



PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM SDN MULTIDOMÍNIO

A3.1 – Levantamento do estado da arte

**Softwarização em Redes Abertas e Desagregadas
como Habilitador de Aplicações Inovadoras
Programa OpenRAN@Brasil - Fase 1**

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 8 |
| 2. Levantamento do Estado da Arte | 9 |
| 2.1. Domínio Sem Fio | 9 |
| 2.1.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos | 9 |
| 2.1.1.1. 3GPP | 10 |
| 2.1.1.2. O-RAN Alliance e OSC | 10 |
| 2.1.1.3. TIP | 12 |
| 2.1.1.4. ONF | 12 |
| 2.1.1.5. OSA | 15 |
| 2.1.2. Projetos de Software Aberto | 16 |
| 2.1.2.1. ONF SD-RAN | 16 |
| 2.1.2.2. OSC RICAPP, RICPLT e NONRTRIC | 18 |
| 2.1.2.3. OAI FlexRIC | 19 |
| 2.1.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento | 19 |
| 2.1.4. Levantamento Sistemático da Literatura | 19 |
| 2.2. Domínio de Cloud | 20 |
| 2.2.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos | 20 |
| 2.2.1.1. Linux Foundation (LF) | 20 |
| 2.2.1.2. Cloud Native Computing Foundation (CNCF) | 21 |
| 2.2.1.3. ONF | 22 |
| 2.2.2. Projetos de Software Aberto | 22 |
| 2.2.2.1. Kubernetes | 22 |
| 2.2.2.2. Helm | 23 |
| 2.2.2.3. Aether | 24 |
| 2.2.2.4. SD-CORE | 25 |
| 2.2.2.5. ONAP | 25 |
| 2.2.2.6. OpenStack | 28 |
| 2.2.2.7. OpenStack Compute (Nova) | 28 |
| 2.2.2.8. Heat | 29 |
| 2.2.2.9. Glance | 30 |
| 2.2.2.10. Cinder | 30 |
| 2.2.2.11. OpenStack Networking (Neutron) | 30 |
| 2.2.2.12. Ceph | 31 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2.13. Akraino Edge Stack..... | 31 |
| 2.2.2.14. Anuket..... | 31 |
| 2.2.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento e utilização | 32 |
| 2.2.4. Levantamento Sistemático da Literatura..... | 35 |
| 2.3. Domínio de Pacotes P4 | 37 |
| 2.3.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos | 37 |
| 2.3.1.1. Open Networking Foundation (ONF)..... | 37 |
| 2.3.1.2. Open Compute Project (OCP)..... | 38 |
| 2.3.1.3. Internet Engineering Task Force (IETF) | 38 |
| 2.3.1.4. Linux Foundation (LF) | 39 |
| 2.3.2. Projetos de Software Aberto..... | 40 |
| 2.3.2.1. Ecosistema P4 | 40 |
| 2.3.2.2. Software Defined Fabric (SD-Fabric) | 42 |
| 2.3.2.3. Stratum | 45 |
| 2.3.2.4. Fabric-TNA | 46 |
| 2.3.2.5. Software for Open Networking in the Cloud (SONiC) | 47 |
| 2.3.2.6. P4 <i>Integrated Network Stack</i> (PINS) | 51 |
| 2.3.3. Seleção das iniciativas e projetos para utilização e acompanhamento | 52 |
| 2.3.3.1. Critérios de Seleção..... | 52 |
| 2.3.3.2. Projetos Selecionados | 52 |
| 2.3.4. Levantamento Sistemático da Literatura..... | 53 |
| 2.4. Domínio FTTX | 57 |
| 2.4.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos | 57 |
| 2.4.1.1. ONF - Open Network Foundation..... | 57 |
| 2.4.1.2. Broadband Forum (BBF)..... | 57 |
| 2.4.1.3. TIP - Fixed Broadband | 57 |
| 2.4.2. Projetos de Software Aberto..... | 58 |
| 2.4.2.1. ONF SDN Enabled Broadband Access (SEBA) | 58 |
| 2.4.2.1.1. Projeto Componente VOLTHA..... | 63 |
| 2.4.2.1.2. Projeto Componente ONOS | 64 |
| 2.4.2.1.3. Projeto Componente Trellis | 66 |
| 2.4.2.1.4. Componente NEM | 67 |
| 2.4.2.2. BBF Open Broadband – Broadband Access Abstraction (OB-BAA) | 68 |
| 2.4.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento..... | 69 |
| 2.4.4. Levantamento Sistemático da Literatura..... | 69 |

| | |
|--|----|
| 2.5. Domínio Óptico WDM | 70 |
| 2.5.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos | 70 |
| 2.5.1.1. ONF | 70 |
| 2.5.1.2. TIP | 71 |
| 2.5.2. Projetos de Software Aberto..... | 71 |
| 2.5.2.1. ODTN | 73 |
| 2.5.2.2. MUST | 73 |
| 2.5.2.3. TAI | 75 |
| 2.5.2.4. TAPI..... | 75 |
| 2.5.2.5. OpenConfig..... | 76 |
| 2.5.2.6. OpenROADM..... | 76 |
| 2.5.2.7. ONOS | 76 |
| 2.5.2.8. OPENDAYLIGHT | 77 |
| 2.5.2.9. Stratum | 77 |
| 2.5.2.10. Goldstone | 78 |
| 2.5.2.11. OcNOS | 79 |
| 2.5.2.12. Cassini..... | 79 |
| 2.5.2.13. Phoenix..... | 80 |
| 2.5.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento..... | 80 |
| 2.5.4. Levantamento Sistemático da Literatura..... | 80 |
| 3. Conclusões e recomendações | 82 |
| 4. Referências Bibliográficas | 84 |
| 4.1. Domínio Sem fio | 84 |
| 4.2. Domínio de Cloud | 85 |
| 4.3. Domínio de Pacotes P4 | 87 |
| 4.4. Domínio de FTTx | 89 |
| 4.5. Domínio DWDM..... | 90 |
| 5. Histórico de alterações do documento consolidado | 91 |
| 6. Execução e aprovação | 92 |

Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Visão Geral da arquitetura O-RAN. | 11 |
| Figura 2 – Visão da arquitetura do O-RAN para 5G na perspectiva do projeto SD-RAN. .. | 11 |
| Figura 3 - Projetos ONOS e Stratum da ONF. | 13 |
| Figura 4 - Organograma da ONF. | 14 |
| Figura 5 - Modelo de trabalho da ONF. | 15 |
| Figura 6 - Esquema de RIC SD-RAN. | 17 |
| Figura 7 - Arquitetura do Aether. | 24 |
| Figura 8 - Arquitetura da versão Honolulu do ONAP. | 26 |
| Figura 9 - Componentes de projetos para 5G da LF. | 27 |
| Figura 10 - Estrutura do OpenStack. | 28 |
| Figura 11 - Diagrama de alguns componentes do OpenStack com o Nova. | 29 |
| Figura 12 - Arquitetura do Intel Smart Edge Open Private Wireless Experience Kit. | 35 |
| Figura 13 - Visão geral do fluxo de trabalho associado aos programas. | 41 |
| Figura 14 - Visão geral dos principais atores associados ao ecossistema. | 41 |
| Figura 15 - Arquitetura de referência do Aether. | 43 |
| Figura 16 - Projetos de rede programáveis suportados pela ONF – visão geral. | 44 |
| Figura 17 - Interfaces <i>northbound</i> disponibilizadas pelo Stratum para tarefas de controle de execução do pipeline, configuração e operação. | 45 |
| Figura 18 - Visão geral da implantação do fabric-tna por meio dos perfis de programa P4. | 47 |
| Figura 19 - Visão geral do SONiC. | 47 |
| Figura 20 - SAI em uma arquitetura de sistema de switches simplificada. | 49 |
| Figura 21 - Visão geral das funcionalidades do SONiC que são encapsuladas em cada container. | 50 |
| Figura 22 - Abordagens de rede baseadas em (i) roteamento tradicional descentralizado e (ii) SDN com controlador centralizado. | 51 |
| Figura 23 - Arquitetura simplificada do PINS que se baseia na abstração das funções de hardware provida pela SAI. | 52 |
| Figura 24 - Categorização dos trabalhos em domínios e subdomínios de pesquisa aplicada em P4. | 54 |
| Figura 25 - Classificação de publicações baseadas no uso do P4 no domínio de serviços de telecomunicação. | 54 |
| Figura 26 - Arquitetura Edge Micro Data Center (EMDC), incluindo computação heterogênea e recursos de rede programáveis usados para engenharia de tráfego orientada por monitoramento, 5G e segurança cibernética descentralizada. | 55 |
| Figura 27 - CORD Profiles. | 59 |
| Figura 28 - Projetos da ONF - Foco nas soluções de banda larga. | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 - Arquitetura do SEBA. | 61 |
| Figura 30 - Arquitetura do SEBA detalhada e diferenças entre a RD1.0 e RD2.0..... | 61 |
| Figura 31 - OLT com módulos plugáveis. | 63 |
| Figura 32 - Função TC (Ex. DBA) apartada do hardware. | 63 |
| Figura 33 - Diagrama de componentes do VOLTHA. | 64 |
| Figura 34 – Comunidade ONOS..... | 65 |
| Figura 35 - Visão Geral do projeto Trellis. | 67 |
| Figura 36 - Componentes de hardware e software do Trellis..... | 67 |
| Figura 37 - Estrutura do TIP OOPT, seus elementos e subgrupos. | 71 |
| Figura 38 - <i>Aggregated Optical Transport Network</i> | 72 |
| Figura 39 - <i>Partially Disaggregated Open Optical Transport Network</i> | 72 |
| Figura 40 - <i>Fully Disaggregated Open Optical Transport Network</i> | 72 |
| Figura 41 - Arquitetura ODTN – desagregação. | 73 |
| Figura 42 - Arquitetura ODTN – camadas. | 73 |
| Figura 43 - Arquitetura SDN proposta pelo OOPT MUST para redes ópticas abertas. | 74 |
| Figura 44 - Rede "parcialmente desagregada" com um único controlador SDN. | 74 |
| Figura 45 - Rede "parcialmente desagregada" controlada por uma estrutura hierárquica SDN. | 74 |
| Figura 46 - <i>Transponder Abstraction Interface</i> | 75 |
| Figura 47 - Estrutura e serviços disponibilizados pela TAPI. | 75 |
| Figura 48 - ONOS phase 1.5 (Parcialmente Desagregado)..... | 76 |
| Figura 49 - ODL usando aplicação TransportPCE..... | 77 |
| Figura 50 - Arquitetura do Stratum. | 78 |
| Figura 51 - Arquitetura do Goldstone..... | 78 |
| Figura 52 – OcNOS e camadas adjacentes..... | 79 |
| Figura 53 - EdgeCore Cassini. | 80 |
| Figura 54 - Phoenix. | 80 |

Resumo

O acesso à internet hoje é considerado um serviço essencial, principalmente no cenário pós-pandemia e é por isso que o investimento em infraestrutura para conectividade passou a ser prioridade em muitos países, inclusive no Brasil. Além disso, a demanda crescente de tráfego de dados, devido ao surgimento de novas aplicações, requer uma atualização constante na capacidade das redes de acesso, sejam elas metropolitanas ou de longa distância.

No entanto, a falta de soluções abertas limita a competitividade e a utilização de soluções com múltiplos fornecedores, fabricantes de equipamentos impõem suas soluções proprietárias e fechadas de forma a se criar um *lock-in* do provedor de rede. Isso limita a inovação e as oportunidades para a indústria nacional, elevando o preço do software associado ao hardware proprietário, principalmente quando se trata de mais altas velocidades.

Esse problema pode ser mitigado graças à adoção de soluções abertas desenvolvidas em parceria entre operadoras, provedores de infraestrutura, fabricantes e integradores e outras empresas de tecnologia. A ideia principal da desagregação da rede de acesso consiste em criar uma pilha de modelos de referência totalmente abertos que permita oportunidades para todo um ecossistema de inovação, onde o software embarcado em hardware de tipo *whitebox* poderá ser desenvolvido por diferentes *players* de mercado. Como consequência, as operadoras e os provedores poderão implementar e testar novas funcionalidades de forma mais rápida, proporcionando ao usuário final serviços de melhor qualidade e a um custo mais baixo.

É nesse contexto que o Projeto Open RAN@Brasil se insere. Como primeiro entregável, este relatório apresenta o levantamento do estado da arte, elencando as características das iniciativas, comunidades e projetos colaborativos e/ou de software aberto, de forma a selecionar aqueles que são prioritários ser acompanhados e, portanto, são candidatos à implementação nos diferentes domínios tecnológicos, focos do trabalho e do *testbed* que será construído. São eles: sem fio, cloud, dados P4, FTTx e DWDM.

1. Introdução

Com um aumento exponencial de usuários, dispositivos e aplicações disponibilizadas na rede, as comunicações móveis têm se tornado cada vez mais complexas. Em 2030, vislumbra-se um cenário com 17 bilhões de dispositivos móveis conectados, demandando um tráfego de dados mensal de aproximadamente 5016 exabytes, por exemplo. Além disso, o acesso sem fio será fornecido em uma variedade de bandas de frequência, incluindo as bandas tradicionais de sub-6 GHz, as de ondas milimétricas (de 24 a 60 GHz) e o espectro acima de 100 GHz. Tudo para que uma série de tecnologias heterogêneas, tais como MIMO massivo, fatiamento de rede e orientação de tráfego (ou traffic steering) sejam contempladas.

A fim de minimizar os custos totais e operacionais de capital, os operadores de rede precisam atualizar a infraestrutura de comunicações móveis, acompanhando os novos casos de uso com as respectivas tecnologias e requisitos do mercado. Uma das formas de gerenciar e otimizar tais sistemas perpassa pela abertura da Rede de Acesso de Rádio (ou do inglês, *Radio Access Network* - RAN), que permitirá uma otimização e automação baseadas no acesso aos dados.

Atualmente, os componentes de rede são unidades monolíticas vistas como caixas-pretas pelos operadores, fornecidas por um número limitado de fornecedores. Portanto, há problemas como a reconfigurabilidade limitada da RAN, já que os equipamentos não podem ser ajustados para suportar diversas implementações e perfis de tráfego, a coordenação é limitada entre nós de rede, impedindo a otimização conjunta e controle de componentes RAN, e a dependência de fornecedor, com opções limitadas para as operadoras implantarem e fazerem interface com equipamentos RAN de vários fornecedores.

Esse novo cenário vai à contramão do que hoje existe para redes celulares. E é por isso que este primeiro relatório do projeto Open RAN se ateve ao levantamento do Estado da Arte. Com relação à *Software Defined Network* (SDN), destacam-se os domínios tecnológicos: Sem fio, de Cloud, de Pacotes, *Fiber to the x* (FTTx) e óptico *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). Cada um deles é abordado separadamente, seguindo a mesma estrutura. Inicialmente são descritas, com uma visão mais técnica e mercadológica, as iniciativas, comunidades e projetos colaborativos que estão sendo desenvolvidos.

Em seguida, é feita a revisão sistemática da literatura com o intuito de buscar o estado da arte no assunto por meio de uma estratégia clara e bem definida, resumindo as evidências existentes sobre o tema e fornecendo um arcabouço para posicionar e orientar novas pesquisas. Dessa forma, foi possível elaborar uma classificação e estruturar a pesquisa na determinada área de interesse. Para isso, foi necessário definir, analisar e interpretar todas as evidências disponíveis a respeito do tema de maneira imparcial e repetível. Para alcançar o objetivo, foi necessário seguir estratégias pré-definidas, com critérios claros, reproduzíveis e documentados. A busca e seleção dos trabalhos seguiu critérios pré-definidos como o protocolo de revisão a partir da criação da string de busca utilizada, as bases de dados analisadas e os critérios de inclusão e exclusão dos trabalhos. Foram utilizadas como fontes as bases de pesquisa IEEE Xplore e ACM Digital Library. Para a realização da pesquisa, buscou-se construir uma string de busca que contemplasse todas as tecnologias e domínios abordados no projeto, utilizando seus nomes e sinônimos,

quando possível. A string utilizada é apresentada a seguir, sem considerar formatações específicas de cada acervo:

```
[survey OR review OR overview] AND "software defined network" OR sdn] AND ["programmable data plane" OR "data plane programmability" OR p4] AND [{"radio access network" AND NOT "cloud radio access network"}] OR openran]
```

Os resultados obtidos a partir dessa busca foram então submetidos aos seguintes critérios de inclusão e exclusão:

Inclusão:

- Artigos que abordam *testbed*
- Ano de publicação: 2018 ou superior
- Idiomas: Inglês

Exclusão:

- Short Papers

Este relatório corresponde ao primeiro entregável do Projeto Open-RAN@Brasil desenvolvido em parceria entre CPQD, Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) e Universidade Federal do Pará (UFPA) e está organizado como segue. A Seção 2 trata da revisão da literatura dos multidomínios de SDN. Suas subseções seguem a seguinte ordem de domínios: sem fio, de cloud, de pacotes, FTTX e óptico WDM. Em seguida, a Seção 3 aborda as principais conclusões e recomendações a serem seguidas nas próximas etapas do projeto. Por sua vez, a Seção 4 lista as referências bibliográficas que basearam nosso trabalho. As Seções 5 e 6 apresentam o histórico de alterações e os dados de execução e aprovação, respectivamente.

2. Levantamento do Estado da Arte

O levantamento do Estado de Arte abrange desde Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos ligados à indústria até aqueles de cunho mais acadêmico, como pode ser visto a seguir.

2.1. Domínio Sem Fio

Com relação ao domínio Sem Fio já existem algumas iniciativas, como tratado a seguir.

2.1.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos

Tendo em vista a característica agregadora do conceito Open RAN de atender a ampla gama de casos de uso e, conseqüentemente, diferentes indústrias verticais, a O-RAN Alliance projetou um controlador inteligente, ou *RAN Intelligent Controller* (RIC). Ele é o responsável pela otimização de desempenho e redução da complexidade operacional da RAN e, por isso, é a ele que o domínio sem fio irá se ater.

Por desempenhar um papel-chave, já existem alguns grupos estudando RIC pelo mundo. São eles: O-RAN Alliance, TIP, ONF, OSC, OAI Mosaic5G. Mas vale ressaltar que foi o 3GPP quem deu o pontapé inicial para esse desenvolvimento. A seguir, cada uma dessas iniciativas são mais bem descritas.

2.1.1.1. 3GPP



Third Generation Partnership Project (3GPP) é uma associação com mais de quatrocentos membros que reúne órgãos normativos de telecomunicações dos Estados Unidos, Europa, Japão, Coreia do Sul e China. Ele é responsável por especificar aspectos do sistema móvel por completo, incluindo os relacionados a terminais, redes de acesso de rádio, redes principais, e partes da rede de serviços. Suas especificações são estruturadas em versões (ou releases) que podem ser publicadas como normas ou recomendações formais.

A fim de promover a desagregação da RAN, em sua release 15, o 3GPP especificou a divisão da estação rádio base (eNB para 4G e gNB para 5G) em três diferentes unidades funcionais: unidade central (CU); unidade distribuída (DU) e unidade de rádio (RU). Isso permite que as funcionalidades possam ser implantadas em diferentes locais da rede (cloud, edge ou local site) e plataformas de hardware [3GPP, 2022].

2.1.1.2. O-RAN Alliance e OSC



Criada em 2018, a *O-RAN Alliance* é um consórcio formado por mais de vinte empresas e instituições acadêmicas de diversos países. Essa iniciativa tem como objetivo remodelar a indústria ligada a RAN, de modo a serem integrados mais fortemente conceitos como interoperabilidade, inteligência, virtualização. Suas especificações complementam os padrões definidos pelo 3GPP, abrangendo desde a desagregação e automação, até a virtualização de RAN e com isso visam obter um mercado mais competitivo, com um grande e emergente número de atores. Quanto à estrutura operacional, ela é dividida em *workgroups*. Detalhes como novas interfaces e nós são tratados pelo *Workgroup 2*, por exemplo.

A partir da divisão em unidades, a O-RAN Alliance propôs a arquitetura O-RAN. Conforme mostrado na Figura 1, dois controladores, ou em inglês *RAN Intelligent Controllers (RICs)* que aplicam políticas de controle e ações baseadas em inteligência artificial foram incluídos. O *real-time* RIC é o responsável pela gestão e controle da rede em escalas de tempo quase reais (10 ms a 1 s), enquanto o *non-real time* RIC, lida com escalas de tempo superiores a 1 s [O-RAN Alliance, 2022].

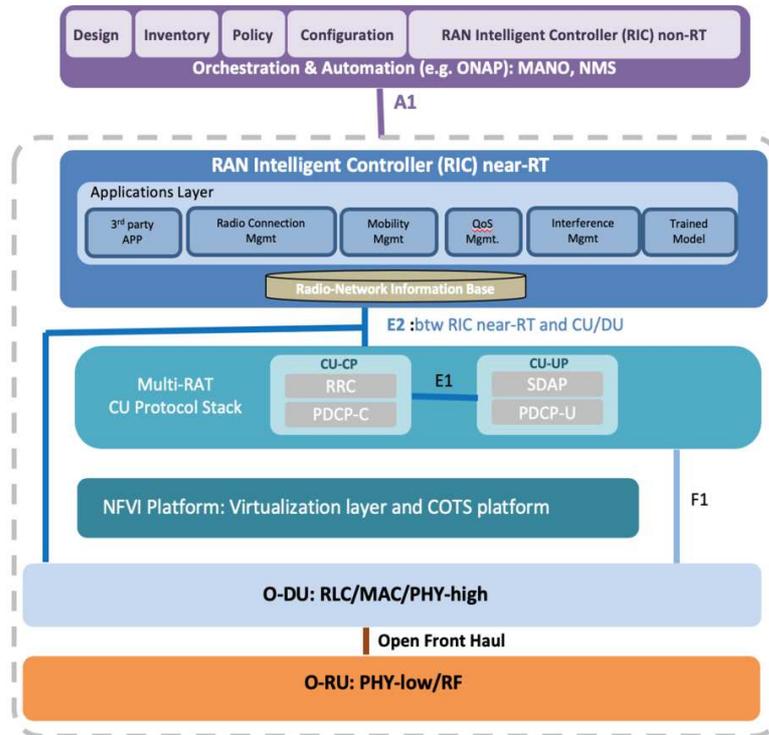


Figura 1 – Visão Geral da arquitetura O-RAN.

A Figura 2 ilustra a arquitetura do O-RAN sob a perspectiva do projeto para uma arquitetura 5G, suas definições das principais funções 5G desagregadas e suas respectivas interfaces, as aplicações nRT-RIC e as xApps executadas sobre essa plataforma.

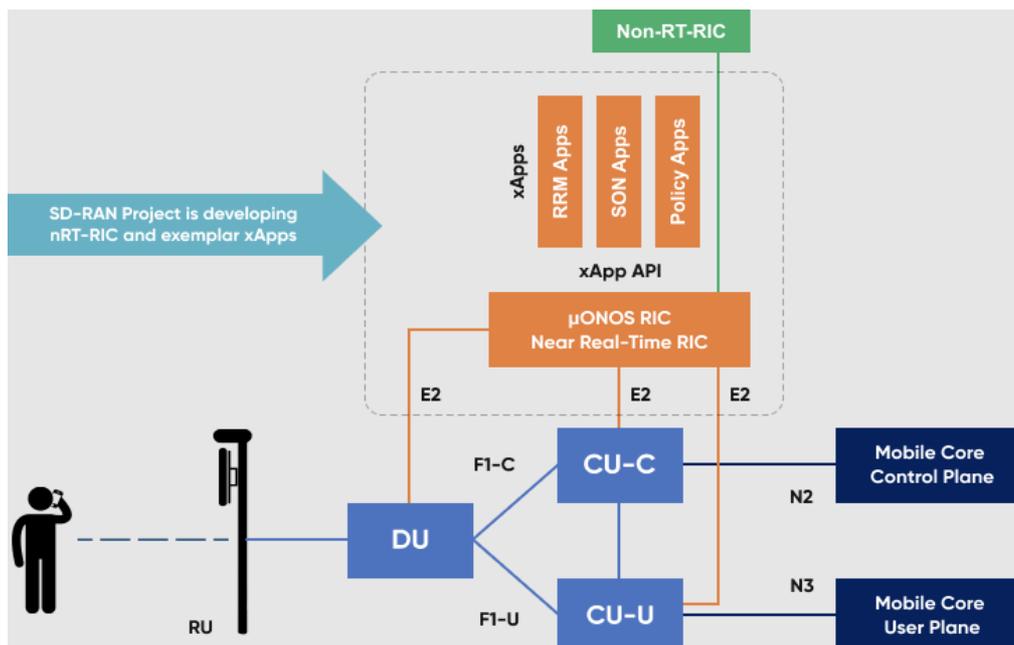


Figura 2 – Visão da arquitetura do O-RAN para 5G na perspectiva do projeto SD-RAN.

Além de ser responsável pela elaboração de diversos documentos de padronização da arquitetura Open RAN, *O-RAN Alliance* também desenvolve software aberto (*open source*), em parceria com a *Linux Foundation*, uma outra organização sem fins lucrativos voltada para o desenvolvimento de projetos *open source* (como o kernel Linux, por exemplo). Essa parceria com outras empresas do ramo de comunicações móveis recebe o nome de *O-RAN Software Community* (OSC). Dentre seus projetos, destacam-se o desenvolvimento de uma plataforma RIC, bem como de muitas aplicações de inteligência artificial integrada (xApps).

2.1.1.3. TIP



Telecom Infra Project (TIP) é um grupo com cunho mais mercadológico formado em 2016, formado pela associação de grandes empresas de diversas áreas de telecomunicações, como grandes operadores de rede e telefonia, fabricantes de *hardware*, fornecedores, instituições de pesquisa e universidades. Seu objetivo é desenvolver e implantar soluções na área de telecomunicações. Seus projetos são sempre voltados para tecnologias abertas e desagregadas, propondo padrões que facilitem integração e conectividade. O TIP também se divide internamente em grupos específicos para cada projeto da área de telecomunicações.

Mais especificamente, seu subgrupo RAN *Intelligence and Automation* (RIA) tem como foco desenvolver aplicativos baseados em *Machine Learning* (sejam eles xApps para near-RT RIC ou rApps para non-RT RIC) para uma variedade de casos de uso, incluindo *Self-Organizing Network* (SON), *Radio Resource Management* (RRM) e *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) massivo [TIP Deliverables, 2022]. Segundo seu documento mais recentemente lançado, o Release 2 Roadmap, TIP prevê desenvolver um protótipo *non standalone* (NSA) com RIC básico ainda para o ano de 2022 [TIP Release 2, 2022].

2.1.1.4. ONF



A *Open Networking Foundation* (ONF) é um consórcio sem fins lucrativos, liderado por operadoras com a missão de direcionar a transformação da infraestrutura de rede e dos modelos de negócios das operadoras. Ele é composto por membros de diversas áreas, como as principais operadoras de rede e telefonia, grandes empresas desenvolvedoras de software, fornecedores e fabricantes de hardware, universidades e institutos de pesquisa, com colaboração da comunidade acadêmica em geral [ONF 2022].

Seu principal objetivo é promover a inovação em redes programáveis definidas por software, sempre com soluções abertas e desagregadas. Com um conjunto grande de iniciativas, integra seus projetos nas mais diversas áreas utilizando suas próprias plataformas.

Atualmente seu principal modelo de negócios consiste em empregar código aberto em *Software Defined Network* (SDN). A ONF serve como guarda-chuva para uma série de projetos e constrói soluções aproveitando a desagregação de rede e software de código aberto para revolucionar a indústria de redes. Ela tem entregado com sucesso plataformas e soluções que alavancam a desagregação, silício comercial, e software de código aberto; e, ao fazê-lo, fornece uma proposta de valor disruptiva para os provedores de serviço. Ao mesmo tempo, essa mesma disrupção está desafiando os modelos de negócios de fornecedores/integradores.

O Conselho da ONF, formado pelas principais operadoras de rede, acredita na expansão do papel da ONF; que ela seja não somente focada em tecnologia disruptiva, mas também foque em ecossistema e implantação. Este plano estratégico foi desenvolvido para abordar novos desafios compartilhados e ajudar a impulsionar a ONF em conjunto com a indústria, catalisando a transformação da rede e impulsionando soluções para implantação baseadas em código aberto.

Ao trabalhar em colaboração com os operadores de rede e outras partes interessadas, a ONF alcançou um momento significativo em que catalisou a formação de uma comunidade de mais de 100 parceiros, membros e colaboradores. Atualmente, a organização está lançando componentes de código aberto (ONOS, VOLTHA, Trellis, Stratum) e plataformas integradas construídas a partir desses componentes (ODTN, CORD, M-CORD, R-CORD, E-CORD), como mostrado na Figura 3. A parceria com as operadoras dão suporte a testes de campo dessas tecnologias e de plataformas *open source*.

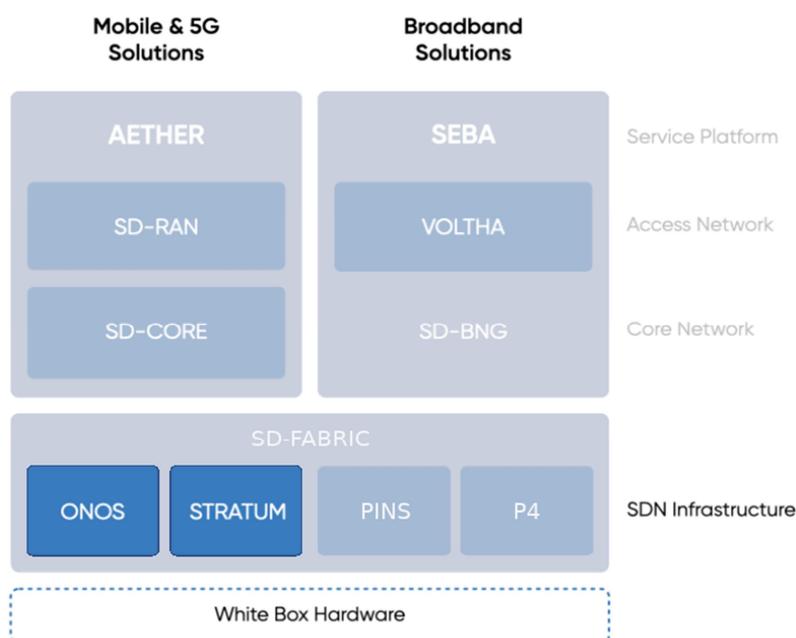


Figura 3 - Projetos ONOS e Stratum da ONF.

A Figura 4 exibe o organograma da ONF, que permite observar cada um dos projetos coordenados.

