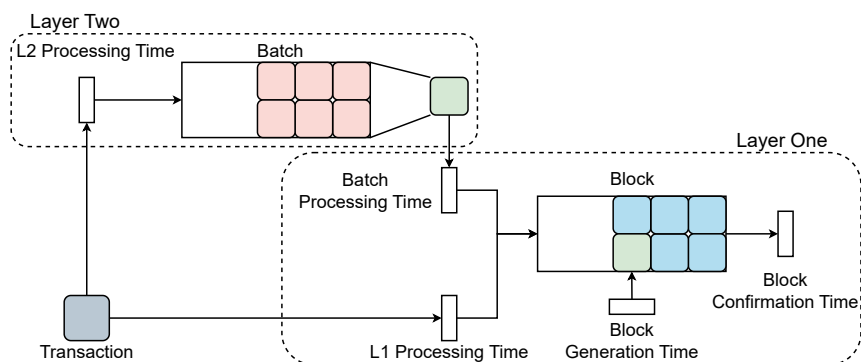
### 3. Rollups na Ethereum

Esta Seção apresenta os conceitos fundamentais para a compreensão da modelagem de desempenho no contexto de blockchain. Analisamos os princípios da Ethereum e seu fluxo de transações, abordando soluções de *Layer-1* e *Layer-2*. Destacando-se aqui o uso de Provas de Conhecimento Zero (*Zero-Knowledge Proofs*) e Redes de Petri Estocásticas como um formalismo apropriado para capturar suas complexidades.

A Ethereum consolidou-se como uma das principais plataformas blockchain, permitindo a execução de *smart contracts* e o desenvolvimento de aplicações distribuídas (*dApps*). A Figura 1 ilustra o fluxo de transações na rede Ethereum, detalhando os caminhos possíveis por meio da *Layer-1* e da *Layer-2*.

As transações partem de um cliente e o seu tipo depende da aplicação em uso, como a transferência de Ether (criptomoeda padrão da plataforma Ethereum) ou a execução de um *smart contract*. Essas transações são inseridas no *mempool*, que funciona como uma área de espera para transações pendentes e então transmitidas para atendimento na rede. A transação pode ser processada na *Layer-1* ou encaminhada para uma solução de alta escalabilidade como um *rollup* na *Layer-2* [Gudgeon et al. 2020].

As soluções de *Layer-2* aumentam a escalabilidade ao agrupar e verificar transações fora da *Layer-1*. Para transações processadas na *Layer-1*, os validadores va-



**Figura 1. Fluxo de Transacional na Plataforma Ethereum**

lidam e agrupam as transações em blocos, que são então adicionados à blockchain da Ethereum, tornando as transações permanentes e imutáveis. A seguir, detalha-se cada componente da Figura 1.

**Transaction:** na *Layer-1* envolve a transferência de dados ou ativos entre partes, como a transferência de Ether ou a execução de um *smart contract*;

**Batch:** ou lote é uma coleção de múltiplas transações processadas na *Layer-2*. Seu objetivo é agrupar transações e gerar uma única prova criptográfica que as valida e, então, as submete à *Layer-1* [Thibault et al. 2022].

**Block:** é um conjunto com transações validadas. Em sistemas de *Layer-2*, como os *ZK-Rollups*, uma vez que um *batch* é validado, seu resultado é submetido à *Layer-1* como uma atualização de estado e adicionado em um bloco [Marro and Donno 2022];

**Block Generation Time:** é o tempo médio necessário para que a rede gere um novo bloco [Yang et al. 2020].

**Processing Times:** é o tempo necessário para processar e validar transações, tanto na *Layer-1* quanto em soluções de *Layer-2*. Na *Layer-1*, esse tempo depende de fatores como tráfego da rede e taxas de gás [Yang et al. 2020]. Em soluções como *ZK-Rollups*, o processamento ocorre fora da blockchain, com apenas a prova sendo processada na *Layer-1*, reduzindo significativamente o tempo e a quantidade de recursos necessários [Sguanci et al. 2021].

**Block Confirmation Time:** é o tempo necessário para que um bloco seja adicionado à blockchain e considerado final, ou seja, imutável. No atual sistema de *Proof-of-Stake* da Ethereum, a finalização é alcançada por meio do mecanismo “Casper”. Apesar da produção rápida de blocos, que ocorre em segundos, a finalização pode levar alguns minutos, pois exige a confirmação de um número suficiente de validadores.

