

Indo além das simulações com o Serviço de Testbeds: Ambientes reais para Experimentação Científica em TICs

Elenice Pedrosa¹, Janssen Martins¹, Fiterlinge Sousa¹, Leandro Mondin¹, Gustavo Dias¹

¹ Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP)

{elenice.pedrosa, janssen.martins, fiterlinge.sousa, leandro.mondin, gustavo.dias}@rnp.br

Abstract. *An infrastructure dedicated to experimentation is often required in the scientific field. The demand for high computational performance in an environment resilient to failures and human errors ranks among the most sought-after requirements by scientists and researchers. In response to this demand, the Testbeds service of the RNP offers a platform dedicated to experimentation and innovation in network and computing technologies. This service provides a flexible and scalable infrastructure for testing and developing solutions in various areas, including virtualization, cloud computing, SDN, blockchain, and cybersecurity, among others. This article aims to detail the operation of the service, covering its offerings and the resources that enable its provision.*

Resumo. *Uma infraestrutura exclusiva destinada à experimentação é frequentemente requisitada no cenário científico. A demanda por alto desempenho computacional em um ambiente resiliente a falhas e erros humanos está entre os requisitos mais solicitados por cientistas e pesquisadores. Como resposta a essa demanda, o Serviço de Testbeds da RNP oferece uma plataforma dedicada à experimentação e inovação em tecnologias de rede e computação. Este serviço viabiliza uma infraestrutura flexível e escalável para experimentação em diversas áreas, abrangendo virtualização, computação em nuvem, SDN, blockchain, segurança cibernética, entre outros. Este trabalho visa detalhar a operação do serviço, abordando suas ofertas e os recursos que viabilizam sua prestação.*

1. Introdução

A reprodutibilidade, que é um aspecto essencial na aceitação de descobertas científicas [of Sciences et al. 2019], está intrinsecamente ligada à metodologia de experimentação escolhida pelo pesquisador. Embora úteis, simulações computacionais e modelagens analíticas têm limitações na reprodução fiel de ambientes reais em TICs (Tecnologias da Informação e Comunicação). Neste contexto, o uso de Testbeds durante a fase de experimentação emerge como uma solução eficaz, possibilitando resultados que se aproximam significativamente dos observados no mundo real.

Um Testbed é um ambiente de experimentação concebido para replicar, com alta fidelidade, o ambiente real de aplicação dos resultados de uma pesquisa [Rakotoarivelo et al. 2010]. Esses ambientes não só simulam aspectos específicos dos ambientes de produção, como também isolam experimentações entre si e do ambiente de produção. Esse isolamento é crucial pois dá ao pesquisador liberdade em suas experimentações ao mesmo tempo que evita interferências externas nos resultados.

Embora os Testbeds tenham o potencial de resolver alguns dos principais problemas na experimentação científica, as especificidades inerentes à sua construção e operação podem limitar seu uso mais amplo. Frequentemente, os usuários dessas infraestruturas necessitam de um período significativo de familiarização com os conceitos e ferramentas necessárias para configurar e realizar seus experimentos. Somado a isso, grande parte dos Testbeds disponíveis

O Serviço de Testbeds da RNP constitui uma infraestrutura computacional distribuída, projetada para facilitar experimentações remotas em uma ampla gama de áreas de pesquisa, incluindo sistemas distribuídos, redes ICN, SDN multicamadas, Switches programáveis (P4), 5G, Internet das Coisas (IoT), Aprendizado de Máquina e Inteligência Artificial, entre outras. Este serviço é estruturado em três componentes principais: (1) uma consultoria especializada em experimentação científica, através da qual equipes de especialistas da RNP avaliam junto aos pesquisadores as necessidades de experimentação propõe soluções ajustadas a cada demanda; (2) uma infraestrutura computacional de alta capacidade, distribuída e altamente flexível, configurada pela equipe da RNP para atender às exigências particulares de cada projeto de pesquisa; e (3) suporte contínuo ao pesquisador ao longo de todo o ciclo de vida da experimentação, garantindo assistência técnica e metodológica.

Se no artigo [Mondin and Dias 2023] foram apresentadas mudanças em andamento no serviço com o propósito de torná-lo mais flexível, neste artigo apresentamos uma visão mais aprofundada sobre as soluções tecnológicas adotadas e como seu uso estratégico tem possibilitado ao serviço acolher novas demandas de experimentação. Após, apresentamos um estudo de caso onde é exemplificado o uso prático desta nova abordagem e de que forma podem ser combinadas as tecnologias e soluções escolhidas para atender novos tipos de demanda. Ao final, são discutidas as lições aprendidas durante este processo .

