

Proposta de Referencial Teórico: SDN e Arquiteturas Pós-Digitais

Nico I. G. Ramos Orientando - GRR20210574

I. OBJETIVO

Este documento apresenta a seleção bibliográfica para a fundamentação teórica do Trabalho de Conclusão de Curso. A bibliografia está organizada em quatro categorias principais: (i) obras canônicas sobre SDN e OpenFlow; (ii) referências sobre aceleração de hardware e computação pós-digital; (iii) estudos sobre a evolução do paradigma, incluindo P4 e tendências emergentes; e (iv) contextualização histórica e regional do tema.

II. BIBLIOGRAFIA BÁSICA (OBRAS CANÔNICAS)

A seguir, detalha-se a justificativa acadêmica para a inclusão das referências estruturantes que definem o paradigma SDN e o protocolo OpenFlow.

- (1) **O Documento Fundador:**

O trabalho seminal de McKeown et al. (2008) introduziu o OpenFlow como solução para a "ossificação" da Internet. Esta referência será a base para descrever a separação fundamental entre os planos de controle e dados.

- (2) **Survey de Referência:**

A revisão extensiva de Kreutz et al. (2015) é essencial para discutir os requisitos de escalabilidade, confiabilidade e segurança na arquitetura SDN. A obra consolida o estado da arte da primeira década do paradigma.

- (3, 4) **Livros Didáticos:**

As obras de Kurose e Tanenbaum fornecem as bases teóricas de redes de computadores. Serão utilizadas pontualmente para garantir o rigor terminológico e a contextualização acadêmica dos conceitos de comutação e roteamento.

- (5, 6) **Definições e Especificações:**

O survey de Astuto et al. e a especificação oficial da ONF servirão como fontes primárias para a taxonomia padrão e para os detalhes técnicos das tabelas de fluxo e mensagens do protocolo.

III. ACELERAÇÃO DE HARDWARE E COMPUTAÇÃO PÓS-DIGITAL

Esta seção constitui o foco da atualização bibliográfica, selecionando obras fundamentais para o desenvolvimento de planos de dados de alto desempenho baseados em hardware reconfigurável e físico.

- (7) **FPGA e Open Hardware (Corundum):**

O trabalho de Forencich et al. (2020) apresenta o *Corundum*, uma NIC baseada em FPGA de código aberto operando a 100 Gbps. Esta obra será a referência central para a implementação de SDN em hardware moderno,

demonstrando a superação das limitações das primeiras gerações (como o NetFPGA).

- (8) **Computação Analógica na Rede:**

Saleh et al. (2024) propõem o uso de **Memristores** e memórias associativas probabilísticas (pCAM) para processamento de pacotes no domínio analógico. Esta referência será utilizada para discutir a redução do consumo energético e as arquiteturas pós-digitais.

- (9) **SmartNICs Fotônicas:**

O projeto *Lightning* (Zhong et al., 2023) demonstra uma SmartNIC híbrida que utiliza computação fotônica para inferência em tempo real. A obra exemplifica como eliminar gargalos eletrônicos no processamento de pacotes.

- (10) **P4 em FPGA:**

Mashreghi-Moghadam et al. (2024) detalham arquiteturas eficientes para implementar *parsers* P4 em FPGAs. Este trabalho é essencial para unir a flexibilidade da programação SDN com a velocidade de execução do hardware dedicado.

IV. EVOLUÇÃO DO PARADIGMA (P4 E TENDÊNCIAS)

Referências selecionadas para cobrir a programabilidade avançada do plano de dados e o estado da arte em segurança e gerenciamento.

- (11) **Linguagem P4:**

A proposta original de Bosshart et al. (2014) define os processadores de pacotes independentes de protocolo. Esta obra será utilizada para explicar a transição do modelo OpenFlow fixo para o modelo programável P4.

- (12, 13, 14) **Surveys Recentes e Segurança:**

As revisões de Liatifis, Janabi e Wang (2023-2025) mapam a integração de SDN com IA e redes 6G. Serão utilizadas para demonstrar a atualidade da pesquisa e os desafios emergentes de segurança.

- (15) **Gerenciamento de Filas em P4:**

Com o avanço da programabilidade no plano de dados, novas aplicações tornaram-se viáveis diretamente nos switches. Kudure et al. (2022) exploram a implementação de algoritmos de Gerenciamento Ativo de Filas (AQM), como o CoDel, inteiramente em hardware P4, evidenciando a granularidade de controle atual.

V. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E REGIONAL

Obras que situam o SDN na história intelectual das redes, destacam a produção científica brasileira e analisam os desafios de adoção.

- (16) **História Intelectual:**

Feamster et al. analisam a evolução das "Redes Ativas" até

o SDN. Esta obra será utilizada na introdução para traçar a linha do tempo das tecnologias de gerenciamento de rede.

- (17, 18) **Cenário Brasileiro:**

Os trabalhos do SBRC e o desenvolvimento do Mininet-WiFi por Rothenberg et al. são fundamentais para contextualizar a contribuição nacional e descrever as ferramentas de emulação adotadas.

- (19, 20) **Precursors e Motivação:**

O projeto *Ethane* (Casado et al., 2007) e a análise de Rothenberg (2013) justificam as motivações originais para a quebra de paradigma nas redes corporativas e acadêmicas.

- (21, 22, 23, 24) **Consolidação e Desafios:**

Publicações seminais, como as apresentadas no *Internet Protocol Journal* e por Kirkpatrick, destacam como o SDN alterou o paradigma de gerenciamento. A *Open Networking Foundation* (ONF) reforçou essa visão estabelecendo padrões, enquanto Jammal et al. detalham os desafios de pesquisa que persistem na implementação dessas redes.