Os *rollups* são soluções de *Layer-2* projetadas para ampliar as capacidades de blockchains como a Ethereum. Essa abordagem processa transações em *batches* fora da cadeia principal (*off-chain*) e, em seguida, envia um resumo de volta à rede principal, aumentando a taxa de processamento e reduzindo os custos de transação para os usuários.

Existem dois tipos principais de *rollups*: os *Optimistic Rollups*<sup>1</sup> e os *Zero-Knowledge Rollups*<sup>2</sup>.

Os *Optimistic Rollups* partem do pressuposto de que todas as transações enviadas são válidas, a menos que seja provado o contrário. Eles agrupam várias transações *off-chain* e as publicam na *Layer-1* sem validação imediata. Validadores independentes monitoram essas transações e dispõem de um período específico para contestar qualquer atividade suspeita por meio de provas de fraude. Essa abordagem simplifica a implementação, mas pode causar atrasos devido ao período de contestação necessário para resolução de disputas.

Por outro lado, os *ZK-Rollups* utilizam mecanismos de validação imediata com provas de conhecimento zero (*Zero-Knowledge Proofs*)<sup>3</sup>. Em *ZK-Rollups*, cada *batch* de transações é acompanhado de uma prova criptográfica que confirma sua validade. Essa prova é gerada *off-chain* e submetida à cadeia principal da Ethereum para validação. Como a prova garante a validade de todas as transações do *batch*, não há necessidade de um período de contestação, resultando em maior rapidez na confirmação das transações e maior segurança. Embora os *ZK-Rollups* ofereçam maior eficiência e escalabilidade, seus cálculos criptográficos complexos implicam em custos mais altos de desenvolvimento e manutenção.

Este trabalho foca em métricas de desempenho associadas à *ZK-Rollups* e avalia vazão (transações por segundo), tempo médio de resposta, tempos de processamento em *batch* e custo transacional, porém o modelo desenvolvido também pode ser aplicado à *Optimistic Rollups* necessitando apenas de alterações em suas variáveis parametrizáveis. Também apresentamos uma análise de custos para determinar o equilíbrio entre transações que seguem um dos dois caminhos possíveis (*Layer-2* ou *Layer-1*), considerando probabilidades definidas por uma análise de sensibilidade [Frank 1978].

#### 4. Modelo Proposto

As Redes de Petri constituem uma família de formalismos utilizada para a modelagem de diversos sistemas, especialmente aqueles que envolvem mecanismos de concorrência, sincronização e comunicação [Murata 1989]. Elas permitem representar atrasos determinísticos e probabilísticos, sendo adequadas para a análise de sistemas complexos como blockchains. Este trabalho utiliza uma extensão específica das Redes de Petri conhecida como Redes de Petri Estocásticas (SPN), que associa atrasos estocásticos a transições temporizadas [Molloy 1981].

As Redes de Petri são compostas por dois elementos fundamentais: lugares e transições, conectados por arcos direcionados, formando um grafo bipartido [Murata 1989]. Os **lugares**, geralmente representados como círculos, armazenam *tokens* que indicam recursos ou condições no sistema. Já as **transições**, ilustradas como retângulos, representam possíveis eventos, consumindo *tokens* dos lugares de entrada e produzindo *tokens* nos lugares de saída.

Os **arcos** definem o fluxo de *tokens* entre lugares e transições [Maciel 2023]. Os

---

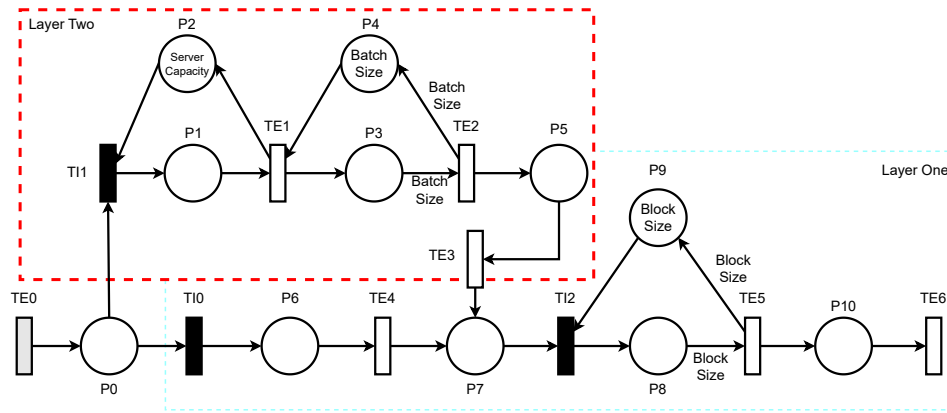
<sup>1</sup><https://ethereum.org/en/developers/docs/scaling/optimistic-rollups/>