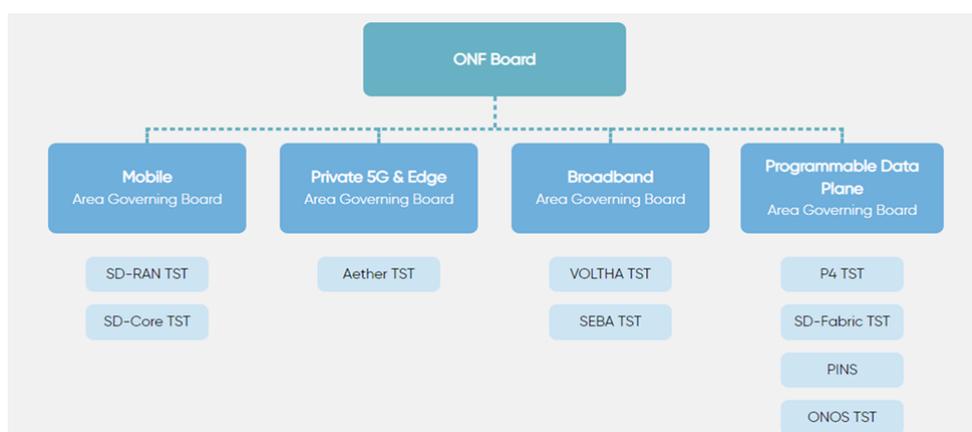


Figura 4 - Organograma da ONF.

Dentre as várias oportunidades identificadas pelo conselho da ONF, destacam-se:

- As operadoras perceberam o valor potencial em soluções abertas.
- Os operadores querem a transformação habilitada pelas plataformas ONF e querem ver a organização e sua comunidade cumprir sua missão e ter sucesso.
- As operadoras têm planos imediatos de transformar suas redes de acesso com X-PON e implantações SDN e as plataformas ONF estão desempenhando um papel importante nessas implantações.
- As operadoras veem uma grande oportunidade de alavancar soluções de código aberto para borda de acesso múltiplo e implantações 5G emergentes e, novamente, as plataformas ONF estão bem posicionadas para desempenhar um papel importante.
- Com o surgimento de P4, P4Runtime, silício de última geração, OpenConfig/gNMI e gNOI que são resultado de quase dez anos de experiência em SDN, a ONF está bem posicionada para realmente entregar a visão para o “definido por software”.

Além disso, o Conselho da ONF está avançando com um plano estratégico para fazer a transição para a próxima fase. A ideia é trazer a transformação disruptiva para a indústria de rede em estreita colaboração com uma cadeia de suprimentos mais ampla de fornecedores afins. Para isso, a diretoria da organização concordou por unanimidade com os seguintes princípios:

- Trabalhar em conjunto para criar *designs* de referência comuns/compartilhados e plataformas de código aberto;
- Levar à produção plataformas e soluções ONF baseadas nestas plataformas;
- Reunir e alinhar a cadeia de suprimentos para que ela possa entregar soluções baseadas nas plataformas ONF;
- Continuar investindo e liderando a transformação SDN com uma nova geração de interfaces (por exemplo, P4, P4Runtime, OpenConfig/gNMI e gNOI).

O plano exige aumentar o modelo de trabalho da ONF para adotar alguns novos conceitos, como detalhado a seguir e ilustrado na Figura 4.

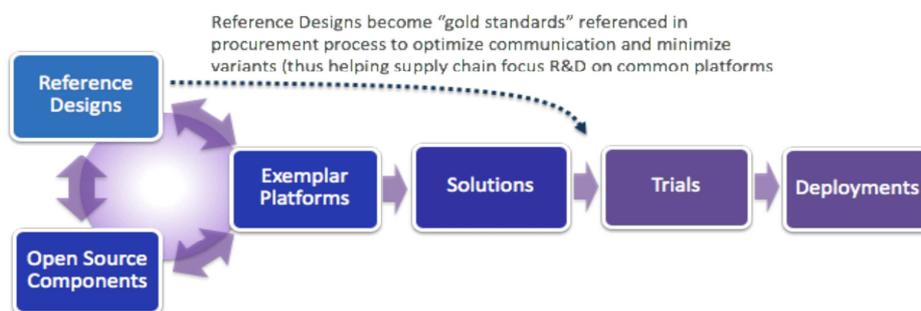


Figura 5 - Modelo de trabalho da ONF.

- **RDs (*Reference Designs*):** São um novo conceito para o ONF, encapsulando um grupo interessado de operadores em uma determinada montagem de componentes para construir uma plataforma. Os componentes podem vir de dentro da ONF ou de outro lugar, podem ser abertos ou de código fechado e várias opções podem ser identificadas para qualquer componente.
- **Componentes de código aberto:** Estes são projetos ONF como ONOS, Stratum, Trellis.
- **Plataformas exemplares:** Montar um conjunto de componentes selecionados para construir uma plataforma de exemplo com base em um design de referência. Essas plataformas fornecem uma prova de conceito e facilitam o teste do RD. CORD, [R,M,E]-CORD, ODTN são plataformas exemplares.
- **Soluções:** As soluções são construídas por operadoras ou fornecedores, construídas em uma plataforma para criar uma distribuição implantável.
- **Ensaio e implantações:** Operadoras levando uma solução para suas redes de produção com o suporte de uma cadeia de suprimentos alinhada com a visão do operador para uma solução *open source* centrada. Os RDs podem ser referenciados, otimizando a clareza e minimizando variantes em toda a indústria. Como resultado, as organizações da cadeia de suprimentos podem concentrar seus investimentos de forma mais eficaz, garantindo e redirecionando os recursos de P&D para abordar uma infinidade de oportunidades com diferentes operadores.

Além dos detalhes já descritos anteriormente, vale destacar que, com relação a Open RAN, o projeto de software aberto SD-RAN da ONF merece destaque e, por isso, será tratado mais adiante.

2.1.1.5. OSA



OpenAirInterface Software Alliance (OSA) é uma organização francesa sem fins lucrativos fundada em 2014 e financiada por patrocinadores corporativos. Sua plataforma de software aberto, *OpenAirInterface* (OAI), conta com contribuições de uma comunidade internacional de desenvolvedores que têm como objetivo construir tecnologias de RAN e core de redes celulares sem fio, promovendo pacotes de software para diversos casos de uso [OSA, 2022].

Sua iniciativa mais recente intitulada Mosaic5G visa desenvolver uma plataforma ágil para RAN e core destinada a redes 4G e 5G abertas. Ela será o primeiro ecossistema de código aberto de tal natureza voltado à pesquisa e desenvolvimento que abrange desde o controle centralizado até a implantação de rede de borda móvel. Dessa forma, será possível explorar novos casos de uso de interesse para diferentes indústrias verticais.

O foco do projeto consiste em implementar alguns softwares abertos. Dentre eles, podemos citar o de protocolo O-RAN E2, chamado de agent E2, o RIC flexível ou FlexRIC e o *core controller* também flexível, chamado de FlexCN. Já o operador inteligente que está sendo desenvolvido para a RAN e *core network* (CN) é conhecido como *Trirematics*. Detalhes sobre cada um deles serão fornecidos ao longo deste relatório.

2.1.2. Projetos de Software Aberto

Com relação a softwares abertos relacionados a RIC, podemos destacar ONF SD-RAN, OSC RIC e RICAPP e OAI FlexRIC.

2.1.2.1. ONF SD-RAN



SD-RAN é uma plataforma de RAN definida por software compatível com as normas do 3GPP e a arquitetura da O-RAN Alliance. É um projeto *cloud native* que faz uso de plataformas já estabelecidas da ONF (como ONOS e Aether). Um de seus produtos é o *μONOS-based near-Real Time RIC*, componente centrado em microsserviços que faz uso de APIs gRPC para a comunicação inter-processos. De tal modo, essa plataforma é constituída de diversos subsistemas e, com isso, é capaz de hospedar as aplicações de otimização (chamadas xApps).

Seus principais serviços são as terminações A1 (comunicação entre non-RT RIC e near-RT RIC), O1 (canal para gerenciamento e orquestração da RAN) e E2 (canal entre near-RT RIC e CU/DU), o gestor de subscrições de E2, os serviços de *Radio-Network Information Base* (R-NIB) e de *User Equipment-Network Information Base* (UE-NIB), para acompanhamento e compartilhamento de informações de nós da RAN e dos UEs participantes da rede, além de um serviço de armazenamento de dados, altamente escalável, distribuído e de alta disponibilidade. A terminação A1 trata as requisições JSON/HTTP de APIs REST oriundas da fronteira *northbound*, isto é, vindas de serviços superiores de orquestração ou de aplicações hospedadas no *non-Real Time RIC* (os chamados rApps). Já a terminação O1 administra requisições externas XML(YANG)/NETCONF de configuração e diferentes tarefas relacionadas à operação. Por sua vez, a terminação E2 lida com conexões ASN.1/SCTP para nós do tipo E2 (elementos da RAN, como CU e DU) e atua como um repetidor para que aplicações recebam e enviem mensagens E2SM. Podemos visualizar um esquemático do RIC com seus componentes na Figura 6 [ONF Archives, 2022].

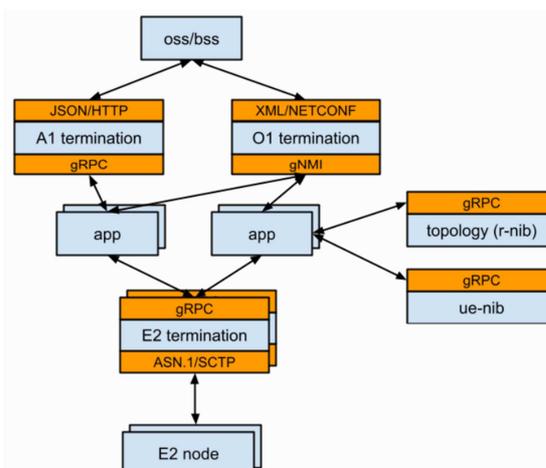


Figura 6 - Esquema de RIC SD-RAN.

Cada um desses serviços é implementado como um microsserviço separado, rodando em múltiplas instâncias, visando escalabilidade e alta disponibilidade. Outra característica é a predominância da linguagem Golang por todo o projeto. Outras linguagens são utilizadas em contextos específicos (como a linguagem C, para auxiliar a tradução de mensagens ASN.1 e *protobuf* na terminação E2).

No mês de Março de 2022, ocorreu o lançamento da versão mais recente do projeto SD-RAN, Trata-se da versão 1.4, a quinta já disponibilizada abertamente e que serviu de base para este relatório. É importante ressaltar que tal versão já se encontra disponível para acesso, através dos devidos canais (*GitHub*, site da ONF para documentação, dentre outros). Diferentemente de versões anteriores, que ficavam disponíveis apenas para membros num período imediatamente após seu lançamento, a versão atual foi disponibilizada para todos.

Seu principal destaque é a introdução do microsserviço para a terminação A1. De acordo com a arquitetura Open RAN, tal terminação estabelece a comunicação entre *Non-RT RIC* e o *Near-RT RIC*, sendo assim, a interface *northbound* para o elemento central de nosso estudo. Ela é o proxy que encaminha mensagens do tipo A1 do *Non-RT RIC* para os devidos xApps e vice-versa [ONF Archives, 2022]. Segundo especificações do *Working Group 2* da O-RAN Alliance [O-RAN Specifications 2022], tais mensagens A1 devem ser relacionadas a gestão de políticas, qualificação da informação para fins de análise de dados da rede e gestão de modelos de *machine learning*.

De maneira geral, seu funcionamento se baseia em monitorar o ente responsável pela topologia da arquitetura (*onos-topo*), armazenar informações A1 localmente e prover sessões gRPC para a intercomunicação de xApps, além de administrar o tráfego de mensagens A1 para o Non-RT RIC.

Outra novidade de forte interesse é a integração de um xApp desenvolvido por terceiros (*Rimedo Labs*, uma entidade polonesa) que visa a gestão dinâmica de tráfego e alocação de recursos das células e os dispositivos conectados (*traffic steering*). Após o desenvolvimento da aplicação ser feito seguindo as devidas padronizações, a empresa fez testes em ambiente real para validação. O xApp se mostrou competente para balancear cargas de tráfego e interagir com parâmetros que modificam as dinâmicas de admissão e

recusa de usuários nas células. Tal feito mostra a capacidade de promover o desenvolvimento de aplicações por terceiros interessados, seguindo as padronizações.

2.1.2.2. OSC RICAPP, RICPLT e NONRTRIC



A *Release E* da OSC apresenta uma série de atualizações relacionadas ao RIC, tais como *Near-Real-time RIC X-APPs* (RICAPP), *Near-Real-time RAN Intelligent Controller Platform* (E2 Interface) (RICPLT) e *Non-Real-time RIC* (A1 Interface) (NONRTRIC) [ORAN-SC, 2022].

RICAPP trata dos novos xApps RC (*RAN Control*) que implementam o subconjunto E2 SM RC para Mavenir, da integração com o simulador Viavi, de um benchmarking usando Bouncer e simulador E2 (da HCL) e do desenvolvimento de xApps que suportam o caso de uso de fatiamento. Além disso, são reportadas melhorias de xApps já existentes. *Load Prediction* (LP) da ChinaMobile passa a incluir modelos de ML treinados, *Anomaly Detection* (AD) da HCL pode detectar anomalia relacionadas à geolocalização, *QoE Predictor* (QP) da HCL passa a incluir previsão para a célula atual, incorporando a carga prevista como um recurso e fornecendo uma sequência de previsões. *Traffic Steering* (TS) da UTFPR (University of Paraná, Brazil) aciona *handover*, resultando em melhorias na lógica de direcionamento de tráfego, Bouncer da HCL aumenta o desempenho e as capacidades de testes funcionais, identificando gargalos da plataforma RIC, HW (*HelloWorld*) demo xApps em C++, go e python da AT&T e Samsung adiciona o uso de mais recursos da plataforma, atualizando o uso daqueles que estão evoluindo.

Com relação a RICPLT, a plataforma da nova versão (E2APv1.1) é compatível com versões anteriores do 1.0. Mas agora, ela armazena OIDs para as definições de função E2SM de E2 no RNIB. Ao contrário do que acontecia antes, o gerenciador de assinaturas E2 é capaz de excluir automaticamente as assinaturas armazenadas caso notificado, assim como os xApps que precisam reemitir suas assinaturas assim que o nó E2 for reconectado. Além disso, o gerenciador de assinaturas E2 passa a tratar vários cenários de erro que antes não eram tratados. O SDL CLI pode ser usado em testes, em vez do uso direto do Redis CLI. A API SDL para *findkeys/getkeys* agora suporta padrões de estilo *glob*. A API/biblioteca Golang SDL lida com *namespaces* como parte de suas assinaturas de função, em vez de ser um parâmetro global. Isso facilita o uso de vários *namespaces* do mesmo aplicativo. Apesar do mediador A1 estar implementado em Python na release E, a ideia é implementá-lo em Golang na release F.

O projeto NONRTRIC traz atualizações acerca do *Non-Real-time RIC*, que é responsável pela orquestração e automação da rede. Como suas funções incluem gerenciamento de políticas e serviços, análise de RAN, hospedagem e coordenação de rApps, além do treinamento de modelo de *machine learning*, a comunicação entre *Non-Real-time RIC* e *Near-Real-time RIC* se dá pela interface A1. Além disso, dentre as características reportadas pela release E, destacam-se a presença da interface gráfica para gerenciamento de trabalho e do stub de teste capaz de simular as interfaces A1-P e A1-EI.

2.1.2.3. OAI FlexRIC

FlexRIC é um pacote de software que contém um controlador de rede inteligente que faz a interface com a pilha de rádio OAI através da interface E2 definida por O-RAN para monitorar e controlar a RAN em tempo real [OAI, 2022].

Ele possui um modelo de serviço (SM) integrado para monitoramento e fatiamento, que pode ser facilmente personalizado e estendido para atender aos diversos casos de uso de 5G. Seus *Application Protocol* (AP) e o SM não são limitados a codificação e decodificação específicas. Além disso, ele também suporta a criação de novos SMs para satisfazer casos de uso específicos e é facilmente validado em implementações 5G reais. Como características, o FlexRIC apresenta integração com a pilha de rádio celular 5G da OAI, compatibilidade do agente FlexRIC E2 com o O-RAN RIC, recursos de monitoramento por meio de SMs projetados e de controle por meio de xApps que realizam o controle de fatiamento em uma rede NSA 5G.

Apesar de possuir funcionalidades similares ao RIC da O-RAN, o FlexRIC se destaca por ser mais compacto, leve, fácil de dar *deploy*, além de ser facilmente substituído por qualquer outro RIC.

2.1.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento

Dentre as iniciativas e projetos mencionados acima, alguns merecem ser acompanhados de acordo com as vantagens que oferecem. Como foi a *O-RAN Alliance* que propôs a arquitetura O-RAN como conhecemos hoje, vale a pena estarmos atentos às atualizações mais recentes acerca do RIC da OSC. Além das características já mencionadas, FlexRIC da OAI pode ser facilmente personalizado e estendido para atender aos diversos casos de uso das redes 5G. Por outro lado, o SD-RAN da ONF possui uma documentação significativa e suporte técnico disponíveis online. Por isso, será feito um estudo detalhado da arquitetura, dos componentes, das interfaces *southbound* e *northbound* para que um deles seja implantado no *testbed* previsto do projeto.

2.1.4. Levantamento Sistemático da Literatura

O advento do sistema de comunicação móvel de quinta geração (5G) traz uma nova visão de futuro para uma gama diversificada de indústrias verticais. No entanto, a implantação e operação de redes 5G também custam mais do que as gerações anteriores de redes móveis. Nesse contexto, aproximadamente 70% dos custos totais da rede são gastos na construção de redes de acesso via rádio (RAN). A mais recente geração de RAN, denominada O-RAN, é uma promissora alternativa para implantar RANs a um custo menor, por meio de componentes de diferentes fornecedores, e habilitada a atender diversificados requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) para diferentes aplicações de rede, como, por exemplo, jogos de última geração, veículos autônomos e variadas abordagens de Internet das Coisas (IoT) [Singh et. al, 2020].

Uma delas foi proposta por Foukas *et. al* [2016], nomeada FlexRAN, para contornar as dificuldades de implementação de soluções SDN em RAN, devido à falta de uma plataforma definida por software (SDN-RAN) na época. A partir dessa plataforma é possível avaliar casos de uso como *Mobility Management*, *Network Slicing*, *Device Centric Networking*, *Spectrum Sharing*. Fajjari et al [2019] utilizam plataforma experimental com versão estendida do FlexRAN para propor uma arquitetura Pgm-RAN, baseada em SDN

que fornece uma representação efetiva do estado da rede de rádio em diferentes níveis de rede.

Já Bonati *et. al* [2021] exploram a arquitetura de rede desagregada proposta pela O-RAN Alliance como um facilitador chave das redes NextG. Também é verificada a viabilidade do controle de RAN por meio de xApps executados no controlador inteligente RAN, quase em tempo real, para otimizar as políticas de agendamento de fatias de rede coexistentes, aproveitando as interfaces abertas O-RAN para coletar dados na borda da rede. São utilizados testbeds experimentais em larga escala para desenvolver e validar algoritmos orientados por dados, implantando um O-RAN RIC baseado em *Deep Reinforcement Learning* no Colosseum.

Parvez *et. al* [2018] discutem a importância de garantir recursos nas redes 5G, como capacidade, confiabilidade e eficiência energética, reduzindo a latência e aumentando significativamente a densidade da conexão. Além disso, apresentam uma pesquisa detalhada sobre as tecnologias emergentes para alcançar comunicações de baixa latência considerando três diferentes domínios de solução: 1) RAN; 2) rede central; e 3) cache. Além disso, destacam mudanças necessárias na arquitetura de rede, incluindo núcleo e RAN para alcançar latência de ponta a ponta na ordem de 1 ms.

Wijethilaka e Liyanage [2021] apresentam uma análise da exploração do fatiamento de rede na realização de *Internet of Things* (IoT), em que discutem a sua utilização em diferentes cenários de aplicativos, juntamente com os desafios técnicos que podem ser resolvidos por meio dele. Desafios de integração e problemas de pesquisa relacionados ao fatiamento de rede na implementação de soluções IoT também são discutidos neste artigo. Por fim, os autores destacam o papel de outras tecnologias e conceitos emergentes, como *blockchain* e Inteligência Artificial/Aprendizado de Máquina (AI/ML) no fatiamento de rede e integração IoT.

2.2. Domínio de Cloud

Em se tratando do domínio de cloud, algumas iniciativas podem ser destacadas como segue.

2.2.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos

Quanto a comunidades e projetos colaborativos, existem quatro frentes de trabalho. São elas:

2.2.1.1. Linux Foundation (LF)



A *Linux Foundation* é uma fundação sem fins lucrativos com o objetivo de desenvolver tecnologias *open source*. Ela promove, protege, e padroniza Linux, "fornecendo um conjunto abrangente de serviços para competir eficazmente com plataformas fechadas" [LF-About, 2022].

Fundada em 2000 pela fusão do *Open Source Development Labs* (OSDL) e o *Free Standards Group* (FSG), a *Linux Foundation* patrocina o trabalho do criador do Linux, Linus Torvalds, e é apoiada pelas seguintes empresas parceiras no desenvolvimento do Linux (aliança de desenvolvedores): Canonical, Red Hat, Google, Intel, AMD, Autodesk, Petrobras, Philips, Samsung, IBM, Adobe, entre outras empresas públicas, privadas, organizações sem fins lucrativos, universidades e desenvolvedores independentes do mundo todo [Krazit, 2020]

O principal projeto mantido pela *Linux Foundation* é o *Kernel Linux*. Porém ele fornece um lar neutro e confiável para desenvolvedores colaborarem em projetos de tecnologia aberta como: ONAP, Anuket, Akraino, Ceph, CPDK, Fledge, Open vSwitch. Projetos esses que serão detalhados em seções subsequentes [LF-Projects].

2.2.1.2. Cloud Native Computing Foundation (CNCF)



Cloud Native Computing Foundation é um projeto da *Linux Foundation* fundado em 2015 que tem como objetivo construir ecossistemas sustentáveis para software *cloud native*. Tais tecnologias capacitam as organizações a criar e executar aplicativos escaláveis em ambientes modernos e dinâmicos, como nuvens públicas, privadas e híbridas. *Containers*, malhas de serviço, microsserviços, infraestrutura imutável e *Application Programming Interface* (APIs) declarativas exemplificam essa abordagem.

A CNCF procura impulsionar a adoção desse paradigma, promovendo e sustentando um ecossistema de projetos de código aberto e neutros para fornecedores, de forma a democratizar padrões de última geração para tornar essas inovações acessíveis a todos [CNCF-Who, 2022].

Os projetos da CNCF são catalogados com um nível de maturidade de *Sandbox*, *Incubating*, *Graduated*, e *Archived*. Os critérios definidos incluem taxa de adoção, longevidade e se o projeto de código aberto pode ser confiável para construir um produto de nível de produção. Um resumo de cada nível de maturidade pode ser visto abaixo [CNCF-Projects, 2022]:

- *Graduated*: Projetos graduados são considerados maduros para ambiente de produção, sendo estáveis, com processos de testes contínuos e tratamento de vulnerabilidades descobertas. Também costumam ter um alto nível de diversidade de contribuição, escala e crescimento da comunidade, e adoção. Alguns exemplos são: Kubernetes, Prometheus, Helm, Fluentd, etc.
- *Incubating*: Os projetos em incubação são projetos em um bom estágio de desenvolvimento, porém ainda não são considerados próprios para uso em produção por ainda não possuírem processos de teste contínuo ou uma comunidade ativa e responsiva o suficiente. Apesar disso, podem ser utilizados se a empresa enxerga opções de contorno no caso de eventuais ocorrências. Alguns exemplos de projetos em incubação: CRI-O, Linkerd, Thanos, etc.
- *Sandbox*: Projetos sandbox são geralmente muito novos. O foco maior ainda é na funcionalidade, e esses projetos podem ter poucos recursos de segurança ou

documentação, além de estarem sujeitos a mudanças mais drásticas. Alguns exemplos de projetos Sandbox são: k3s, Keylime, Parsec, etc.

- **Archived:** Projetos arquivados são aqueles que já não estão sendo desenvolvidos ou suportados de forma ativa. Questões de segurança já não são mais monitoradas e novas vulnerabilidades são raramente corrigidas. Exemplo de projeto arquivado é o rkt.

2.2.1.3. ONF

Com relação a Cloud, merece destaque o projeto Aether, que é uma plataforma 5G/LTE Connected Edge de código aberto de plataforma como serviço (PaaS) e será tratado mais adiante [ONF-Aether].

2.2.2. Projetos de Software Aberto

Com relação aos softwares abertos relacionados a cloud, podemos destacar: Kubernetes, Helm, Aether, ONAP, OpenStack, Ceph, Akraino e Anuket. Cada uma dessas tecnologias será detalhada a seguir.

2.2.2.1. Kubernetes



Kubernetes, também conhecido como K8s, é um software de código aberto atualmente mantido pela Linux Foundation para automatizar a implantação, o dimensionamento e o gerenciamento de aplicativos containerizados em infraestrutura de nuvem, seja esta uma nuvem privada, híbrida ou pública [Kubernetes, 2022].

É uma solução avançada para a orquestração de *containers*, agrupando aqueles que compõem uma mesma aplicação em unidades lógicas distintas para facilitar a descoberta e o gerenciamento de serviços. O Kubernetes foi desenvolvido originalmente pela Google, e se baseia em 15 anos de experiência na execução de *containers* de produção, combinados com as melhores ideias e práticas da comunidade. Ele é capaz de escalar as aplicações de nuvem sem depender de um aumento na equipe de operações [Kubernetes-Whatis].

A solução Kubernetes padrão já embarca mecanismos avançados para transformar uma infraestrutura de servidores físicos ou virtuais em um cluster de nuvem, alavancando funcionalidades próprias da arquitetura de nuvem como alta disponibilidade, escalabilidade automática sob demanda, autosserviço e uso eficiente dos recursos [Kubernetes-Whatis, 2022]. O Kubernetes possibilita [Kubernetes, 2022]:

- Orquestrar containers em vários servidores;
- Aproveitar melhor o hardware para maximizar os recursos necessários na execução das aplicações corporativas;
- Controlar e automatizar as implantações e atualizações de aplicações;
- Montar e adicionar armazenamento para executar aplicações com monitoração de estado;

- Escalar rapidamente as aplicações em containers e recursos relacionados;
- Gerenciar serviços de forma declarativa, garantindo que as aplicações sejam executadas sempre da mesma maneira como foram implantadas;
- Verificar a integridade e auto recuperação das aplicações com posicionamento, reinício, replicação e escalonamento automáticos.

Além disso, novas funcionalidades específicas podem ser adicionadas através de aplicações desenvolvidas para o Kubernetes, a serem executadas junto ao plano de controle da plataforma. Essas aplicações podem ser adicionadas de forma modular e paralela, enriquecendo a flexibilidade da nuvem e atendendo às funcionalidades requeridas pelos serviços de camada superior. Grande parte desses projetos também é open source e muitos estão listados na CNCF, sendo reconhecidos como adequados para o ambiente de produção. Dentre as categorias de funcionalidades atendidas por esses projetos, incluem-se:

- Bancos de dados distribuídos;
- Rede e roteamento inteligente;
- Repositórios de imagens de *containers*;
- Telemetria, observabilidade e análise;
- Automação, coordenação e orquestração;
- Integração contínua e entrega contínua;
- Malha de serviços, encadeamento de funções e descoberta de serviço;
- Armazenamento cloud-native;
- Segurança e conformidade.

O Kubernetes é executado sobre o sistema operacional Linux e utiliza outras plataformas ou padrões de execução de *containers*, como Docker ou Containerd. Ele prevê dois tipos de funções para os nodes dentro do cluster: a função *master*, encarregada das aplicações de controle do cluster e do acesso à API de controle pela equipe de administração/DevOps, e a função *worker*, encarregada da execução dos *containers* das aplicações de nuvem [Kubernetes, 2022]. Essas duas funções podem ser executadas em um mesmo node, porém idealmente devem ser executadas em nodes distintos. Os nodes com função *master* são configurados em arquitetura *high availability* (alta disponibilidade - HA), enquanto que os nodes *worker* formam a infraestrutura de execução de aplicações de nuvem que provê alta disponibilidade às aplicações por padrão.

2.2.2.2. Helm



Helm é um gerenciador de pacotes para Kubernetes, facilitando o compartilhamento, a descoberta, a implantação e o controle de ciclo de vida de aplicações executadas sobre uma nuvem, suportando aplicações complexas que usam múltiplos

containers em arquitetura de micro-serviços [Helm, 2022]. Dentre as funcionalidades adicionadas pelo Helm, incluem-se:

- Gerenciamento de instalação e configuração padronizado;
- Coordenação de updates e rollbacks;
- Versionamento e compartilhamento de modelos de implantação (chamados charts).

Dentre as várias aplicações que podem fazer parte de um ecossistema Kubernetes, o Helm é uma ótima adição, pois permite a personalização e o controle do ciclo de vida das aplicações de nuvem de forma automatizada e facilmente gerenciada pelas equipes envolvidas [Helm, 2022].

2.2.2.3. Aether



O Aether é uma plataforma de Edge Cloud 5G em código aberto, voltada a oferecer conectividade móvel e serviços de nuvem de borda para redes corporativas distribuídas, de forma a alavancar a transformação digital dessas organizações [ONF-Aether, 2022].

A plataforma Aether é otimizada para implantações em várias nuvens e suporte simultâneo para conectividade sem fio sobre espectro licenciado, não licenciado e levemente licenciado (CBRS). Ela é desenvolvida e mantida pela ONF e segue o padrão de referência para arquiteturas de redes móveis 5G abertas e desagregadas desenvolvido pela O-RAN Alliance, incluindo dois outros grandes projetos: SD-RAN e SD-CORE [ONF-Aether, 2022]. A visão geral do projeto Aether é mostrada no diagrama da Figura 7:

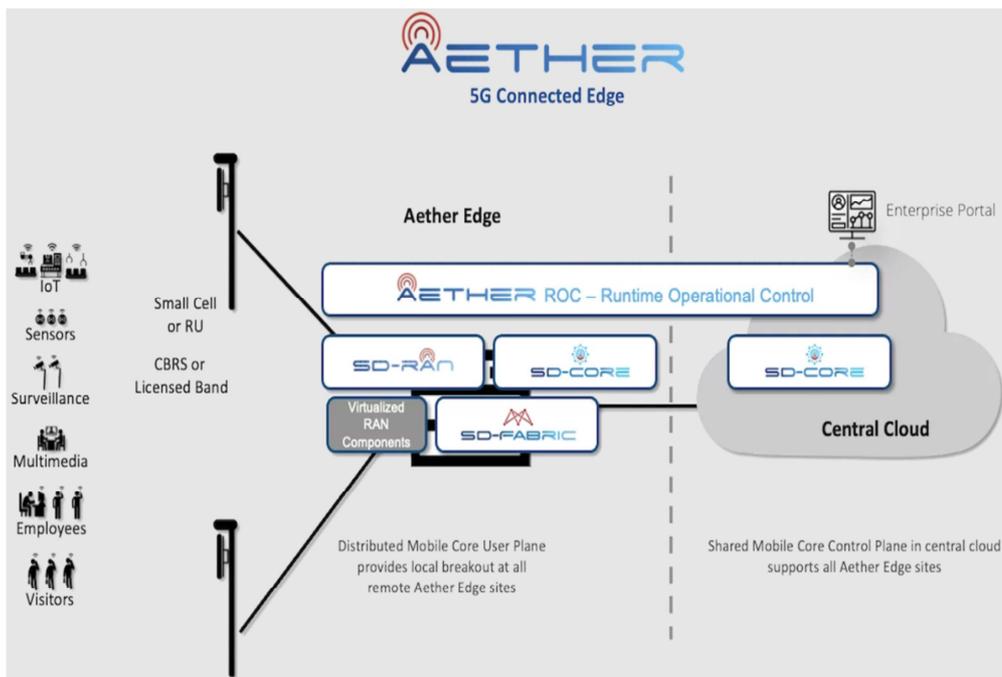


Figura 7 - Arquitetura do Aether.