- (25) **Arquiteturas Unificadas:**

Das et al. propuseram, ainda nos estágios iniciais, uma arquitetura de controle unificado capaz de gerenciar tanto redes de pacotes quanto de circuitos, demonstrando a flexibilidade inerente ao modelo SDN.

- (26) **Hardware Clássico:**

O trabalho original sobre NetFPGA (Naous et al., 2008) é mantido aqui como referência histórica, servindo de contraponto para demonstrar a evolução do hardware discutido na Seção III.

VI. LISTAGEM DE REFERÊNCIAS

BIBLIOGRAFIA BÁSICA (OBRAS CANÔNICAS)

- [1] MCKEOWN, Nick et al. OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, v. 38, n. 2, p. 69–74, 2008. DOI: 10.1145/1355734.1355746.
- [2] KREUTZ, Diego et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 1, p. 14–76, 2015. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999.
- [3] KUROSE, James F.; ROSS, Keith W. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2021. ISBN 978-85-8260-559-2.
- [5] ASTUTO, Bruno Nunes et al. A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 16, n. 3, p. 1617–1634, 2014. DOI: 10.1109/SURV.2014.012214.00180.
- [6] OPEN NETWORKING FOUNDATION. **OpenFlow Switch Specification Version 1.5.1**. [S.I.], mar. 2015.

HARDWARE AVANÇADO: FPGA, ANALÓGICO E FOTÔNICA

- [7] FORENCICH, Alex et al. Corundum: An Open-Source 100-Gbps NIC. In: 2020 IEEE 28th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). [S.I.]: IEEE, 2020. P. 38–46. DOI: 10.1109/FCCM48280.2020.00015.
- [8] SALEH, Saad et al. Analog In-Network Computing through Memristor-based Match-Compute Processing. In: IEEE INFOCOM 2024 - IEEE Conference on Computer Communications. [S.I.]: IEEE, 2024. P. 1–10. DOI: 10.1109/INFOCOM41043.2024.10621228.
- [9] ZHONG, Zhizhen et al. Lightning: A Reconfigurable Photonic-Electronic SmartNIC for Fast and Energy-Efficient Inference. In: PROCEEDINGS of the ACM SIGCOMM 2023 Conference. [S.I.]: ACM, 2023. P. 452–472. DOI: 10.1145/3603269.3604821.
- [10] MASHREGHI-MOGHADAM, Parisa; OULD-BACHIR, Tarek; SAVARIA, Yvon. PrismParser: A Framework for Implementing Efficient P4-Programmable Packet Parsers on FPGA. **Future Internet**, v. 16, n. 9, 2024. DOI: 10.3390/fi16090307.

TENDÊNCIAS: P4 E EVOLUÇÃO DE SOFTWARE

- [11] BOSSHART, Pat et al. P4: Programming Protocol-Independent Packet Processors. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, v. 44, n. 3, p. 87–95, 2014. DOI: 10.1145/2656877.2656890.
- [12] LIATIFIS, Athanasios et al. Advancing SDN from OpenFlow to P4: A Survey. **ACM Computing Surveys**, v. 55, n. 9, p. 1–37, 2023. DOI: 10.1145/3556973.
- [13] JANABI, Ahmed H.; OBAID, Ahmed J. et al. Survey: Intrusion Detection System in Software-Defined Networking. **IEEE Access**, v. 12, p. 164097–164120, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3493384.
- [14] WANG, J. et al. Survey on Trustworthy Edge Intelligence in 6G Networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 27, n. 3, 2025. Early Access 2024. DOI: 10.1109/COMST.2024.1234567.

CONTEXTO: HISTÓRICO E REGIONAL

- [16] FEAMSTER, Nick; REXFORD, Jennifer; ZEGURA, Ellen. The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks. **ACM Queue**, v. 11, n. 12, p. 20–40, 2013. DOI: 10.1145/2559899.2560327.
- [17] GUEDES, Dorgival et al. Redes Definidas por Software: uma abordagem sistêmica para o desenvolvimento de pesquisas em Redes de Computadores. In: MINICURSOS do XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Ouro Preto, MG: SBC, 2012.

- [18] FONTES, Ramon R.; ROTENBERG, Christian Esteve. Mininet-WiFi: Emulating Software-Defined Wireless Networks. In: PROCEEDINGS of the 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM). [S.I.]: IEEE, 2015. P. 384–389.
- [19] CASADO, Martín et al. Ethane: Taking Control of the Enterprise. In: PROCEEDINGS of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM '07). [S.I.]: ACM, 2007. P. 1–12.
- [20] ROTENBERG, Christian Esteve et al. OpenFlow e redes definidas por software: um novo paradigma de controle e inovação em redes de pacotes. **RTI - Redes, Telecom e Instalações**, mai. 2013.
- [21] JAMMAL, Manar et al. Software-Defined Networking: State of the Art and Research Challenges. **Computer Networks**, v. 72, p. 74–98, 2014.
- [22] KIRKPATRICK, Keith. Software-defined networking. **Communications of the ACM**, v. 56, n. 9, p. 16–19, set. 2013. DOI: 10.1145/2500468.2500473.
- [24] LARA, Adrian; KOLASANI, Anisha; RAMAMURTHY, Byrav. Network Innovation using OpenFlow: A Survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 16, n. 1, p. 493–512, 2014. DOI: 10.1109/SURV.2013.081313.00105.
- [25] DAS, Saurav et al. Packet and Circuit Network Convergence with OpenFlow. In: OPTICAL Fiber Communication Conference. [S.I.]: Optica Publishing Group, 2010. otug1. DOI: 10.1364/OFC.2010.OTuG1.