<sup>2</sup><https://ethereum.org/en/developers/docs/scaling/zk-rollups>

<sup>3</sup><https://chain.link/education-hub/zero-knowledge-rollup>

**pesos** atribuídos aos arcos especificam a quantidade de *tokens* consumidos ou produzidos por uma transição. As transições podem ser categorizadas como temporizadas, determinísticas ou imediatas, influenciando o momento e as condições de sua ativação ou disparo. Além disso, **guardas** ou condições lógicas associadas às transições adicionam um nível extra de controle, permitindo que as transições ocorram apenas quando condições específicas são atendidas.

A Figura 2 apresenta uma SPN baseada na arquitetura de alto nível da plataforma Ethereum (ver Figura 1). Este modelo representa cada etapa do fluxo de transações, destacando explicitamente a interação entre a *Layer-1* e *Layer-2*. A representação do modelo e a computação dos resultados da análise numérica foram obtidos com a ferramenta Mercury [Maciel et al. 2017].



**Figura 2. Rede de Petri Estocástica para a plataforma Ethereum**

O modelo proposto pode ser interpretado sequencialmente, a partir do canto superior esquerdo e progredindo para a direita. As transações entram no sistema através do disparo da transição **TE0**, que corresponde ao tempo de chegada entre transações e segue uma distribuição exponencial.

Após a entrada, uma transação alcança o estado intermediário **P0** e pode ser direcionada para a *Layer-1* ou para a *Layer-2*. A *Layer-1* está representada dentro de linhas tracejadas em azul, enquanto a *Layer-2* é delimitada pelas linhas tracejadas em vermelho. A transição imediata **TI0** direciona as transações para a *Layer-1*, enquanto a transição **TI1** as encaminha para a *Layer-2*.

É importante destacar que as transições **TI0** e **TI1** possuem pesos associados, permitindo a definição de probabilidades para que uma transação siga um dentre os dois possíveis caminhos disponíveis. Esse mecanismo de roteamento probabilístico possui implicações significativas em termos de desempenho e custo, como veremos nas análises subsequentes deste trabalho.

#### 4.1. Caminho pela *Layer-1*

Ao atingir o estado **P6** na *Layer-1*, uma transação passa por um processo de validação (transição **TE4**). O tempo associado a essa transição reflete o tempo médio de processamento de transações na *Layer-1* da Ethereum. Após a validação, a transação avança para o estado **P7**, onde aguarda inclusão em um bloco, juntamente com outras transações, por meio da transição imediata **TI2**.

O tamanho do bloco da *Layer-1*, um parâmetro publicamente disponível, é representado no modelo como uma fila composta pelos lugares **P8** e **P9**. As transações que chegam ao bloco a partir da transição **TI2** permanecem nessa fila até que o bloco atinja seu tamanho designado. Quando o lugar **P8** acumula um número de *tokens* equivalente ao “Block Size”, o lugar **P9** é esvaziado, indicando que o bloco está completo.

Nesse ponto, todas as transações do bloco são consolidadas em um *token* e direcionadas pela transição exponencial **TE5**. O tempo dessa transição corresponde ao de geração de blocos. À medida que um novo bloco é gerado, o bloco anterior é movido para o lugar **P10**, onde aguarda por sua persistência na blockchain. Esta etapa é representada pela transição exponencial **TE6**, cujo tempo reflete o tempo necessário para que o bloco alcance a finalização.

## 4.2. Caminho na *Layer-2*

Quando as transações são direcionadas para a *Layer-2*, assume-se uma quantidade limitada de recursos. Essa limitação é representada no modelo por uma fila composta pelos lugares **P1** e **P2**, simbolizando a capacidade do servidor, relacionada ao número de vCPUs disponíveis na *Layer-2*. Essa configuração difere da *Layer-1*, pois não há uma forma direta de determinar o tamanho da *Layer-1* ou do *mempool*, o que leva à abstração de uma quantidade infinita de recursos para validação de transações. Nosso modelo para a *Layer-2* opera em um ambiente controlado, garantindo uma alocação previsível e confiável de recursos.