2.2.2.4. SD-CORE



Já o projeto SD-Core desenvolve um núcleo móvel desagregado 4G/5G, otimizado para implantação em nuvem pública em conjunto com nuvens de borda distribuída e é ideal para redes 5G de operadoras e empresas privadas. Ele expõe interfaces 3GPP padrão que permitem o uso do SD-Core como um núcleo móvel convencional. Também está disponível pré-integrado com um adaptador (parte do subsistema Aether Runtime Operation Control (ROC) para aqueles que o implantam como uma solução de núcleo móvel como serviço [ONF-SDCore, 2022].

O SD-Core é um componente do modelo Aether e pode ser rapidamente implantado de forma pré-integrada com o Aether, como um núcleo móvel 5G/4G autônomo, ou como componente de controle e plano de dados (UPF) integrado em soluções personalizadas projetadas [ONF-SDCore, 2022]. Essa gama de versatilidade torna a plataforma SD-Core de código aberto ideal para a mais ampla gama de casos de uso e cenários de implantação.

Os componentes do SD-Core têm como suas principais funções garantir que apenas dispositivos móveis autenticados tenham acesso à rede, fornecer conectividade IP para serviços de dados e voz, garantir que a conectividade adere às políticas de QoS e fatia de rede, rastrear a mobilidade do usuário para garantir um serviço ininterrupto, e rastrear a utilização uso por assinantes [ONF-SDCore, 2022].

O SD-Core também expõe um conjunto de APIs para o Controle de Operação em Tempo de Execução (Runtime Operation Control - ROC). As operadoras podem usar essas APIs para prover os assinantes no núcleo móvel, controlar a configuração em tempo de execução das funções de rede, e fornecer dados de telemetria para aplicações de terceiros. Por sua vez, aplicativos de terceiros podem aproveitar os dados de telemetria para criar aplicativos para controle em loop fechado. Dessa forma, o SD-Core é uma plataforma de rede móvel flexível, ágil, escalável e configurável que constrói e aprimora as plataformas de rede OMEC e 5GC gratuitas da ONF, suportando serviços LTE, 5G NSA e 5G SA. O plano de controle do SD-Core também oferece a flexibilidade de suportar múltiplas implantações simultâneas de 5G autônomo, 5G não-autônomo, e 4G/LTE, controlando múltiplas instâncias do plano de usuário SD-Core (SD-Core user plane) em cada Edge Site Aether [ONF-SDCore, 2022].

2.2.2.5. ONAP



Open Network Automation Platform (ONAP) é um projeto de código aberto da Linux Foundation que desenvolve uma plataforma comum para orquestração, gerenciamento e automação de serviços de rede e computação de borda para operadoras de rede, provedores de nuvem e empresas [ONAP, 2022]. A arquitetura ONAP habilita a

orquestração e automação em tempo real de funções de rede físicas, virtuais e nativas de nuvem, permitindo a rápida automação de novos serviços, e o gerenciamento crítico completo do ciclo de vida de serviços de rede fim-a-fim, redes 5G e da próxima geração. Ela inclui toda a funcionalidade de camada de Gestão e Orquestração (Management AND Orchestration - MANO) especificada pela arquitetura ETSI NFV, e fornece uma estrutura de design de serviço de rede com suporte a funcionalidades de Falha, Configuração, Contabilidade, Desempenho e Segurança (FCAPS) [ONAP-Architecture, 2022].

O desafio que a ONAP enfrenta é ajudar as operadoras de redes de telecomunicações a acompanhar a escala e o custo das mudanças manuais necessárias para implementar novas ofertas de serviços, desde a instalação de novos equipamentos de data center até a atualização de equipamentos no local dos clientes. Para isso, a ONAP está desenvolvendo recursos de automação em escala global multi-site e multi-VIM, e fornecendo um conjunto comum de APIs Rest que são abertas e interoperáveis, em uma arquitetura modular e em camadas [ONAP-Architecture, 2022]. Essa arquitetura melhora a interoperabilidade e simplifica a integração, permitindo que ela suporte vários ambientes VNF integrando-se a vários VIMs, VNFMs, controladores SDN, bem como equipamentos legados (PNF). O projeto Service Design & Creation (SDC) também oferece orquestração perfeita de CNFs.

A publicação consolidada de requisitos xNF pelo ONAP também permite o desenvolvimento comercial de xNFs compatíveis com ONAP para utilização em conjunto com a plataforma. Essa abordagem permite que os operadores de rede e de nuvem otimizem sua infraestrutura física e virtual integrando módulos específicos. Ao mesmo tempo, o uso de modelos padrão pela ONAP reduz os custos de integração e implantação de equipamentos heterogêneos [ONAP-Architecture, 2022]. A Figura 8 ilustra a arquitetura da versão Honolulu versão 8.0.1 de 30/09/2021 do ONAP, com as funções previstas para o tempo de desenho (planejamento) e o tempo de execução (implantação e operação):

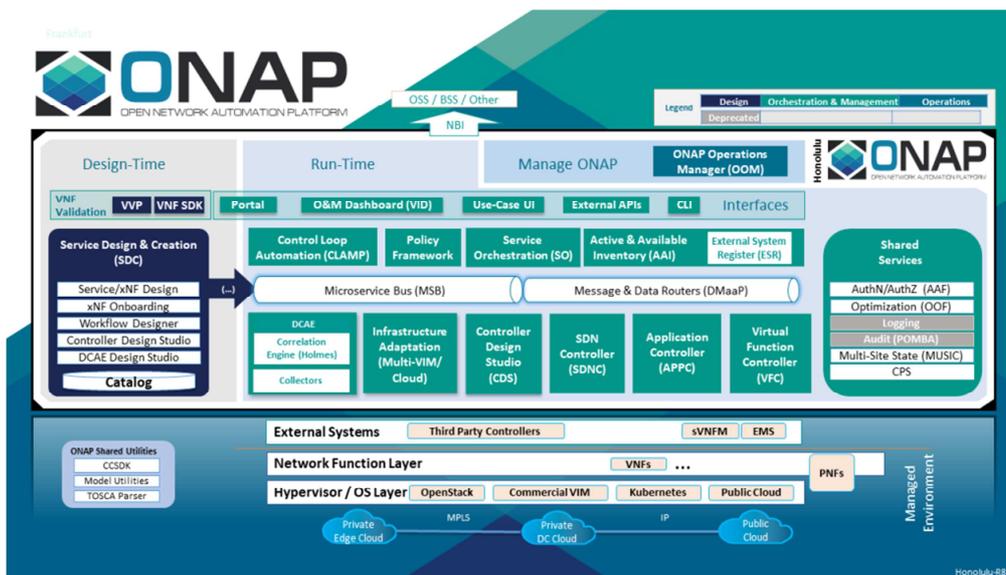


Figura 8 - Arquitetura da versão Honolulu do ONAP.

Especificamente para redes 5G, o ONAP pode ser usado de forma integrada a múltiplos projetos da Linux Foundation ou projetos de código aberto para prover uma infraestrutura de rede 5G fim-a-fim completa. A Figura 9 ilustra os componentes que podem ser integrados dentro desse tipo de arquitetura.

LF Open Source Component Projects for 5G

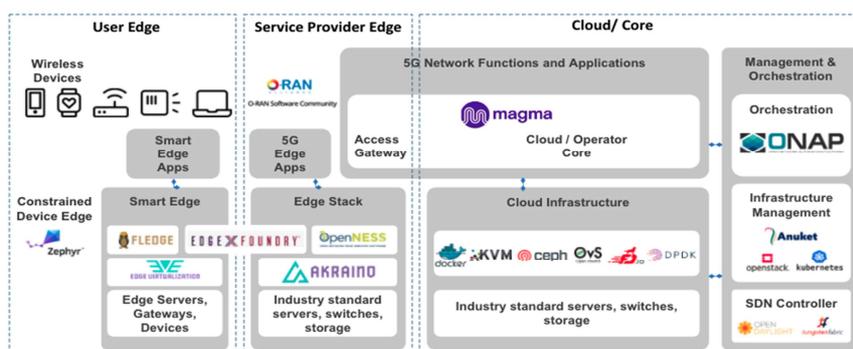


Figura 9 - Componentes de projetos para 5G da LF.

Para suportar redes 5G, o ONAP prevê quatro requisitos para a camada MANO, considerando que a automação de rede se torna fundamental [ONAP-Architecture, 2022]:

- **Fatiamento de rede (NS - Network Slicing):** considerando a comunicação entre domínios específicos, como RAN, núcleo e transporte.
- **RAN:** o 5G requer que algumas partes da rede de rádio sejam implementadas na forma de Funções de Rede Física (PNFs). Isso significa que uma rede 5G o serviço precisará suportar tanto PNFs quanto funções de rede nativas de nuvem (VNFs ou CNFs). Além disso, a camada MANO precisa suportar funcionalidades como o Não-RealTime RAN Intelligent Controlador (RIC) conforme especificado pela O-RAN Alliance.
- **Arquitetura nativa de nuvem:** tanto o núcleo 5G quanto a funções de RAN virtualizadas deverão considerar um ambiente cada vez mais distribuído e em arquitetura nativa de nuvem, como a apresentada por projetos como Kubernetes, para uma NFVI.
- **Análises em tempo real:** redes 5G precisam ser otimizadas em tempo real, em resposta às solicitações do assinante e ao comportamento da rede. Análises em tempo real serão necessárias para influenciar ações de gerenciamento do ciclo de vida, como dimensionamento, gerenciamento de falhas, otimização de desempenho, entre outras.

As especificações do ONAP também deixam claro o caráter evolutivo do projeto. No momento, nem todas as aplicações finais para redes 5G são suportadas, porém é previsto que esse suporte seja implementado a cada nova release, em uma estratégia gradual de suporte a novas funcionalidades para redes 5G [ONAP-Architecture, 2022].

2.2.2.6. OpenStack



O OpenStack é um conjunto de projetos de software de código aberto usados para configurar e operar a infraestrutura de computação e o armazenamento em nuvem. A seguir, são detalhados os projetos em destaque da Figura 10 [OpenStack-Whatis, 2022].

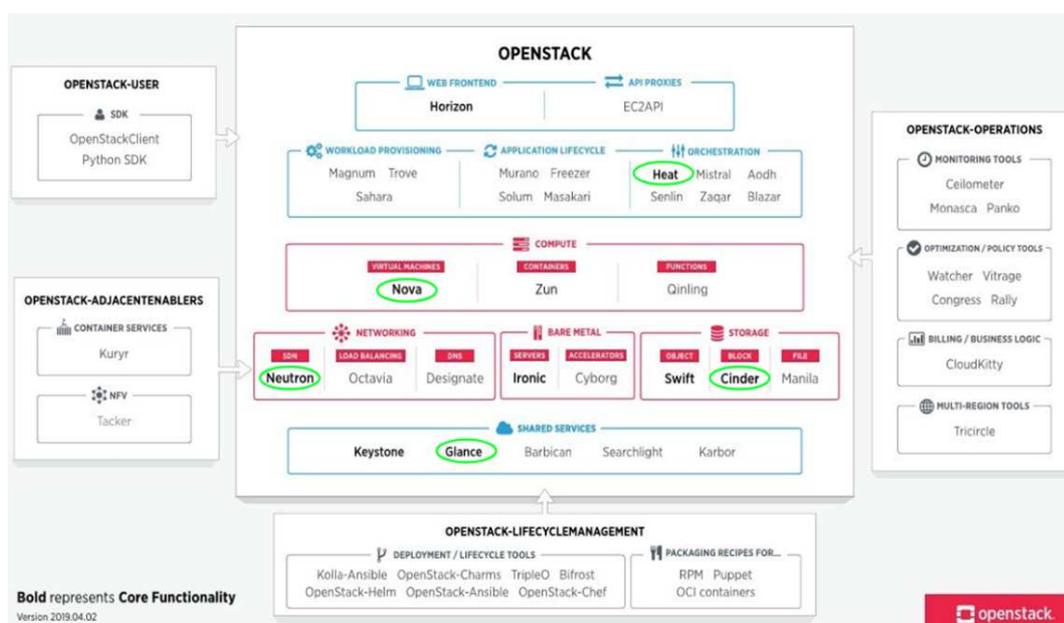


Figura 10 - Estrutura do OpenStack.

2.2.2.7. OpenStack Compute (Nova)

Nova é o projeto OpenStack que fornece uma maneira de provisionar instâncias de computação (servidores virtuais). O Nova suporta a criação de máquinas virtuais, servidores bare-metal e tem suporte limitado para sistemas de *containers*. Ele é executado como um conjunto de daemons sobre servidores Linux existentes para fornecer esse serviço. Ou seja, fornece um controlador de malha de computação em nuvem, compatível com uma ampla variedade de tecnologias de computação, incluindo: libvirt (KVM, Xen, LXC e mais), Hyper-V, VMware, OpenStack Ironic e PowerVM [OpenStack-Nova, 2021].

Ele requer os seguintes serviços adicionais do OpenStack para funções básicas [OpenStack-Nova, 2021]:

- **Keystone:** Fornece identidade e autenticação para todos os serviços OpenStack.
- **Glance:** Isso fornece o repositório de imagens de computação. Todas as instâncias de computação são iniciadas a partir de imagens glance.
- **Neutron:** é responsável por provisionar as redes virtuais ou físicas às quais as instâncias de computação se conectam na inicialização.
- **Placement:** Responsável por rastrear o inventário de recursos disponíveis em uma nuvem e auxiliar na escolha de qual provedor desses recursos será utilizado na criação de uma máquina virtual.

Ele também pode ser integrado a outros serviços para incluir armazenamento em bloco persistente, discos criptografados e instâncias de computação bare-metal [OpenStack, 2021].

Na Figura 10 conseguimos visualizar a relação de alguns dos componentes do OpenStack em relação ao Nova.

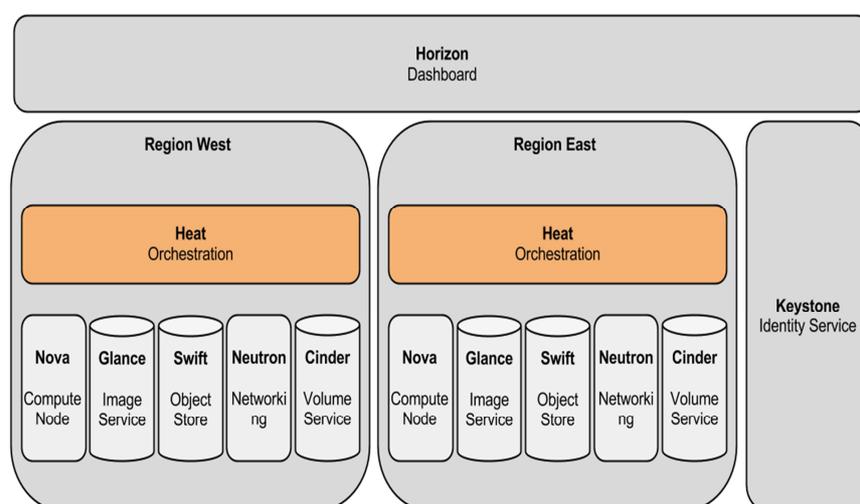


Figura 11 - Diagrama de alguns componentes do OpenStack com o Nova.

2.2.2.8. Heat

O OpenStack Orchestration tem como objetivo criar um serviço acessível a humanos e máquinas para gerenciar todo o ciclo de vida da infraestrutura e aplicativos nas nuvens OpenStack (OpenStack) [OpenStack-Heat 2022].

O Heat é o principal projeto do OpenStack Orchestration. Ele implementa um mecanismo de orquestração para iniciar vários aplicativos de nuvem compostos com base em modelos na forma de arquivos de texto que podem ser tratados como código. Um formato de modelo nativo do Heat está evoluindo, mas o Heat também se esforça para fornecer compatibilidade com o formato de modelo do AWS CloudFormation, para que muitos modelos existentes do CloudFormation possam ser executados no OpenStack. O Heat fornece uma API Rest nativa do OpenStack e uma API de consulta compatível com CloudFormation [OpenStack-Heat 2022].

2.2.2.9. Glance

Glance é um projeto OpenStack que fornece serviços e bibliotecas associadas para armazenar, navegar, compartilhar, distribuir e gerenciar imagens inicializáveis de disco, outros dados intimamente associados à inicialização de recursos de computação e definições de metadados [OpenStack-Glance, 2019].

Os serviços de imagem Glance incluem descoberta, registro e recuperação de imagens de máquina virtual (VM). O Glance possui uma API RESTful que permite consultar os metadados da imagem da VM, bem como a recuperação da imagem real [OpenStack-Glance, 2019]. Ou seja, o Glance provê um catálogo de imagens que são usadas para criar máquinas virtuais, mas não armazena essas imagens.

2.2.2.10. Cinder

Cinder é um serviço Block Storage para OpenStack. Ele foi projetado para apresentar recursos de armazenamento aos usuários finais que podem ser consumidos pelo OpenStack Compute Project (Nova). Isso é feito por meio do uso de uma implementação de referência (LVM) ou drivers de plug-in para outro armazenamento. A breve descrição do Cinder é que ele virtualiza o gerenciamento de dispositivos de armazenamento em bloco e fornece aos usuários finais uma API de autoatendimento para solicitar e consumir esses recursos sem exigir nenhum conhecimento de onde seu armazenamento está realmente implantado ou em que tipo de dispositivo [OpenStack-Cinder, 2022].

2.2.2.11. OpenStack Networking (Neutron)

O OpenStack Networking (Neutron) é um projeto OpenStack para fornecer “conectividade de rede como serviço” entre dispositivos de interface (por exemplo, vNICs) gerenciados por outros serviços OpenStack (por exemplo, Nova) [OpenStack-Neutron, 2020].

O Neutron fornece uma API que permite aos usuários configurar e definir conectividade e endereçamento de rede na nuvem. Ele lida com a criação e o gerenciamento de uma infraestrutura de rede virtual, incluindo redes, switches, sub-redes e roteadores para dispositivos gerenciados pelo serviço OpenStack Compute (Nova). Serviços avançados como firewalls ou rede privada virtual (VPN) também podem ser usados [OpenStack-Neutron, 2020].

2.2.2.12. Ceph

Ceph é uma plataforma de armazenamento de código aberto que implementa o armazenamento de objetos em um único cluster de computador distribuído e fornece interfaces 3 em 1 para armazenamento em nível de objeto, bloco e arquivo. Ele visa principalmente a operação completamente distribuída sem um único ponto de falha, escalabilidade para o nível de exabyte e disponibilidade gratuita. Desde a versão 12, o Ceph não depende de outros sistemas de arquivos e pode gerenciar diretamente HDDs e SSDs com seu próprio *backend* de armazenamento BlueStore e pode expor completamente um sistema de arquivos POSIX de forma autossuficiente [Ceph, 2022].

Foi apenas em 2018 que a *Linux Foundation* lançou a *Ceph Foundation* como sucessora do *Ceph Community Advisory Board*. A *Ceph Foundation* existe para permitir que os membros do setor colaborem e reúnam recursos para apoiar a comunidade do projeto Ceph. A fundação oferece um lar aberto, colaborativo e neutro para as partes interessadas do projeto coordenarem seu desenvolvimento e investimentos comunitários no ecossistema Ceph [Ceph, 2022].

2.2.2.13. Akraino Edge Stack



O Akraïno é um projeto da *Linux Foundation* iniciado pela AT&T e Intel, que tem como objetivo desenvolver uma solução de infraestrutura *edge* totalmente integrada, com foco total em *edge computing*. Essa *stack* de software de código aberto fornece infraestrutura crítica para permitir alto desempenho, reduzir a latência, melhorar a disponibilidade, diminuir a sobrecarga operacional, fornecer escalabilidade, atender às necessidades de segurança e melhorar o gerenciamento de falhas [Akraïno, 2020].

Akraïno é uma coleção de vários *blueprints*, que por sua vez são as configurações declarativas de toda *stack*, ou seja, plataforma de nuvem, API e aplicativos. A intenção do Akraïno é dar suporte aos *workloads* de VM, contêiner e *bare-metal*. E ele suporta qualquer tipo de metodologias de acesso como *wireless* (4G/LTE, 5G), *wireline*, Wi-Fi, etc.

Por ser um projeto de código aberto complementar, ele faz interface com os projetos existentes, como Acumos AI, Airship, Ceph, DANOS, EdgeX Foundry, Kubernetes, LF Networking, ONAP, OpenStack e StarlingX [Akraïno, 2020].

A comunidade Akraïno aborda vários casos de uso de borda e indústria, não apenas a indústria de telecomunicações. A comunidade Akraïno tem como foco desenvolver soluções e suporte de operadoras, provedores e redes IoT.

2.2.2.14. Anuket



Anuket é um projeto de código aberto da *Linux Foundation* que une os esforços desenvolvidos previamente pelos projetos *Open Platform for Network Function*

Virtualization (OPNFV) e *Cloud Infrastructure Telco Taskforce* (CNTT) [Anuket-Artifacts, 2022]. O Anuket desenvolve uma arquitetura de referência comum para o *Network Functions Virtualization Infrastructure* (NFVI), que inclui arquiteturas de referência, modelos comuns de infraestrutura, implementações de referência, e programas de conformidade e verificação, para apreciação de toda a indústria de telecomunicações. As implementações de referência da infraestrutura são baseadas no OpenStack (para funções de rede virtual, ou VNFs) e kubernetes (para funções de rede nativas de nuvem, ou CNFs) [Anuket-EdgeStack, 2022].

Por ser um projeto de código aberto complementar, ele faz interface com outros projetos existentes, como Acumos AI, Airship, Ceph, DANOS, EdgeX Foundry, Kubernetes, LF Networking, OpenStack e StarlingX, e principalmente o ONAP. Enquanto o foco principal do ONAP é na orquestração de serviços de rede e na integração da operação, o foco do Anuket é em tecnologias habilitadoras de funções de rede virtualizadas e de nuvem [Anuket, 2022]. Em seu escopo de atividades, o projeto Anuket inclui [Anuket-EdgeStack, 2022]:

- Promover o alinhamento das comunidades membros ao modelo, arquitetura, requisitos e especificações de implementação para infraestrutura baseada em nuvem para cargas de trabalho de telecomunicações;
- Desenvolver de forma colaborativa uma referência integrada, testada e validada de infraestrutura de código aberto (incluindo interfaces para hardware), com ferramentas de seu próprio design e de projetos de teste upstream;
- Desenvolver de forma colaborativa documentação, testes, integração, estruturas de conformidade e programas de validação;
- Criar novos componentes de código aberto dentro da infraestrutura de referência onde necessário;
- Contribuir com projetos upstream aproveitando a referência de infraestrutura;
- Apoiar comunidades de código aberto e de padrões abertos no ecossistema;
- Apoiar atividades estratégicas em andamento e avaliar tecnologias emergentes para promover o sucesso contínuo da implantação.

2.2.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento e utilização

Abaixo foram definidos os critérios de seleção e selecionados os fóruns e projetos para acompanhamento e utilização no testbed OpenRAN.

- **Fóruns colaborativos selecionados para acompanhamento**

Abaixo foram definidos alguns critérios para a seleção de fóruns de discussão colaborativos relacionados a cloud em redes 5G a serem acompanhados pelo projeto Open RAN. Os critérios para a seleção são:

- Fazer parte de comunidade ativa
- Participação de atores relevantes no cenário de desenvolvimento de redes 5G abertas

- Comunidade aberta a oferecer suporte responsivo aos usuários
- Ter documentação disponível e atualizada a respeito dos padrões técnicos e das soluções
- Discussões a respeito de segurança em redes 5G
- Discussões a respeito de aplicações futuras e avançadas em redes 5G

As comunidades das três fundações citadas anteriormente: ONF, LF e CNCF crescem continuamente, contam com uma documentação satisfatória e os fóruns de discussão oficiais, atualizados e bem ativos. Portanto, as três foram selecionadas para acompanhamento.

• **Projetos e soluções selecionados para utilização**

Abaixo foram definidos alguns critérios para a seleção dos projetos relacionados a camada de cloud em redes 5G a serem acompanhados e utilizados no projeto Open RAN. Os critérios são usados apenas quando aplicáveis ao escopo de cada projeto ou solução. Aqueles mandatórios são:

- Suporte à arquitetura 5G, incluindo as funções virtualizadas de RAN, e a possibilidade de manipulação de diferentes tipos de workload, como aplicações de vídeo, de IoT e aplicações industriais;
- Suporte a funções de rede físicas (PNFs);
- Estar atualmente em desenvolvimento e ter uma comunidade ativa, crescente e responsiva.
- Nível Graduated de maturidade CNCF;

Os critérios desejáveis são:

- Previsto pela arquitetura ONAP;
- Em conformidade com os padrões e modelos Anuket;
- Suporte acessível dos desenvolvedores;
- Já estar em testes ou em uso por alguma operadora no mercado.
- Estar sendo desenvolvido por algum dos Fóruns colaborativos e comunidades descritas no item anterior;

Portanto, dentre os projetos já descritos, podemos destacar os seguintes a serem acompanhados:

- Kubernetes - projeto de nível de maturidade Graduated no CNCF - com a função de prover a infraestrutura de aplicações em container. Também previsto dentro da arquitetura ONAP e Aether;
- Helm - projeto de nível de maturidade Graduated no CNCF - com a função de prover o gerenciamento de versões de aplicações em container sobre Kubernetes;

- Aether - solução com arquitetura completa para redes privadas 5G, prevendo ainda infraestrutura de cloud para o central site e o edge site. Utiliza Kubernetes para aplicações em container;
- ONAP - projeto com um grande nível de abrangência dentro do cenário de cloud, com suporte a redes 5G e suporte gradual a funções avançadas sobre redes 5G. Prevê as camadas de orquestração de aplicações e se integra com várias soluções de infraestrutura de cloud - poderá ter a função de orquestração de aplicações dentro do testbed.
- Outros - eventualmente, algum componente previsto pela arquitetura ONAP pode vir a ser selecionado para utilização no testbed.

- **Soluções não descritas anteriormente que podem ser utilizadas:**

Intel Smart Edge Open - Trata-se de um conjunto de ferramentas de software de edge computing (computação de borda) para a hospedagem e entrega de serviços e aplicações de nuvem de borda, como inteligência artificial, processamento de mídia e redes 5G privadas, conectando-se com outras aplicações de controle em um site central. A arquitetura prevê:

- "on-premises edge", normalmente localizado em uma empresa;
- "access edge", localizado em ou perto de uma estação base 5G;
- "near edge", que é o ponto de agregação hospedando um UPF distribuído (UPF - user plane function - função do plano de usuário);
- "regional data center", que hospeda um escritório central com convergência de redes sem fio e redes cabeadas; e
- "experience kits", que fornecem a referência e as soluções para a implantação de redes 5G localmente com seus serviços de borda.

A solução utiliza componentes de software de código aberto como Kubernetes, para infraestrutura de containers em nuvem de borda, e considera padrões desenvolvidos em conjunto com a Linux Foundation Edge, 3GPP, CNCF e O-RAN Alliance.

Assim, dentro do *Intel Smart Edge Open* foi selecionado o "*Private Wireless Experience Kit*" (Kit de Experiência Sem Fio Privado) como uma possível solução a ser utilizada no testbed, agregando e se integrando com os componentes de edge cloud já descritos anteriormente. Este kit combina tecnologias nativas de nuvem Intel, projetos de código aberto, rede sem fio e computação de alto desempenho para plataformas "Intel Edge". A arquitetura de implantação do *Private Wireless Experience Kit* é ilustrada na Figura 11. Os seguintes serviços, destacados em amarelo são:

- NG-RAN - gNodeB DU e CU;
- UPF - User plane function - Função de plano de usuário
- DN - Data network - aplicações de borda
- AMF e SMF - funções do plano de controle 5G, incluindo o AMF: "access and mobility management function" e o SMF: "session management function".

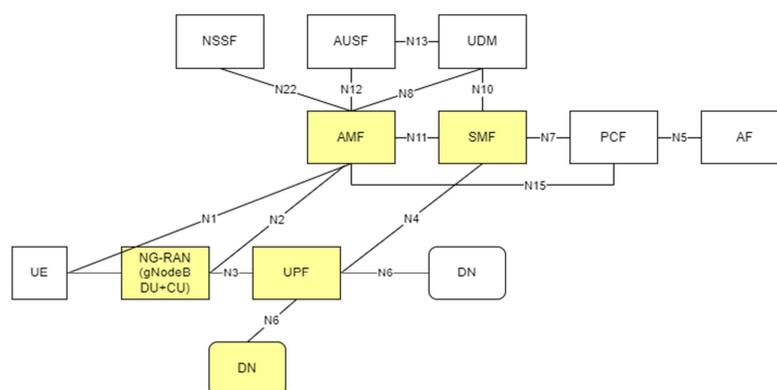


Figura 12 - Arquitetura do Intel Smart Edge Open Private Wireless Experience Kit.

O *Intel Smart Edge Open Private Wireless Experience Kit* utiliza a rede central 5G simplificada da Radisys, de modo que apenas as funções AMF e SMF são destacadas na documentação e descritas na Figura 12. A implantação também pode ser estendida para suportar outras funções do plano de controle, sendo necessário o contato com a Radisys para mais informações.

Os projetos abaixo não foram selecionados para utilização neste primeiro momento, por se tratarem de especificações já atendidas pelos projetos anteriores ou por se tratarem de projetos que ainda não são utilizados pelas soluções descritas anteriormente. Porém estão aptos a serem eventualmente utilizadas caso durante o desenvolvimento do testbed se julgue necessário:

- OpenStack - com a função de prover infraestrutura de máquinas virtuais;
- Ceph - com a função de prover armazenamento de objetos cloud-native;
- Akraino - para definição de interfaces entre os componentes das aplicações;
- Anuket - para definição de requisitos das funções virtualizadas.

