Comparação e Análise de Custo e Desempenho entre Nós de Redes Blockchain Permissionadas e Públicas

Ronan Dutra Mendonça[1], **Ericksulino Manoel de Araújo Moura**[2]
Glauber Dias Gonçalves[2], **Alex Borges Vieira**[3], **José A. M. Nacif**[1]

[1]Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Florestal, MG – Brasil
[2]Universidade Federal do Piaui (UFPI) – Picos, PI – Brasil
[3]Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) – Juiz de Fora, MG – Brasil

{ronan.dutra,jnacif}@ufv.br,{ericksulino,ggoncalves}@ufpi.edu.br

alex.borges@ufjf.edu.br

Resumo. *Blockchain é uma tecnologia que amplia a segurança nas relações entre organizações via o registro auditável e descentralizado de transações. Notadamente, há uma crescente atenção por aplicações que utilizam essa tecnologia. Entretanto, a eficiência e custo de tais aplicações pode ser influenciada pela rede blockchain utilizada. De fato, a escolha da rede impacta nas qualidades não funcionais das aplicações, em especial desempenho (e.g., em relação a taxa de transações efetivadas) e custo. Este artigo investiga o impacto no desempenho e custo da infraestrutura de rede blockchain para lidar com uma determinada carga de trabalho. Primeiramente, este artigo propõe um modelo de arquitetura de rede comum entre a rede pública Ethereum e permissionada Hyperledger Fabric com base em recursos por nó par da rede blockchain. A seguir, avalia-se o custo por transação para aplicações nessa arquitetura considerando latências e custos mínimos para os pares da rede, em função da carga de trabalho. Os experimentos realizados nas plataformas mais populares para redes blockchain, Ethereum e Hyperledger Fabric, mostram os limites de escalabilidade dessas plataformas e os seus compromissos entre custo e desempenho no projeto de aplicações baseadas em blockchain.*

Abstract. *Blockchain is a technology that increases security in relationships between organizations via the auditable and decentralized recording of transactions. Notably, there is growing attention to applications that use this technology. Moreover, the network choice impacts applications' non-functional requirements, especially performance and cost. This paper investigates the performance and cost impact of blockchain network infrastructure to handle a given workload. First, this article proposed a common network architecture model between public and permissioned networks based on resources per blockchain network peer node. Next, the cost per transaction for applications in this architecture was analyzed considering latencies and minimum costs for network peers, depending on the workload. Finally, experiments performed on the most popular platforms for public and permissioned blockchain networks, Ethereum and Hyperledger Fabric, show the scalability limits of these platforms and their trade-offs between cost and performance in the design of blockchain-based applications.*

1. Introdução

Blockchain é uma tecnologia disruptiva com impactos nas relações entre pessoas, consumo e produção de bens e serviços [Xu et al. 2019]. Essa tecnologia possibilita o registro seguro e descentralizado de dados ou transações entre entidades (pessoas e/ou organizações) que podem não se conhecer, e assim não terem confiança mútua. Logo, os dados e transações entre essas entidades são registrados de forma imutável, com acesso público ou privado para fins de verificação de autenticidade e derivação de novas transações. Isso se tornou possível a partir da evolução e unificação de outras tecnologias como criptografia assimétrica e protocolos de consenso distribuído via comunicação par a par, que são a essência de blockchains [Greve et al. 2018].

Existe um crescente interesse por novas aplicações derivadas dessa tecnologia no meio corporativo e nos serviços públicos, além das já conhecidas aplicações para cripto ativos Bitcoin e Ethereum [Nakamoto 2008, Wood 2014]. Os recursos da tecnologia blockchain como os *contratos inteligentes* estendem o seu uso em diferentes domínios de aplicação corporativas [Xu et al. 2019]. Contudo, essa tecnologia encontra-se ainda em fase de amadurecimento e necessita de ferramentas para gerenciamento de custos e recursos computacionais (i.e., infraestrutura) que permitirão a sua adoção por organizações em setores como indústria, serviços e governos. Atualmente os modelos de infraestrutura mais adotados para a tecnologia blockchain são *redes públicas* e *permissionadas* cada uma com características de desempenho e custos específicas.

As redes blockchain públicas foram as primeiras a serem desenvolvidas e são ainda as mais utilizadas. Plataformas populares como Ethereum permitem o desenvolvimento e execução de contratos inteligentes, sem restrição ao acesso ou uso desses recursos e constituem um intricado ecossistema de aplicações descentralizadas (DApps). Contudo, transações nessas redes podem levar minutos para serem confirmadas dado o grande número de usuários que as submetem e o consenso distribuído realizado pelos nós mantenedores da rede para validar transações[1]. Esses nós têm direito de gerar novos ativos (ou moeda) e adquiri-los (mineração), assim como cobrar tarifa aos usuários por transação confirmada. Uma aplicação em rede pública requer um nó provedor de acesso para encaminhar transações requisitadas pelos seus usuários aos nós mantenedores. Existem provedores de acesso tais como a AWS[2], Alchemy[3], QuickNode[4] e Infura[5] que oferecem recursos de infraestrutura para esse nó como um serviço para facilitar o desenvolvimento de aplicações. Logo, o custo da aplicação consiste primordialmente no recurso computacional do nó provedor, ao passo que o usuário geralmente arca com a tarifa da transação.

Por sua vez, uma rede blockchain permissionada [Androulaki and et al. 2018] é uma alternativa atrativa para organizações que possuem infraestrutura e corpo técnico próprios, visando escapar de questões de custos (tarifação) e desempenho instáveis das redes blockchains públicas como Ethereum e Bitcoin. Hyperledger Fabric é uma das

[1]Desempenho da rede Ethereum em tempo real: https://etherscan.io
[2]https://docs.aws.amazon.com/blockchain-templates/
[3]https://www.alchemy.com/
[4]https://www.quicknode.com/
[5]https://infura.io

plataformas para blockchains permissionadas mais populares atualmente[6] com recursos para a implantação de uma infraestrutura de rede privada entre organizações e desenvolvimento de aplicações no topo dessa rede. Nesse caso, os participantes da rede formam um consórcio e arcam com o custo da infraestrutura, buscando ganhos no desempenho em relação às redes blockchain públicas.