Ao chegar na *Layer-2*, as transações passam por um processo rápido de avaliação antes de serem direcionadas para uma fila que representa um *batch*. Esse mecanismo de formação de *batches* é análogo à formação de blocos na *Layer-1*, sendo a transição para a fila de *batches* acionada pelo disparo da transição **TE1**.

O tamanho de cada *batch* depende da solução específica de *Layer-2* empregada. *Batches* maiores, embora possam acomodar mais transações, requerem mais tempo para atingir sua capacidade total e serem enviados para a *Layer-1*. Consequentemente, as transações em *batches* maiores experimentam tempos de finalização mais longos. Por outro lado, *batches* menores são submetidos à *Layer-1* com maior frequência, resultando em custos mais elevados de *gas* para os usuários.

Uma vez cheio, o *batch* é representado como um único *token* e transferido para o lugar **P5** por meio da transição **TE2**. O tempo dessa transição reflete o tempo necessário para consolidar todas as transações do *batch*. Subsequentemente, o *batch* é submetido à *Layer-1* como uma única transação, acompanhado pela prova necessária para validar sua autenticidade. Essa etapa é representada pela transição **TE3**, cujo tempo corresponde ao tempo de avaliação da prova ou ao processamento do *batch*. Após alcançar a *Layer-1*, o *batch* passa pelas mesmas etapas das transações enviadas diretamente para a *Layer-1*.

## 5. Estudos de Caso

Esta seção apresenta três estudos de caso que demonstram a viabilidade do modelo proposto. O primeiro estudo de caso realiza uma avaliação geral do sistema, considerando ambas as camadas e analisando o impacto na vazão (transações por segundo) e na latência (segundos). No segundo estudo de caso, investigamos como o tempo de processamento e o tamanho dos *batches* influenciam a vazão do submodelo que representa a segunda



camada. Por fim, o terceiro estudo de caso explora a relação entre custo e benefício, considerando métricas-chave de desempenho em ambas as camadas e o custo médio por transação, com base nos experimentos apresentados em [Chaliasos et al. 2024].

A Tabela 1 apresenta os dados de entrada para a avaliação do modelo proposto, utilizando-se a ferramenta Mercury. Os valores da *Layer-1* refletem dados reais da Ethereum e foram extraídos da plataforma etherscan.io, enquanto os dados da *Layer-2* foram ajustados para representar características de ZK-Rollups e obtidos de [Chaliasos et al. 2024] e [Silva et al. 2024].

**Tabela 1. Parâmetros de Entrada e Variações para o Modelo Proposto**

Fator	Valor Base	Variação {min,max}
Arrival (TE0)	$\approx 13.7\text{tps}$	{-}
Probabilidade de L2	90%	{0%, 100%}
Probabilidade de L1	10%	{0%, 100%}
Layer One Processing Time (TE4)	$\approx 12.98\text{s}$	{-}
Layer Two Processing Time (TE1)	100ms	{50ms, 200ms}
Block Generation Time (TE5)	13s	{-}
Block Confirmation Time (TE6)	60s	{-}
Batch Processing Time (TE2)	1075s	{600s, 1800s}
Batch Generation Time (TE3)	1s	{0.5s, 1.5s}
Tamanho do Batch	5000	{1000, 10000}
Server Capacity	32	{16, 64}
Block Size	167	{-}

Os dados utilizados por nossos estudos de caso e relacionados à *Layer-1* ou rede principal da plataforma Ethereum foram extraídos da plataforma etherscan.io e não sofrem variação em nossas análises pelo simples fato de não estarem sob controle de seus usuários. Além disso, a maioria das suas configurações é inerente à própria plataforma, como, por exemplo, o tamanho do bloco e a taxa de chegada de transações (*Arrival*). Consequentemente, os valores mínimos e máximos para esses componentes são definidos por seus valores base.