2. Trabalhos Relacionados

As TICs evoluem de maneira diversificada e interdisciplinar, demandando que os Testbeds se adaptem continuamente. A estratégia de expansão do Serviço de Testbeds da RNP baseia-se em duas lições chave: (1) Um Testbed flexível e não especializado, operando em um ambiente de produção, é mais eficaz que múltiplos Testbeds especializados; (2) Uma equipe especializada em experimentação entrega mais valor aos usuários do que a criação de plataformas de autoatendimento. Outros Testbeds seguiram caminhos diferentes e discutimos três deles a seguir:

- O FABRIC [Baldin et al. 2019] possui como conceito central a programabilidade de praticamente todos aspectos do Testbed. Com base em interfaces gráficas, alocar os recursos da infraestrutura é relativamente simples.
- O CloudLab [Ricci et al. 2014] oferece aos pesquisadores acesso a recursos computacionais configuráveis em grande escala, para experimentações em áreas como computação distribuída (incluindo Nuvens). O seu diferencial é um acesso granular e privilegiado ao hardware.
- O GENI [Berman et al. 2014] é uma infraestrutura distribuída e virtualizada, que inclui nós de computação, redes ópticas, ambientes sem fio e ferramentas de medição. Os recursos do Testbed são acessíveis com base em técnica de fatiamento, trazendo vantagens do ponto de vista de otimização do uso dos mesmos.

3. Ofertas para experimentação

O Serviço de Testbeds da RNP é uma solução flexível, projetada para atender às necessidades específicas de pesquisa. Ele permite a integração de várias infraestruturas e a utilização de diversas tecnologias e recursos em experimentos únicos. Nesta seção, destacamos os serviços oferecidos pelo Testbed da RNP, que incluem Servidores Baremetal, Servidores *Data Transfer Node* (DTN), *Switchs Programming Protocol-Independent Packet Processors* (P4), Cluster Nacional, máquinas virtuais (VMs) e Testbed Blockchain.

Cada um desses serviços pode ser disponibilizado de forma independente, integrada ou de forma personalizada, conforme as necessidades do pesquisador. A infraestrutura foi cuidadosamente projetada para garantir que cada "ilha" do Serviço esteja interligada, facilitando ajustes e configurações para atender às demandas específicas de cada projeto.

3.1. Servidores Baremetal

A oferta de Serviço na modalidade Baremetal oferece um Ambiente dedicado que permite aos pesquisadores o acesso a um ambiente experimental, que pode ser isolado ou interligado a outras localidades de forma distribuída, ou não. Ao possibilitar a utilização de servidores, permitindo o acesso direto ao hardware da infraestrutura, o pesquisador pode desenvolver ou modificar serviços de ambientes de nuvem existentes, o que pode demandar que determinadas ações do experimento tenham acesso privilegiado à infraestrutura, tais como uma rede de controle separada, uma conexão *back to back* e outras. Dessa forma, é possível a realização de experimentos em redes, treinamentos de modelos utilizando *datasets*, simulações com controladores, tais como ONOS, instanciação de VMs, uso de *containers*.

3.2. Servidores DTN e Switchs P4

Em destaque temos os servidores DTN, fundamentais para lidar com os desafios da transferência de dados entre instituições geograficamente dispersas. Os DTNs, ou Nós de Transferência de Dados, são máquinas especializadas e dedicadas e otimizados exclusivamente à transferência de dados em redes de alta velocidade a longa distância, podendo atingir até 100Gb/s, tanto para leitura quanto para escrita [Cristofoleti Magri et al. 2017]. Sua habilidade em processar grandes volumes de dados de maneira eficiente e rápida os torna uma solução indispensável para ambientes específicos de pesquisa científica, garantindo uma transferência eficaz de dados mesmo em redes com desafios de conectividade e largura de banda limitada.

Os *switchs* P4 também estão disponíveis para serem utilizados para experimentação, eles permitem aos usuários personalizarem o comportamento do *switch* de acordo com suas necessidades específicas, utilizando a linguagem P4 [Schwarz and Loui 2023]. Com eles, é possível implementar novos protocolos de rede, otimizar o encaminhamento de pacotes e até mesmo criar funcionalidades de segurança personalizadas. A entrega desse recurso para experimentação é feita através da configuração de um roteador virtual por meio de VRFs (*Virtual Routing and Forwarding*), onde o pesquisador pode criar diferentes tabelas de rotas no mesmo equipamento sem interferir na pesquisa de outro, utilizando apenas uma fatia dos recursos disponíveis no hardware.