Nesse contexto, entender as características das infraestruturas computacionais para implantação e o funcionamento de uma rede blockchain é essencial para orientar o corpo técnico e executivo das organizações a planejarem uma possível adoção dessa tecnologia. Esses atores necessitam avaliar os modelos de rede pública ou permissionada e o problema em questão é entender requisitos não funcionais essenciais de cada modelo, em especial aspectos de custo e desempenho, assim como o compromisso entre ambos para planejar adequadamente as aplicações que funcionarão no topo da rede blockchain.

A maioria das propostas da literatura que lidam com essa questão focam em aplicações específicas para rede pública [Leal et al. 2020, Rouhani and Deters 2017, Zhang et al. 2020] ou rede permissionada [Baliga et al. 2018, Thakkar et al. 2018, Wang and Chu 2020, Xu et al. 2021]. Alguns trabalhos ainda focam na análise de uma aplicação típica para ambas as redes [Monrat et al. 2020, Malik et al. 2019]. Contudo, nenhuma dessas propostas busca identificar a infraestrutura, especificamente a arquitetura do nó da rede, considerando ao mesmo tempo os fatores desempenho e custo para uma organização participar de uma rede blockchain pública ou permissionada, que são representadas neste trabalho pelas plataformas Ethereum e Hyperledger Fabric.

Este artigo tem o objetivo de preencher essa lacuna com duas contribuições principais. Inicialmente, este trabalho apresenta uma arquitetura de nó de redes blockchain públicas e permissionadas que permite a uma organização analisar as vantagens em termos de custo e desempenho considerando cada um desses modelos de rede em função da carga de trabalho esperada. Além disso, este trabalho apresenta uma avaliação experimental da arquitetura proposta tendo em vista nós com diferentes capacidades computacionais em Ethereum e Hyperledger Fabric que são, respectivamente, as plataformas públicas e permissionadas mais populares para redes blockchain atualmente. Esta avaliação evidencia os melhores compromissos entre custo e desempenho para cada uma dessas plataformas.

Os experimentos conduzidos neste artigo mostram que um nó Ethereum com capacidade computacional básica (i.e., baixo custo) pode executar cargas intensas (200 transações por segundo – TPS) com alto nível de desempenho (latência média de 9 e 11 segundos) para redes blockchains públicas, apesar do alto consumo de processamento. Nesse caso, foi salientado que a arquitetura proposta leva ao melhor compromisso entre custo e desempenho, pois aumentos do poder computacional não levam à redução de latência. Por sua vez, na plataforma Hyperledger Fabric, o poder computacional de um nó é um fator importante dado que se espera alto desempenho (baixa latência de transação) em redes permissionadas. Nesse modelo de rede, dois tipos de nós são recomendados, considerando o melhor compromisso entre custo e desempenho: um nó básico (baixo custo) para cargas menores que 140 TPS, e a partir dessa marca, um nó intermediário alcança latência média abaixo de 0,2 segundos.

As próximas seções são organizadas como segue: a Seção 2, apresenta os traba-

[6]https://www.ibm.com/topics/hyperledger

lhos relacionados. A Seção 3 apresenta uma arquitetura e sua aplicação às plataformas Ethereum e Hyperledger Fabric. A Seção 4 mostra a metodologia utilizada, as avaliações experimentais considerando a arquitetura proposta com as duas plataformas e detalhamento dos resultados alcançados. Finalmente, a Seção 5 expõe as considerações finais.

2. Trabalhos Relacionados

Existem disponíveis na literatura trabalhos que abordam a avaliação de custos e desempenho de plataformas Blockchains, porém não realizando comparação com infraestruturas e plataformas diferentes. Grande parte desses estudos apresentam avaliações específicas para uma plataforma. Dessa maneira, os parâmetros e requisitos considerados impossibilitam a escolha da melhor plataforma e infraestrutura necessárias para as quais as aplicações serão projetadas. Portanto, esta seção sintetiza alguns trabalhos relacionados à avaliação de custos e desempenho de plataformas Blockchains.

O trabalho desenvolvido por [Rimba et al. 2020] investigou a questão do custo monetário de utilizar uma plataforma blockchain em comparação com uma infraestrutura de armazenamento em nuvem. Por meio de modelos de custo para processos de negócios, os autores compararam os custos na plataforma Ethereum e Amazons Simple Workflow Service (SWF). Os resultados apontaram uma grande variação de custo entre as duas soluções. O custo do blockchain Ethereum é, pelo menos, o dobro dos serviços tradicionais de nuvem fornecidos pelo Amazon SWF. Nosso trabalho se diferencia ao apresentar um modelo de custo para comparação da infraestrutura necessária para manter o provimento da plataforma blockchain, sendo ela pública ou permissionada.

[Baliga et al. 2018, Thakkar et al. 2018, Wang and Chu 2020] analisaram o desempenho da plataforma Hyperledger Fabric. A abordagem de [Baliga et al. 2018] utilizou a ferramenta Hyperledger Caliper sob diferentes configurações para avaliar a latência e a taxa de transferência do Hyperledger Fabric. Avaliaram também o desempenho variando o número de *chaincodes*, *channels* e *peers*. Concluíram que a taxa de transferência é sensível às configurações e que a latência é significativamente afetada pelo tamanho da carga utilizada. [Thakkar et al. 2018] testou duas abordagens para avaliação de desempenho, otimização de cache e configuração de políticas de endosso. Como contribuição, os autores descreveram orientações sobre a configuração de parâmetros da rede e também os principais gargalos de desempenho. Em [Wang and Chu 2020], os autores caracterizaram o desempenho das três fases de uma transação (endosso, execução e validação), sendo que a fase de execução mostrou boa escalabilidade de desempenho, ao passo que a validação obteve desempenho pior devido a carga computacional mais intensa sob o nó nessa fase. Contudo, os autores concluíram que variações na política de endosso, i.e., número mínimo de pares para aprovar uma transação, foi o principal fator na variação do desempenho. Seguindo recomendações desses trabalhos, utilizamos a política de endosso padrão da plataforma: 50% mais um pares.