### 5.1. Estudo de Caso I - Métricas-chave e a Layer-1

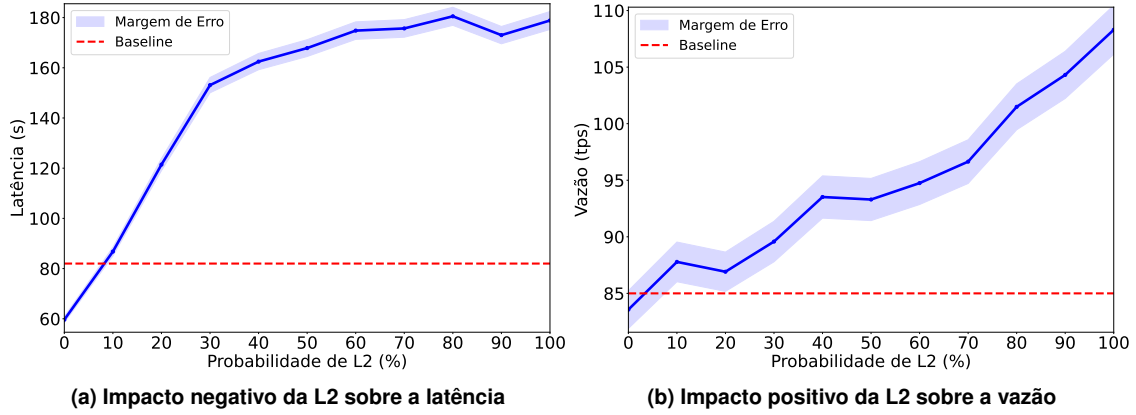
O primeiro estudo de caso consiste na avaliação da latência em segundos e da vazão do sistema em transações por segundo, incluindo-se aqui o relacionamento entre ambas as camadas até a persistência das transações submetidas ao sistema. A latência pode ser calculada utilizando-se a Lei de Little [Jain 1991]. Essa lei estabelece uma relação entre o número médio de transações pendentes em um sistema e o tempo de chegada entre transações.

A Equação (1) é utilizada para calcular a latência do modelo proposto, onde  $P(m(\text{Place}) = i)$  representa a probabilidade de observar  $i$  tokens nos possíveis locais (P0, P1, P3, P6 e P8) dentro do sistema em relação ao tempo de chegada.

$$E(\text{Place}) = \sum_{i=1}^n P(m(\text{Place}) = i) \times i, \quad (1)$$

A Figura 3a ilustra como a latência do sistema aumenta à medida que cresce a probabilidade de uma transação ser processada pela *Layer-2*. Esse comportamento está

diretamente ligado à demora na persistência de blocos completos na primeira camada. Esse efeito pode ser amplificado pelo fato de que os *batches*, que são ainda maiores do que os blocos, precisam ser enviados para validação na *Layer-1* e armazenados com as demais transações.



**Figura 3. Latência e Vazão x Probabilidade das transações seguirem pela Layer-2**

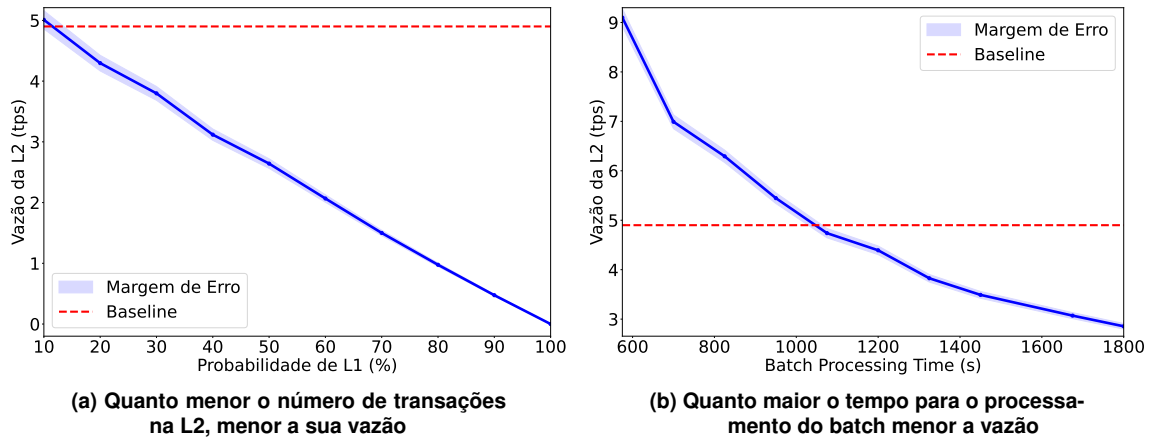
A vazão, por sua vez, é definida como o número de transações processadas com sucesso por unidade de tempo [Thakkar et al. 2018]. No modelo proposto, calculamos as métricas de vazão separadamente para a *Layer-1* e a *Layer-2*. A Equação (2) descreve como esse cálculo é realizado. O termo  $E$  representa o número esperado de transações em cada camada, enquanto o tempo  $t$  refere-se ao período necessário para que as transições  $TE3$  e  $TE6$  disparem. Essas transições correspondem, respectivamente, ao Tempo de Processamento da *Layer-1* e da *Layer-2*, considerando que os blocos armazenam *batches* já processados como transações e este cenário denota a importância da *Layer-2* no modelo atual e do seu impacto sobre a latência e experiência do usuário.