3.3. NameSpace como serviço

O Serviço também oferece acesso aos recursos de um cluster Kubernetes conhecido como Cluster Nacional. Este cluster fornece uma plataforma de experimentação baseada em *NameSpace as a Service* (NaaS), distribuída geograficamente pelo território nacional. Trata-se de uma infraestrutura altamente flexível, operando em um ambiente que utiliza as mesmas regras de roteamento do ambiente de produção da RNP, embora segmentado e isolado. Essa abordagem permite que os pesquisadores criem um ambiente de experimentação muito próximo a um cenário real.

O uso de orquestração utilizando Kubernetes é empregado para automatizar a implantação, o dimensionamento e o gerenciamento do Cluster. Dessa forma, nodes de controle (*masters*) e nodes de trabalho (*workers*) também compõem a infraestrutura do serviço. É possível observar na Figura 1 que a comunicação do nó(*master*) com os nós *nodes workes* ocorre primariamente em dois sentidos, o primeiro é a partir do *apiserver* para o processo do *kubelet*, executado em cada nó no cluster. O segundo é do *apiserver* para qualquer nó, *pod*, ou serviço através da funcionalidade de *proxy* do *apiserver*. Referente a comunicação originada dos *nodes workes* para o *master*, todos os caminhos de comunicação do cluster para o *master* terminam no *apiserver*, componentes do *control plane*, tais como *etcd*, *scheduler*, *controller manager*, *kub-proxy*, *kubelet* não expõem serviços remotos [The Linux Foundation. Os autores do Kubernetes 2021].

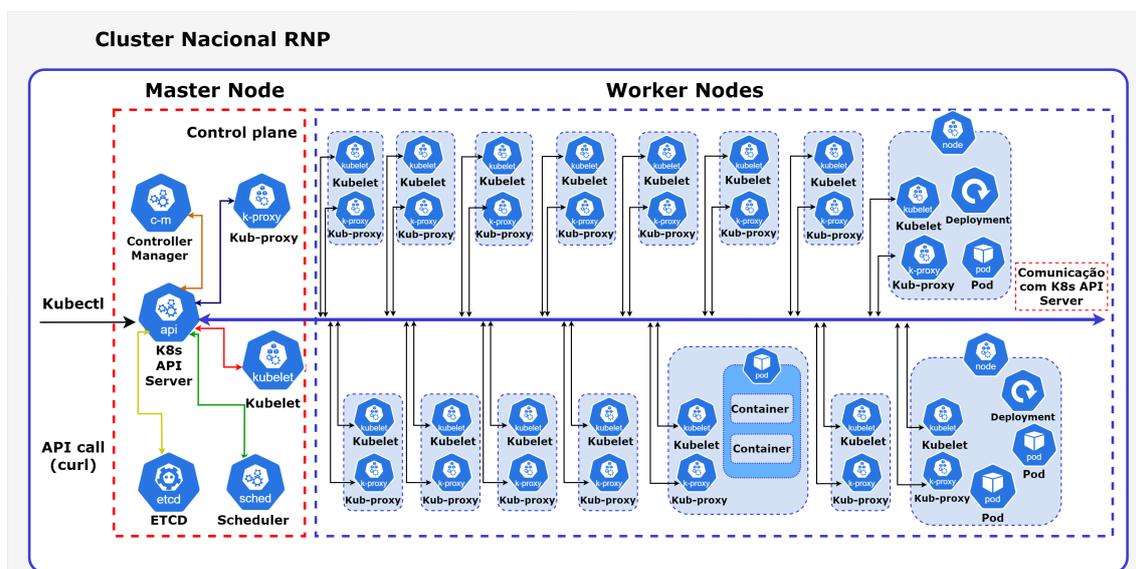


Figura 1. Diagrama do Cluster K8s Nacional

Dentro desse cenário, os usuários têm acesso ao ambiente do Cluster por meio de um *namespace*. De forma simplificada, *namespaces* podem ser compreendidos como "subclusters" no cluster principal. Cada *namespace* funciona como um cluster independente, possuindo seus próprios recursos de computação, rede e armazenamento. Essa característica permite a execução de diferentes *workloads* isoladamente.

Dessa forma o pesquisador pode instanciar pods e gerenciá-los utilizando o Kubernetes, seja criando um ou mais *containers* no pod, e aplicando as configurações necessárias para seu experimento, como a atribuição de réplicas, *load balancer*, configurações de compartilhamento de recursos e de rede.