Os artigos [Leal et al. 2020, Rouhani and Deters 2017, Zhang et al. 2020] fornecem avaliação de desempenho de redes blockchain privadas baseadas na plataforma blockchain Ethereum de código aberto. [Leal et al. 2020] avaliam o desempenho da rede utilizando um conjunto de dados para definir a configuração ideal. Eles utilizaram diferentes custos, algoritmos de consenso, e número de nós de rede para determinar a

configuração. Como contribuição é fornecida uma forma para encontrar a configuração ideal para um determinado número de transações exigidas por determinado caso de uso. O trabalho de [Rouhani and Deters 2017] mostrou que o desempenho da rede Ethereum depende, além da configuração da rede, da implementação do cliente utilizada. O estudo mostra que o cliente Parity obteve desempenho significativamente melhor do que o cliente Geth. Em [Choi and Hong 2021], os autores utilizaram o Hyperledger Caliper para avaliar a rede Ethereum. Os resultados mostram que o desempenho das transações pode diferir de acordo com seu conteúdo e configuração da rede.

Existem estudos de análise de desempenho Blockchain que avaliam e comparam as plataformas Hyperledger Fabric e Ethereum. E.g., em [Monrat et al. 2020] é realizada uma análise de desempenho e escalabilidade, variando as cargas de trabalho, das plataformas Ethereum, Quorum, Corda e Hyperledger Fabric. A conclusão geral do trabalho é que o Hyperledger Fabric tem um desempenho superior às demais plataformas porque atinge o consenso de forma mais eficiente. Em [Malik et al. 2019] é realizada uma comparação do desempenho das plataformas Ethereum e Hyperledger Fabric utilizando uma aplicação de comércio de energia e Hyperledger Caliper. A conclusão é que o Ethereum fornece a melhor solução para a aplicação em pequena escala, mas, o Hyperledger Fabric pode ser mais adequado para aplicações de grande escala. Contudo, ambas as propostas não tratam dos aspectos arquiteturais do nó de uma rede blockchain publica ou permissionada que impactam no seu custo e desempenho, e portanto são aspectos relevantes para uma organização participar de um desses modelos de rede.

3. Arquitetura Proposta para Avaliação

Esta seção apresenta a arquitetura geral considerada para avaliação em um par de redes blockchain e a sua utilização para plataformas específicas. Dessa forma é possível equiparar os recursos utilizados de diferentes plataformas, afim de comparar os custos essenciais para sua operação. Inicialmente é introduzida a descrição da arquitetura geral e, a seguir, é demonstrado como ela se aplica às plataformas Ethereum e Hyperledger Fabric. O objetivo dessa proposta é unificar diferentes arquiteturas de rede blockchain, e.g., redes públicas e permissionadas, para analisar requisitos de custo e desempenho de se participar dessas redes em termos de infraestrutura básica (i.e., um nó da rede). Já com uma arquitetura unificada, o trabalho focou-se nos aspectos essenciais de blockchain, buscando reduzir a complexidade dessas análises e, ao mesmo tempo, mantê-las realistas em termos de custo e benefícios.

A arquitetura geral para um participante da rede blockchain pública ou permissionada é mostrada na Figura 1[7]. Nessa figura, os componentes verticais em linhas contínuas representam nós da rede mantidos por uma entidade (pessoa ou organização) que participa da rede blockchain. O nó é um computador físico ou uma máquina virtual em serviços de computação em nuvem administrado pela entidade. Por sua vez, os componentes horizontais em linhas tracejadas representam os protocolos de *consenso* e par-a-par (*P2P*), elementos básicos para o funcionamento de uma rede blockchain que devem estar con-

[7]Produzida sob a motivação em diferentes conteúdos técnicos como: `https://ethereum.org/en/developers/docs/nodes-and-clients` e `https://kctheservant.medium.com/multi-host-deployment-for-first-network-hyperledger-fabric-v2-273b794ff3d`

tidos em cada nó da rede. Nas principais implementações de blockchains atuais, esses dois elementos podem ser modularizados como dois processos diferentes, aproveitando as tecnologias de isolamento de recursos de computação leve como contêineres.

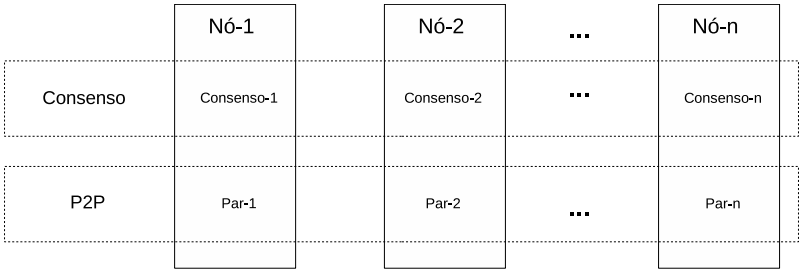


Figura 1. A arquitetura geral para um nó da rede blockchain pública ou permissionada.

O protocolo de consenso define as regras para a escolha do nó líder da vez, i.e., periodicamente escolhido, responsável pela construção do próximo bloco de transações a ser replicado para os demais nós da rede. Existem diferentes protocolos de consenso como, por exemplo, Prova de Trabalho e Prova de Participação. Esses protocolos de consenso são adotados em redes blockchain públicas como *Bitcoin e Ethereum*. *Raft* e *Kafka* são serviços de ordenação de transações que funcionam como protocolos de consenso em redes blockchain permissionadas como Hyperledger Fabric [Greve et al. 2018].