$$\text{Vazão} = \frac{E(\text{Place})}{t(\text{Transition})} \quad (2)$$

A Figura 3b mostra o crescimento da vazão geral do sistema conforme a probabilidade das transações seguirem pela *Layer-2* cresce. Quanto maior a vazão, melhor; quanto maior a latência, pior. Essa relação é importante sob a perspectiva do usuário que espera que sua transação seja persistida na blockchain o mais rápido possível. Deste modo, os parâmetros atualmente definidos para a nossa avaliação da *Layer-2* demonstram impacto positivo sobre a vazão do sistema. A vazão em transações por segundo cresce aproximadamente 20% para o cenário avaliado, chegando à aproximadamente 110 tps em um cenário onde 90% das transações seguem pela *Layer-2* contra 85 tps em um cenário onde 90% das transações seguem pela *Layer-1*.

## 5.2. Estudo de Caso II - Explorando a segunda camada

A vazão do subsistema representado pela *Layer-2* aumenta à medida que a probabilidade de transações nesta camada cresce, conforme ilustrado na Figura 4a. No entanto, esse crescimento de aproximadamente 20% é modesto quando comparado ao impacto negativo causado por outro fator diretamente relacionado ao *batch*: o tempo de processamento.



**Figura 4. Vazão da L2 x Probabilidade de L2 e Batch Processing Time**

Quanto maior o *batch*, maior o tempo de processamento e, consequentemente, menor a vazão do sistema.

No cenário base (*baseline*), considerando um *batch processing time* de 1075 segundos, a vazão foi de 4,9 tps, mas caiu para menos de 3 tps em cenários com um *batch processing time* de 1800 segundos. No sentido oposto, um *batch processing time* de 600 segundos quase dobra a vazão do sistema. Em outras palavras, blocos menores resultam em maior vazão, como evidenciado na Figura 4b. Contudo, essa melhoria na vazão implica um custo mais elevado para o usuário.

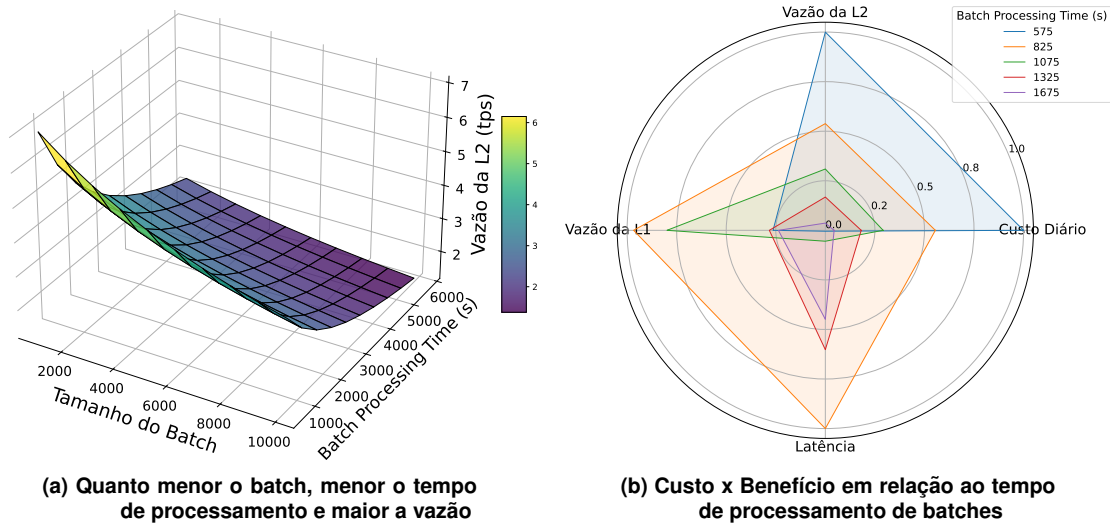
### 5.3. Estudo de Caso III - Custo x Benefício