2.2.4. Levantamento Sistemático da Literatura

Os resultados obtidos a partir das *strings* de busca sinalizam que, na última década, o setor de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) experimentou mudanças rápidas, tanto na escala das plataformas quanto no escopo dos aplicativos. Computadores, telefones inteligentes, nuvens e redes sociais exigem não apenas alto desempenho, mas também alto grau de inteligência de máquina. Segundo Polese et al., [2020], para enfrentar esse novo paradigma de computação e comunicação, é preciso atualizar os ecossistemas de redes e nuvem com novos recursos, como aprendizado de máquina, redes definidas por software, análise de dados e poder cognitivo que podem imitar ou aumentar a inteligência humana.

Na análise de Silva *et al.* [2018], a diversificação dos modelos de serviços ofertados em computação em nuvem, como Aprendizagem como Serviços (LaaS), Analytics como Serviço (AaaS), fatias como serviço (*Slice as a Service*) ou Segurança como Serviço (SaaS) está demandando que os sistemas em nuvem, os serviços da web e os centros de dados (*data centers*) sejam projetados para armazenar, processar, aprender e analisar

grande quantidade de dados para descobrir novos conhecimentos ou tomar decisões críticas, aproveitando as diversas métricas capturadas em suas redes para resolver e evitar problemas, fortalecer a segurança e melhorar o desempenho da rede. Essas metas são alcançadas por meio de virtualização de hardware, redes programáveis, inteligência artificial, análise de dados e computação cognitiva.

O projeto Necos [2020] propõe uma solução baseada na virtualização de recursos, ou *Lightweight Slice Defined Cloud* (LSDC) como uma abordagem para automatizar o processo de configuração otimizada da nuvem, estendendo o conceito de virtualização a todos os recursos em um centro de dados, fornecendo um gerenciamento uniforme com um alto nível de autonomia para os recursos de computação, conectividade e armazenamento atualmente separados.

Outros artigos propõem ferramentas para viabilizar a virtualização das redes em busca de maior largura de banda, diminuir os custos e sobrecargas, aumentar a flexibilidade e customização do ambiente. Os autores Callegati *et al.* [2014], Sefraoui *et al.* [2012] e Hao *et al.* [2019] investigam as plataformas OpenStack e OpenNebula para administração de nuvens com objetivo de gerir grandes centros de dados, infraestrutura de redes virtuais e controlar o acesso ao ambiente. Uma comparação entre as duas plataformas é feita por Wen *et al.* [2012].

Além do uso de plataformas de gerência de nuvem para a construção de softwares nativos de nuvem, as redes 5G demandam flexibilidade e portabilidade. Assim, são necessárias alternativas leves de virtualização. Com isso, é sugerido o uso de *containers*, por serem considerados mais leves quando comparados a máquinas virtuais. Casalicchio [2019] realiza um levantamento das alternativas de containerização disponíveis.

Para selecionar, implantar, monitorar e controlar dinamicamente a configuração de aplicações de múltiplos *containers* na nuvem, são utilizadas ferramentas de orquestração de containers. Uma das mais utilizadas é o Kubernetes, ela fornece orquestração, automação de implantação, programação, escalonamento e coordenação de aplicações. O uso de Kubernetes como tecnologia chave para a arquitetura de micro-serviços 5G cloud-native é abordado por Shah *et al.* [2021] e pelo grupo *5G Infrastructure Public Private Partnership* (5G-PPP). Além disso, trabalhos como o de Wang *et al.* [2018] a utilizam para hospedar e gerenciar componentes de funções de rede *cloud-native* containerizados.

2.3. Domínio de Pacotes P4

As demandas em redes móveis estão em constante evolução, porém projetar e integrar novos processamentos de pacotes de alta velocidade continua sendo um desafio devido à complexidade dos requisitos e à opacidade das especificações dos protocolos. Os planos de dados 5G devem ser implementados em hardware programável para garantir velocidade e flexibilidade, além do fato de estender ou substituir esses planos de dados deve também ser indolor para garantir a sua rápida implantação e inovação [MacDavid et al., 2021]. É nesse contexto em que redes definidas por software baseadas no ecossistema P4 se inserem [Hauser et al., 2021] [Kfoury et al., 2021].

O objetivo desta seção é realizar um levantamento do estado da arte das principais iniciativas comunidades, projetos colaborativos e projetos de software aberto relacionados ao ecossistema P4, visando a sua aplicação em redes móveis 4G/5G de borda (edge). Ao final, é apresentado também um breve levantamento sistemático da literatura relacionada ao tema.

2.3.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos

A seguir, são apresentadas as principais iniciativas comunidades e projetos colaborativos: ONF, LF, Open Compute Project (OCP) e Internet Engineering Task Force (IETF).

2.3.1.1. Open Networking Foundation (ONF)

A comunidade ONF em sua origem, foi responsável por padronizar o protocolo OpenFlow para permitir a separação do plano de controle de rede e de dados, permitindo implementações SDN de vários fornecedores. Atualmente, a ONF atua em diversas frentes de trabalho, coordenando projetos em diversas áreas de SDN, como redes móveis, redes privadas 5G e de borda, banda larga fixa, além de planos de dados programáveis.

Na sua versão atual, o OpenFlow especifica explicitamente os cabeçalhos de protocolo nos quais ele opera. Este conjunto cresceu de 12 a 41 campos em alguns anos, aumentando a complexidade da especificação, porém ainda não oferece flexibilidade suficiente para se adicionar novos cabeçalhos e definir novas ações após um *flow matching*.

A linguagem P4 ajuda a superar essas limitações do OpenFlow, aumentando a programabilidade das redes definidas por software. Por volta de 2013, surgiram as ideias iniciais sobre a programabilidade do plano de dados por meio de uma linguagem de domínio específico de alto nível. Assim, surgiu a denominação P4, acrônimo de *Programming Protocol-Independent Packet Processors*. A linguagem tomou forma e foi publicado o primeiro artigo no SIGCOMM em 2014 [Bosshart et al., 2014] quando surgiu a primeira versão, a P4₁₄, e foram lançadas as primeiras especificações oficiais.

Em relação ao plano de dados programável, a ONF conduz o *P4 Technical Steering Team* (TST) que é responsável por supervisionar o projeto P4 e é responsável por todas as decisões técnicas. O projeto P4 é descrito em mais detalhes na Seção “2.3. Domínio de Pacotes P4” e pode ter suas principais referências obtidas a partir do site oficial do projeto.

2.3.1.2. Open Compute Project (OCP)



A *Open Compute Project Foundation* (OCP) [OCP, 2022] foi iniciada em 2011 com a missão de aplicar os benefícios do código aberto e da colaboração aberta ao hardware e aumentar rapidamente o ritmo da inovação dentro, perto e ao redor do data center . O OCP é uma organização que compartilha projetos de produtos relacionados a data centers e práticas recomendadas para eles entre empresas, incluindo ARM, Meta, IBM, Wiwynn, Intel, Nokia, Google, Microsoft, Seagate Technology, Dell, Rackspace, Hewlett Packard Enterprise, NVIDIA, Cisco, Goldman Sachs, Fidelity, Lenovo e Alibaba Group.

A OCP mantém diversos projetos em diversas áreas relacionadas a data centers como: Projeto de Servidores, Armazenamento de Dados, Projeto de Bastidores/Racks, Data Centers Eficientes Energeticamente e Switches de Rede Abertos.

No que diz respeito aos dispositivos de rede, em 2013, um esforço do Facebook de definir um switch de rede aberto foi anunciado [Frankovsky, 2013]. Esse esforço culminou no que hoje é conhecido como o sistema operacional de switches SONiC, descrito em mais detalhes na Seção “2.3.2.5. Software for Open Networking in the Cloud (SONiC)”.

2.3.1.3. Internet Engineering Task Force (IETF)



O *Internet Engineering Task Force* (IETF) é um grupo informalmente auto organizado de pessoas (composto por técnicos, agências, fabricantes, fornecedores e pesquisadores) que contribuem para a engenharia e evolução das tecnologias usadas na Internet. Dentre suas principais ocupações está o desenvolvimento, especificação e promoção de padrões para a Internet, atuando em estreita cooperação com o *World Wide Web Consortium* e a Organização Internacional de Normalização (ISO, do inglês *International Organization for Standardization*). O IETF é atípico por ser constituído de um conjunto de eventos, mas não ser uma corporação e não ter conselho de administração, membros ou taxas de filiação [Braga et al., 2014]. Sua missão inclui:

- Identificar problemas técnicos e operacionais urgentes na Internet e propor soluções.
- Especificar o desenvolvimento ou utilização de protocolos e de uma arquitetura de curto prazo para resolver problemas técnicos para a Internet.
- Fazer recomendações ao IESG (*Internet Engineering Steering Group*) em relação à padronização e ao uso de protocolos na Internet.
- Facilitar a transferência de tecnologia do IRTF (*Internet Research Task Force*) para a comunidade ativa da Internet.

- Fornecer um fórum para troca de informações na comunidade da Internet entre fornecedores, usuários, pesquisadores, empresários e gestores de redes.

Os Grupos de Trabalho (WGs, do inglês *Working Groups*) são o principal mecanismo para o desenvolvimento de especificações e diretrizes do IETF, muitos dos quais podem se tornar padrões ou recomendações. Os Grupos de Trabalho são normalmente criados com uma carta que descreve o problema ou resultados específicos (uma diretriz, uma especificação de padrões, etc.) para os quais foram formados. Essas cartas e outros detalhes sobre o trabalho necessário são frequentemente, mas nem sempre, desenvolvidos com a contribuição das sessões iniciais do “*Birds of a Feather*”¹. Os estatutos do WG estabelecem o escopo do trabalho do grupo e estabelecem metas e marcos que mostram como esse trabalho será concluído.

Normalmente, existem mais de 100 Grupos de Trabalho ativos em um determinado momento, e cada um faz parte da área do IETF que é mais relevante para seu trabalho. Embora geralmente se espere que os Grupos de Trabalho tenham vida curta, alguns fornecem melhorias contínuas dos protocolos estabelecidos. Por fim, ao completar suas metas e atingir seus objetivos o WG é concluído.

Atualmente, existem dois grupos de trabalho que tratam da adoção do P4 como tecnologia habilitadora para a implementação e o funcionamento de determinados protocolos. Primeiramente, o Grupo de Trabalho *IP Performance Measurement* trata do desenvolvimento do protocolo *In-situ Operations, Administration, and Maintenance* (IOAM), ou seja, do registro de informações operacionais e de telemetria em pacotes de usuário enquanto os pacotes percorrem um caminho entre dois pontos na rede. As funcionalidades de *In-band Network Telemetry* (INT) especificadas em [P4.org Applications Working Group, 2020] podem ser adotadas para habilitar o uso do IOAM.

O P4, também, é um tema de grande relevância no Grupo de Pesquisas de *Computing in the Network* (COINRG) do IRTF/IETF, que trata da perspectiva de implantar a funcionalidade de processamento de dados gerais em dispositivos de rede, como switches e placas de interface de rede. Embora essa funcionalidade possa ser benéfica em vários contextos, ela deve ser cuidadosamente colocada no contexto da comunicação geral da Internet [IETF, 2022].

No entanto, cabe frisar que, conforme citado anteriormente, o P4 não é o assunto principal de nenhum dos dois WG. Ele somente é utilizado como uma tecnologia habilitadora para as tecnologias em questão. Por essa razão é justificada sua menção, embora não seja o enfoque principal do presente trabalho.

2.3.1.4. Linux Foundation (LF)



Quanto à Linux Foundation, suas principais características foram descritas na Seção “2.2.1.1. Linux Foundation (LF)”.

¹ As sessões “*Birds of a Feather*” (BOFs) são discussões iniciais sobre um tópico específico de interesse para a comunidade IETF. Os BOFs geralmente são realizados em reuniões do IETF, e os pedidos para realizar um BOF devem ser feitos com bastante antecedência da reunião.

2.3.2. Projetos de Software Aberto

A presente seção visa apresentar os principais projetos de software aberto relacionados ao tema “Ecossistema P4”. A seguir são apresentados os seguintes projetos: Ecossistema P4, *Software Defined Fabric*, Stratum, Fabric-TNA, *Software for Open Networking in the Cloud* (SONiC) e *P4 Integrated Network Stack* (PINS).

2.3.2.1. Ecossistema P4



O *Programming Protocol-Independent Packet Processors* (P4) é uma linguagem específica de domínio para dispositivos de rede, que especifica como os dispositivos de plano de dados (switches, NICs, roteadores, filtros, etc.) processam pacotes. Antes do P4, os fornecedores tinham controle total sobre a funcionalidade suportada na rede. E como os ASICs de rede determinavam grande parte do comportamento possível, os seus fornecedores controlavam o lançamento de novos recursos (por exemplo, VXLAN), que em geral levavam anos para ocorrer.

O P4 transforma o modelo tradicional de cabeça para baixo. Desenvolvedores de aplicativos e engenheiros de rede agora podem utilizar o P4 para definir novos protocolos de rede, implementar políticas de rede específicas (de acordo com sua necessidade), e até executar algoritmos mais complexos (como modelos de aprendizado de máquina). Tudo isso em questão de minutos ao invés de anos (como ocorria com os dispositivos “tradicionais”).

A Figura 13 visa ilustrar como o fluxo de trabalho de um programa desenvolvido em linguagem P4 funciona. Programas e compiladores P4 são específicos do alvo em que é aplicado. Esse alvo, no entanto, pode ser baseado em diversos tipos, podendo ser tanto baseado em hardware (executado em FPGA ou ASICs programáveis, por exemplo) quanto em software (executado em arquitetura x86, por exemplo).

Um programa P4 (`prog.p4`) classifica os pacotes por cabeçalho e as ações a serem tomadas nos pacotes recebidos (por exemplo, encaminhar ou descartar). Um compilador P4 gera os metadados de mapeamento de tempo de execução para permitir que os planos de controle e de dados se comuniquem usando P4Runtime (`prog.p4info`). Ele também gera um executável para o plano de dados de destino (`target_prog.bin`), especificando os formatos de cabeçalho e as ações correspondentes para o dispositivo de destino.

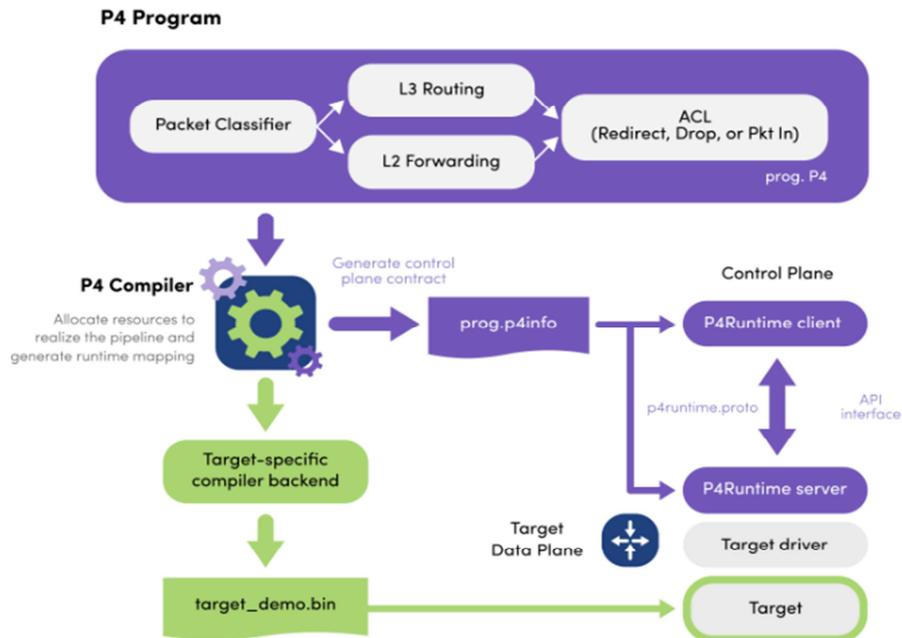


Figura 13 - Visão geral do fluxo de trabalho associado aos programas.

O Ecossistema P4 é grande e está em constante crescimento acelerado. Ele inclui uma ampla gama de produtos, projetos e serviços que tiram proveito do P4 e podem ser vistos na Figura 14. Não é objetivo aqui esgotar a explanação a respeito do tema P4, desse modo para uma obter uma documentação detalhada a respeito, é recomendada a leitura da documentação disponível em [P4.org, 2022].

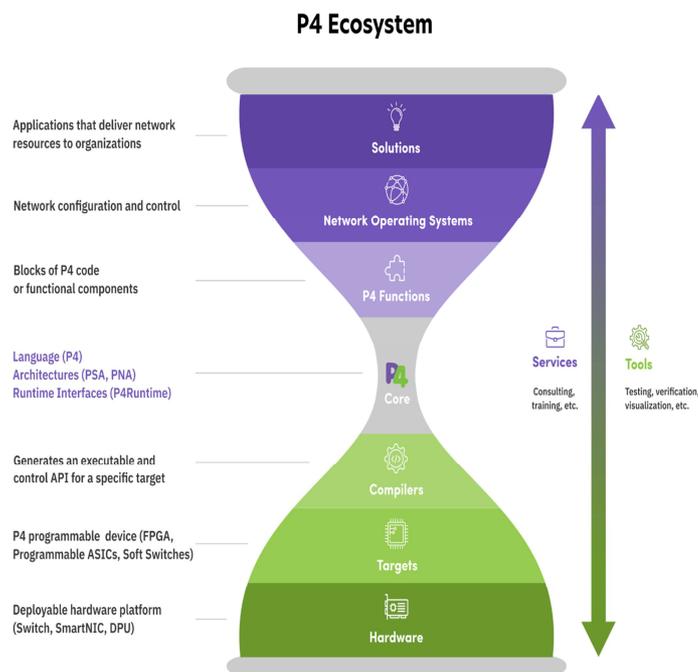


Figura 14 - Visão geral dos principais atores associados ao ecossistema.

Como mencionado, o P4 define todo um ecossistema de aplicações, protocolos, linguagem, arquiteturas de hardware, interfaces e plataformas de hardware em si. Identificar as principais especificações associadas a cada um dos principais atores relacionados é um trabalho complexo. Assim sendo, a seguir são descritos, brevemente, os principais aspectos relacionados ao P4, que em geral são fonte de equívocos a respeito dos temas.

- **API P4Runtime:** é uma especificação do plano de controle para gerenciar os elementos de plano de dados de um dispositivo definido por um programa P4.
- **P4 Target:** é uma modalidade de implementação de hardware específica (Por exemplo, FPGA, Tofino, DPDK).
- **P4 Architecture:** um conjunto específico de componentes programáveis P4, externos, componentes fixos e suas interfaces disponíveis para o programador P4.
- **P4 Platform:** é uma P4 *architecture* implementada em um P4 *target*.
- **Portable NIC Architecture (PNA):** é um exemplo de arquitetura de dispositivos alvo que descreve os recursos comuns de NICs que processam e encaminham pacotes entre uma ou mais interfaces de rede e um sistema host.
- **Portable Switch Architecture (PSA):** é um exemplo de arquitetura de dispositivos alvo que descreve os recursos comuns de switches de rede para processar e encaminhar pacotes.
- **In-band Network Telemetry (INT):** é um *framework* de telemetria (monitoramento avançado) executado diretamente para o plano de dados para coletar e relatar o estado dos elementos da rede sem depender de mecanismos do sistema de gerência baseados em polling do plano de controle.
- **Telemetry Report Format:** define os formatos de pacote para relatórios de dispositivos de plano de dados para um sistema de monitoramento de telemetria distribuído.

2.3.2.2. Software Defined Fabric (SD-Fabric)



O SD-Fabric é uma malha de rede programável, de pilha completa, gerenciada na nuvem e amigável ao desenvolvedor que permite novas classes de aplicativos de borda emergentes para a Indústria 4.0 com tecnologia 5G. A Figura 15 exibe a arquitetura de referência do SD-Fabric. Ele é integrado às bordas da pilha de referência Aether, como sua infraestrutura de rede subjacente, interconectando todos os equipamentos em cada site de borda Aether [ONF, 2021].

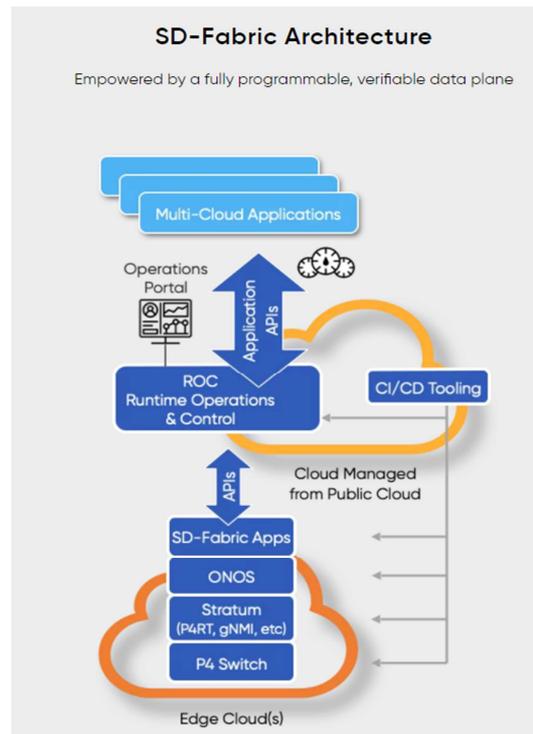


Figura 15 - Arquitetura de referência do Aether.

Conforme pode ser visto na Figura 16, extraída de [ONF, 2022], o SD-Fabric possui como principais componentes de sistema os seguintes elementos descritos a seguir [ONF, 2021]:

- **Open Network Operating System (ONOS):** SD-Fabric usa o ONOS da ONF como o controlador SDN. O ONOS é projetado como um sistema distribuído, composto por várias instâncias operando em um cluster, com todas as instâncias operando ativamente na rede enquanto são funcionalmente idênticas.
- **Aplicações ONOS:** SD-Fabric utiliza uma coleção de aplicativos executados no ONOS para fornecer recursos e serviços disponibilizados pelo *fabric*. O principal aplicativo responsável pela operação do fabric lida com recursos de conectividade de acordo com a arquitetura SD-Fabric, enquanto outros aplicativos como DHCP relay, AAA, controle do pipeline 4G/5G e multicast lidam com recursos mais especializados.
- **STRATUM:** SD-Fabric integra o SO de switch do projeto ONF denominado como Stratum. O Stratum é um sistema operacional de switch independente de código aberto e é descrito em detalhes na Seção “2.3.2.3. Stratum”.
- **Switch Hardware Leaf e Spine:** em uma configuração típica, os hardwares *leaf* e *spine* utilizados na arquitetura do SD-Fabric normalmente são switches certificados do *Open Compute Project* (OCP) de uma seleção de diferentes fornecedores. As configurações de porta e ASICs usados nesses switches dependem das necessidades de cada operador. Por exemplo, se a necessidade for apenas para recursos de encaminhamento tradicionais (como pipelines tradicionais L2/L3) várias

opções são possíveis – por exemplo, ASICs Broadcom StrataXGS em configurações 48x1G/10G, 2x40G/100G. Para necessidades avançadas que aproveitam o P4 e ASICs programáveis, os ASICs Intel Tofino ou Broadcom Trident 4 são as escolhas mais apropriadas.

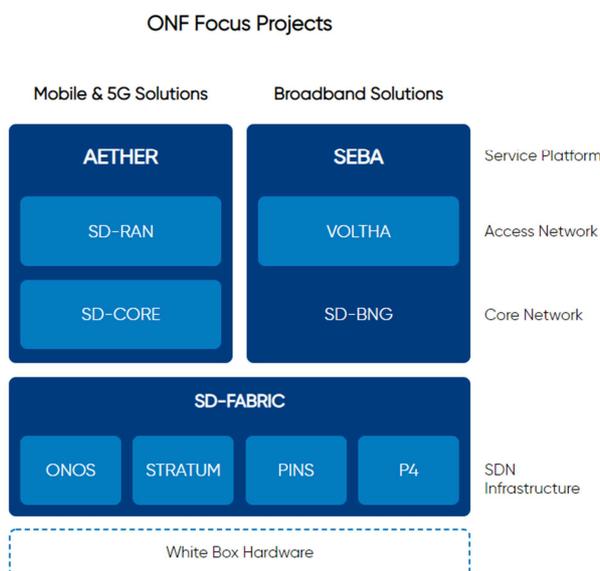


Figura 16 - Projetos de rede programáveis suportados pela ONF – visão geral.

O SD-Fabric tira proveito da programação P4 estendendo o pipeline L2/L3 tradicional para comutação e roteamento com funções especializadas, como 4G/5G *Mobile Core User Plane Function* (UPF) e INT (*Inband Network Telemetry*), que são funcionalidades essenciais para o funcionamento da arquitetura dos projetos SD-Core [ONF-SDCore, 2022], e SD-RAN [ONF-SDRAN, 2022], integrantes do Aether.

Switches que adotam o SD-Fabric podem ser programados para executar funções UPF em line rate. O pipeline de processamento de pacotes L2/L3 executado em switches baseados em hardware programável Intel Tofino foi estendido para incluir recursos como terminação de túnel GTP-U, relatórios de uso, buffer de modo ocioso, QoS, slicing e muito mais. Semelhante ao vRouter, um novo aplicativo ONOS abstrai toda a estrutura de topologia de fabric com elementos *leaf* e *spine* como um grande UPF, fornecendo integração com o plano de controle do núcleo móvel usando uma implementação do *Packet Forwarding Control Protocol* (PFCP) compatível com o 3GPP.

Com a integração do pipeline UPF, o SD-Fabric pode implementar um *breakout* local 4G/5G para aplicativos de borda multiterabit e baixa latência, sem tirar o poder de processamento da CPU de elementos de computação de borda para *containers* ou VMs. Em contraste com as soluções UPF baseadas em *offload* total ou parcial de smartNIC, o UPF do SD-Fabric não requer hardware adicional além dos mesmos switches leaf e spine usados para interconectar servidores e estações base. Ao mesmo tempo, o SD-Fabric pode ser integrado a UPFs baseados em CPU ou baseados em smartNIC para melhorar a escala enquanto oferece suporte a serviços diferenciados em um caminho rápido baseado em hardware em line-rate para aplicações 4G/5G de missão crítica.

2.3.2.3. Stratum



O Stratum [ONF-Stratum, 2022] é um sistema operacional de switch independente do chip para redes definidas por software. Concebido como um componente de software chave das soluções SDN do futuro, o Stratum implementa as mais recentes interfaces *northbound* centradas em SDN, incluindo P4, P4Runtime, gNMI/OpenConfig e gNOI, o que permite a intercambialidade de dispositivos de encaminhamento e a programação de seus comportamentos de encaminhamento. Conforme ilustrado na Figura 17, extraída de [ONF-Stratum, 2022], o Stratum suporta todo o ciclo de vida de controle e gerenciamento dos switches, incluindo (i) Configuração, (ii) Controle, (iii) Operações e (iv) Programabilidade do pipeline de encaminhamento de pacotes de modo opcional, providas pelas interfaces *northbound* citadas anteriormente.

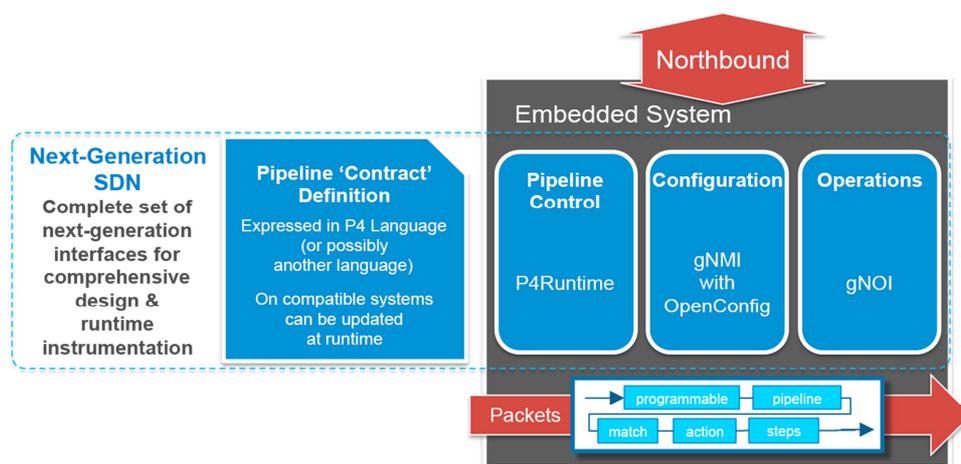


Figura 17 - Interfaces *northbound* disponibilizadas pelo Stratum para tarefas de controle de execução do pipeline, configuração e operação.

No entanto, cabe ressaltar que o Stratum não incorpora protocolos de controle, mas foi projetado para oferecer suporte a um Sistema Operacional de Rede (NOS, do inglês *Network Operating System*) externo ou para trabalhar com funções do NOS executadas de modo incorporado ao mesmo switch (quando utilizado em implementações de switches/roteadores tradicionais). Quanto às interfaces *southbound*, o Stratum implementa adaptadores que suportam ASICs de rede, como Intel Tofino, a linha Broadcom StractaXGS e outros.

Diversos casos de uso são suportados pelo Stratum, conforme citados a seguir:

- Plano de Dados SDN para Nuvem: alavanca a utilização de SDN em redes SDN customizadas, onde o Stratum atua como um sistema operacional de switches controlado por um controlador proprietário.
- Plataforma de Fabrics SDN para Nuvem: uma solução de código aberto para fabrics spine-leaf para data center s de próxima geração por meio do SD-Fabric.

- Plataformas de Nuvem de Borda de Operadores de Redes Móveis 5G: aumenta a escalabilidade e eficiência de custo de nuvens de borda com Funções de Redes Virtualizadas (VNFs, do inglês *Virtual Network Functions*) no fabric em switches P4, como é o caso do projeto Aether em operação conjunta com o SD-Fabric.
- *Thick Switches* com Controle Incorporado: replica o gerenciamento e controle “tradicionais” usando Stratum em um controlador incorporado dentro do mesmo switch.