O protocolo *P2P* é responsável pela comunicação entre os nós, estendendo-se também às etapas de processamento de transações pelos nós da rede. A comunicação geralmente segue protocolos *Gossip*, onde nós obtém uma lista limitada de parceiros e estabelecem conexões entre eles formando uma rede sobreposta para a difusão de blocos de transações. O processamento desses blocos varia de acordo a plataforma sendo que Bitcoin e Ethereum adotam a estratégia ordenar-executar blocos, ao passo que Hyperledger Fabric adota a estratégia executar-ordenar-validar blocos [Androulaki and et al. 2018].

3.1. Ethereum

Ethereum é atualmente a segunda maior rede pública de blockchain do mundo em arrecadação de fundos, portanto uma representante importante desse modelo de rede[8]. A arquitetura básica do Ethereum é composta por nós que executam softwares para verificar e manter as transações organizadas em blocos. Esses nós são computadores que executam os clientes Ethereum e que permitem que eles se conectem uns aos outros. Os clientes Ethereum são responsáveis por verificar se os dados inseridos ou solicitados por meio de transações cumprem as regras impostas pelo protocolo da rede. Existem dois tipos de clientes que são estabelecidos nas camadas de execução e consenso da rede. Esses clientes são interdependentes e devem ser executados de maneira conjunta, podendo ser em hosts separados, para fornecer acesso à rede.

Primeiramente, conforme ilustrado pela figura 2, um nó da rede recebe e executa as transações enviadas para a rede por um cliente (1), por meio da Camada de execução, mantendo o banco de dados que representa o estado atual da rede. A camada de consenso

[8]Mais informações podem ser encontradas em *https://ethereum.org/en/developers/docs/*.

implementa o algoritmo de consenso para validação de dados de acordo com o estado da rede mantido pelos clientes em execução. No algoritmo de consenso de prova de participação, ou em inglês, Proof of Stake – POS, se um nó da rede quiser se tornar um validador, ele primeiro deve enviar uma taxa de validador (2) e quando a transação for confirmada, ele poderá apostar algumas moedas para competir com outros validadores (3). Por sua vez, cada nó é responsável por transmitir as transações que recebe dos clientes aos outros nós (4). Quando uma quantidade suficiente de transações é recebida, os validadores elegem um líder com o máximo de moedas apostadas. O líder eleito então cria um bloco e o transmite para a rede (5) onde cada nó valida o bloco, executa todas as transações do bloco e adiciona o bloco na cadeia (6). O bloco também possui uma transação de recompensa especial, sendo que o líder da rodada recebe como recompensa as taxas de transação inferidas nas transações presentes no bloco.

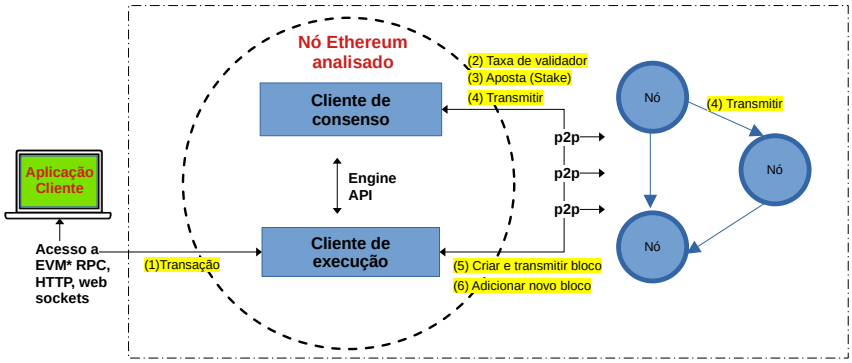


Figura 2. Modelo de rede pública Ethereum

Manter a propriedade de nós da rede para execução e consenso, em uma rede pública, oferece os benefícios da independência de terceiros, ao fornecer acesso à rede por aplicativos, além de prover a descentralização esperada da rede. O fato da mudança do uso do algoritmo de consenso para o POS resultou em uma redução significativa do consumo de recursos em comparação ao algoritmo anterior POW e, portanto, um menor custo para manter um nó da rede. Desta forma, a viabilidade para que uma aplicação tenha acesso aos dados disponíveis na Blockchain, depende estritamente destes nós, que recebem as solicitações de transações, por meio da camada de execução e as submetem ao consenso da rede.

3.2. Hyperledger Fabric

A plataforma para redes permissionadas Hyperledger Fabric é uma das mais populares atualmente. Ela é um grande projeto de código fonte aberto envolvendo mais de 35 organizações e 200 desenvolvedores[9]. A rede blockchain da plataforma Hyperledger Fabric usa a estratégia executar-ordenar-validar para processar blocos de transações.

Assim como no Ethereum, podemos organizar essa estratégia em dois elementos essenciais para a arquitetura, que são os componentes P2P e consenso. Contudo, o componente P2P neste contexto tem atribuições extras. Em linhas gerais, os pares primeiramente executam uma transação, i.e., simulam seu funcionamento e proveem o endosso

[9]Mais informações podem ser encontradas em *https://hyperledger-fabric.readthedocs.io*.

da transação para a aplicação cliente, e posteriormente os pares validam as transações, as mantendo na estrutura de dados encadeada da blockchain. Por sua vez, os ordenadores participam da estratégia após a etapa de execução para realizar o consenso, i.e., determinar o líder que ordena as transações em um novo bloco, e posteriormente envia o bloco aos pares para a etapa de validação.

A Figura 3 ilustra o fluxo de uma transação no Hyperledger Fabric e componentes P2P e consenso representados por pares e serviço de ordenação respectivamente. Inicialmente, um par recebe a proposta de transação da aplicação cliente (1). O par então simula a execução da transação invocando o contrato inteligente que a corresponde e envia uma mensagem de endosso ou sua negativa para a aplicação cliente (2). A aplicação aguarda endossos de outros pares, conforme a quantidade configurada na rede, e então envia a transação para o serviço de ordenação (3). A seguir, esse serviço recolhe transações da rede até alcançar o tempo (*timeout*) ou quantidade de transações limite para gerar um novo bloco. Os blocos são então encaminhados para os pares da rede realizarem a validação (4), que consiste no encadeamento do bloco à blockchain e atualização do seu estado global para consultas rápidas, e.g., variáveis dos contratos inteligentes ou saldos de contas.

