

# Plataformas flexíveis para experimentação: o caminho para atender as novas demandas de experimentação científica em TICs

Leandro Mondin<sup>1</sup> e Gustavo Dias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (DPDI) - Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), Rua Lauro Müller, 116 - sala 1103 - Rio de Janeiro - RJ - Brazil

{leandro.mondin, gustavo.dias}@rnp.br

***Abstract.** This paper discusses the main challenges in providing Testbeds (environments for scientific experimentation) in ICTs, whose demands have been characterized by the increasing need for more heterogeneous and complex tests. Look for a balance between offering a platform for experimentation flexible enough to accommodate interdisciplinary research and, at the same time, enabling specialized experiments has been the approach adopted by the Serviço de Testbeds RNP. The authors detail in this work the initiatives adopted by RNP with the purpose of finding this balance and expanding the scope of experimentations supported by the available infrastructures.*

***Resumo.** Neste artigo são discutidos os principais desafios na oferta de ambientes para experimentação científica (Testbeds) em TICs, cujas demandas têm se caracterizado pela crescente necessidade de ensaios mais heterogêneos e complexos. A busca pelo equilíbrio entre oferecer uma plataforma para experimentação flexíveis o suficiente para acolher pesquisas interdisciplinares e, ainda assim, que possibilite experimentações especializadas têm sido a abordagem adotada pelo Serviço de Testbeds RNP. Os autores detalham neste trabalho as iniciativas adotadas pela RNP com o propósito de buscar este equilíbrio e expandir o escopo de atendimento das infraestruturas de experimentação disponíveis.*

## 1. Introdução

As Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) são uma parte fundamental da sociedade moderna (NIEBEL, 2018). Elas afetam a forma como nos comunicamos, trabalhamos (BIAGI, 2013), aprendemos e nos divertimos. As TICs tornaram-se uma parte essencial da vida cotidiana, permitindo o acesso a informações e serviços de maneira sem precedente.

Se em um passado recente as inovações em TICs podiam ser observadas a partir de uma perspectiva segmentada (redes de computadores mais velozes, computadores mais rápidos), as novas demandas trazem uma nova perspectiva: a transversalidade disciplinar. Esta característica multifacetada de algumas áreas de pesquisa em TICs não está restrita a uma transversalidade interna entre as disciplinas de TICs, mas também pode ser multidisciplinar. Por exemplo, a pesquisa em tecnologias educacionais pode envolver não apenas ciência da computação, mas também pedagogia, psicologia e sociologia. Da mesma forma, a pesquisa em saúde digital pode envolver médicos, enfermeiros, engenheiros biomédicos e cientistas da computação trabalhando juntos.

Um dos aspectos desafiadores das pesquisas multidisciplinares em TICs está relacionado a execução de experimentos e avaliação de seus resultados. Hipóteses que nascem da intersecção de duas ou mais áreas de pesquisa diferentes podem necessitar, para suas validações, que o ambiente para experimentação possibilite avaliar a interrelação de variáveis das diferentes áreas. Encontrar ou construir um *Testbed* que contemple as múltiplas áreas pode ser um desafio na validação de hipóteses com esta característica.

Discutir os conceitos e desafios relacionados a experimentação científica em TICs, com um olhar especial sobre as necessidades emergentes das pesquisas interdisciplinares, e de que forma a RNP tem buscado evoluir o seu Serviço de Testbeds em resposta a estas novas necessidades é o objetivo principal deste artigo.

## **2. Experimentação Científica em TICs e o uso de *Testbeds***

A validação de hipóteses em TICs geralmente segue um processo científico rigoroso, que envolve a formulação de uma ou mais hipóteses claras e testáveis, a definição de um plano de experimentação, a execução deste plano, a coleta de dados e a análise e interpretação dos resultados obtidos. O processo que define estas etapas, chamado de método científico, centra a validação das hipóteses na experimentação, cujos resultados podem amparar, refutar ou possibilitar ao pesquisador derivar novas hipóteses.