2.3.2.4. Fabric-TNA

Em se tratando de código P4, um programa em linguagem P4 pode ser visto como um contrato que define precisamente o comportamento de encaminhamento de dados dos dispositivos de rede. Diante desse contexto, o fabric-TNA é um subprojeto do Stratum, disponível em [ONF-TNA, 2022], que define um programa P4 que tem por objetivo realizar o plano de dados do SD-Fabric (descrito na Seção “2.3.2.2. Software Defined Fabric (SD-Fabric)”). O Fabric-TNA é baseado na *Tofino Native Architecture* (TNA), o que lhe permite ser utilizado para programar qualquer switch baseado no ASIC Intel Tofino. O programa P4 é especificamente projetado para rodar em switches com Stratum e controlados pelo controlador SDN ONOS. Entretanto, vale ressaltar ainda que existe também uma versão equivalente do mesmo programa P4, baseada na arquitetura v1model, para ser utilizado em desenvolvimento e testes juntamente com o switch virtual *Behavioral Model version 2* (BMv2).

Cabe salientar, no entanto, que apesar do Fabric-TNA seguir um projeto muito similar ao fabric.p4 [Open Networking Lab, 2022] (programa P4 antigo hospedado no repositório do ONOS e desenvolvido para suportar a aplicação Trellis²), ele evoluiu significativamente visando prover mais capacidades avançadas para redes móveis 4G/5G, como UPF, INT, fatiamento e Qualidade de Serviço (QoS, do inglês *Quality of Service*). Por essa razão (capacidades avançadas), é que o Fabric-TNA deve ter uma atenção especial no desenvolvimento do projeto OpenRAN@Brasil, dado que é ele o responsável por implantar os comportamentos de encaminhamento associados a essas capacidades. Conforme pode ser observado na Figura 18, o Fabric-TNA se baseia em uma abordagem *cloud-native*, onde as capacidades de fabric e de redes móveis são implantadas por meio de *containers* com perfis de capacidades diferentes em função da funcionalidade a ser explorada.

² O Trellis [ONF-Trellis, 2022] é um antigo projeto da ONF que tinha como proposta principal tirar proveito da programação P4 estendendo o pipeline L2/L3 tradicional para suportar aplicações de fabrics em redes de data center. Com o surgimento do projeto SD-Fabric, o projeto Trellis foi absorvido, tendo se tornado uma das funções providas por ele.

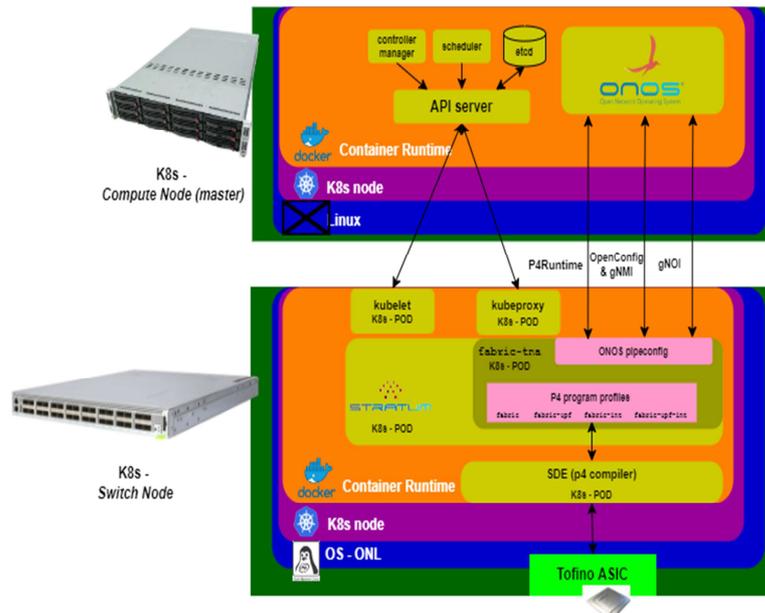


Figura 18 - Visão geral da implantação do fabric-tna por meio dos perfis de programa P4.

2.3.2.5. Software for Open Networking in the Cloud (SONiC)

SONiC [OCP-SONiC, 2022], acrônimo de *Software for Open Networking in the Cloud*, é um sistema operacional de rede de código aberto baseado em Linux que roda em switches de vários fornecedores e ASICs distintos. O SONiC oferece um conjunto completo de funcionalidades de rede, como BGP e RDMA, que foram amplamente utilizadas em ambientes de produção de *data centers* de alguns dos maiores provedores de serviços em nuvem de todo o mundo. Atualmente, ele tem seu desenvolvimento liberado pela equipe da Azure da Microsoft, porém tem a adesão da indústria de diversas frentes, como Alibaba, Cisco, Dell, Docker, Canonical, Nokia, LinkedIn, entre outros. Desse modo, ele tem como uma de suas premissas oferecer às equipes a flexibilidade de criar as soluções de rede de que precisam, aproveitando a força coletiva de um grande ecossistema e comunidade.

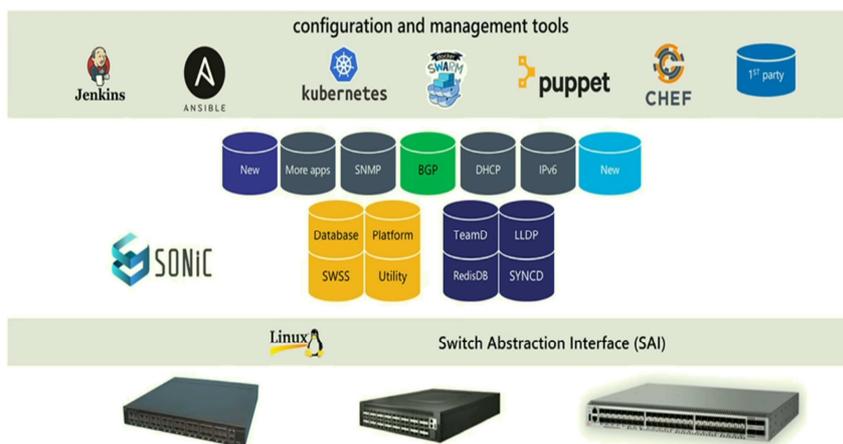


Figura 19 - Visão geral do SONiC.

A Figura 19 extraída de [Maltz, D., 2019] ilustra por meio de um alto nível de abstração em camadas como o SONiC se integra ao hardware dos dispositivos de rede através de interfaces de abstração de hardware e como as ferramentas de configuração e gerenciamento de serviços web podem ser utilizadas para gerir todo o ciclo de vida desses dispositivos. O SONiC começa com as plataformas de hardware de roteadores e switches atuais. Sobre essa plataforma de hardware é executado o sistema operacional Linux. É necessário, então, que o Linux seja estendido para permitir suportar os hardwares disponíveis em switches. Dessa necessidade surgiu a motivação para o desenvolvimento da *Switch Abstraction Interface* (SAI). Basicamente, a SAI é um conjunto de arquivos de cabeçalho comuns que permitem que seja simples e uniforme a interação com os switches quando eles executam tarefas comuns, mas permitindo ainda que sejam extensíveis por meio de cabeçalhos de extensão, de modo que capacidades únicas de ASICs de switches possam ser refletidas em direção norte ao software. Desta forma, o software pode usufruir dessas capacidades quando ele está sendo executado sobre o hardware que as suporta.

Mais especificamente, a SAI pode ser vista como uma API padronizada que permite que fornecedores de hardware de rede desenvolvam arquiteturas de hardware inovadoras para alcançar grandes velocidades, mantendo a interface de programação consistente. A SAI ajuda a consumir facilmente o melhor e mais recente hardware executando a mesma pilha de aplicativos em todo o hardware, habilitada por uma interface de programação simples e consistente. Novos aplicativos podem ser executados com mais facilidade e rapidez no hardware mais recente com menor portabilidade de bugs. A Figura 20, extraída de [OCP, 2015], exibe uma arquitetura de sistema operacional de switches simplificada onde a SAI é adotada.

Sobre essa base Linux e SAI que são executados os principais componentes do SONiC, que são então containerizados, de modo que cada componente possa ser desenvolvido, testado e implantado de modo independente, e então integrado para completar o conjunto de funcionalidades que serão executados em um switch.

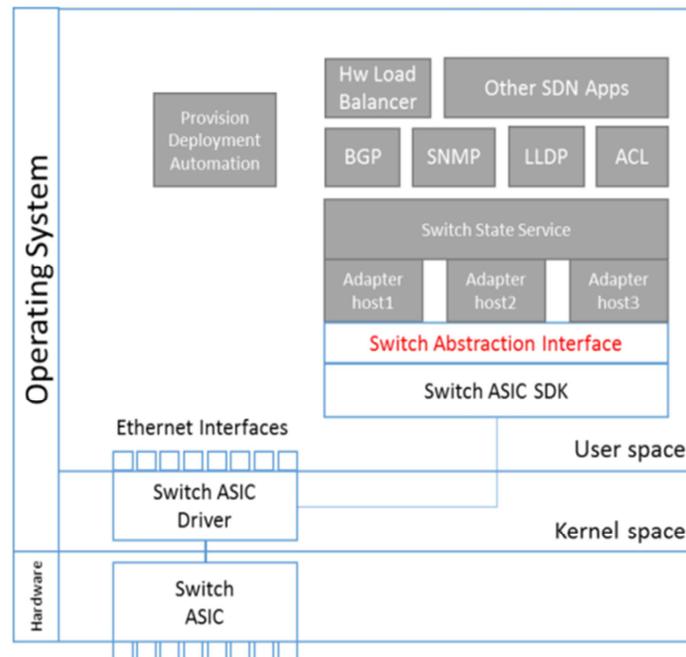


Figura 20 - SAI em uma arquitetura de sistema de switches simplificada.

A arquitetura do sistema SONiC é composta por vários módulos que interagem entre si por meio de uma infraestrutura centralizada e escalável. Essa infraestrutura depende do uso de um mecanismo de banco de dados “*redis*”, que é um banco de dados do tipo chave-valor e fornece uma interface independente de linguagem, um método para persistência de dados, replicação e comunicação multiprocessos entre todos os subsistemas do SONiC. Ele se baseia no paradigma de mensagens do tipo *publisher/subscriber* oferecido pela infraestrutura provida pelo *redis*, o que permite que os aplicativos possam se inscrever apenas nas visualizações de dados de que precisam e evitar detalhes de implementação irrelevantes para sua funcionalidade.

O SONiC coloca cada módulo em *containers* docker independentes para manter alta coesão entre os componentes semanticamente afins, enquanto reduz o acoplamento entre os módulos disjuntos. Cada um desses componentes é escrito para ser totalmente independente dos detalhes específicos da plataforma necessários para interagir com abstrações de camada inferior. O diagrama ilustrado na Figura 21, extraída de [Azure, 2019], exibe uma visão de alto nível da funcionalidade incluída em cada container docker e como esses *containers* interagem entre si.

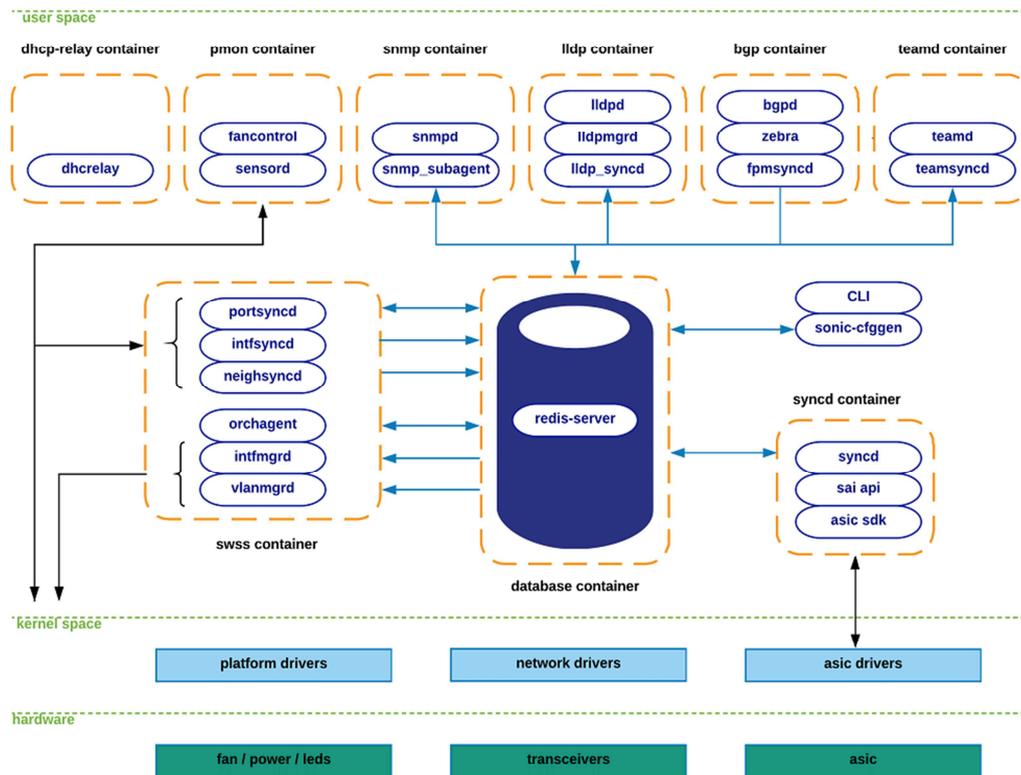


Figura 21 - Visão geral das funcionalidades do SONiC que são encapsuladas em cada container.

Como esta tecnologia baseada em *containers* já é utilizada em serviços web, pode-se tirar proveito do grande ecossistema de ferramentas de software e ferramentas de gerenciamento que foram desenvolvidas para gerenciar *containers* e, conseqüentemente, simplificando o processo de acoplar os switches SONiC em toda a plataforma de gerenciamento de serviços.

Ao modularizar o sistema operacional do switch em múltiplos *containers*, o SONiC permite recuperação de falhas refinada e upgrades *in-service* sem tempo de inatividade.

Isto é feito em conjunto com *Switch State Service* (SWSS), um serviço que aproveita o armazenamento *open source* de "valores chaves" para gerenciar todos os requerimentos de *switch state* e direciona o switch ao seu objetivo de estado. Ou seja, em vez de repor toda a imagem de switch na eventualidade da necessidade de correção de um bug, basta apenas aplicar melhorias ao código do container afetado.

Posto isto, o SONiC demonstra um grande potencial de adoção em múltiplos casos de uso devido a uma de suas premissas como sistema operacional que é a possibilidade de uma adoção gradual de funcionalidades programáveis de rede. Isso ocorre por ele disponibilizar um modelo híbrido de encaminhamento, que traz programabilidade SDN para redes tradicionais.

2.3.2.6. P4 *Integrated Network Stack* (PINS)

Até hoje, havia duas maneiras principais de abordar a rede: (i) a abordagem tradicional de roteamento incorporado (por exemplo, BGP), onde toda a decisão de encaminhamento (plano de controle) e os processos de encaminhamento de dados (plano de dados) são integrados de modo monolítico nos elementos de rede; ou (ii) a abordagem SDN que simplifica o plano de dados e centraliza o plano de controle fora do dispositivo de rede. A Figura 22, extraída de [ONF-PINS], ilustra a diferença entre essas abordagens.

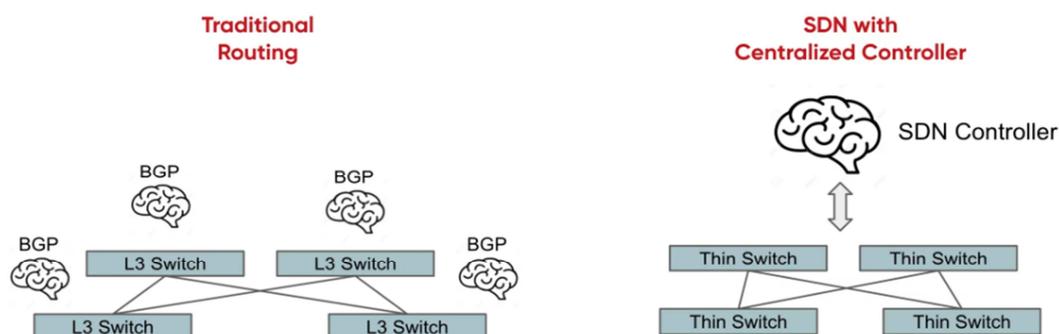


Figura 22 - Abordagens de rede baseadas em (i) roteamento tradicional descentralizado e (ii) SDN com controlador centralizado.

O P4 *Integrated Network Stack* (PINS) é uma colaboração do setor industrial que traz recursos SDN e programabilidade P4 para dispositivos de roteamento tradicionais que dependem de protocolos de controle incorporados/embarcados (como o BGP). Desse modo, o PINS cria um modelo híbrido, que traz programabilidade SDN para redes tradicionais. Ao adicionar um estágio opcional programável externamente ao *pipeline* de encaminhamento de cada dispositivo de comutação, as redes podem ser construídas de maneiras tradicionais e aumentadas com funcionalidades avançadas com a ajuda de um controlador SDN externo.

Especificamente, o projeto PINS utiliza o P4 para modelar o pipeline da *Switch Abstraction Interface* (SAI) [OCP, 2015], adiciona extensões programáveis externamente ao pipeline e introduz o P4Runtime como uma nova interface de plano de controle para controlar o pipeline (vide Figura 23, extraída de [Raman, M. e Weitz, K., 2021]). Desse modo, o PINS adota o SONiC para prover as funcionalidades de programabilidade de rede providas pelo P4 de um modo híbrido, isto é, provê funções fixas embarcadas nos switches em paralelo a funções programáveis de rede disponibilizada pelo ASIC suportado.

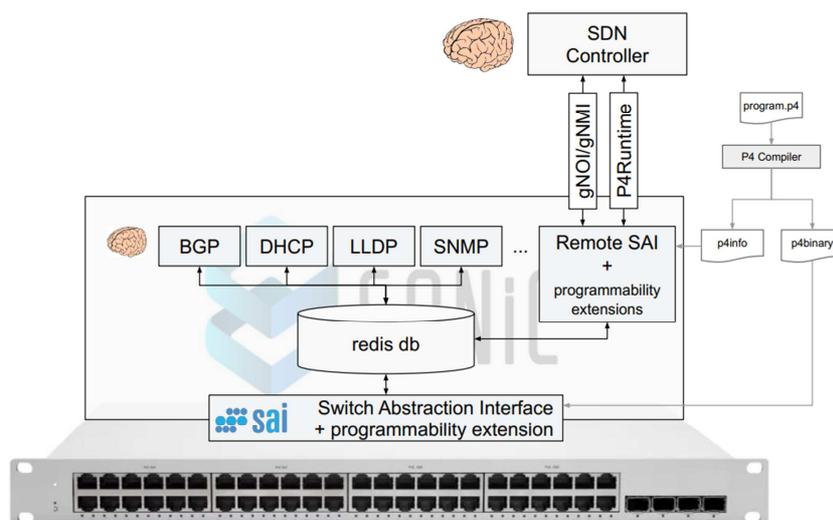


Figura 23 - Arquitetura simplificada do PINS que se baseia na abstração das funções de hardware provida pela SAI.

2.3.3. Seleção das iniciativas e projetos para utilização e acompanhamento

Dentre as iniciativas e projetos descritos anteriormente, podemos destacar quais são as recomendações atuais de acompanhamento do seu desenvolvimento ao longo da execução do projeto.

2.3.3.1. Critérios de Seleção

A seguir, foram definidos alguns critérios gerais para a seleção dos projetos a serem acompanhados e utilizados no projeto. Os critérios são utilizados considerando o recorte de onde se aplicam ou poderão se aplicar dentro da arquitetura de redes móveis 4G/5G, considerando o escopo de atuação:

- Critérios Mandatórios:
 - Suporte a arquitetura de redes móveis 4G/5G, incluindo as funções de RAN, como UPF e INT.
 - Projeto em fase de desenvolvimento, com uma comunidade ativa, crescente e responsiva.
- Critérios Desejáveis:
 - Suporte acessível aos desenvolvedores.
 - Projeto maduro em fase de testes ou uso por algum *stakeholder* no mercado em que se aplica.

2.3.3.2. Projetos Selecionados

Dentre as iniciativas e projetos mencionados anteriormente, podemos destacar alguns que merecem ser acompanhados de acordo com as vantagens que oferecem e os critérios de adesão.

Como o P4.org é a referência de especificação de diversos aspectos do ecossistema P4, é de extrema relevância manter a atenção às mais recentes atualizações ao seu respeito, tanto da própria linguagem P4 quanto da interface de execução do plano de controle P4Runtime, por exemplo. A adoção de Plataformas de Nuvem de Borda de Operadores de Redes Móveis 5G é um dos aspectos principais do projeto.

Assim sendo, a ONF é a única organização, atualmente, que descreve explicitamente a adoção do plano de dados baseado em P4 em redes móveis 4G/5G (por meio do projeto Aether e consequentemente do SD-Fabric). Portanto, o acompanhamento dela é de suma importância para a execução do projeto. No que tange aos projetos de software aberto, o acompanhamento do desenvolvimento dos projetos Stratum e SD-Fabric são de extrema relevância. Isso decorre em função das características funcionais de operação dos fabric de rede baseados na arquitetura SD-Fabric (composta pelo SO de switch Stratum) que oferece suporte à programabilidade P4 e às funcionalidades de UPF e INT. Não obstante, os projetos Aether e SD-Fabric disponibilizam uma extensa documentação, além da ONF oferecer suporte técnico para parceiros.

Por fim, apesar do SONiC, em função de suas características funcionais principais, se basear no SAI e, por conseguinte, na disponibilização de funções fixas nos ASIC dos switches, o seu acompanhamento deve ser levado em consideração devido ao grande potencial de aplicação pela comunidade. Isso se dá, entre outros motivos, por sua abordagem arquitetural de SDN híbrida. Essa característica apesar de não parecer tão importante em um primeiro momento, pode se tornar bastante relevante para implementação em ambientes de produção híbridos no futuro.

2.3.4. Levantamento Sistemático da Literatura

Os artigos relevantes identificados em nossa pesquisa indicam que as redes definidas por softwares possuem diversas vantagens competitivas em relação à arquitetura tradicional, entre as quais se destacam: desacoplamento de planos, programabilidade, gerenciamento centralizado e independência de soluções proprietárias. A divisão de planos, denominados de controle e de dados, concentra no primeiro a inteligência da rede, localizada em elemento externo ao equipamento de comutação. Enquanto no segundo, estão localizados os elementos físicos de comutação, responsáveis por dar encaminhamento aos fluxos de dados estabelecidos pelo plano de controle. [Rothenberg et. al, 2014] [Amin et. al, 2019];

A mais recente geração de SDN, denominada *Next Generation SDN* (NG-SDN), evolui para explorar a descentralização de virtualização no plano de dados, de modo a possibilitar a expansão e retração de recursos virtuais de rede de forma dinâmica diretamente nos dispositivos de encaminhamento, por exemplo, a criação e/ou remoção de um switch, ou roteador ou até mesmo de uma topologia inteira, de acordo com a demanda, utilizando a linguagem P4 (*Programming Protocol-independent Packet Processors*) [P4,2022] para permitir a programação mais flexível do plano de dados e a incorporação acelerada de funções de redes virtualizadas (NFV) [NG-SDN,2021]. Deste modo, SDN-NG oferece flexibilidade para customização de redes para aplicações comerciais, por exemplo, redes 5G, Redes de acesso por Rádio, Centro de Dados e Nuvens, ou para aplicações de pesquisa e desenvolvimento.

Dois recentes estudos da literatura em P4, [Hauser et al., 2021] e [Kfoury et al., 2021], apresentam com detalhe o grande volume de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento baseados na tecnologia P4. A Figura 23 extraída de [Hauser et al., 2021] ilustra a abrangência das pesquisas em P4 em diferentes domínios e subdomínios de aplicação na área de redes.

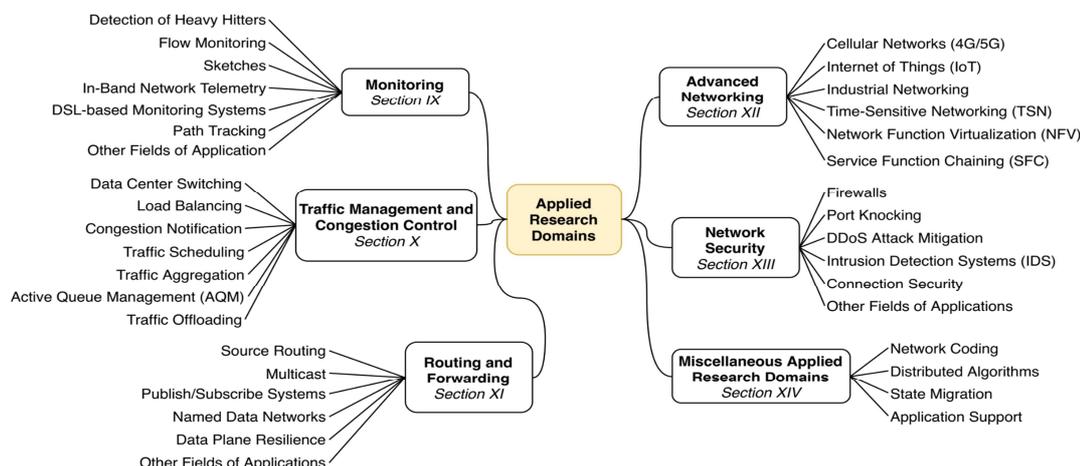


Figura 24 - Categorização dos trabalhos em domínios e subdomínios de pesquisa aplicada em P4.

A Figura 25 extraída de [Kfoury et al., 2021] foca na literatura de P4 aplicada ao domínio de redes de telecomunicações.

| | Ref | Idea | Deployment | Latency scale | Concurrent users | Platform | |
|------------------|-------|---|-------------------|---------------|------------------|----------|----|
| | | | | | | HW | SW |
| 5G functions | [137] | Enhances the data path in 5G multi-tenants | Backhaul | Microseconds | N/A | ✓ | |
| | [138] | Implements a 5G firewall in the switch | Backhaul | Microseconds | 1K | ✓ | |
| | [139] | Performs signaling in the data plane | Core | Milliseconds | 65K | ✓ | |
| | [140] | Offloads MPC user plane functions to switch | Core | Microseconds | 65K-1M | ✓ | |
| | [141] | Hybrid next-generation NodeB (gNB) | 5G RAN | N/A | N/A | ✓ | |
| | [142] | Provides smart handover for mobile UE | Between CU and DU | N/A | N/A | | ✓ |
| | [143] | Potentials of programmability in SDN/NFV | Edge | Microseconds | N/A | | ✓ |
| Media offloading | [144] | Implements UPF in the data plane | Core | Milliseconds | 300-10,000 | ✓ | |
| | [145] | Offloads media traffic relay to switch | Edge | Nanoseconds | 65K-1M | ✓ | |
| | [146] | Offloads video processing to switch | Edge | N/A | N/A | ✓ | |

Figura 25 - Classificação de publicações baseadas no uso do P4 no domínio de serviços de telecomunicação.

A seguir, são apresentados com maior detalhamento alguns trabalhos selecionados relevantes para o contexto do *testbed* objetivado neste projeto.

Paolucci et al. [2021] ilustram como o P4 e suas novas funcionalidades disruptivas no plano de dados ainda não estão disponíveis em redes SDN de primeira geração, abrindo caminho para novas estruturas de orquestração e permitindo novas redes autônomas e flexíveis na borda. Casos de uso, avaliações e resultados de desempenho de software são propostos e discutidos no cenário de borda e IoT, visando engenharia de tráfego avançada, segurança cibernética, multilocação, descarregamento 5G e telemetria, para demonstrar a viabilidade da abordagem.

Lin et al. [2021] demonstram como o fatiamento de rede de transporte pode acomodar os vários requisitos de serviço de rede de aplicações IoT massivas (MIoT), IoT críticas (CIoT) e de banda larga móvel (MBB). Além disso, desenvolvem programas específicos MIoT, CIoT e MBB para vários campi, armazenando os dados gerados em um banco de teste 5G baseado na linguagem P4. A proposta foi avaliada seguindo as seguintes métricas de desempenho: taxa de transferência, perda de pacotes e latência. Os resultados foram promissores.

Macdavid et al. [2021] explora o uso da linguagem P4 para implementação de redes 5G, dividindo a implementação em duas partes. Um programa é escrito para atuar como um plano de dados de código aberto, e outro para ser executado nos switches de hardware para minimizar a latência e maximizar a largura de banda. Essa abordagem foi limitada em três campi universitários possibilitando seu uso para pesquisas.

Na proposta de Cugini et al. [2021] são apresentadas soluções baseadas em P4 no contexto de um projeto financiado pela União Européia (UE) chamado BRAIN, o projeto tem como objetivo principal desenvolver um micro *data center* de borda (EMDC) para impulsionar o uso de aplicações de inteligência artificial (IA) na borda da rede. Dentre as soluções citadas, destacam-se: soluções de engenharia de tráfego descentralizadas orientadas por telemetria em banda (INT), aplicação e verificação de qualidade de serviço, virtualização de função de rede 5G.

O controlador BRAINE SDN é baseado no projeto de código aberto ONOS proposto pela ONF. O testbed utiliza rede híbrida cabeada e sem fio. O segmento de rede com fio e *backhaul* é composto por 40 interfaces Gigabit Ethernet e uma pilha de switches P4, com Linux executando o modelo *Behavioral Mode version 2* (BMv2) e implementando o código telemetria em banda (INT) P4 ampliado sobre o código INT versão 2.1. Os componentes *Radio Access Network* (RAN) são implantados no mini-PC NUC e o *Evolved Packet Core* (EPC) é implantado no mini-PC UP-Board.

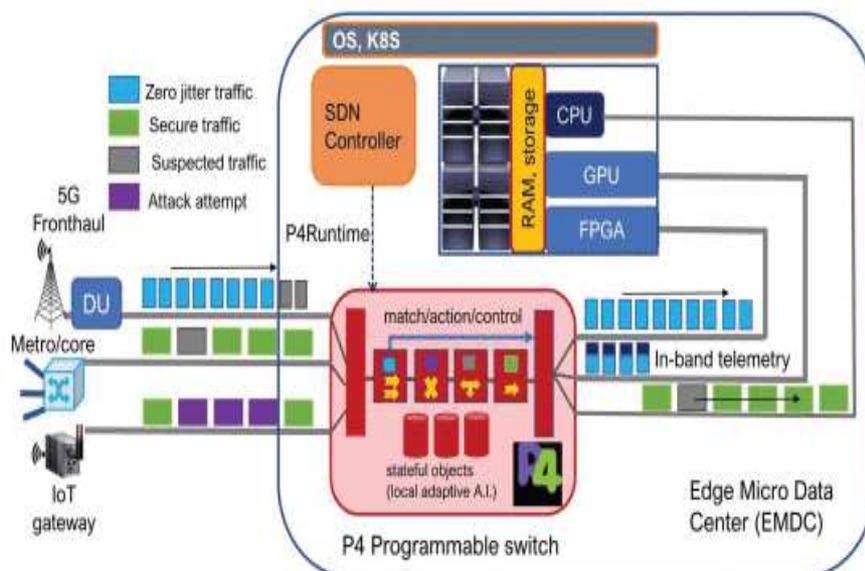


Figura 26 - Arquitetura Edge Micro Data Center (EMDC), incluindo computação heterogênea e recursos de rede programáveis usados para engenharia de tráfego orientada por monitoramento, 5G e segurança cibernética descentralizada.