A Figura 5a ilustra o relacionamento entre o tamanho do *batch* e o tempo de processamento (parâmetros do modelo) e o impacto desses na vazão da *Layer-2*. A análise dessa relação visa indicar configurações ideais para esses dois parâmetros e, por conseguinte, a estimativa de vazão alcançada. Observa-se que essa análise considera apenas o desempenho do submodelo da segunda camada, onde *batches* menores são benéficos para o usuário, que busca uma persistência mais rápida de suas transações e *batches* propiciam uma redução de custos para aqueles que almejam economizar em suas transações. O tempo de processamento, por sua vez, é diretamente associado ao tamanho do *batch* que, por sua vez, está associado ao tipo de *rollups* utilizado e varia de apenas algumas dezenas de transações na Polygon [Chaliasos et al. 2024], para milhares de transações como na ZKsync Era avaliada no presente trabalho. A escolha final fica a cargo do administrador do nó, que é responsável por adaptá-lo às necessidades do usuário e ao lucro almejado.

No entanto, ao considerar o custo, *batches* menores acabam sendo menos vantajosos, pois precisam ser enviados com mais frequência à rede principal, o que eleva a taxa repassada aos usuários. Esse efeito é ilustrado na Figura 5b, onde o custo avaliado tem como base o valor apresentado por [Chaliasos et al. 2024], que estimou um custo médio de \$0,00486 por transação em um nó disponibilizado na Google Cloud Platform<sup>4</sup>.

As métricas foram normalizadas no intervalo de 0 a 1, uma vez que cada uma apresenta um intervalo próprio de variação. Valores mais próximos do centro indicam um impacto menor, enquanto valores mais afastados indicam um impacto maior, atingindo

<sup>4</sup><https://gcloud-compute.com/grid.html?name=g2-standard-32>



**Figura 5. Relação entre custo e benefício na L2**

seu máximo quando próximos de 1. Isso significa que, quanto maior a distância em relação ao centro, maior o efeito do tempo de processamento do *batch* sobre a métrica analisada.

Como pode ser observado, tempos menores de processamento do *batch* resultam em uma maior vazão na segunda camada. O custo diário é calculado com base no número de transações processadas ao longo do dia no nó da segunda camada. Quanto maior o volume de transações, maior o custo operacional diário. Por fim, tempos médios de processamento do *batch* favorecem uma maior vazão na primeira camada, mas também resultam em uma latência geral mais alta no sistema, devido à redução no fluxo de transações provenientes da *Layer-2*, como observado no primeiro estudo de caso.

## 6. Conclusão

Este artigo abordou a escalabilidade em blockchains, com foco em *ZK-Rollups* como uma solução de *Layer-2* para enfrentar as limitações de desempenho em blockchains públicas como a Ethereum. Embora a transição da Ethereum para o mecanismo de consenso *Proof-of-Stake* e o surgimento de *sidechains* tenham mitigado alguns gargalos de desempenho, essas abordagens frequentemente envolvem concessões relacionadas à segurança ou introduzem complexidades na implementação. Em contraste, os *ZK-Rollups* oferecem uma vantagem específica ao utilizarem computação *off-chain* e verificação *on-chain* em conformidade com os requisitos da Ethereum, aumentando a taxa de processamento de transações sem comprometer a segurança.

Adicionalmente, este artigo apresentou um modelo generalizável de desempenho baseado em Redes de Petri Estocásticas, que possibilita a simulação de condições de rede e cargas de trabalho por meio de variáveis parametrizáveis. Esse *framework* proporciona uma visão abrangente sobre o comportamento dos *ZK-Rollups*.

Os resultados obtidos oferecem subsídios para aqueles interessados em adquirir, prover ou utilizar *ZK-Rollups* como uma solução de *Layer-2*, ao fornecer meios para identificar os fatores que influenciam o desempenho dos *ZK-Rollups*. Além disso, desta-

que para os aspectos como latência, vazão e como os tamanhos de batches e os tempos necessários ao seu processamento impactam diretamente os custos por transação. Como trabalhos futuros, propomos a validação experimental do modelo com foco em *ZK-rollups* e a generalização do proposto para outras tecnologias de segunda camada como os *optimistic rollups*.