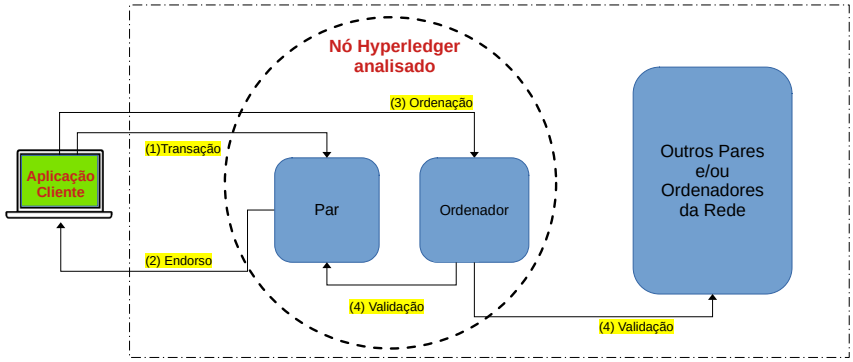


Figura 3. Componentes e fluxo de transações na plataforma Hyperledger Fabric.

Há alguns pontos importantes para observar na arquitetura particular do Hyperledger Fabric que permite também representá-lo pela arquitetura geral da Figura 1. Primeiro, execução e validação (passos 2 e 4) são realizadas pelos pares da rede, i.e., o componente P2P, ainda que estejam em etapas diferentes no fluxo da transação. Por sua vez, o serviço de ordenação é constituído por uma coleção de ordenadores – os serviços Raft e Kafka adotados no Hyperledger Fabric requerem ao menos três ordenadores – que determinam o líder da vez para a geração do novo bloco, i.e., o componente consenso. Logo, um nó participante de uma rede blockchain permissionada Hyperledger Fabric pode conter os componentes par e consenso como mostrado na arquitetura geral (Figura 1) em concordância à arquitetura particular e fases de transações dessa rede (Figura 3).

4. Avaliação Experimental

A seção anterior apresentou uma proposta de arquitetura geral para um nó participante de uma rede blockchain e a sua aplicação à rede pública Ethereum e à rede permissionada Hyperledger Fabric. Esta seção, avalia experimentalmente o custo e desempenho desse nó de forma conjunta, buscando analisar o compromisso entre esses dois importantes fatores para desenvolvedores e organizações que necessitam dessa informação para planejarem

a participação nesses dois tipos de redes blockchain. A avaliação busca responder as seguintes perguntas: *(1) A arquitetura proposta (unificação de dois componentes em um único nó) consome rapidamente recursos computacionais do nó levando a redução de desempenho? (2) A arquitetura requer um nó de alto custo para executar transações com níveis razoáveis de desempenho?*

4.1. Metodologia

Este projeto produziu ambientes experimentais Ethereum e Hyperledger Fabric para medir desempenho e custo de um nó seguindo a arquitetura proposta. O ambiente Ethereum foi construído a partir do software cliente *Geth* versão 1.10.26, que é a implementação oficial do protocolo Ethereum. A tecnologia *Docker*[10] foi utilizada para criar dois *contêineres*: um *contêiner* configurado como componente P2P utilizando o cliente *Geth* para receber, retransmitir solicitações de transações e manter o livro razão, e outro *contêiner* configurado como componente de consenso, i.e., respectivamente, os componentes P2P e consenso definidos na arquitetura geral. Os dois contêineres foram iniciados em um mesmo nó, i.e., uma máquina virtual, ambos configurados com interfaces de redes para comunicarem entre si via as portas TCP e UDP do protocolo Ethereum. O nó recebe requisições de transações da aplicação através do componente P2P e as repassa ao componente de consenso, que é responsável pela mineração das transações e geração dos blocos que encadeiam e armazenam essas transações. Contudo, o componente consenso não está conectado à rede principal pública Ethereum e os blocos gerados contêm apenas transações da aplicação de nosso ambiente experimental. Para simular uma vazão semelhante à rede principal Ethereum, o tempo de criação de bloco para o protocolo de consenso foi estipulado em 15 segundos.

O ambiente Hyperledger Fabric foi criado a partir das imagens de *containers Dockers* contendo o software cliente oficial dessa plataforma versão 2.2. A fundação Hyperledger disponibiliza um *contêiner* para atuar como ordenador baseado no protocolo RAFT e outro *contêiner* para atuar como par da rede P2P no endosso e validação de transações. Assim, foi iniciado um *contêiner* par e um *contêiner* ordenador comunicando-se entre si via interfaces de redes e portas TCP e UDP do protocolo Hyperledger Fabric em um mesmo nó, seguindo a arquitetura geral proposta. O par recebe requisições de transação da aplicação e segue o fluxo mostrado na Figura 3 para registrá-la na blockchain. Diferente do ambiente Ethereum, foram criados três nós para o funcionamento de uma rede blockchain permissionada. Isso porque a plataforma Hyperledger requer ao menos três ordenadores para construírem blocos de transações, implementando o protocolo tolerante a falhas de *crash* em até dois ordenadores. Uma rede sobreposta utilizando o orquestrador de containers *Docker Swarm* foi utilizada para a comunicação entre os *contêineres* dos três nós, i.e., três ordenadores e três pares.

A ferramenta de aferição *Caliper* [Caliper 2019] foi utilizada para atuar como aplicação cliente gerando cargas com emissão de transações para os dois ambientes construídos. As cargas sintéticas geradas emulam uma aplicação blockchain típica com foco na emissão de transações, i.e., inserção de registros, que é usualmente a operação com maior uso de recursos computacionais e latências em blockchains como já observado em trabalhos anteriores [Spengler and Souza 2021]. Assim, a carga de trabalho submetida em ambas as plataformas representa um conjunto de registros emitidos por segundo

[10]https://www.docker.com/resources/what-container

(transações por segundo – tps), de forma fixa em um dado período de tempo aqui chamado de rodada. O valor em tps das cargas de trabalho foi incrementado gradativamente até atingir 200 tps, i.e., uma carga de alta intensidade. Para cada carga realizamos 10 rodadas de 60 segundos cada. Os códigos utilizados para os experimentos desta seção estão disponíveis no repositório *Blockchain performance* [11].