A Figura 26, extraída de [Cugini et al. 2021], mostra a arquitetura funcional geral do BRAINE EMDC. Inclui recursos de computação heterogêneos (CPU, GPU, FPGA) e recursos programáveis P4 usados para conectividade intra e inter EMDC. O EMDC está interconectado com outras áreas de neblina/metro, backhaul 5G e infraestruturas metro/núcleo para *data centers* remotos. O BRAINE EMDC inclui recursos de computação e armazenamento para aplicativos de computação de borda multilocatário seguros, que exigem tratamentos de encaminhamento de tráfego complexos e cuidadosos com base nos requisitos de cada fluxo de tráfego e serviço. O projeto foi pensado para suportar o descarregamento específico de funções de rede 5G, bem como fornecer conectividade com garantia de QoS entre vários segmentos de rede heterogêneos, incluindo outras áreas de nuvem/metro, 5G *front-haul*, *gateways* IoT e infraestruturas metro-core.

No contexto do projeto 5GINFIRE, a iniciativa P4in5G [2022] (Pipelines flexíveis de plano de dados para 5G), propõe a utilização de Virtualização de Funções de Rede (NFV) para aumentar a flexibilidade das redes de comunicação, implantando funções de rede como software em servidores comuns. O projeto combina as vantagens de 5G-NFV e P4, fornecendo VNFs programáveis por P4 com base no compilador P4 e solução de plano de dados de software chamada T4P4S (usando *back-end* DPDK). A validação é feita por meio de casos de uso utilizando a linguagem P4 e as medições de desempenho foram realizadas com várias configurações no testbed 5GTONIC.

2.4. Domínio FTTX

Quanto ao domínio FTTX, já existem algumas iniciativas, como detalhado a seguir.

2.4.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos

2.4.1.1. ONF - Open Network Foundation

A ONF, já detalhada na seção “2.1.1.4. ONF”, é a principal organização para o domínio FTTx, com o projeto SEBA, que será detalhado na seção “2.4.2.1. ONF SDN Enabled Broadband Access (SEBA)”.

2.4.1.2. Broadband Forum (BBF)



O Broadband Forum é uma organização do setor de comunicações focada em acelerar a inovação de banda larga, padrões e desenvolvimento de ecossistemas. É uma organização aberta e sem fins lucrativos, composta pelos principais operadores de banda larga, fornecedores e líderes de pensamento do setor que estão moldando o futuro da banda larga. Seu trabalho tem sido a base para a proliferação e inovação global da banda larga [BBF, 2022].

Os projetos do Broadband Forum abrangem 5G, Connected Home, Cloud e Access e os grupos de trabalho e projetos colaboram para definir as melhores práticas para redes globais, permitindo novos serviços geradores de receita e entrega de conteúdo, estabelecendo estratégias de migração de tecnologia e projetando ferramentas críticas de gerenciamento de dispositivos, serviços e desenvolvimento na infraestrutura de rede IP doméstica e empresarial. As especificações de rede de pacotes de banda larga multisserviço são desenvolvidas abordando arquitetura, gerenciamento de dispositivos e serviços, modelos de dados de software, implementações de referência, interoperabilidade e certificação no mercado de banda larga.

2.4.1.3. TIP - Fixed Broadband



O Grupo de Projetos de Banda Larga Fixa do TIP está desenvolvendo uma nova geração de tecnologias abertas e desagregadas que ajudam as operadoras a aumentar a disponibilidade de serviços rápidos e confiáveis de banda larga em todo o mundo. O trabalho é orientado a casos de uso de operadores do mundo real e o grupo desenvolve requisitos técnicos robustos e abrangentes que implementam padrões estabelecidos do setor. Os objetivos gerais do grupo de projeto são [TIP-FIX, 2022]:

- Promover a adoção de tecnologias modernas e seguras baseadas em interfaces abertas e padronizadas
- Para melhorar a diversidade da cadeia de suprimentos, desbloqueando novas oportunidades de negócios para fornecedores e aumentando a escolha para os operadores

Há dois subgrupos:

- Acesso Fixo: seu objetivo é construir redes de acesso capazes de fornecer conectividade de alta velocidade na última milha e alcançar um alto grau de interoperabilidade no domínio de acesso, incluindo interfuncionamento leste-oeste e integração entre os elementos da rede e integrações *northbound* para OSS e sistemas de gerenciamento de rede
- OpenBNG: concentra-se na criação de BNGs (*Broadband Network Gateways*) abertos e desagregados que possam atender às crescentes demandas de largura de banda e em vários cenários de implantação diferentes que atendem a todo o espectro de necessidades das operadoras existentes, bem como na avaliação de tendências tecnológicas emergentes e novas oportunidades de serviços para o futuro.

2.4.2. Projetos de Software Aberto

Dentre os projetos já documentados, destacam-se os seguintes.

2.4.2.1. ONF SDN Enabled Broadband Access (SEBA)



A borda da rede da operadora (como o escritório central para telecomunicações e o head-end para operadoras de cabo) é onde as operadoras se conectam a seus clientes. CORD™ é um projeto que visa transformar essa vantagem em uma plataforma ágil de entrega de serviços, permitindo que a operadora ofereça a melhor experiência ao usuário final, juntamente com serviços inovadores de próxima geração [SEBA, 2022].

A plataforma *Central Office Re-architected as a Data center* (CORD) aproveita as tecnologias SDN, NFV e *cloud* para construir *data centers* ágeis para a borda da rede. Integrando vários projetos de código aberto, o CORD oferece uma plataforma nativa da nuvem, aberta, programável e ágil para as operadoras de rede criarem serviços inovadores.

O CORD fornece uma plataforma integrada completa, integrando tudo o que é necessário para criar um *data center* de borda operacional completo com recursos de serviço integrados, todos construídos em hardware de *commodity* usando os mais recentes princípios de *design* nativos da nuvem.

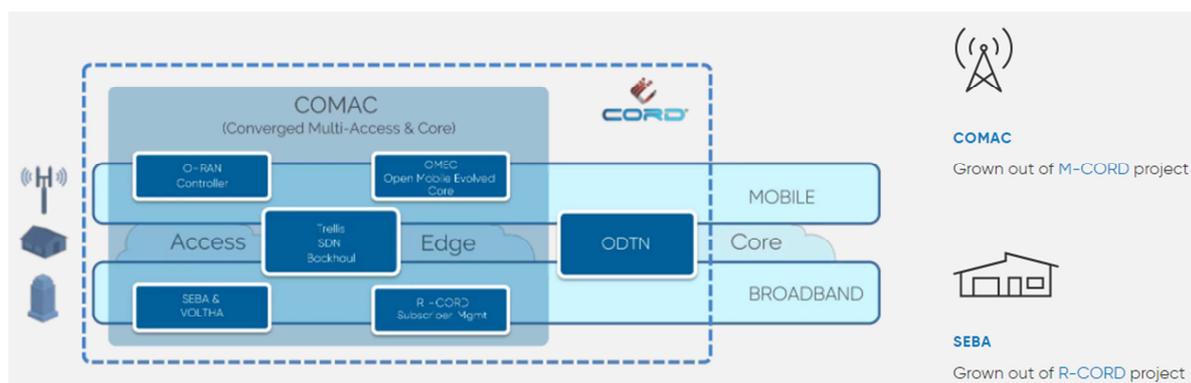


Figura 27 - CORD Profiles.

O Residential CORD (R-CORD) é uma solução de código aberto baseada na plataforma CORD para fornecer serviços residenciais de banda ultralarga. Ele transforma a borda da rede da operadora em uma plataforma ágil de entrega de serviços, permitindo que a operadora ofereça a melhor experiência ao usuário final, juntamente com serviços inovadores de próxima geração. Várias tecnologias de acesso podem ser usadas, incluindo: GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), G.fast (ITU *G. fast access to subscriber terminals*), 10GPON e DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*). A plataforma CORD fornece a economia de um *data center* e a agilidade da nuvem para a borda da rede TELCO. Construída em servidores comuns e *switches* de *whitebox*, a infraestrutura CORD aproveita o SDN para interconectar os elementos virtuais e físicos, permitindo serviços inovadores.

SEBA™ é uma plataforma leve baseada em uma variante do R-CORD. Ele suporta muitas tecnologias de acesso virtualizado na borda da rede da operadora, incluindo PON, G.Fast e, eventualmente, DOCSIS, etc. O SEBA suporta acesso residencial e *backhaul* sem fio e é otimizado para que o tráfego possa ser executado em 'caminho rápido' direto para o *backbone* sem exigir processamento de VNF em um servidor. É baseado em Kubernetes e operacionalizado com integração FCAPS e OSS.

SEBA foi criado para fornecer um padrão de arquitetura para o desenvolvimento de soluções para acesso de banda larga de operadora. O objetivo é definir um padrão comum componente de infraestrutura que seria considerado não diferenciador tanto para os operadores como para os fornecedores. A não diferenciação ajuda a criar eficiência no desenvolvimento de código aberto e *white boxes*, e depois produtos comerciais e suporte para essas entidades.

O escopo do RD do SEBA [SEBA-RD, 2022] destina-se a cobrir um amplo conjunto de redes fixas e tecnologias de acesso sem fio fixo e recursos de borda de serviço relacionados. O escopo deve permitir a fácil adaptação de novas tecnologias, novos silícios e novos dispositivos em elementos implantáveis. Isso deve ser possível sem reescrever as principais seções dos subcomponentes que compõem o SEBA e não deve exigir novas interações fundamentais *northbound* para as plataformas de automação das operadoras. O RD suporta a abordagem POD, o que significa que todos os componentes necessários para a entrega de acesso ao serviço são cobertos. Além disso, para suportar nós de rede de acesso simples, o RD também pode incluir outros elementos como uma arquitetura *leaf-spine*.

Um *switching fabric* habilita as funções de agregação e borda de serviço. O RD suporta os requisitos de operadoras que desejam fornecer serviços de banda larga sem capacidades de serviço de borda, bem como operadoras que forneçam serviços IP, incluindo capacidades de serviço de borda dentro do POD.

A Figura 28 mostra projetos da ONF e destaca aqueles que estão sendo desenvolvidos para soluções de banda larga. O SEBA está no contexto de plataforma de serviço, o VOLTHA (*Virtual Optical Line Terminal Hardware Abstraction*) no de rede de acesso e o SD-BNG no de *core* de rede.

A arquitetura simplificada do SEBA é mostrada na Figura 29, em que são apresentados seus componentes VOLTHA, ONOS, Trellis e NEM, que serão explanados nas seções a seguir. A Figura 30 apresenta maiores detalhes da arquitetura, e as diferenças entre o RD 1.0 e o 2.0. A versão 2.0 do RD acrescenta:

- APIs NBI detalhadas para POD, OLT (*Optical Line Terminal*), ONT (*Optical Network Terminal*), Gerenciamento de Serviços
- Atualizações do Gateway de Rede de Banda Larga (BNG)
- Gerenciamento de dispositivos (DM)
- Modelo de pilha VOLTHA por OLT para maior escalabilidade
- Tecnologia de Acesso – Acesso Fixo Sem Fio (FWA) / mmWAVE
- Casos de uso para gerenciamento do ciclo de vida do POD

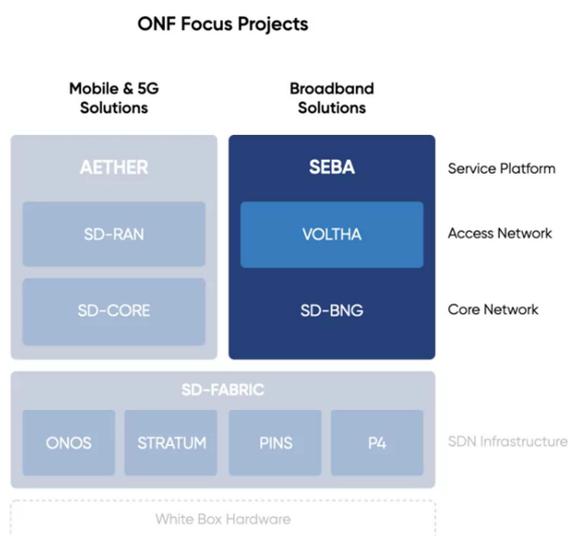


Figura 28 - Projetos da ONF - Foco nas soluções de banda larga.

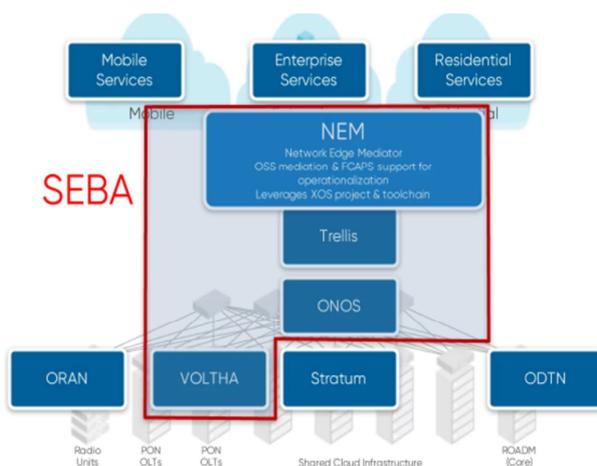


Figura 29 - Arquitetura do SEBA.

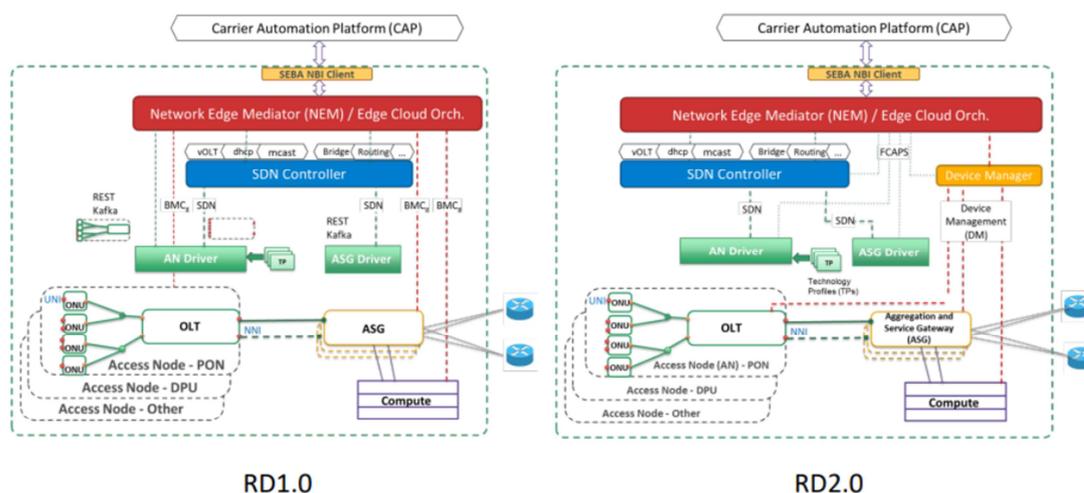


Figura 30 - Arquitetura do SEBA detalhada e diferenças entre a RD1.0 e RD2.0.

Foram adicionadas APIs *northbound* (NBI) para gerenciamento de POD, de OLT, de ONT e de serviço, incluindo definições, parâmetros de entrada e valores de retorno. As funcionalidades das APIs *northbound* são:

- **Gerenciamento de POD**
 - Fornecer informações de inventário
 - Monitorar recursos de hardware
 - Relatório de Status
 - Gerenciamento de Alarmes
 - Monitoramento de Desempenho
- **Gerenciamento de Serviços**
 - Aprovisionar/Excluir assinatura de serviço
 - Excluir lista/todas as assinaturas de serviço
 - Ativar/Desativar assinatura de serviço
 - Criar/Excluir perfil de tecnologia
 - Criar/Excluir/Obter definição de serviço
 - Listar todas as definições de serviço

- Criar/Excluir/Obter perfil de velocidade
- Listar todos os perfis de velocidade
- Listar ONTs/UNIs com serviço específico
- Obter informações de assinatura de serviço
- **Gerenciamento de OLT**
 - Provisionar hardware OLT
 - Atribuir CLI associado a inventário de hardware via número de série
 - Recuperar lista de dispositivos OLT
 - Recuperar inventário de hardware OLT em formação
 - Recuperar lista de portas OLT NNI/PON
 - Recuperar informações da porta OLT PON
 - Gerenciar software e atualizações OLT
 - Redefinir/Excluir hardware OLT
 - Executar diagnósticos OLT disponíveis e recuperar resultados
 - Recuperar Status Operacional
 - Recuperar informações de inventário para SFP - dispositivos conectados às portas OLT
 - Desativar/ativar hardware OLT
- **Gerenciamento ONT**
 - Provisionar hardware ONT
 - Atualizar o número de série do hardware ONT
 - Mapear identificações ONT upstream (OLT CLI porta ONT) para atribuições dinâmicas de VOLTHA
 - Recuperar lista de dispositivos ONT
 - Recuperar informações de inventário de hardware ONT
 - Recuperar lista de portas ONT UNI
 - Gerenciar software e atualizações ONT
 - Redefinir hardware ONT
 - Gerenciar configurações de banco de dados ONT associadas
 - Excluir hardware ONT
 - Executar diagnósticos ONT disponíveis e recuperar resultados
 - Recuperar Status Operacional
 - Recuperar informações de inventário para o dispositivo SFP conectado ao ONT
 - Desativar/ativar hardware ONT
 - Redefinir porta ONT UNI
 - Ativar/Desativar ONT UNI

Espera-se que o SEBA suporte vários tipos de tecnologia relacionada a PON (por exemplo, GPON, XGS-PON, EPON, Gfast e etc.) e dispositivos físicos. Nessa arquitetura, esses recursos e dispositivos específicos de PON (ou seja, OLT/ONTs) são abstraídos pelo driver AN em um switch pseudo-Ethernet cujas portas correspondem a ONU-UNIs e OLT-NNIs. Essa abstração fornece às operadoras várias opções para implantar PONs que possuem diferentes estruturas de equipamentos enquanto as gerenciam em uma arquitetura SDN comum. Por exemplo, é possível usar os dois tipos de OLT: OLT tipo caixa e OLT tipo módulo plugável.

Neste último caso, as mensagens de controle enviadas do AN Driver para OLT passam pelo ASG, conforme mostrado na Figura 31, enquanto as mensagens são enviadas diretamente para o OLT no primeiro caso.

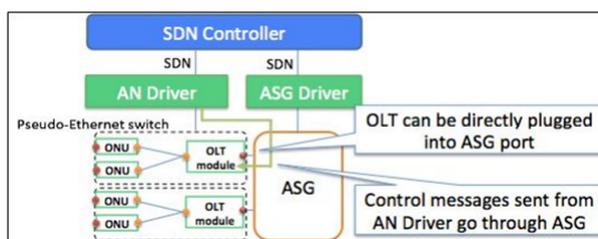


Figura 31 - OLT com módulos plugáveis.

Também é possível executar funções de Tempo Crítico (TC), por exemplo, a função *Dynamic Bandwidth Allocation* (DBA) apartadas do hardware em vez de executar essas funções dentro dele. Em qualquer caso, os recursos específicos de PON são gerenciados sob o AN Driver.

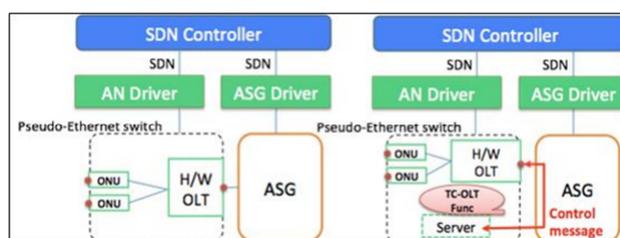


Figura 32 - Função TC (Ex. DBA) apartada do hardware.

2.4.2.1.1. Projeto Componente VOLTHA



VOLTHA™ é um projeto de código aberto para criar uma abstração de hardware para equipamentos de acesso de banda larga. Ele apoia o princípio de multivendor, desagregado, “qualquer acesso de banda larga como serviço” para o escritório central. Atualmente fornece um sistema de gerenciamento e controle GPON comum e independente de fornecedor, para um conjunto de dispositivos de hardware PON *white boxes* e específicos de fornecedor. Com a introdução de perfis de tecnologia de acesso, o VOLTHA também suportará outras tecnologias de acesso como EPON, NG-PON2 e G.Fast [VOLTHA, 2022].

Em sua interface *northbound*, o VOLTHA abstrai a rede PON para aparecer como um switch Ethernet programável para um controlador SDN. Em seu lado sul, o VOLTHA se comunica com dispositivos de hardware PON usando protocolos específicos do fornecedor por meio de adaptadores OLT e ONT.

De forma resumida, algumas características do VOLTHA são:

- Acesso como um switch: Faz uma rede de acesso parecer um switch programável abstrato
- Evolução para virtualização: Funciona com dispositivos legados e virtualizados. Pode ser executado no dispositivo, em servidores de uso geral ou em uma nuvem virtualizada.

- Abstração unificada de OAM: fornece interface de gerenciamento unificada e independente de fornecedor/tecnologia
- Ponte DevOps para a modernização: traz as mais recentes técnicas de desenvolvimento para as telecomunicações

A Figura 33 apresenta o diagrama de componentes do VOLTHA.

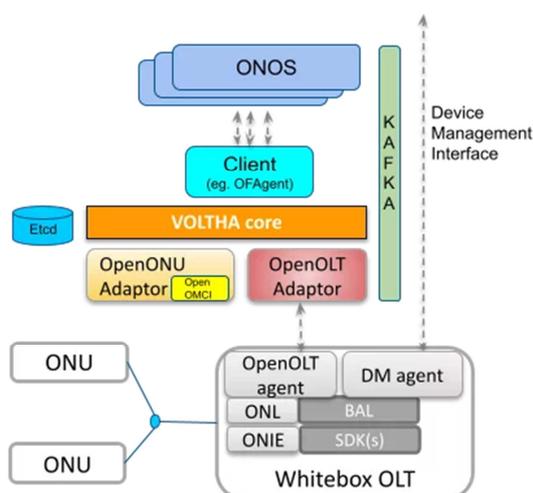


Figura 33 - Diagrama de componentes do VOLTHA.

2.4.2.1.2. Projeto Componente ONOS



Open Network Operating System (ONOS) é o controlador SDN de código aberto para a criação de soluções SDN/NFV de próxima geração. Ele foi projetado para atender às necessidades das operadoras que desejam construir soluções de nível de operadora que aproveitem a economia do hardware de silício comercial de whitebox, oferecendo a flexibilidade de criar e implantar novos serviços de rede dinâmicos com interfaces programáticas simplificadas [ONOS-Main, 2022].

ONOS suporta configuração e controle em tempo real da rede, eliminando a necessidade de executar protocolos de controle de roteamento e comutação dentro da malha da rede. Ao mover a inteligência para o controlador de nuvem ONOS, a inovação é possibilitada e os usuários finais podem criar facilmente novos aplicativos de rede sem a necessidade de alterar os sistemas de plano de dados.

A plataforma ONOS inclui:

- Uma plataforma e um conjunto de aplicativos que atuam como um controlador SDN extensível, modular e distribuído.
- Gerenciamento, configuração e implantação simplificados de novos softwares, hardwares e serviços.

- Uma arquitetura escalável para fornecer a resiliência e a escalabilidade necessárias para atender aos rigores dos ambientes das operadoras de produção.

ONOS fornece o plano de controle para uma rede SDN, gerenciando componentes de rede, como *switches* e links, e executando programas ou módulos de software para fornecer serviços de comunicação para hosts finais e redes vizinhas.

Comparando a sistemas operacionais de servidor, o ONOS fornece alguns tipos análogos de funcionalidade, incluindo APIs e abstrações, alocação de recursos e permissões, bem como software voltado para o usuário, como CLI (*Command Line Interface*), GUI (*Graphical User Interface*) e aplicativos do sistema. Se comparado com sistemas operacionais tradicionais de switch "dentro da caixa", o ONOS gerencia toda a sua rede em vez de um único dispositivo, o que pode simplificar o gerenciamento, a configuração e a implantação de novos softwares, hardwares e serviços. Considerando os controladores SDN, a plataforma e os aplicativos ONOS atuam como um controlador SDN extensível, modular e distribuído.

Os aplicativos e casos de uso do ONOS geralmente consistem em serviços personalizados de roteamento, gerenciamento ou monitoramento de comunicação para redes definidas por software. Além disso, ele pode ser executado como um sistema distribuído em vários servidores, permitindo que use os recursos de CPU e memória de vários servidores, fornecendo tolerância a falhas e potencialmente suportando atualizações ao vivo/sem interrupção de hardware e software sem interromper o tráfego de rede.

O kernel ONOS e os serviços principais, bem como os aplicativos ONOS, são escritos em Java como pacotes configuráveis que são carregados no container Karaf OSGi. OSGi é um sistema de componentes para Java que permite que módulos sejam instalados e executados dinamicamente em uma única JVM. Como o ONOS é executado na JVM (*Java Virtual Machine*), ele pode ser executado em várias plataformas de sistemas operacionais subjacentes.

ONOS é um projeto de código aberto apoiado por uma comunidade em expansão de desenvolvedores e usuários, como mostrado na Figura 34:



Figura 34 – Comunidade ONOS.

2.4.2.1.3. Projeto Componente Trellis



O Trellis [ONF-Trellis, 2022] é um antigo projeto da ONF que tinha como proposta principal tirar proveito da programação P4 estendendo o pipeline L2/L3 tradicional para suportar aplicações de fabrics em redes de data center . Com o surgimento do projeto SD-Fabric, o projeto Trellis foi absorvido, tendo se tornado uma das funções providas por ele.

O Trellis RD fornecia um padrão de arquitetura para desenvolver soluções para estruturas baseadas em SDN/NFV para provedores de serviços. Seu objetivo era definir um componente de infraestrutura comum para provedores de serviços e fornecedores para o desenvolvimento, produção e suporte de software de código aberto e hardware *whitebox*.

Ele foi projetado como uma estrutura de *data center leaf-spine* SDN e NFV nativa, otimizado para serviços e aplicativos de borda. Diferentes redes de acesso como DOCSIS, PON, Ethernet e redes sem fio podiam ser suportadas pela plataforma comum. A estrutura era controlada por um controlador SDN escalável e altamente disponível. Este controlador é o ONOS e outras plataformas de controlador podem ser usadas para diferentes exemplos de arquiteturas. A estrutura consiste em switches Leaf e Spine.

O *Distributed Access Aggregation Switch* (DAAS) é um switch Leaf especial que conecta componentes de rede de acesso. Uma solução vRouter é fornecida para a conectividade. Os aplicativos integrados à plataforma do controlador fornecem funcionalidade para gerenciamento de assinantes e serviços, autenticação de componentes de acesso e estabelecimento de conexões seguras entre componentes.

Os principais componentes HW e SW na plataforma Trellis são switches *white boxes* como hardware e software de código aberto, conforme mostrado na Figura 35. Os aplicativos SDN são executados em containers e controlam a estrutura. Microserviços VNFs são funcionalidades de rede local em containers e podem ser comuns a todas as tecnologias de acesso ou específicas de uma determinada tecnologia. O design é modularizado, baseado em microserviços e fluxos de trabalho personalizados podem ser adicionados conforme necessário. A orquestração de rede e o balanceamento dinâmico de carga são feitos programaticamente. A orquestração de computação é programaticamente gerenciada por meio de complementos no Kubernetes. Uma plataforma de controlador SDN é modular com aplicativos que podem ser removidos e adicionados com base no caso de uso e escalado para atender aos tamanhos dos grupos de atendimento dos provedores de serviço.

O RD do Trellis define os seguintes componentes:

- Controlador e aplicativos SDN
- Roteador Virtual
- Plataforma de containers controlada por Kubernetes
- VNFs de Rede Integrada
- *Leaf-Spine white boxes (switches)*
- Servidores de computação

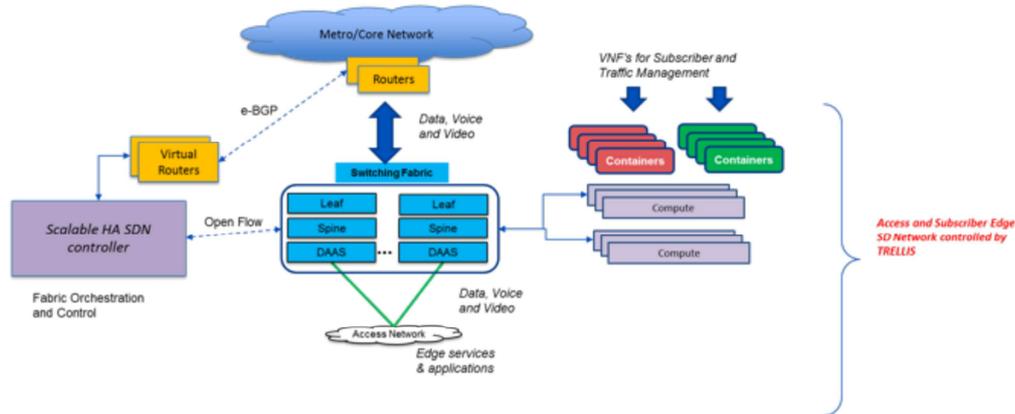


Figura 35 - Visão Geral do projeto Trellis.

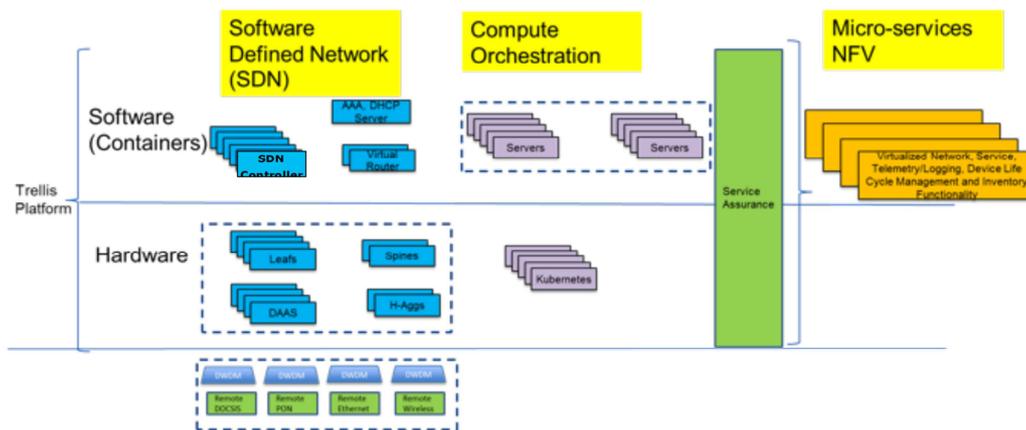


Figura 36 - Componentes de hardware e software do Trellis.