## Referências

- Chaliasos, S., Reif, I., Torralba-Agell, A., Ernstberger, J., Kattis, A., and Livshits, B. (2024). Analyzing and benchmarking zk-rollups. *Cryptology ePrint Archive*.
- Ernstberger, J., Chaliasos, S., Kadianakis, G., Steinhorst, S., Jovanovic, P., Gervais, A., Livshits, B., and Orrù, M. (2024). zk-bench: A toolset for comparative evaluation and performance benchmarking of snarks. In *International Conference on Security and Cryptography for Networks*, pages 46–72. Springer.
- Frank, P. M. (1978). *Introduction to Sensitivity Analysis*. Academic.
- Gluchowski, A. (2020). Evaluating ethereum l2 scaling solutions: A comparison framework. *Accessed: Apr, 18:2022*.
- Gudgeon, L., Moreno-Sanchez, P., Roos, S., McCorry, P., and Gervais, A. (2020). Sok: Layer-two blockchain protocols. In *Financial Cryptography and Data Security: 24th International Conference, FC 2020, Kota Kinabalu, Malaysia, February 10–14, 2020 Revised Selected Papers 24*, pages 201–226. Springer.
- Hafid, A., Hafid, A. S., and Samih, M. (2020). Scaling blockchains: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 8:125244–125262.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Maciel, P., Matos, R., Silva, B., Figueiredo, J., Oliveira, D., Fé, I., Maciel, R., and Dantas, J. (2017). Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, expolynomial, and general distributions. In *Proc. of PRDC*, pages 50–57. IEEE.
- Maciel, P. R. M. (2023). *Performance, reliability, and availability evaluation of computational systems, volume I: performance and background*. CRC Press.
- Marro, S. and Donno, L. (2022). Green nfts: A study on the environmental impact of cryptoart technologies.
- Melo, C., Gonçalves, G., Silva, F. A., and Soares, A. (2024). Performance modeling and evaluation of hyperledger fabric: An analysis based on transaction flow and endorsement policies. In *2024 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6. IEEE.
- Molloy, M. K. (1981). *On the Integration of Delay and Throughput Measures in Distributed Processing Models*. PhD thesis, University of California, Los Angeles, USA. AAI8201138.
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4):541–580.

- Nakamoto, S. et al. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.
- Negka, L. D. and Spathoulas, G. P. (2021). Blockchain state channels: A state of the art. *IEEE Access*, 9:160277–160298.
- Schäffer, M., Di Angelo, M., and Salzer, G. (2019). Performance and scalability of private ethereum blockchains. In *Business Process Management: Blockchain and Central and Eastern Europe Forum: BPM 2019 Blockchain and CEE Forum, Vienna, Austria, September 1–6, 2019, Proceedings 17*, pages 103–118. Springer.
- Sguanci, C., Spatafora, R., and Vergani, A. M. (2021). Layer 2 blockchain scaling: A survey. *arXiv preprint arXiv:2107.10881*.
- Silva, M. I., Messias, J., and Livshits, B. (2024). A public dataset for the zksync rollup. *arXiv preprint arXiv:2407.18699*.
- Spain, M., Foley, S., and Gramoli, V. (2020). The impact of ethereum throughput and fees on transaction latency during icos. In *International Conference on Blockchain Economics, Security and Protocols (Tokenomics 2019)*, pages 1–15. Schloss-Dagstuhl-Leibniz Zentrum für Informatik.
- Tas, E. N., Adler, J., Al-Bassam, M., Khoffi, I., Tse, D., and Vaziri, N. (2022). Accountable safety for rollups.
- Thakkar, P., Nathan, S., and Viswanathan, B. (2018). Performance benchmarking and optimizing hyperledger fabric blockchain platform. In *2018 IEEE 26th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, pages 264–276. IEEE.
- Thibault, L. T., Sarry, T., and Hafid, A. S. (2022). Blockchain scaling using rollups: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 10:93039–93054.
- van Steen, M., Chien, A. A., and Eugster, P. (2021). The difficulty in scaling blockchains: A simple explanation. *CoRR*, abs/2103.01487.
- Wood, G. et al. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum project yellow paper*, 151(2014):1–32.
- Yang, D., Long, C., Xu, H., and Peng, S. (2020). A review on scalability of blockchain. In *Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Blockchain Technology, ICBCT '20*, page 1–6, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.