A relação direta entre a qualidade das evidências coletadas e o processo de experimentação tornam as decisões tomadas nesta etapa críticas. Ao pesquisador cabe escolher o método e o ambiente para experimentação adequados ao propósito da validação, de forma que os resultados fortaleçam as evidências coletadas.

A importância da experimentação em Ciências da Computação foi amplamente discutida em [TICHY 1998]. Embora muitas das limitações discutidas pelo autor, com base na realizada de 1998, não façam mais parte da realidade da experimentação científica, algumas barreiras apresentadas na época continuam atuais, como, por exemplo, o alto custo e a complexidade de se construir e manter ambientes para experimentação.

Infraestruturas públicas para experimentação (*Testbeds* Federados), como, por exemplo, FIBRE (SALMITO 2014), *Planet Lab* (CHUN, 2003) e FIRE (GAVRAS 2014), surgiram com o propósito de endereçar alguns destes problemas, oferecendo aos pesquisadores uma infraestrutura de rede e de computação para pesquisa e experimentação em larga escala, em um ambiente controlado e com características de operação reais. Em [LI, 2021] os autores argumentam que *Testbeds* podem oferecer um ambiente mais realista e diversos para avaliação de modelos de ML. Já em [WANG, 2020] os autores discutem os benefícios do uso de *Testbeds* Federados no contexto de IoT (*Internet of Things*), incluindo, entre eles, a maior acuracidade e relevância dos resultados das experimentações. Por fim, em [ZHANG, 2021], os autores avaliam o uso de *Testbeds* em pesquisas relacionados à computação de borda, e assim como os autores anteriores, reforçam a robustez e aceitação dos resultados obtidos nas experimentações.

Além de possibilitarem o reuso das infraestruturas para diferentes interesses de pesquisa, reduzindo assim o custo da pesquisa, as plataformas públicas para experimentação também facilitam a reprodução de experimentos por outros cientistas, facilitando também a aceitação de seus resultados e conclusões (RAKOTOARIVELO, 2010).

Há, porém, um aspecto inerente à pesquisa científica em TICs que representa um desafio aos mantenedores destas plataformas: cada pesquisa possui suas próprias necessidades e interesses de experimentação (RAKOTOARIVELO, 2010 e MARIN e NAVARRO,

2014), o que pode distanciar os *Testbeds* disponíveis de pesquisas interdisciplinares ou daquelas que buscam desbravar o “estado da arte” tecnológico.

Ao olhar atentamente os fatores que impulsionaram a construção das diversas plataformas para experimentação mantidas pela RNP, talvez seja possível perceber algumas causas deste desalinhamento. Com exceção do *Testbed* FIBRE, que foi construído com uma abordagem generalista de ilhas, mas cuja infraestrutura se tornou obsoleta ao longo dos anos, as demais plataformas foram entregues de iniciativas e projetos com objetivos de atender experimentações bastante específicas, normalmente atendendo a um recorte de alguma área de pesquisa em TICs. Como as propostas de construção de *Testbeds* geralmente partem de grupos de pesquisa que buscam viabilizar ou aprimorar as experimentações em sua área de pesquisa, não chega a ser surpreendente que *Testbeds* mais abrangentes em seu escopo de atendimento sejam raros.