3.4. Máquinas Virtuais

Visando ampliar as possibilidades de experimentação, o serviço oferece a possibilidade de criação de VMs provisionadas sob demanda. Nesse cenário, o Vagrant surge como uma potencial solução para tornar ágil o gerenciamento e implementação desses ambientes.

Nessa infraestrutura, uma máquina específica desempenha o papel de *bastion* da rede, sendo responsável pela gestão das regras de *firewall* o qual realiza a tradução dos endereços privados para públicos e provê o acesso externo as máquinas instanciadas por meio da configuração de um redirecionamento de portas. Assim, o acesso SSH é liberado apenas advindo de redes específicas informadas pelo pesquisador no ato do pedido. Atualmente, estão alocadas cerca de vinte máquinas virtuais para diferentes projetos de pesquisa, distribuídas em toda a estrutura computacional.

3.5. Testbed Blockchain

O Serviço de Testbed blockchain consiste em um ambiente controlado e simulado onde é possível testar e validar diversas aplicações e tecnologias baseadas em blockchain. O testbed possui uma interface gráfica onde o pesquisador facilmente consegue realizar as configurações para a criação de uma rede Blockchain. A arquitetura *Hyperledger Fabric* é utilizada como a atual plataforma, ela foi projetada para fornecer uma plataforma modular e flexível para a construção de redes de Blockchain corporativas [Hyperledger Fabric, CNCF 2020]. Outra funcionalidade da arquitetura *Hyperledger Fabric* são os nós pares (*Peers nodes*), tais nós, são os principais participantes da rede. São eles que mantêm o registro (*ledger*) e executam os contratos inteligentes (*chaincodes*) [Hyperledger Fabric, CNCF 2020] Os *peer nodes* de validação verificam a consistência das transações endossadas e mantêm o *ledger* compartilhado.

Ao utilizar o Testbed, o pesquisador pode informar a quantidade desejada de nós pares a serem implementados na rede Blockchain de acordo com necessidade do experimento. Outra informação importante que deve ser inserida é se há ou não, um nó ordenador, o serviço de ordenação (*Ordering Service*) é responsável por receber transações de nós pares, ordená-las em blocos e distribuir os blocos para os nós pares. Ele garante que as transações sejam registradas na ordem correta em todos os *peer nodes* [Hyperledger Fabric, CNCF 2020].

Ao confirmar os dados das organizações, a rede é criada e é possível acessar o *dashboard* e gerenciar a rede existente, criar canais, implantar e executar contratos inteligentes em uma ou mais organizações. Na Figura 2 temos um exemplo de criação de uma rede Blockchain no ambiente para experimentação.

4. Recursos

Para suportar todos os serviços descritos na seção anterior, o serviço coloca à disposição dos usuários uma robusta infraestrutura computacional distribuída por mais de 34 localidades em todo o Brasil. Essa ampla cobertura abrange PoPs, *Internet Data Center (IDC)* e instituições parceiras, garantindo conectividade e acesso facilitado para pesquisadores e instituições em diversas regiões do país.

A infraestrutura do Serviço se destaca por sua natureza totalmente compartilhada, virtualizável e acessível remotamente. Isso significa que os recursos computacionais po-

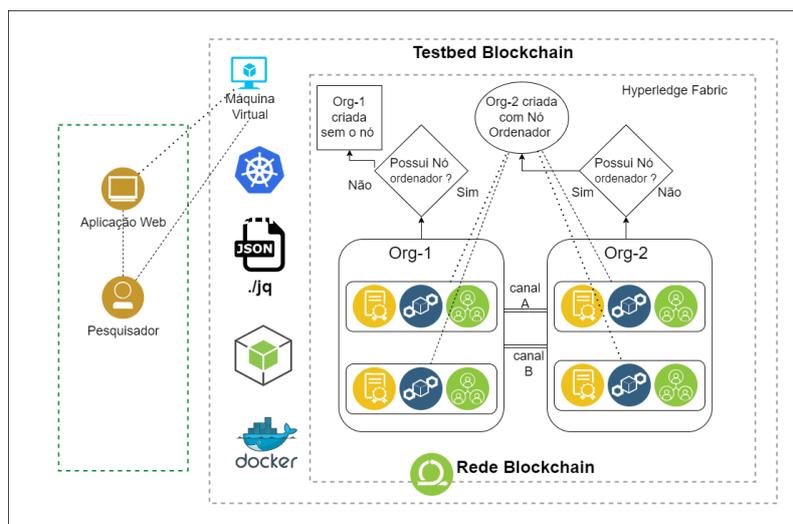


Figura 2. Exemplo de rede Blockchain no ambiente testbed.

dem ser utilizados por múltiplos usuários de forma simultânea, otimizando o uso da infraestrutura e promovendo a colaboração entre diferentes projetos.