2.4.2.1.4. Componente NEM

O *Network Edge Mediator (NEM)* serve como a camada de mediação entre o sistema de borda/ acesso e o *backend* do provedor de serviços e estruturas de automação globais. O NEM fornecerá as interfaces e componentes para suportar as funcionalidades do FCAPS exigidas pelo provedor de serviços para gerenciar os componentes da rede de acesso e os assinantes do serviço de banda larga que o SEBA POD é projetado para oferecer e suportar. Uma variedade de operadores OSS/BSS (*Operations Support Systems/Business Support Systems*) e estruturas de orquestração global podem ser integradas na *northbound* para necessidades de implantação [SEBA, 2022].

O cliente SEBA NorthBound Interface (NBI) fornece uma camada de aplicação para interfaces de gerenciamento entre a *Carrier Automation Platform* e o NEM. O cliente SEBA NBI está fortemente acoplado à *Carrier Automation Platform* e, portanto, é específico para o provedor de serviços.

No momento de escrita deste relatório, o desenvolvimento do componente NEM pela ONF ainda não foi liberado.

2.4.2.2. BBF Open Broadband – Broadband Access Abstraction (OB-BAA)

O OB-BAA permite a implantação padronizada, automatizada e acelerada de novos serviços e infraestrutura de acesso baseados em nuvem. É um projeto de código aberto que especifica *Northbound Interfaces* (NBI), *Core Components* e *Southbound Adaption Interfaces* (SAI) para funções associadas aos dispositivos de rede de acesso que foram virtualizados [BBF-OB-BAA, 2022].

O OB-BAA facilita a coexistência e a migração contínua, trazendo agilidade para se adaptar a uma ampla variedade de modelos de acesso definidos por software à medida que são definidos por fornecedores e provedores em um mercado potencialmente vasto.

A implementação de referência de banda larga aberta permite implantação e gerenciamento padronizados, automatizados e acelerados por SDN (por exemplo, configuração, relatórios, alarmes, monitoramento de desempenho e gerenciamento de falhas) de novos serviços e infraestrutura de acesso baseados em nuvem.

Inerente ao projeto OB-BAA, está a capacidade de puxar diferentes tipos de dispositivos de acesso, incluindo implementações legadas, juntos sob uma única rede e gerenciamento de serviços e guarda-chuva de controle para serem expostos a elementos de gerenciamento, como o Gerenciamento de SDN e/ou Sistemas de Controle e de Gerenciamento de Elementos.

O projeto OB-BAA foi desenvolvido para ser implantado no ambiente CloudCO da BBF como uma ou mais funções de rede virtualizadas (VNFs). Como o NBI e o SAI utilizam modelos de dados padronizados e os componentes Core do projeto OB-BAA são projetados como microsserviços virtualizados com interfaces especificadas, os componentes do projeto OB-BAA também podem ser adaptados e implantados em outros ambientes virtualizados.

A versão 2.0 do OB-BAA lançada em abril de 2022 também expande os tipos de nós de acesso proprietários que podem ser gerenciados e controlados através da camada BAA. Isso permite a adaptação adicional de nós de acesso para atender às necessidades de rede individuais e fornece exemplos de funções comuns que os provedores de serviços provavelmente executarão ao automatizar e gerenciar suas redes. Essas funcionalidades facilitam a migração para implantações baseadas em nuvem para um número maior de provedores de serviços.

Um novo acordo entre o Broadband Forum e a ONF estabelece como as operadoras que buscam efetivamente usar virtualização e código aberto para aumentar a agilidade podem alavancar projetos de código aberto e padronização lado a lado para facilitar suas migrações para redes de acesso automatizadas e permitir a coexistência perfeita. Broadband Forum e ONF acreditam que muitos tipos de implantações de operadoras se beneficiariam dos recursos oferecidos pelo OB-BAA e SEBA/VOLTHA. A cooperação entre as duas organizações leva o trabalho para o próximo nível, fornecendo um caminho eficaz e eficiente para as operadoras aproveitarem as inovações e os benefícios de ambas as iniciativas, garantindo interoperabilidade, alto desempenho, escalabilidade e confiabilidade máxima. Um *whitepaper* fornecendo mais detalhes sobre a relação entre os projetos de código aberto OB-BAA e SEBA/VOLTHA pode ser encontrado em [BBF-ONF, 2022].

2.4.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento

Mediante os levantamentos realizados, considera-se que a ONF é a principal organização a ser acompanhada, com foco no projeto SEBA e seus componentes (VOLTHA, ONOS, Trellis e NEM). Dentro deste escopo, será feito um estudo detalhado da arquitetura, dos componentes, das interfaces *southbound* e *northbound*, dentre todos os detalhes inerentes ao projeto, para que o mesmo seja implantado no testbed previsto para o projeto

As comunidades BBF e TIP também serão acompanhadas, porém com menor prioridade, já que as mesmas tendem a utilizar o projeto ONF SEBA.

2.4.4. Levantamento Sistemático da Literatura

As redes sem fio de quinta geração (5G) exigirão uma mudança de paradigma no projeto da rede com uma interação muito mais próxima entre sistemas sem fio e ópticos. Neste contexto, a terminologia de redes 5G está sendo adotada para identificar esta nova rede sem fio/óptica altamente integrada. A futura rede 5G, segundo Talli *et al.* [2017], exigirá uma evolução a partir da camada física do ponto de vista da convergência de diferentes tipos de tráfego e os rigorosos requisitos impostos pelos serviços sem fio. O *Fibre-to-the-Premises* (FTTx) e, em particular, as redes ópticas passivas (PONs) são os candidatos mais promissores para permitir a convergência entre diferentes serviços em uma única arquitetura [Talli et al, 2017].

Como uma arquitetura alternativa à tradicional que utiliza hardwares fechados, estudos como o de Lee [2016] propõe a abstração de GPONs em *switches* SDN virtuais habilitados para OpenFlow. Para Nishimoto *et al.* [2020], essa abordagem serviu de base para a ONF implementar o *Virtual OLT Hardware Abstraction* (VOLTHA). Em 2019, Suzuki *et al.* [2019] inseriram um OLT baseado em software para processamento de camada *upstream* 10G-EPON em um servidor comum. Recentemente, seu trabalho foi mesclado ao projeto VOLTHA [Wang, 2021]. Em paralelo, o projeto Flexible Access System Architecture (FASA) virtualiza as funções do OLT em um servidor comum [Kani et al, 2018].

Nishimoto *et al.* [2020b] apresentam uma implementação bem-sucedida de uma OLT modular com *switch* Openflow. Enquanto que, Nishimoto *et al.* [2020a] propõem um método de abstração em dois estágios, que visa o controle OpenFlow de arquiteturas OLT desagregadas por intermédio de um controlador OpenFlow e uma camada de abstração PON. O hardware e o OLT são abstraídos como um único dispositivo OLT, enquanto que a camada de abstração PON cria um dispositivo OpenFlow lógico, abstraindo os dispositivos OLT e ONUs, permitindo controle e gerência através do controlador.

O SEBA é considerado por Das [2021] como o estudo mais bem sucedido das aplicações SDN para a rede de acesso. Por ser baseado nos princípios SDN, o SEBA proporciona redes mais simples, flexíveis e facilmente personalizáveis [Das, 2021]. Entretanto, por ser limitado a suportar apenas ITU-T PON, Suzuki [2021] propõe um perfil tecnológico incluindo tipos de pacotes para a especificação IEEE e um adaptador que abstrai IEEE PON, comutando funções de acordo com o tipo de pacote especificado.

2.5. Domínio Óptico WDM

Com relação ao domínio óptico WDM, destacam-se as seguintes iniciativas.

2.5.1. Iniciativas, comunidades e projetos colaborativos

As infraestruturas de redes passaram por uma grande revolução com o surgimento do conceito SDN, que tem se tornado cada vez mais presente nas arquiteturas de redes atuais. O SDN, que se baseia na separação da rede de controle e a rede de dados, viabilizou a implementação de uma rede programável, com controlador centralizado e, através da criação de uma abstração da rede, permite que novas aplicações e serviços venham a ser mais facilmente desenvolvidas.

Para tornar este conceito viável, é necessário que sejam definidas interfaces (APIs) abertas e padronizadas, tanto *northbound Interfaces* (NBI), entre as aplicações e os controladores, bem como *southbound Interfaces* (SBI), entre controladores e dispositivos de rede. Esta padronização permite criar uma abstração e interoperabilidade entre os equipamentos de diferentes fabricantes, ao invés de utilizar arquiteturas e protocolos proprietários. Embora inicialmente projetado para a rede de pacotes (L2/L3), o conceito SDN tem se expandido cada vez mais para outros níveis da camada de transporte, inclusive a camada óptica (L0/L1). Desta forma, SDN permite gerenciar redes *multi-layer* (L0-L3), bem como redes *multi-vendor*, através de um único controlador/orquestrador, permitindo criar conexões fim-a-fim mesmo em ambientes heterogêneos, atuando em todas as camadas de transporte.

Outra tendência na área de redes, a camada de transporte óptico inclusive, é o conceito de desagregação de hardware e software. Dispositivos de rede, como roteadores e *switches*, passam a ser desenvolvidos usando hardware genérico e aberto, também conhecidos como “whitebox”, ao invés de arquiteturas proprietárias. Nestes dispositivos são instalados sistemas operacionais de rede (NOS), especialmente desenvolvidos para este fim, bem como todas as funcionalidades das diversas camadas da rede.

A seguir, são descritas as iniciativas mais atuantes nestes segmentos e seus principais projetos.

2.5.1.1. ONF

Em relação à parte óptica, o principal projeto da ONF chama-se *Open and Disaggregated Transport Network* ou ODTN e tem como objetivo principal interligar *data centers* através de equipamentos ópticos desagregados por intermédio de interfaces padronizadas e abertas, sempre utilizando software de código aberto. Outros projetos relevantes e integrados ao ODTN são o controlador de uso geral ONOS e o sistema operacional de redes STRATUM, descritos mais adiante.

2.5.1.2. TIP



Mais especificamente, o grupo responsável pela definição de tecnologias abertas, arquiteturas e interfaces para redes ópticas chama-se *Open Optical & Packet Transport (OOPT)* [OOPT, 2022]. O projeto se concentra em diferentes partes da arquitetura da rede de transporte, incluindo *transponders* ópticos, sistemas de linha, APIs abertas e ferramentas de simulação e planejamento de rede. Entre seus projetos mais relevantes, destacam-se os de *transponders* desagregados, como CASSINI e PHOENIX e o sistema operacional de redes de código aberto GOLDSTONE, concebido para operar em *hardware* aderente ao padrão TIP OOPT. Um conjunto de recomendações e requisitos para redes de transporte SDN é definido no subgrupo *Mandatory Use Case Requirements For SDN Networks (MUST)*.

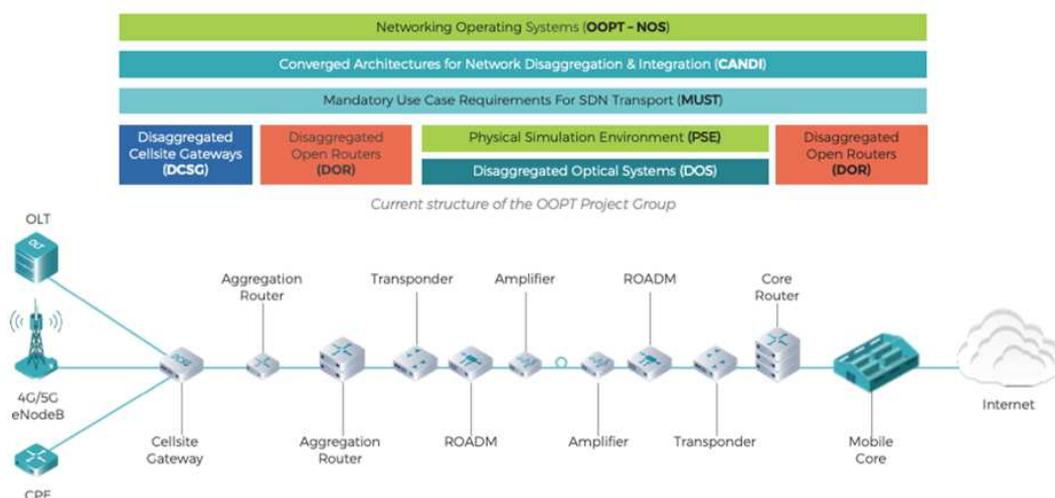


Figura 37 - Estrutura do TIP OOPT, seus elementos e subgrupos.

2.5.2. Projetos de Software Aberto

Com relação a softwares abertos relacionados à parte óptica, podem-se destacar controladores SDN, sistemas operacionais de redes, protocolos, APIs e bibliotecas. Para fins de esclarecimento, alguns conceitos básicos sobre desagregação são apresentados a seguir.

- **Conceitos básicos sobre desagregação na parte óptica**

Um conceito importante em relação à desagregação em redes ópticas é a diferença entre “parcialmente desagregado” e “totalmente desagregado”. Durante a migração de arquiteturas proprietárias para arquiteturas “totalmente desagregadas”, existe uma fase de transição, chamada “parcialmente desagregadas”. A Figura 38, Figura 39 e Figura 40 mostram as arquiteturas de cada forma de desagregação.

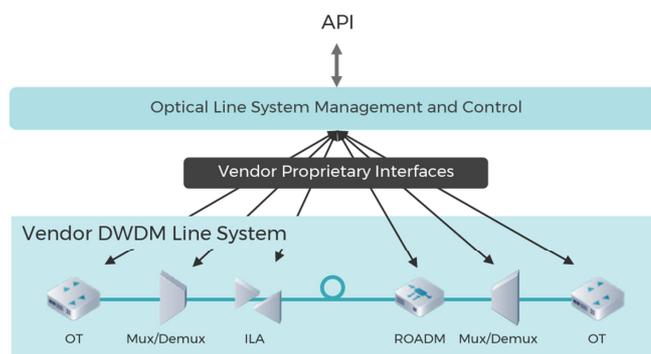


Figura 38 - *Aggregated Optical Transport Network.*

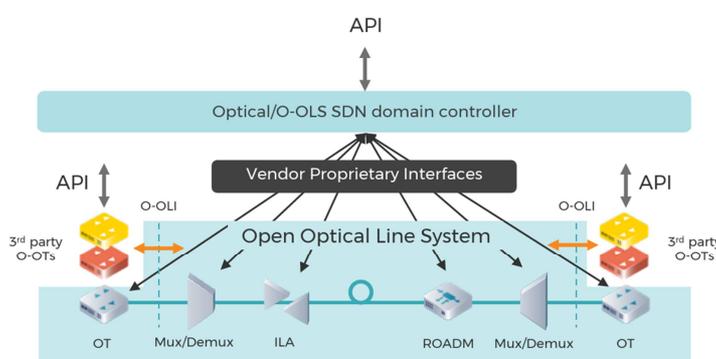


Figura 39 - *Partially Disaggregated Open Optical Transport Network.*

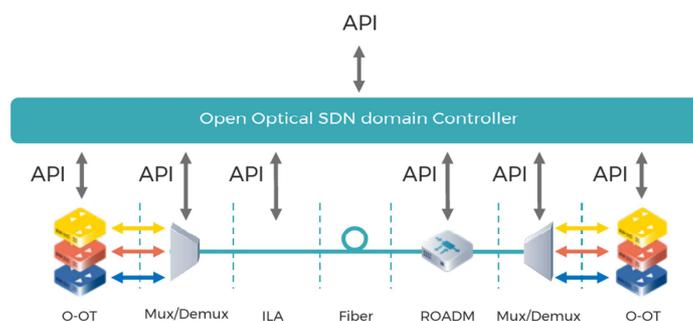


Figura 40 - *Fully Disaggregated Open Optical Transport Network.*

Em redes “parcialmente desagregadas”, equipamentos de rede e *transponders* são configurados e gerenciados diretamente pelo controlador SDN. No entanto, equipamentos ópticos intermediários como MUX, amplificadores, booster e ROADMs, que compõem a *Open Line System* (OLS) são controlados por uma camada de software que faz a intermediação entre estes dispositivos e o controlador SDN. No momento de escrita deste relatório, o cenário “totalmente desagregado” ainda não é uma realidade.

• Padrões

2.5.2.1. ODTN

O ODTN [ODTN, 2022] é um projeto da ONF para definir e criar a padronização em relação à desagregação dos equipamentos ópticos, permitindo o controle e gerência destes dispositivos de forma aberta e totalmente independente do fabricante. A Figura 41 apresenta a arquitetura ODTN focando na desagregação dos equipamentos, e a Figura 42 apresenta a visão da arquitetura ODTN em camadas.

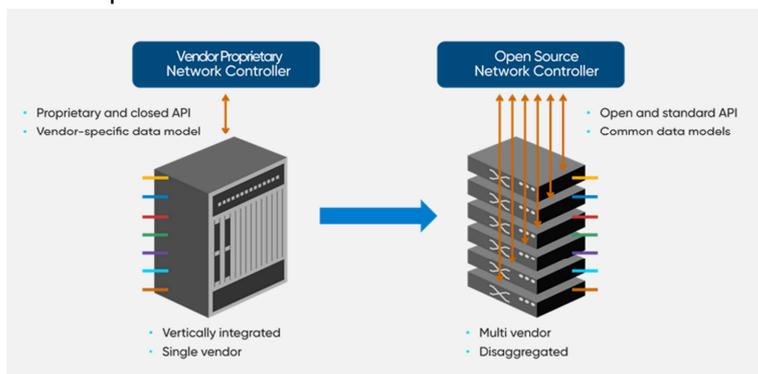


Figura 41 - Arquitetura ODTN – desagregação.

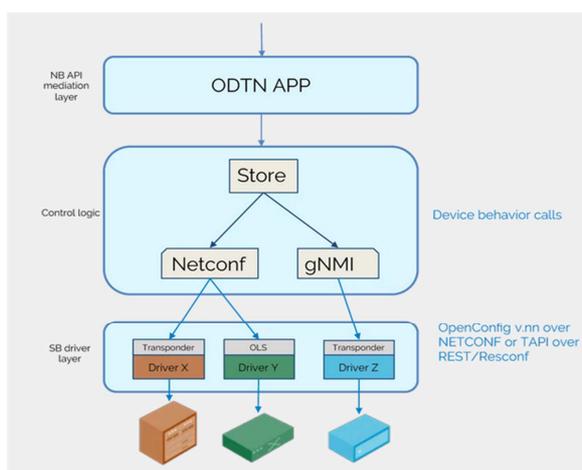


Figura 42 - Arquitetura ODTN – camadas.

2.5.2.2. MUST

MUST é um subgrupo do TIP OOPT responsável por definir a arquitetura de referência SDN e os requisitos mínimos necessários para criar uma rede de transporte programável, que seja *multi-layer* e *multi-vendor*. Formado por grandes operadoras de rede, ele sugere a arquitetura, a metodologia baseada em casos de uso e a seleção das interfaces padrão mais relevantes a serem implementadas pela indústria. O MUST atualmente baseia-se em redes “parcialmente desagregadas”.

A Figura 43 apresenta a arquitetura SDN proposta pelo OOPT MUST para redes ópticas abertas. A Figura 44 ilustra a rede "parcialmente desagregada" com um único controlador SDN e a Figura 45 mostra a rede "parcialmente desagregada" controlada por uma estrutura hierárquica SDN.

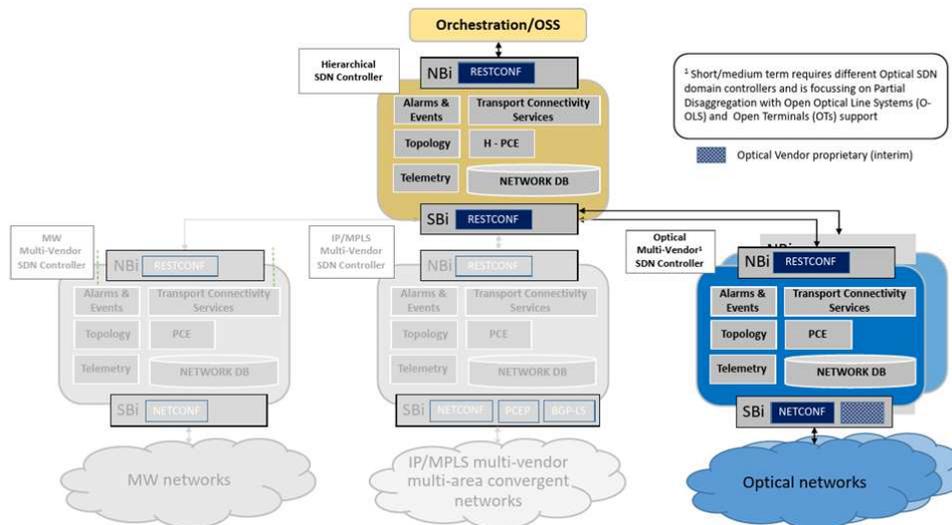


Figura 43 - Arquitetura SDN proposta pelo OOPT MUST para redes ópticas abertas.

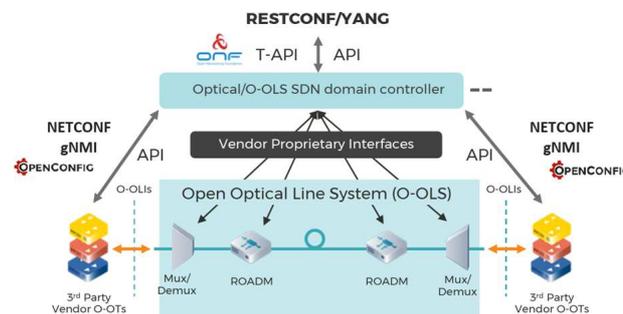


Figura 44 - Rede "parcialmente desagregada" com um único controlador SDN.

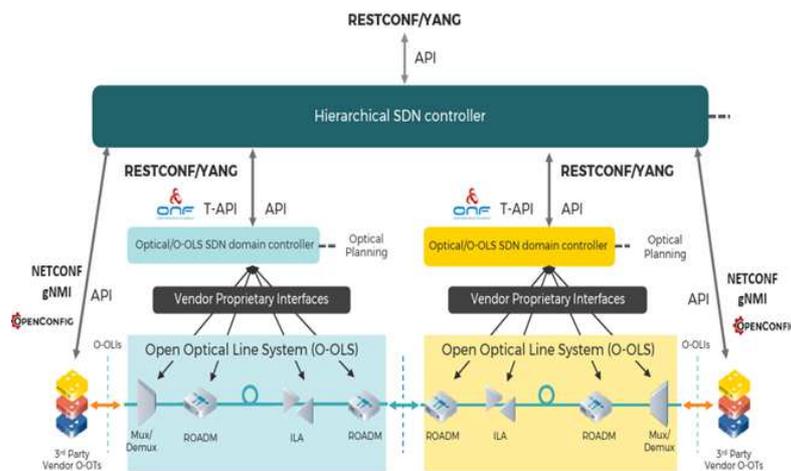


Figura 45 - Rede "parcialmente desagregada" controlada por uma estrutura hierárquica SDN.

- **Camadas de software, estruturas e protocolos**

2.5.2.3. TAI

Transponder Abstraction Interface (TAI) [TAI, 2022] é uma API aberta que fornece um mecanismo independente do fornecedor para controlar os componentes ópticos, simplificando a integração entre o sistema operacional de rede e os dispositivos ópticos, através de interfaces padronizadas, idealizado e mantido pelo TIP OOPT, como mostra a Figura 46.

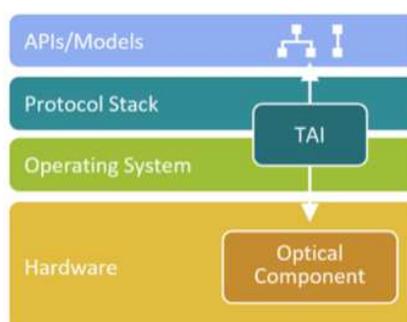


Figura 46 - *Transponder Abstraction Interface*.

2.5.2.4. TAPI

Transport API ou TAPI [TAPI, 2022] é um subprojeto do grupo OTCC da ONF, que padroniza a interface aberta para configuração e controle da camada de transporte.

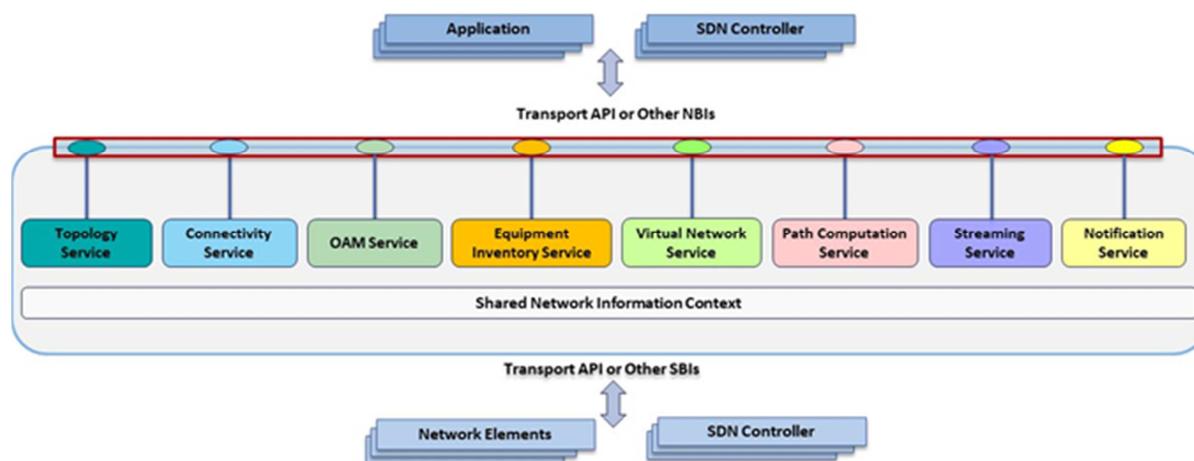


Figura 47 - Estrutura e serviços disponibilizados pela TAPI.

A API disponibiliza diversos serviços como topologia, conectividade, OAM, inventário, *path computation* e notificações (vide Figura 47) e é adotada pelo ONOS tanto para as interfaces *northbound* quanto *southbound*.

2.5.2.5. OpenConfig

Embora não seja vinculado a nenhuma iniciativa específica, o OpenConfig [OPENCONFIG, 2022] é um grupo de trabalho informal para definir um modelo de gerência de redes que seja padronizado e aberto, independentemente de fabricante. Adequado para o uso em redes SDN, ele tem como objetivo a configuração declarativa, gerenciamento e operações orientadas por modelo, definidos em YANG. ONOS e ODTN adotam o padrão OpenConfig como opção para comunicação *southbound*.

2.5.2.6. OpenROADM

Open ROADM Multi-Source Agreement (MSA) ou OpenROADM [OpenROADM, 2022] propõe uma especificação padronizada para permitir a interoperabilidade entre ROADMs de diferentes fabricantes, que atualmente utilizam sistemas proprietários. Em redes definidas por software, as conexões entre os elementos ROADM devem ser configuráveis remotamente por meio de interfaces abertas, sendo automatizadas sempre que possível.

Embora sejam peças importantes na parte óptica, ROADMs não fazem parte do *testbed*. Ainda assim, é importante acompanhar este padrão.

- **Controladores SDN**

2.5.2.7. ONOS

Mantido pela ONF, ONOS é um dos principais controladores SDN de código aberto [ONOS-a, 2022][ONOS-b, 2022]. É um projeto modular, com diversas aplicações já prontas para uso e pode ser operado tanto em modo de linha de comando quanto de interface web. Além disso, ele é usado pelo projeto ODTN, também mantido pela ONF, para gerenciar redes ópticas desagregadas.

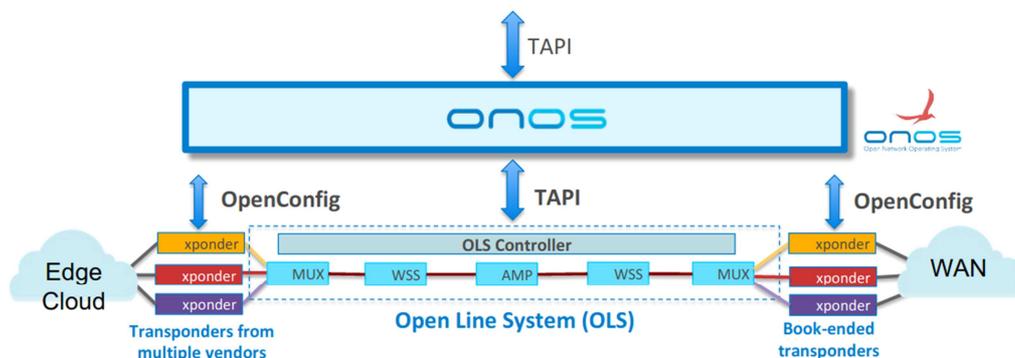


Figura 48 - ONOS phase 1.5 (Parcialmente Desagregado).

Na Figura 48, pode-se observar uma demonstração realizada pela ONF de uma rede óptica “parcialmente desagregada” sendo gerenciada pelo controlador ONOS. Nela, o

OpenConfig, que pode ser usado na comunicação com dispositivos ópticos. A Figura 50 apresenta a arquitetura do Stratum. [ONF-Stratum, 2022]

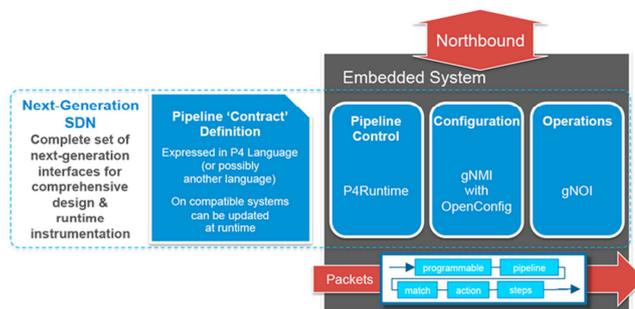


Figura 50 - Arquitetura do Stratum.

Ele implementa as principais interfaces *northbound*, incluindo P4, P4Runtime, gNMI/OpenConfig e gNOI e pode executar as funções de NOS nativamente ou se comunicando com algum outro NOS externo.

2.5.2.10. Goldstone

TIP OOPT-NOS é o subgrupo responsável pelo desenvolvimento do sistema operacional de redes GOLDSTONE que utilizam, em boa parte da sua arquitetura (Figura 51), componentes de código aberto já existentes e consolidados, desenvolvidos principalmente pelo *Open Compute Project* (OCP) e TIP, através de parceria com a NTT.