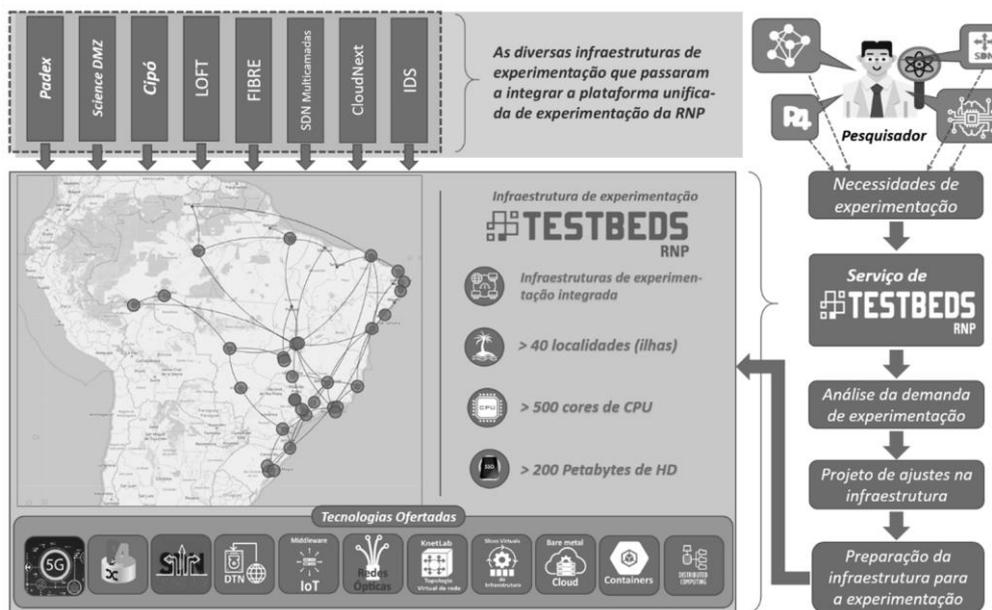
Embora, sob a perspectiva dos recursos tecnológicos atuais, estejamos longe de uma “plataforma universal para experimentação em TICs”, observa-se uma tendência crescente na construção de novos *Testbeds* em buscar acomodar diferentes áreas de pesquisa. Por exemplo, o *Testbed* FABRIC (BALDIN, 2019), lançado em 2019, tem como um dos seus objetivos oferece instrumentos de experimentação para pesquisadores de Ciências da Computação e para muitos outros domínios da ciência que desejem explorar infraestruturas computacionais e de dados distribuídas (BALDIN, 2019). Apenas a título de exemplo, algumas áreas citadas pelos mantenedores do FABRIC como possivelmente acolhidas pela infraestrutura deste *Testbed* são *Edge Computing*, IoT, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina (ML - *Machine Learning*), Ciência de Dados, Cibersegurança, computação de alto desempenho, entre outras (FABRIC, 2023).

De acordo com [BALDIN, 2019], a arquitetura do FABRIC diferencia-se dos seus antecessores pela sua capacidade de armazenamento, recursos computacionais e programabilidade, tanto em borda como no core da infraestrutura.

Inspirado na proposta do FABRIC, o Serviço de *Testbeds* RNP tem buscado alterar sua infraestrutura de experimentação, bem como, possibilitar o acesso dos experimentadores a mais recursos de armazenamento e capacidade computacional, com o propósito de estender o escopo de atendimento atual do serviço. No restante deste artigo discutimos como tem se dado este processo e que resultados são esperados desta nova visão.

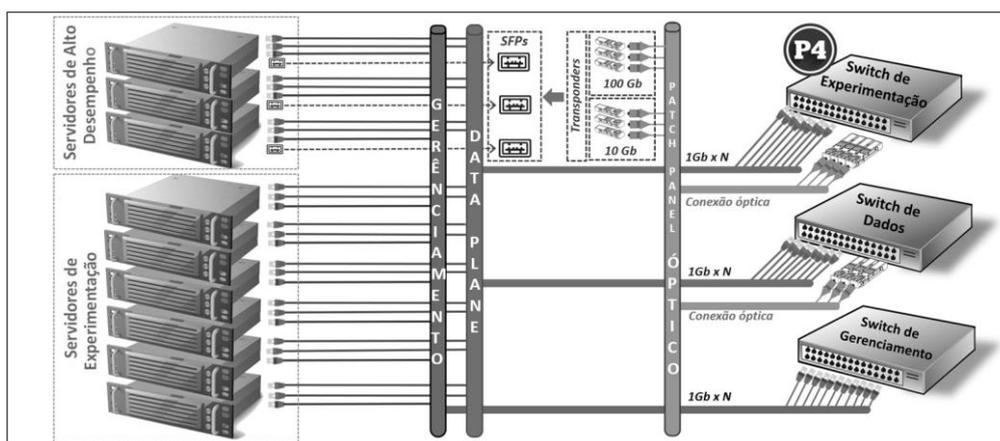
### **3. A unificação das diferentes plataformas para experimentação em uma única oferta de Serviço na RNP**

Embora o portfólio de oferta de infraestrutura para experimentação na RNP tenha crescido de forma significativa nos últimos anos, a utilização destas pela comunidade científica brasileira não cresceu em uma proporção semelhante. A partir da criação do Serviço de *Testbeds* RNP, em 2021, e do mapeamento, ainda que preliminar, de possíveis razões para essa dissociação entre a oferta e as necessidades emergentes, uma série de ações estratégicas têm sido tomadas no sentido de aproximar a oferta destas plataformas às necessidades emergentes da comunidade científica brasileira.