Portanto, em relação à infraestrutura, o serviço conta com 102 servidores físicos, 2 *switchs* P4, máquinas virtuais provisionadas sob demanda, um cluster Kubernetes com 1 nó master e com 16 nós *workers*. Portanto, somando os recursos de hardware de todos os servidores físicos do serviço, o testbeds conta hoje com 11161 GB de memória RAM, 2774 CPUs e 763 TB de armazenamento. Além disso, os pesquisadores também podem utilizar o *Backbone* da RNP, haja vista que os componentes do serviço estão espalhados por todo o País, estando presente em todos os 26 estados e distrito federal.

5. Resultados

5.1. Estudo de caso

O 1º *Hackathon* do programa Hackers do Bem ocorreu em setembro de 2023 e contou com o suporte técnico e apoio computacional do serviço. Nesse caso, haviam dez times inscritos, sendo necessário, portanto, a criação de uma Máquina Virtual (VM) para cada um deles. O provisionamento das VMs foi realizado em 2 servidores, localizados no Rio Grande do Norte e no Rio Grande do Sul, respectivamente, sendo provisionadas 5 VMs em cada estado. Além disso, outras 20 VMs (10 em cada estado) foram provisionadas para garantir a continuidade ininterrupta do evento em caso de falha, elas foram mantidas desligadas como pode ser observado na Figura 3.

As VMs foram configuradas seguindo as diretrizes estabelecidas pelos coordenadores do evento, os quais solicitaram a instalação do sistema operacional Ubuntu 22.04 LTS com interface gráfica para que os participantes pudessem acessar um navegador web, além das ferramentas *Python 3.10*, *PIP3* e *Jupyter Notebook*. Adicionalmente, um *dataset* foi disponibilizado para ser utilizado pelos competidores durante o *Hackathon*.

Cada VM foi isolada individualmente em uma rede local privada, garantindo separação completa das demais e aumentando a segurança do ambiente. A fim de também evitar uso excessivo de CPUs por cada grupo, foi realizada a configuração de *cpuaffinity*, onde cada núcleo de processamento foi alocado para um grupo específico, evitando

sobrecarga na máquina hospedeira e garantindo uma distribuição equitativa de recursos, impedindo assim a concentração de recursos em um único participante do *Hackathon*.

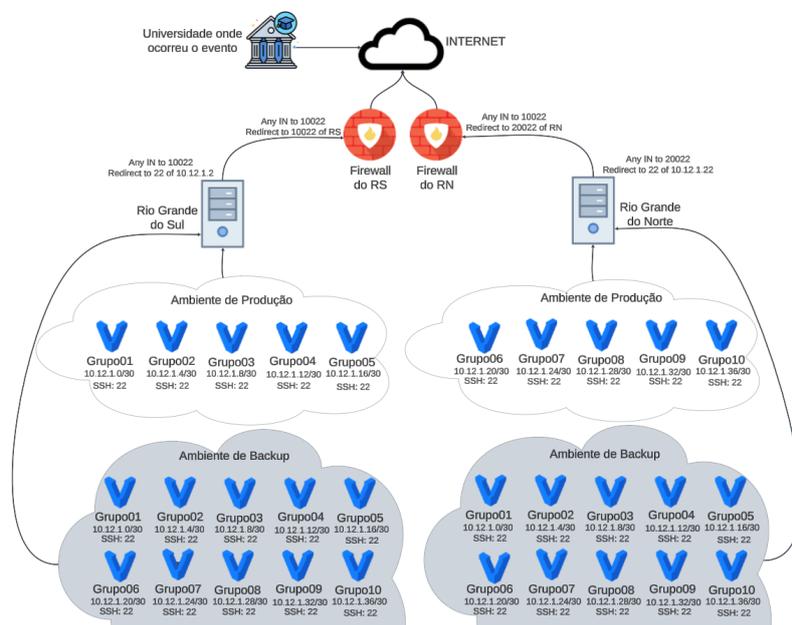


Figura 3. Diagrama da rede criada para o Hackathon.