Três tipos de recursos computacionais foram utilizados para executar os experimentos nos ambientes que representam as redes blockchain pública e permissionada. Esses tipos são máquinas virtuais (VMs) do serviço *Amazon Elastic Cloud Computing* (EC2) para compor os nós de cada rede. Nos experimentos o poder computacional desses nós foi incrementado gradualmente para analisar o desempenho em função do aumento de carga. Nesse sentido, foram utilizadas as VMs T2 do tipo *small, medium* e *xlarge*, cujas respectivas especificações são apresentadas na Tabela 1.

	Small	**Medium**	**xLarge**
vCPUs	1	2	4
Memória (GB)	2	4	16
Custo/hora (USD)	0,0230	0,0464	0,1856

Tabela 1. Especificações dos nós que compõem cada tipo de infraestrutura: família AWS T2, processador Intel Xeon 3.0-3.3 GHz e disco SSD de 100 GB.

Foram coletadas para cada carga de trabalho executada as métricas de latência da transação, além do uso dos recursos processamento (CPU), memória, disco e rede para os nós da rede. O Caliper registra a latência e a confirmação (sucesso ou falha) para cada transação e um programa, que foi desenvolvido na linguagem Python e a biblioteca *Psutil 5.9.0*, coleta os dados sobre os recursos monitorados em cada nó dos ambientes.

Intuitivamente, o crescimento da latência de transações pode estar associado ao aumento do consumo de recursos computacionais. Nesse sentido, foram examinados o consumo de recursos em nós de diferentes tipos com a finalidade de observar quais recursos são mais requisitados, preliminarmente ao início dos experimentos.

Foi observado que CPU é o recurso que tem o uso mais impactado com os aumentos de carga (transações por segundo). O uso de memória permanece estável em torno de 1GB, ao passo que o uso da rede (entrada e saída) e disco crescem com o aumento de carga mas ficam distantes das capacidades máximas que são iguais para diferentes tipos de nós, i.e., 1 Gbps de comunicação entre os componentes (containers) e 1 Gbps de leitura/escrita em discos SSD. Portanto, o foco das análises a seguir é no uso de CPU.

4.2. Avaliação de Desempenho

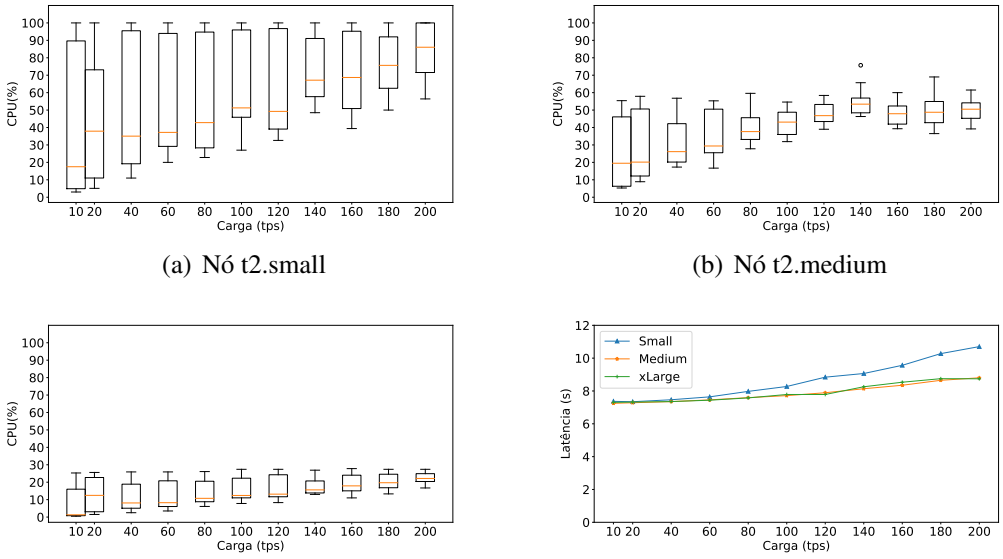
Esta seção busca responder a primeira pergunta de pesquisa: *"A arquitetura proposta consome rapidamente recursos computacionais do nó levando a redução de desempenho?"* Para isso foram relacionados o uso de processamento com a latência média de transações considerando o crescimento da carga e aumento do poder de processamento da CPU.

As Figuras 4 e 5 mostram a variação de uso de CPU e a latência em função da carga de trabalho em transações por segundo (tps) para as medições observadas nos três tipos de nós nas plataformas Ethereum e Hyperledger respectivamente. As três primeiras figuras

[11] https://github.com/LABPAAD/blockchain_performance

apresentam *boxplots* para sumarizar a distribuição dos usos de CPU nos três tipos de nós da seguinte forma: o retângulo central se expande entre o primeiro e terceiro quartil, o segmento interior é a mediana, enquanto os indicadores abaixo e acima do retângulo representam o 10^{o} e 90^{o} percentis. Por sua vez, a quarta figura representa as curvas da latência média de uma transação para os três tipos de nós.

A Figura 4 apresenta resultados observados para a plataforma Ethereum. De modo geral, nota-se que a variação do uso de CPU cresce com o aumento da carga de trabalho, que pode ser observado pelas marcas da mediana. O tipo *small* sofre a maior variação de uso CPU visto pelas expansões consecutivas dos boxplots entre o 10^{o} e 90^{o} percentis (i.e., 80% das medições) e uma parcela relevante das medições (10% das medições) tiveram 100% do uso de CPU como indica a marca do 90^{o} percentil a partir de 20 tps. Pode-se observar na Figura 4-d que o alto uso de CPU aumenta a latência do nó tipo $small$ em até 3,4 segundos em relação aos outros. Valor este que consideramos um impacto irrelevante na latência para uma rede pública, um vez que os tempos gastos por transação pela rede principal é atualmente em torno de 12,7 segundos. Logo, a arquitetura proposta consome rapidamente recursos computacionais do nó de menor capacidade, mas não levando a redução significativa de desempenho, i.e., latência da transação.