**Figura 1. Integração das infraestruturas para experimentações da RNP**

As duas principais mudanças na oferta de plataformas para experimentações na RNP foram a centralização dos pedidos de uso dos *Testbeds* em uma equipe dedicada e a unificação das diferentes infraestruturas dos *Testbeds* ofertados em uma plataforma integrada para experimentações. Os *Testbeds* integrados, bem como, a nova forma como os atendimentos têm ocorrido pelo Serviço de Testbeds RNP para suportar esta nova infraestrutura estão apresentados na Figura 1. A integração das diferentes infraestruturas em uma única plataforma de experimentação, distribuída e flexível, têm como objetivos (i) expandir a gama de áreas de pesquisas em TIC atendidas e (ii) possibilitar ajustes mais finos às necessidades peculiares de cada demanda.



**Figura 2. Nova arquitetura para as ilhas do Serviço de Testbeds RNP**

Conforme apresentado na Figura 2, o projeto topológico adotado para a nova infraestrutura unificada possibilita a interconexão lógica entre qualquer hardware dedicado a experimentação na ilha, ou mesmo, a interconexão lógica destes mesmos dispositivos a qualquer outro hospedado em outras ilhas (modelo N:N). Somado a isso, a nova arquitetura possui uma infraestrutura dedicada ao gerenciamento dos recursos de experimentação, possibilitando um melhor suporte aos usuários que estejam realizando

experimentações ou mesmo a oferta de serviços de servidores, ou nuvem de servidores, *bare-metal*. A rede de gerenciamento foi projetada para suportar o protocolo IPMI (*Intelligent Platform Management Interface*), que possibilita o monitoramento, gerenciamento, atualização de firmware, entre outras funções, de forma remota, independente do sistema operacional ou status dos mesmos.

Esta nova arquitetura está em implantação, neste momento, nos PoPs (Point of Presence – Ponto de Presença) RNP do Rio de Janeiro e no IDN (*Internet Data Center*) RNP em Brasília. Ela passará por um período de ajustes e prova de conceito durante o ano de 2023 e, em logrando sucesso, deverá ser implementada em outras ilhas do Serviço de Testbeds RNP.

#### **4. Resultados esperados das mudanças de infraestrutura e atendimento**

As alterações da infraestrutura de experimentação, discutidas na Seção 3, e a nova abordagem de atendimento do Serviço de Testbeds RNP, apresentada na Figura 1, que agora passa a contar com uma etapa de preparação e consultoria durante o atendimento, têm por objetivo possibilitar o acolhimento de demandas de experimentação de pesquisas do estado da arte tecnológico e aumentar o escopo de áreas de pesquisa atendidas. Nesta seção trazemos alguns exemplos de áreas de pesquisa, que podem agora ser acolhidas pelo Serviço de Testbeds RNP de forma mais adequada, e de atendimentos realizados recentemente para grupos de pesquisa antes não atendidos pelo serviço.

O plano futuro de implementar a nova arquitetura de ilhas, apresentada na Figura 2, nos diversos PoPs da RNP que hospedam infraestruturas de experimentação (ver Figura 1) possibilitará experimentações como aquelas discutidas em [HUEDO, 2021] e [HOFER, 2019]. Em [HUEDO, 2021] os autores propõem uma nova plataforma para habilitar uma infraestrutura de borda (*Edge*) com base em uma arquitetura de nuvem distribuída desagregada fazendo uso de servidores *bare-metal* nas bordas. Conforme apresentando na Figura 2, a nova arquitetura possibilita que a infraestrutura de cada ilha possa ser reconfigurada para suportar um ou mais servidores *bare-metal*. Já em [HOFER, 2019] os autores avaliam o desempenho de aplicações de tempo crítico em plataforma de nuvem fazendo uso para seus experimentos de servidores *bare-metal*. Experimentações como esta poderiam ser acolhidas também pela nova infraestrutura, possibilitando testes em escala e com distribuição geográfica.