O sucesso do primeiro *Hackathon* do programa Hackers do Bem demonstra a importância do serviço como plataforma para experimentação e desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras. A infraestrutura ofereceu aos pesquisadores e desenvolvedores um ambiente real, seguro, escalável e flexível para testar suas ideias e transformar suas soluções em realidade.

6. Lições aprendidas

Os experimentos conduzidos através do Serviço resultaram em aprendizados valiosos e impulsionaram o amadurecimento do serviço ao longo do tempo. Uma das evoluções significativas refere-se à análise da demanda dos pesquisadores, adotando uma abordagem centrada nas necessidades individuais de cada usuário. Aprendemos a realizar uma análise detalhada dos requisitos, visando identificar a solução e o ambiente mais adequados para cada pesquisador.

Outro aprendizado contínuo tem sido o fornecimento de suporte e realização de hands-on com usuários do ambiente de experimentação, trazendo um ganho para a equipe interna em relação ao aprendizado de novas tecnologias. Um ponto adicional é termos conseguido atuar como facilitadores para o início ou continuidade de colaborações, seja internamente na RNP, ou com grupos de pesquisadores de interesses em comum. Todo esse processo também trouxe enriquecimento interno do ponto de vista de autonomia, compartilhamento de conhecimento, colaboração entre equipes e treinamento interno.

7. Conclusão

Desempenhando um papel fundamental na pesquisa científica brasileira, o Serviço de Testbeds da RNP surge para atender à crescente busca por infraestruturas dedicadas à

experimentação científica. Ao oferecer uma plataforma flexível e customizável, com suporte à diferentes tecnologias emergentes, possibilita que pesquisadores desenvolvam e testem soluções nas diversas áreas tecnológicas que abrange, oferecendo um ambiente mais realista que viabiliza a execução de experimentos em cenários reais garantindo a reprodutibilidade dos resultados. Com este artigo espera-se dar visibilidade a importância e impactos que este serviço gera, através de suas ofertas, recursos e casos de uso, enquanto consolida seu contínuo valor para a comunidade acadêmica brasileira. Como trabalhos futuros pretende-se ampliar a oferta de tecnologias, tais como 5G e processamento gráfico com GPUs, e aprimorar as soluções existentes com a oferta de switches P4 para execução de experimentos em camada 2 impulsionando o progresso científico e tecnológico para o avanço do conhecimento.

Referências

- Baldin, I., Nikolich, A., Griffioen, J., Monga, I. I. S., Wang, K.-C., Lehman, T., and Ruth, P. (2019). Fabric: A national-scale programmable experimental network infrastructure. *IEEE Internet Computing*, 23(6):38–47.
- Berman, M., Chase, J. S., Landweber, L., Nakao, A., Ott, M., Raychaudhuri, D., Ricci, R., and Seskar, I. (2014). Geni: A federated testbed for innovative network experiments. *Computer Networks*, 61:5–23.
- Cristofoleti Magri, D. R., Frota Redigolo, F., Melo de Brito Carvalho, T. C., Neves Dias, G., Neumann Ciuffo, L., and Stanton, M. (2017). Guia dmz científica.
- Hyperledger Fabric, CNCF (2020). A blockchain platform for the enterprise. <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/1>. Acesso: 10 abr. 2024.
- Mondin, L. and Dias, G. (2023). Plataformas flexíveis para experimentação: o caminho para atender as novas demandas de experimentação científica em tics. In *Anais do XIV Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro*, pages 25–32. SBC.
- of Sciences, N. A., Policy, Affairs, G., on Research Data, B., Information, on Engineering, D., Sciences, P., on Applied, C., Statistics, T., on Mathematical Sciences, B., et al. (2019). *Reproducibility and replicability in science*. National Academies Press.
- Rakotoarivelo, T., Ott, M., Jourjon, G., and Seskar, I. (2010). Omf: a control and management framework for networking testbeds. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 43(4):54–59.
- Ricci, R., Eide, E., and Team, C. (2014). Introducing cloudlab: Scientific infrastructure for advancing cloud architectures and applications. ; *login:: the magazine of USENIX & SAGE*, 39(6):36–38.
- Schwarz, M. and Loui, F. (2023). Global p4 lab. In *SC23 Network Research Exhibition*. Association for Computing Machinery.
- The Linux Foundation. Os autores do Kubernetes (2021). Comunicação entre nó e control plane. <https://kubernetes.io/pt-br/docs/concepts/architecture/control-plane-node-communication>. Acesso: 10 abr. 2024.