(a) Nó t2.small (b) Nó t2.medium

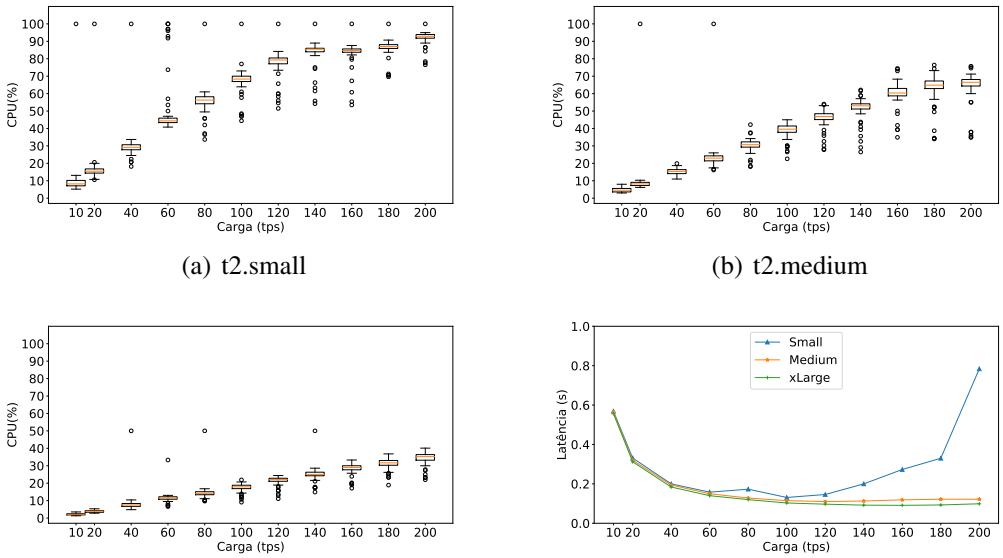
(c) Nó t2.xlarge (d) Latência

Figura 4. Uso de CPU e latência em nó da plataforma Ethereum.

Agora discutimos os resultados observados para nós Hyperledger Fabric, mostrados na Figura 5.[12] Observa-se pouca variação no uso de CPU, dado a menor expansão dos boxplots, mas esse uso cresce com a carga, semelhante ao Ethereum. Usos expressivos de CPU, i.e., 80% de uso em mais de 90% das amostras, ocorrem no nó tipo $small$ em cargas intensas (acima 120 tps). É importante então analisar o impacto desse uso expressivo no desempenho do nó. A Figura 5-d mostra que a latência para nós Hyperledger Fabric é baixa (menor que 1 segundo) em comparação aos nós Etherem, como esperado

[12]A rede utilizou três nós dessa plataforma e que tiveram desempenhos qualitativamente similares e por questão de espaço mostramos resultados de apenas um dos nós.

para um rede blockchain permissionada. Contudo, a capacidade do tipo de nó tem impacto relevante na latência para cargas intensas. Note que o nó tipo $small$ tem latência até 8 vezes maior que os outros tipos em carga de 200 tps. Interessante observar ainda a redução da latência à medida que a carga aumenta, que não permanece no nó $small$ devido o consumo expressivo de CPU. Portanto, o poder computacional de um nó é um fator importante na plataforma Hyperledger Fabric, que tem como característica baixa latência de transação, e um nó básico (e.g., tipo $aws\ t2.small$) pode ter redução significativa de desempenho em cargas intensas com a arquitetura proposta.



(a) t2.small (b) t2.medium

(c) t2.xlarge (d) Latência

Figura 5. Uso de CPU e latência em rede permissionada Hyperledger Fabric.

4.3. Compromisso entre Custo e Desempenho

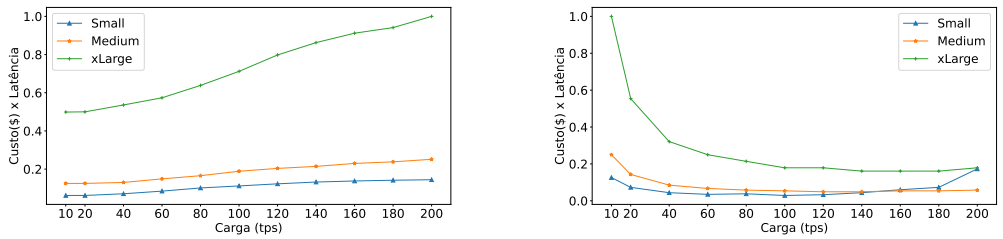
Esta seção busca responder a segunda pergunta colocada: *A arquitetura requer um nó de alto custo para executar transações com níveis razoáveis de desempenho?* Para isso foi aplicado às latências observadas na seção anterior um peso proporcional ao custo do tipo do nó por hora como é usual na precificação de recursos computacionais, o que nos permite analisar o compromisso entre custo e desempenho.

A Figura 6 mostra esse compromisso para os três tipos de nó em função da carga (tps). Cada tipo é representado por uma curva obtida via o produto $custo \times latência$ normalizado, onde o custo se refere aos preços praticados pela Amazon mostrados na Tabela 1. Assim, o tipo de nó com o menor valor desse produto é recomendado nessa análise em função da carga de trabalho. Nós da plataforma Ethereum mostrados na Figura 6-a, notavelmente, tem o melhor compromisso entre custo e desempenho com o tipo $small$, pois não há diferenças relevantes para as latências observadas entre esse nó e os demais, mesmo com o aumento da carga, logo o fator custo é dominante na escolha do tipo de nó. Por sua vez, dois tipos de nós são recomendados para a plataforma Hyperledger Fabric em função da carga, considerando o melhor compromisso entre custo e desempenho como mostra a Figura 6-b. O tipo $small$ é recomendado para cargas menores que 140 tps,

e a partir dessa marca, o tipo $medium$ é mais indicado, i.e., os ganhos com latência do nó $medium$ compensam o seu custo, que é duas vezes superior ao nó tipo $small$.