A possibilidade de reconfigurar a infraestruturas das ilhas para expandir o *Cluster Kubernetes* do Serviço de Testbeds RNP permite aplicações em containers que podem simular componentes IoT. A arquitetura *Kubernetes* oferece suporte os diferentes protocolos de dispositivos IoT, que podem ser instâncias de forma distribuída no *Cluster* (PHUC e THANH, 2022), viabilizando experimentações de larga escala e distribuídas em IoT. Mesmo experimentos que têm por objetivo realizar modificações na arquitetura *Kubernetes*, como a proposta em [PHUC, PHAN e KIM, 2022], podem ser realizadas na nova arquitetura. Para este tipo de experimento, o ambiente de homologação do *Cluster Kubernetes*, onde novas implementações são avaliadas antes de serem migradas para o *Cluster* de produção, pode ser utilizado. Uma segunda opção seria reservar servidores de diferentes ilhas para construir um *Cluster Kubernetes* do próprio experimentador, em escala e distribuído geograficamente, dando ao mesmo pleno controle sobre o seu experimento, sem afetar outras experimentações.

A abordagem de trabalhar em parceria com os pesquisadores para encontrar formas de viabilizar as experimentações, mesmo com as limitações atuais da infraestrutura, tem

possibilitado experimentos em diversas áreas relacionadas à evolução da Internet, como ICN (*Information-Centric Networking*) e MEC (*Multi-Access Edge Computing*) [TALEB, 2017]. Em [BELTRAN, 2022] estão relados sobre uma pesquisa científica realizada sobre a infraestrutura de experimentação da RNP relacionada à ICN. Com relação a experimentações em MEC, neste momento o Serviço de Testbeds RNP está apoiando experimentações desta tecnologia no uso de aplicações de vídeo sob demanda.

Através de parcerias, o Serviço de Testbeds RNP também tem apoiado grupos de pesquisa em redes de nova geração. Neste modelo de atendimento, o Serviço de Testbeds RNP é responsável pela interconexão, monitoramento e configuração das infraestruturas de experimentação, enquanto diferentes equipes de pesquisa provêm as infraestruturas computacionais. O projeto SFI-2 [SFI2, 2023], que busca criar *slices* virtuais de recursos computacionais e de rede em diferentes domínio, tem usado o Serviço de Testbeds RNP para realizar experimentações dos diferentes *Work Packages* do projeto.

Um dos objetivos das mudanças de infraestrutura descritas na Seção 3, ou seja, acolher novos campos de pesquisa, já pode ser observado nos atendimentos aos projetos *Network Borescope* [BORESCOPE, 2023] e da ferramenta WHOT (*Women's Health Observer Tool*) [COSTA, 2021], que usam a infraestrutura de experimentação da RNP para treinamento de modelos de ML com grandes volumes de dados.

## 5. Desafios na evolução da infraestrutura do Serviço de Testbeds RNP

A partir da reestruturação da oferta de infraestruturas para experimentação, discutidos na Seção 3, a forma como o seu *roadmap* evolutivo é feito também está sendo alterada. Se antes as definições sobre a expansão ou evolução eram definidas a partir de direcionamentos tecnológicos (*Technology Push*), com as alterações no serviço outros fatores passaram a influenciar estas decisões, o que chamaremos aqui de *Demand Pull* (DI STEFANO, 2012). Como forma de balancear o *roadmap* evolutivo da infraestrutura de experimentação, indicações de necessidades de pesquisa coletadas junto à comunidade têm passado a influir nas evoluções planejadas (*Demand Pull*).

Um dos aspectos que devem ser melhor compreendidos, sob o ponto de vista de demanda, é a necessidade de elementos de hardware especializados para viabilizar a experimentação científica em campos de pesquisa claramente em expansão, como IoT.

Em [MEWADA, 2023] os autores discutem sobre a evolução da pesquisa em IoT e os desafios a serem vencidos pela pesquisa nesta área. Segundo [GOMEZ, 2019], muitas pesquisas relacionadas à IoT requerem que o ambiente de experimentação possua dispositivos específicos e presentes em larga escala nas experimentações. Hoje, as alternativas oferecidas pelo Serviço de Testbeds RNP aos pesquisadores com estas necessidades são as seguintes:

1. Simular dispositivo IoT em modelos computacionais e instanciar estes modelos nas ilhas e na quantidade necessária para a hipótese que se busca validar; ou
2. Integrar seus próprios dispositivos IoT durante a experimentação permitindo, inclusive, que estes fiquem na própria instituição do pesquisador, modelo conhecido como BYOD (*Bring Your Own Device*).

Porém, ambos os casos trazem desafios, tanto para o pesquisador quanto para a equipe serviço, ou ainda, para quem está cedendo recursos para o experimento. Conectar dispositivos externos na rede de dados do serviço pode trazer riscos de segurança, além de envolver um processo complexo de configuração dos elementos de rede que realizam

o transporte de dados entre as infraestruturas. Já no caso de dispositivos IoT simulados, pode ser do interesse do pesquisador instanciar, hipoteticamente, milhares de instâncias simultaneamente, o que, dependendo da eficiência do simulador, pode comprometer recursos computacionais que são compartilhados com outras pesquisas.

As mesmas limitações e opções discutidas anteriormente também se aplicam a pesquisas em P4 (HAUSER, 2023). Neste momento, a infraestrutura de experimentação da RNP possui poucos switches com suporte à P4. Pesquisadores que precisam de uma quantidade maior de switches podem simular estes dispositivos no *Cluster Kubernetes* do serviço ou mesmo trazer seus próprios Switches para serem somados aos disponibilizados pela RNP.

Ainda dentro da discussão de possíveis expansões da infraestrutura de experimentação da RNP com a agregação de *hardwares* especializados, parcerias com *Testbeds* internacionais tem sido um outro caminho explorado. Um exemplo, que neste momento encontra-se em fase de prova de conceito e modelagem de oferta, é a integração dos *Switches* P4 da infraestrutura para experimentações da RNP a um *Testbed* global de Switches P4 chamado GÉANT P4 Lab (GP4L).

Se por um lado esta abordagem possibilitaria a comunidade científica brasileira ter acesso a uma ampla rede de dispositivos P4 para suas experimentações, por outro, requer que os Switches P4 da RNP sejam reservados para o uso no *Testbed* global, tornando-os indisponíveis para outras experimentações de menor escala ou que requeiram infraestruturas computacionais que não estão disponíveis no GP4L, mas estão disponíveis no Serviço de Testbeds RNP. Devido a isso, diferentes modelos de oferta para serviços com este perfil estão sendo avaliados e experimentados pelo Serviço de Testbeds RNP.

## Conclusão

Este artigo buscou destacar a importância da experimentação na pesquisa científica em TICs e como a qualidade do processo e das evidências coletadas afetam a aceitação dos resultados. Com o aumento da interseção entre as diferentes áreas de conhecimento, surge um novo desafio na experimentação: a construção de *Testbeds* capazes de acolher experimentos diversos. A RNP está buscando soluções evolutivas, unificadas e flexíveis para melhor suportar esse novo desafio. Um novo processo de decisão para evolução dos *Testbeds* está em curso, levando em consideração as demandas da comunidade científica brasileira e as tendências de pesquisa em TICs. Assim como na pesquisa científica, estas iniciativas nasceram de observações e experiências passadas, tiveram hipóteses formuladas e estão, neste momento, em fase de experimentação no serviço. Os resultados e evidências gerados deverão fornecer subsídios que validem o quão próximo estamos.