Alguns entendimentos interessantes sobre negócios envolvendo blockchain podem ser obtidos com essa análise. Primeiro, serviços de infraestrutura em blockchains públicas como Ethereum se tornam viáveis com o baixo custo de um nó nessa rede, em especial após a adoção do consenso Prova de Participação. Tomando como exemplo a Infura, que é o serviço mais popular atualmente, um único nó $small$ pode atender com uma carga de 200 tps até 86 pagadores do plano básico[13], gerando uma receita expressiva (cerca de 250 vezes maior) em relação ao custo mensal desse nó.

Sobre blockchains permissionadas com Hyperledger Fabric, existem vários casos de implantação dessa plataforma em redes corporativas[14], mas não há ainda a concepção de uma arquitetura de nó padrão para eles. De fato, a documentação oficial apenas ilustra o uso da plataforma de forma simplista e centralizada com um nó ordenador e vários nós pares, havendo, porém, a orientação à construção de redes personalizadas pelas corporações. A arquitetura avaliada neste trabalho unifica os componentes ordenador e par em um único nó completo, possibilitando estimar um teto de custo (i.e., uma estimativa conservadora) para uma organização participar numa rede blockchain permissionada. Em resposta à pergunta dessa seção, é elucidado que essa arquitetura requer um nó com capacidade intermediária (e.g., $aws\ t2.medium$) para executar cargas intensivas com alto desempenho.



(a) Ethereum (b) Hyperledger Fabric

Figura 6. Compromisso entre custo e desempenho (normalizado) por nó em função da carga: melhores compromissos são os valores menores das curvas.

5. Conclusão

Em síntese, o artigo propôs um modelo de infraestrutura, em específico a arquitetura do nó da rede considerando o nó de consenso e p2p, para comparar e avaliar ao mesmo tempo os fatores desempenho, uso de recursos computacionais e custo para uma organização participar de uma rede blockchain. A avaliação e comparação foi conduzida por experimentos desenvolvidos a partir do modelo da arquitetura proposta tendo em vista nós com diferentes capacidades computacionais na plataformas Ethereum e Hyperledger Fabric. Os resultados evidenciaram os melhores compromissos entre custo e desempenho para cada uma destas plataformas e em cada um dos recursos computacionais utilizados. O modelo foi proposto como solução para o problema de compatibilizar os pares de redes

[13] O plano *developer* atende até 200 mil requisições/dia a US$ 50/mês (https://www.infura.io/pricing).
[14] https://www.hyperledger.org/learn/case-studies

blockchain pública e privada afim de realizar uma avaliação justas em função dos custos, uso de recursos e desempenho. Entretanto, o modelo tem potencial para expansão de propostas de novas arquiteturas, por meio de desenvolvimentos a serem implementadas como trabalhos futuros.

Referências

Androulaki, E. and et al. (2018). Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. In *Proc. of the EuroSys Conference*.

Baliga, A., Solanki, N., Verekar, S., Pednekar, A., Kamat, P., and Chatterjee, S. (2018). Performance characterization of hyperledger fabric. *Proceedings - 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology, CVCBT 2018*, pages 65–74.

Caliper, H. (2019). Caliper. https://hyperledger.github.io/caliper. (Accessed on 09/23/2021).

Choi, W. and Hong, J. W. K. (2021). Performance Evaluation of Ethereum Private and Testnet Networks Using Hyperledger Caliper. *22nd APNOMS 2021*, pages 325–329.

Greve, F., Sampaio, L., Abijaude, J., Coutinho, A. A., Brito, I., and Queiroz, S. (2018). Blockchain e a Revolução do Consenso sob Demanda. In *Proc. of SBRC Minicursos*.

Leal, F., Chis, A. E., and González–Vélez, H. (2020). Performance Evaluation of Private Ethereum Networks. *SN Computer Science*, 1(5):1–17.

Malik, H., Manzoor, A., Ylianttila, M., and Liyanage, M. (2019). Performance Analysis of Blockchain based SG with Ethereum and Hyperledger Implementations. *IEEE International Conference on ANTS*.

Monrat, A. A., Schelen, O., and Andersson, K. (2020). Performance Evaluation of Permissioned Blockchain Platforms. *IEEE, CSDE 2020*.

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.

Rimba, P., Tran, A. B., Weber, I., Staples, M., Ponomarev, A., and Xu, X. (2020). Quantifying the Cost of Distrust: Comparing Blockchain and Cloud Services for Business Process Execution. *Information Systems Frontiers*, 22(2):489–507.

Rouhani, S. and Deters, R. (2017). Performance analysis of ethereum transactions in private blockchain. In *2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. IEEE.

Spengler, A. C. and Souza, P. S. (2021). Avaliação de desempenho do hyperledger fabric com banco de dados para o armazenamento de grandes volumes de dados médicos. In *Proc. of WPerformance*.

Thakkar, P., Nathan, S., and Viswanathan, B. (2018). Performance benchmarking and optimizing hyperledger fabric blockchain platform. *Proceedings - IEEE, MASCOTS 2018*, pages 264–276.

Wang, C. and Chu, X. (2020). Performance characterization and bottleneck analysis of hyperledger fabric. *Proceedings - International Conference on Distributed Computing Systems*, 2020-Novem:1281–1286.

Wood, G. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum project yellow paper*, 151:1–32.

Xu, X., Sun, G., Luo, L., Cao, H., Yu, H., and Vasilakos, A. V. (2021). Latency performance modeling and analysis for hyperledger fabric blockchain network. *Information Processing and Management*, 58(1).

Xu, X., Weber, I., and Staples, M. (2019). *Architecture for blockchain applications*. Springer.

Zhang, L., Lee, B., Ye, Y., and Qiao, Y. (2020). Ethereum transaction performance evaluation using testnets. In *Euro-Par 2019: Parallel Processing Workshops*, Cham. Springer International Publishing.