## Referências

- BIAGI, Federico. (2013), ICT and Productivity: A Review of the Literature.
- NIEBEL, Thomas. (2018), ICT and economic growth-Comparing developing, emerging and developed countries. *World Development* 104, p. 197-211.
- BALDIN, Ilya, et al. (2019), Fabric: A national-scale programmable experimental network infrastructure. *IEEE Internet Computing* 23.6, p. 38-47.
- CHUN, Brent, et al. (2003), Planetlab: an overlay testbed for broad-coverage services. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 33.3, p. 2-12.
- JIANG, Dajie, e Guangyi Liu. (2016), An overview of 5G requirements. *5G Mobile Communications*, p. 3-26.
- TICHY, Walter F. (1998), Should computer scientists experiment more?. *Computer* 31.5, p. 32-40.

- SALMITO, Tiago et al. (2014), Fibre: an international testbed for future internet experimentation. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-SBRC 2014.
- GAVRAS, Anastasius et al. (2007), Future internet research and experimentation: the FIRE initiative. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 37, n. 3, p. 89-92.
- FABRIC. (2023), FABRIC Testbed Web Page. Disponível em < <https://whatisfabric.net/>>. Acesso em 12 mar. 2023.
- DI STEFANO, Giada et al. (2012), Technology push and demand pull perspectives in innovation studies: Current findings and future research directions. *Research policy*, v. 41, n. 8, p. 1283, 2012.
- MEWADA, Shivlal. (2023), Exploration of Research Challenges and Potential Applications in IoT. *Encyclopedia of Data Science and Machine Learning*, p. 2286-2297.
- GOMEZ, A. K. e Bajaj, S. (2019), Challenges of Testing Complex Internet of Things (IoT) Devices and Systems. 11th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE), Da Nang, Vietnam, 2019, pp. 1-4.
- HUEDO, E., et al. (2021), Enabling an edge infrastructure according to a disaggregated distributed cloud architecture and an opportunistic model based on bare-metal providers. *Future Generation Computer Systems*, 116, 1-14.
- HOFER, C., Kastner, W., e Scholz, B. (2019), Shifting industrial control software from dedicated hardware to bare-metal servers or cloud computing platforms using off-the-shelf technologies. *Journal of Systems and Software*, 157, 110391.
- PHUC, N. H., THANH, N. T. e Thanh, N. H. (2022), Node-Based Horizontal Pod Autoscaler in KubeEdge-Based Edge Computing Infrastructure. *IEEE Access*, (10), 134417-134426.
- PHUC, N. H., PHAN, T. H. e KIM, D. H. (2022), Traffic-Aware Horizontal Pod Autoscaler in Kubernetes-Based Edge Computing Infrastructure. *IEEE Access*, 10, 18966-18977.
- BELTRAN, Rafael D. et al. (2022), Orquestrando Avaliaçõess Experimentais com ICN-Stage. Anais do XIII Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro. SBC, 2022. p. 1-6.
- TALEB, Tarik et al. (2017), On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, n. 3, p. 1657-1681, 2017.
- SFI2. (2023), SFI-2 Web Page. < <https://sites.google.com/view/sfi2/home>>. Acesso em 10 mar. 2023.
- COSTA, S. W. D. S. et al. (2021), WHOT, a Novel Tool to Assist Women Victims of Violence: A Case Study in the Brazilian Amazon. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 95046-95060, 2021.
- BORESCOPE. (2023), Network Borescope Web Page. Disponível em <<https://bit.ly/42cakby>>. Acesso em 9 mar. 2023.
- ZHANG, Y., et al. (2021), A federated testbed for edge computing research. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 147, 1-10.
- Li, Y., et al. (2021), Federated learning testbeds: A survey. *IEEE Access*, 9, 128925-128940.
- Wang, Y., et al. (2020), Federated testbeds for internet of things research: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(10), 9675-9686.
- RAKOTOARIVELO, Thierry et al. (2010), OMF: a control and management framework for networking testbeds. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, v. 43, n. 4, p. 54-59, 2010.
- MARIN, Gerard e NAVARRO, Leandro. (2014), Federation of community networking testbeds?. *IEEE 10th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. IEEE, 2014. p. 200-204.
- HAUSER, Frederik et al. (2023), A survey on data plane programming with p4: Fundamentals, advances, and applied research. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 212, p. 103561, 2023.