Estão Incluídos o sistema operacional *Open Network Linux* (ONL), SONiC, *Switch Abstraction Interface* (SAI), além da biblioteca TAI para fornecer uma solução de código aberto completa. Além do ONL, Kubernetes é empregado para permitir gerenciamento de aplicativos, tornando a solução bastante flexível. Devido a sua arquitetura modular, Goldstone pode facilmente ser estendido para suportar novos dispositivos de rede [GOLD, 2022]

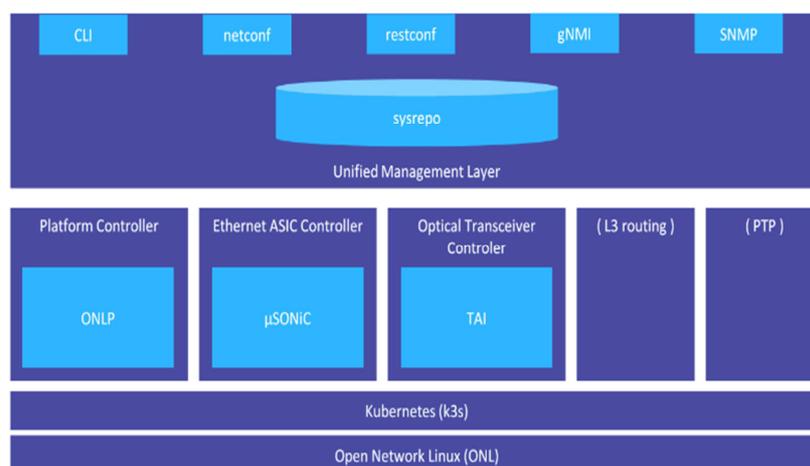


Figura 51 - Arquitetura do Goldstone.

2.5.2.11. OcNOS



Apesar de não ser um software de código aberto, o OcNOS deve ser considerado como uma opção interessante, devido ao seu grau de maturidade de *software*. Comercializado pela empresa IPinfusion [IPinfusion, 2022], ele pode ser usado em vários cenários. No entanto, o seu licenciamento tem um custo fixo por equipamento e uma taxa anual de manutenção. A Figura 52 apresenta as camadas adjacentes que interagem com o OcNOS.

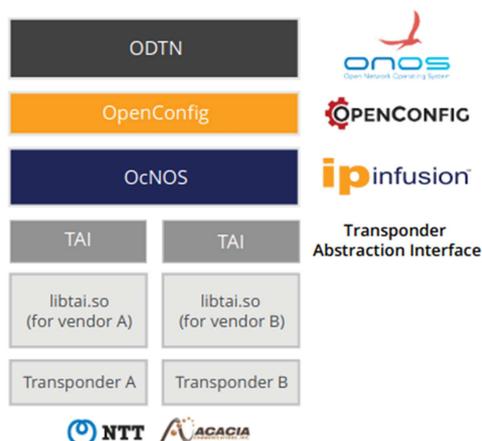


Figura 52 – OcNOS e camadas adjacentes.

Experimentos realizados anteriormente pela equipe da RNP, utilizando *transponder* CASSINI + STRATUM, apresentaram problemas para utilizar placas DCO (*Digital Coherent Optics*), por falta de *drivers* compatíveis. Enquanto tais *drivers* não são disponibilizados, a utilização do OcNOS pode ser uma opção alternativa como *software* comercial no *testbed*.

- **Transponders whitebox**

Embora *hardware* não seja objeto desta meta do projeto, é importante acompanhar a evolução destes *transponders* ópticos desagregados, identificando novos softwares ou funcionalidades sendo implementadas.

2.5.2.12. Cassini

Cassini (Figura 53) é um *transponder* que atua nas camadas L1/L2/L3. Contribuição da empresa EdgeCore para o TIP, ele integra a comutação de 100 GbE com funções de transporte óptico. Ele é comercializado pela Edgecore e possui suporte a *Open Network Install Environment* (ONIE) e TAI [Cassini, 2022].



Figura 53 - EdgeCore Cassini.

2.5.2.13. Phoenix

Este é outro *transponder whitebox* proveniente do projeto TIP (Figura 54). Ele atua nas camadas L0/L1, utilizando somente componentes desagregados (HW e SW), suportando interfaces de até 400G. Alguns fabricantes estão com projetos baseados no Phoenix (NEC, Fujitsu e Cisco). Seu lançamento está previsto para o segundo semestre de 2022 [EdgeCore, 2022].



Figura 54 - Phoenix.

2.5.3. Seleção das iniciativas e projetos para acompanhamento

Dentre as iniciativas e projetos mencionados acima, basicamente todos merecem ser acompanhados. Os projetos do TIP e ONF representam atualmente o estado da arte para redes ópticas desagregadas e de código aberto. Estão em fase de grande atividade de desenvolvimento, contando com o apoio das principais empresas desenvolvedoras de software, fabricantes de hardware, operadores de rede e telefonia. Suas comunidades crescem continuamente, contam com uma documentação satisfatória e os fóruns de discussão são bem ativos.

2.5.4. Levantamento Sistemático da Literatura

Entre os principais desafios das redes atuais de *fronthaul* e *backhaul* estão a eficiência e a vazão para atender o consistente crescimento de tráfego. Como as capacidades de transmissão de um enlace de rede dependem da largura de banda do meio de transmissão, as redes ópticas, juntamente com a tecnologia WDM, são consideradas a melhor opção para atender esse compromisso de eficiência e vazão. No entanto, grandes redes dinâmicas multiplexadas por divisão de comprimento de onda, baseadas no mecanismo de controle distribuído, são suscetíveis a imprecisões nas informações de roteamento. Nesse contexto, o paradigma SDN apresenta-se como um candidato promissor que pode potencialmente minimizar a imprecisão das informações de roteamento, para melhorar o desempenho do bloqueio e a eficiência dessas redes [Qureshi e Braun, 2021].

[Mirkhanzadeh *et. al*, 2017] e [Manso *et al.*, 2021] apresentam demonstrações de orquestradores SDN para provisionamento de fluxo e tratamento de falhas em redes WDM. Por sua vez, [Mirkhanzadeh *et. al*, 2017] utilizam o orquestrador PRONet para fornecer duas funções críticas em uma rede *Ethernet-over-Wavelength Division Multiplexing*. As duas funções são: 1) provisionamento de fluxo sob demanda na camada Ethernet e 2) tratamento coordenado de falhas na camada Ethernet e WDM. Na primeira função o orquestrador provisiona automaticamente os circuitos ópticos para satisfazer com eficiência o requisito de tolerância a falhas de fluxo Ethernet. Com a segunda função, o orquestrador coordena os procedimentos de resposta em ambas as camadas para redirecionar rapidamente os fluxos interrompidos e garantir que a rede esteja preparada para lidar com uma possível segunda interrupção. [Manso *et al.*, 2021] apresentam a implantação dinâmica de VNTs WDM lógicos implantando enlaces virtuais entre nós ROADM/OXC, usando canais espaciais fornecidos por redes SDM. Em sequência, eles propõem um orquestrador de SDN WDM sobre SDM (WDMoSDM) nativo da nuvem que é responsável pelo gerenciamento do ciclo de vida dos VNTs WDM habilitados para SDN.

Já [Yu *et. al*, 2020] investigam o problema de mapeamento de fatias RAN com reconhecimento de isolamento considerando divisões funcionais avançadas e uma arquitetura RAN de três camadas. Eles propõem um algoritmo heurístico de duplo objetivo para mapeamento de fatias RAN sobre uma infraestrutura física representada por redes de metro-agregação de multiplexação por divisão de comprimento de onda. A heurística proposta visa a minimização do número de COs ativos (ou seja, hospedando DUs e/ou CUs) e do número de canais de comprimento de onda estabelecidos sob restrições de capacidade de rede e requisitos de latência. Como o algoritmo também foi projetado para mapear as fatias de RAN com a menor quantidade de recursos físicos para um determinado nível de isolamento, eles também investigam o impacto do isolamento de fatias na utilização de recursos. Os resultados mostram como um isolamento mais alto resulta em um custo de rede mais alto.

[Ahsan *et. al*, 2022] propõem um novo posicionamento ótimo de *Base Band Unit (BBU)* com um esquema de divisão funcional misto para combater o desafio de latência de *fronthaul*, proporcionando à rede maior flexibilidade e redução de custos. Eles ainda introduzem um problema de posicionamento de BBU baseado em programação linear inteira (ILP) com uma abordagem de seleção de divisão funcional mista para minimizar simultaneamente o número de hospedeiros de BBU e de fibras, reduzindo assim o custo da rede. Além disso, um algoritmo heurístico é proposto para resolver o modelo proposto para grandes cenários de rede.

3. Conclusões e recomendações

Tendo em vista a heterogeneidade de cenários e dispositivos conectados nas redes de comunicações, é tendência mundial a abertura da RAN. Dessa forma, a partir da otimização e automação baseadas no acesso aos dados, funções até então tidas como caixas-pretas serão capazes de reduzir os custos relacionados à infraestrutura.

Por ser essa uma ideia inovadora, antes da implantação do testbed que é alvo do projeto OpenRAN@Brasil, este relatório apresentou um levantamento do Estado da Arte da tecnologia. Cada um dos domínios tecnológicos abordados, a saber: Sem fio, Cloud, Pacotes, FTTx e WDM, foi tratado separadamente. As principais comunidades, iniciativas, projetos e softwares foram destacados e sumarizados conforme mostrado na Tabela 1. A partir de artigos do IEEE Xplore e ACM Digital Library, foi realizada uma revisão bibliográfica para embasar ainda mais as decisões.

| | Sem-Fio | Cloud | P4 | FTTx | DWDM |
|-----------------------|---------|-------|----|------|------|
| <i>3GPP</i> | X | | | | |
| <i>O-RAN Alliance</i> | X | | | | |
| <i>OSC</i> | X | | | | |
| <i>OSA</i> | X | | | | |
| <i>CNCF</i> | | X | | | |
| <i>IETF</i> | | | X | | |
| <i>BBF</i> | | | | X | |
| <i>LF</i> | | X | X | | |
| <i>TIP</i> | X | X | | X | X |
| <i>ONF</i> | X | X | X | X | X |

Tabela 1 - Principais comunidades para os domínios tecnológicos do OpenRAN@ Brasil.

Com base nos critérios estabelecidos em cada domínio tecnológico, a Tabela 2 apresenta os projetos selecionados para acompanhamento. Eles foram categorizados por cores, seguindo uma ordem de relevância. Por primário entende-se o mais relevante. Vale ressaltar que, na próxima etapa, os projetos com maior prioridade serão o foco principal, porém aqueles menos prioritários continuarão a ser acompanhados. Temos também o objetivo de entender a evolução de cada um deles.

| | RIC | Cloud | P4 | FTTx | DWDM | |
|------------------------------|-----|-------|----|------|------|------------|
| OAI FlexRIC | X | | | | | Primário |
| OSC RICAPP, RICPLT e NONTRIC | X | | | | | Secundário |
| ONF SD-RAN | X | | | | | Terciário |
| Intel SmartEdge 5G | | X | | | | |
| Kubernetes | | X | | | | |
| Helm | | X | | | | |
| Aether | | X | | | | |
| SD-RAN | | X | | | | |
| SD-CORE | | X | | | | |
| ONAP | | X | | | | |
| OpenSTACK | | X | | | | |
| OpenSTACK - Nova | | X | | | | |
| OpenSTACK - Heat | | X | | | | |
| OpenStack Glance | | X | | | | |
| OpenStack Cinder | | X | | | | |
| OpenStack Neutron | | X | | | | |
| Ceph | | X | | | | |
| Akraino | | X | | | | |
| Anuket | | X | | | | |
| Stratum/SD FABRIC | | | X | | | |
| Sonic/PINS | | | X | | | |
| ONF SEBA | | | | X | | |
| ONF VOLTHA | | | | X | | |
| ONF TRELIS->SDFABRIC | | | | X | | |
| ONF NEM | | | | X | | |
| ONF ONOS | | | | X | X | |
| LF ODL - OpenDayLight | | | | | X | |
| ONF ODTN | | | | | X | |
| TIP MUST | | | | | X | |
| TIP TAI | | | | | X | |
| ONF TAPI | | | | | X | |
| ONF Openconfig | | | | | X | |
| OpenROADM | | | | | X | |
| ONF Stratum | | | | | X | |
| TIP Goldstone | | | | | X | |
| IPInfusion OCNOS | | | | | X | |
| Edgecore Cassini | | | | | X | |
| TIP Phoenix | | | | | X | |

Tabela 2 - Principais projetos para os domínios tecnológicos do OpenRAN@ Brasil.

4. Referências Bibliográficas

4.1. Domínio Sem fio

- [3GPP, 2022] 3GPP. Disponível em: <https://www.3gpp.org/>. Acessado em: 24/03/2022.
- [Bonati et. al, 2021] L. Bonati, S. D'Oro, M. Polese, S. Basagni and T. Melodia, "Intelligence and Learning in O-RAN for Data-Driven NextG Cellular Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 10, pp. 21-27, October 2021, doi: 10.1109/MCOM.101.2001120.
- [Fajjari et al, 2019] I. Fajjari, N. Aitsaadi and S. Amanou, "Optimized Resource Allocation and RRH Attachment in Experimental SDN based Cloud-RAN," 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCNC.2019.8651784.
- [Foukas et. Al, 2016] Xenofon Foukas, Navid Nikaein, Mohamed M. Kassem, Mahesh K. Marina, and Kimon Kontovasilis. 2016. FlexRAN: A Flexible and Programmable Platform for Software-Defined Radio Access Networks. In Proceedings of the 12th International on Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 427-441. DOI: <https://doi.org/10.1145/2999572.2999599>
- [OAI, 2022] OAI: OAI integrates O-RAN RIC with its 5G Stack and showcases Monitoring & Control xApps. Disponível em: <https://openairinterface.org/news/oai-integrates-o-ran-ric-with-its-5g-stack-and-showcases-monitoring-control-xapps/>. Acessado em: 25/03/2022.
- [ONF 2022] ONF: SD-RAN. Disponível em: <https://opennetworking.org/sd-ran/>. Acessado em: 25/03/2022.
- [ONF Archives, 2022] ONF: Archives. Disponível em: <https://opennetworking.org/software-defined-standards/archives/>. Acessado em: 25/03/2022.
- [O-RAN Alliance, 2022] O-RAN Alliance. Disponível em: <https://www.o-ran.org/>. Acessado em: 25/03/2022.
- [O-RAN Specifications, 2022] O-RAN Specifications. Disponível em: <https://orandownloadswb.azurewebsites.net/adopters-license>. Acessado em: 25/03/2022.
- [ORAN-SC, 2022] ORAN-SC. Projects. Disponível em: <https://docs.o-ran-sc.org/en/latest/projects.html>. Acessado em: 04/04/2022.
- [OSA, 2022] OSA. OpenAirInterface. Disponível em: <https://openairinterface.org/>. Acessado em: 28/03/2022.
- [Parvez et. al, 2018] I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. I. Sarwat and H. Dai, "A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 3098-3130, Fourthquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2841349.
- [Singh et. al, 2020] S. K. Singh, R. Singh and B. Kumbhani, "The Evolution of Radio Access Network Towards Open-RAN: Challenges and Opportunities," 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNCW48565.2020.9124820.
- [TIP Deliverables, 2022] TIP. Telecom Infra Project: Deliverables. Disponível em: <https://telecominfraproject.com/openran/>. Acessado em: 28/03/2022.
- [TIP Release 2, 2022] TIP Release 2. Roadmap Disponível em: https://cdn.brandfolder.io/D8DI15S7/at/hb2jktj8t6cc4msp6fgxz/TIP_OpenRAN_Release_2_Roadmap_Document.pdf. Acessado em: 28/03/2022.
- [Wijethilaka e Liyanage, 2021] S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Survey on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 957-994, Secondquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3067807.

4.2. Domínio de Cloud

- [Akraio, 2020] Akraio Edge Stack. Disponível em <https://wiki.akraio.org/display/AK/Akraio+Edge+Stack> Acessado em 31/03/2022
- [Anuket, 2022] Disponível em <https://anuket.io/> Acessado em 06/04/2022
- [Anuket-Artifacts, 2022] Disponível em <https://anuket.io/artifacts/>, Acessado em 28/04/2022
- [Anuket-EdgeStack, 2022] Disponível em <https://wiki.akraio.org/display/AK/Akraio+Edge+Stack> Acessado em 06/04/2022
- [Callegati et al., 2014] Callegati, F.; Cerroni, W.; Contoli, C.; Santandrea, G. "Performance of Network Virtualization in cloud computing infrastructures: The OpenStack case," 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet), 2014, pp. 132-137, doi: 10.1109/CloudNet.2014.6968981.
- [Casalicchio, 2019] Casalicchio, E. "Container orchestration: A survey", Proc. Syst. Modeling Methodol. Tools, pp. 221-235, 2019.
- [Ceph-About, 2022] About the foundation. Disponível em <https://ceph.com/en/foundation/> Acessado em 31/03/2022
- [Ceph-Welcome, 2022] WELCOME TO CEPH. Disponível em <https://docs.ceph.com/en/latest/> Acessado em 31/03/2022
- [CNCF-Projects, 2022] Projects. Disponível em: <https://www.cncf.io/projects/>. Acessado em: 31/03/2022
- [CNCF-who, 2022] Who we are. Disponível em: <https://www.cncf.io/about/who-we-are/>. Acessado em: 31/03/2022
- [Hao et al., 2019] Hao, J.; Ye, K.; Xu, C.-Z. "Live migration of virtual machines in OpenStack: A perspective from reliability evaluation", Proc. Int. Conf. Cloud Comput., pp. 99-113, 2019.
- [Helm, 2022] Helm (2022), Disponível em <https://helm.sh/>, Acessado em 06/04/2022
- [Krazit, 2020] Krazit, Tom. The Linux Foundation became a force in enterprise tech. Is that a problem?. Protocol, 2020. Disponível em: <https://www.protocol.com/enterprise/linux-foundation-open-source-enterprise>. Acessado em 31/03/2022
- [kubernetes, 2022] Kubernetes (2022), Disponível em <https://kubernetes.io/> Acessado em 06/04/2022
- [kubernetes-Whatis, 2022] What is Kubernetes? Disponível em <https://kubernetes.io/docs/concepts/overview/what-is-kubernetes/> Acessado em 06/04/2022
- [LF, 2022] Linux Foundation (2022), disponível em <https://linuxfoundation.org/>, acessado em 28/04/2022
- [LF-About, 2022] About. Disponível em: <https://www.linuxfoundation.org/about/>. Acessado em 31/03/2022
- [LF-Projects, 2022] Projects. Disponível em: <https://www.linuxfoundation.org/projects/>. Acessado em 31/03/2022
- [Necos, 2020] NECOS: Novel Enablers for Cloud Slicing. Disponível em: <http://www.h2020-necos.eu/>. Acessado em: 15/07/2020.
- [ONAP, 2022] Disponível em <https://www.onap.org/> Acessado em 06/04/2022
- [ONAP-Architecture, 2022] Disponível em <https://docs.onap.org/en/quilin/guides/onap-developer/architecture/onap-architecture.html>, Acessado em 06/04/2022
- [ONF-Aether, 2022] Aether. Disponível em: <https://opennetworking.org/aether/> Acessado em 28/04/2022
- [ONF-SDCore, 2022] Disponível em <https://wiki.opennetworking.org/display/COM/SD-Core> Acessado em 06/04/2022
- [OpenStack-Cinder, 2022] Cinder. Disponível em: <https://wiki.openstack.org/wiki/Cinder> Acessado em 31/03/2022
- [OpenStack-Glance, 2019] Welcome to Glance's documentation!. Disponível em: <https://docs.openstack.org/glance/latest/> Acessado em 31/03/2022
- [OpenStack-Heat, 2022] Heat. Disponível em: <https://wiki.openstack.org/wiki/Heat>. Acessado em 31/03/2022
- [OpenStack-Intro, 2021] Introduction. Disponível em <https://docs.openstack.org/neutron/latest/admin/intro.html> Acessado em 31/03/2022
- [OpenStack-Neutron, 2020] Welcome to Neutron's documentation!. Disponível em <https://docs.openstack.org/neutron/pike/> Acessado em 31/03/2022

- [OpenStack-Nova, 2021] OpenStack Compute (nova). Disponível em <https://docs.openstack.org/nova/latest/> Acessado em 31/03/2022
- [OpenStack-Whatis, 2022] WHAT IS OPENSTACK? Disponível em <https://www.openstack.org/software/> Acessado em 31/03/2022
- [Polese et al., 2020] Polese, M.; Giordani, M.; Zugno, T.; Roy, A.; Goyal, S.; Castor, D.; and Zorzi, M. "Integrated Access and Backhaul in 5G mmWave Networks: Potentials and Challenges," IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 3, pp. 62-68, March 2020.
- [Sefraoui et al., 2012] Sefraoui, O.; Aissaoui, M.; Eleuldj, M. "OpenStack: Toward an Open-Source Solution for Cloud Computing", International Journal of Computer Applications (0975 - 8887), vol. 55, no. 03, October 2012.
- [Shah et al., 2021] Shah, S. D. A.; Gregory, M. A.; Li, S. "Cloud-Native Network Slicing Using Software Defined Networking Based Multi-Access Edge Computing: A Survey," in IEEE Access, vol. 9, pp. 10903-10924, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050155.
- [Silva et al., 2018] Silva, F. S.; Lemos, M. O. ; Medeiros, A.; Neto, A. V. ; Pasquini, R.; Moura, D.; Rothenberg, C.; Mamatas, L.; Correa, S.; Cardoso, K.; Marcondes, C. ; Abelem, Antonio ; Nascimento, M.; Galis, A.; Contreras, L.; Serrat, J.; Papadimitriou, P. NECOS Project: Towards Lightweight Slicing of Cloud Federated Infrastructures. In: 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft), 2018, Montreal. 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft). NY- USA: Editora da IEEE, 2018. v. 1. p. 406-420.
- [Wang et al., 2018] Wang, Q. et al. "SliceNet: End-to-End Cognitive Network Slicing and Slice Management Framework in Virtualised Multi-Domain, Multi-Tenant 5G Networks," 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/BMSB.2018.8436800.
- [Wen et al., 2012]. Wen, Xiaolong; Gu, Genqiang; Li, Qingchun; Gao, Yun; Zhang, Xuejie. "Comparison of open-source cloud management platforms: OpenStack and OpenNebula," 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2012, pp. 2457-2461, doi: 10.1109/FSKD.2012.6234218.

4.3. Domínio de Pacotes P4

- [Amin et. al, 2019] R. Amin, M. Reisslein and N. Shah, "Hybrid SDN Networks: A Survey of Existing Approaches," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 3259-3306, Fourthquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2837161.
- [Azure, 2019] Microsoft Azure. (2019). SONiC System Architecture. Retrieved 04 12, 2022, from <https://github.com/Azure/SONiC/wiki/Architecture>
- [Bosshart et al., 2014] Bosshart, P., Daly, D., Gibb, G., Izzard, M., McKeown, N., Rexford, J., Schlesinger, C., Talayco, D., Vahdat, A., Varghese, G., & Walker, D. (2014). P4: programming protocol-independent packet processors. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 44(3), 87-95. <https://doi.org/10.1145/2656877.2656890>
- [Braga et al., 2014] Braga, J., Granville, L. Z., O'Flaherty, C., & Moreiras, A. M. (2014). O Livro do IETF (1st ed.). Comitê Gestor da Internet no Brasil. Retrieved 04 12, 2022, from <https://nic.br/media/docs/publicacoes/1/o-livro-do-ietf.pdf>
- [Cugini et al., 2021] F. Cugini, D. Scano, A. Giorgetti, A. Sgambelluri, P. Castoldi and F. Paolucci, "P4 Programmability at the Network Edge: the BRAINE Approach [Invited]," 2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2021, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICCCN52240.2021.9522351. (projeto brain)
- [Foukas et. Al, 2016] Foukas, Xenofon & Nikaein, Navid & Kassem, Mohamed & Marina, Mahesh & Kontovasilis, Kimon. (2016). FlexRAN: A Flexible and Programmable Platform for Software-Defined Radio Access Networks. 427-441. 10.1145/2999572.2999599.
- [Frankovsky, 2013] Frankovsky, F. (2013, 08 7). Up next for the Open Compute Project: The Network. Open Compute Project. Retrieved 04 12, 2022, from <https://www.opencompute.org/blog/up-next-for-the-open-compute-project-the-network>
- [Hauser et al., 2021] Hauser, F., Häberle, M., Merling, D., Lindner, S., Gurevich, V., Zeiger, F., ... & Menth, M. (2021). A survey on data plane programming with p4: Fundamentals, advances, and applied research. arXiv preprint arXiv:2101.10632.
- [IETF, 2022] IETF. (2022). Computing in the Network Research Group (coinrg) - Documents. IETF Datatracker. Retrieved 04 12, 2022, from <https://datatracker.ietf.org/rg/coinrg/documents/>
- [Kfoury et al., 2021] Kfoury, E. F., Crichigno, J., & Bou-Harb, E. (2021). An exhaustive survey on p4 programmable data plane switches: Taxonomy, applications, challenges, and future trends. IEEE Access, 9, 87094-87155.
- [Lin et al.,2021] Lin, Yi-Bing & Tseng, Chien-Chao & Wang, Ming-Hung. (2021). Effects of Transport Network Slicing on 5G Applications. Future Internet. 13. 69. 10.3390/fi13030069.
- [MacDavid et al., 2021] MacDavid, R., Cascone, C., Lin, P., Padmanabhan, B., Thakur, A., Peterson, L., Rexford, J., & Sunay, O. (2021). A P4-based 5G User Plane Function. Proceedings of the ACM SIGCOMM Symposium on SDN Research (SOSR), 1(1), 162-168. Retrieved 04 12, 2022, from <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3482898.3483358>
- [Macdavid et al.,2021] Macdavid, Robert & Cascone, Carmelo & Lin, Pingping & Padmanabhan, Badhrinath & Thakur, Ajay & Peterson, Larry & Rexford, Jennifer & Sunay, Oguz. (2021). A P4-based 5G User Plane Function. 162-168. 10.1145/3482898.3483358.
- [Maltz, D. 2019] Maltz, D., "Keynote - SONiC-SAI and Its Rapid Growing Ecosystem", OCP Global Summit 2019, 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=7ZlbHlkgFRQ>
- [NG-SDN,2021] NG-SDN, Open Networking Foundation. Disponível em <https://wiki.opennetworking.org/display/COM/NG-SDN>. 2021, Acessado em 28/04/2022
- [OCP, 2015] OCP. (2015). Switch Abstraction Interface (SAI): A Reference Switch Abstraction Interface for OCP. Open Compute Project. Retrieved 04 12, 2022, from <https://www.opencompute.org/documents/switch-abstraction-interface-ocp-specification-v0-2-pdf>
- [OCP, 2022] OCP. (2022). Open Compute Project. Home. Retrieved 04 12, 2022, from <https://www.opencompute.org/>
- [OCP-SONiC, 2022] OCP. (2022). SONiC. About SONiC. Retrieved April 12, 2022, from <https://azure.github.io/SONiC/>
- [ONF, 2021] ONF. (2021, 06). SD-Fabric White Paper. ONF Documents. Retrieved 04 12, 2022, from <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2021/06/SD-Fabric-White-Paper-FINAL.pdf>
- [ONF, 2022] ONF. (2022). ONF Main Page. Retrieved 04 12, 2022, from <https://opennetworking.org/>
- [ONF-SDCore, 2022] ONF. (2022). SD-Core. About SD-Core. Retrieved 04 12, 2022, from <https://opennetworking.org/sd-core/>
- [ONF-SDRAN, 2022] ONF. (2022). SD-RAN. About SD-RAN. Retrieved 04 12, 2022, from <https://opennetworking.org/sd-ran/>

- [ONF-Stratum, 2022] ONF. (2022). Stratum. About Stratum. Retrieved 04 12, 2022, from <https://opennetworking.org/stratum/>
- [ONF-TNA, 2022] ONF. (2022). stratum/fabric-tna: The SD-Fabric data plane. GitHub. Retrieved 04 12, 2022, from <https://github.com/stratum/fabric-tna>
- [ONF-Trellis, 2022] ONF. (2022). Trellis. About Trellis. Retrieved 04 12, 2022, from <https://opennetworking.org/trellis/>
- [Open Networking Lab, 2022] Open Networking Lab. (2022). fabric: The Trellis data plane. Github. Retrieved 04 12, 2022, from <https://github.com/opennetworkinglab/onos/tree/master/pipelines/fabric/impl/src/main/resources>
- [P4,2022] P4. Programming Protocol-independent Packet Processors. Disponível em: <https://www.opennetworking.org/p4/>. Acessado em 16/02/2022.
- [P4.org Applications Working Group, 2020] The P4.org Applications Working Group. (2020, 11 11). In-band Network Telemetry (INT) Dataplane Specification v2.1. P4.org. Retrieved 04 12, 2022, from https://p4.org/p4-spec/docs/INT_v2_1.pdf
- [P4.org, 2022] P4 Project. (2022). P4. P4 Ecosystem. Retrieved 04 12, 2022, from <https://p4.org/ecosystem/>
- [P4in5G, 2022] P4in5G, 2022. P4in5G: Flexible Data Plane Pipelines for 5G. visitado em 07/04/2022. Disponível em: <https://5ginfire.eu/p4in5g/>
- [Paolucci et al., 2021] Paolucci, Francesco & Cugini, Filippo & Castoldi, Piero & Osinski, Tomasz. (2021). Enhancing 5G SDN/NFV Edge with P4 Data Plane Programmability. IEEE Network. Early Access. 10.1109/MNET.021.1900599.
- [Raman, M. e Weitz, K., 2021] Raman, M. & Weitz, K. (2021). Keynote PINS: P4 Integrated Network Stack. 2021 P4 Workshop. Retrieved 04 12, 2022, from https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2022/01/P4-WS-Raman_Weitz.pdf
- [Rothenberg et. al, 2014] Rothenberg, C. E. ;Salvador, M. ; Marques, D. ; Lucena, S. ; Salvatti, J. J. ; Farias, F.; Cerqueira, E.; Abelém, A. Hybrid Networking Towards a Software Defined Era. In: Fei Hu. (Org.). Network Innovation through OpenFlow and SDN: Principles and Design. 1ed.New York - USA: CRC Press, 2014, v. 1, p. 153-198.

4.4. Domínio de FTTx

- [BBF, 2022] Broadband Forum Site principal, Disponível em <https://www.broadband-forum.org/>, acessado em 28/04/2022
- [BBF-OB-BAA, 2022] Open Broadband – Broadband Access Abstraction (OB-BAA) (2022), Disponível em <https://www.broadband-forum.org/open-broadband/open-broadband-software/open-broadband-broadband-access-abstraction-ob-baa>, acessado em 28/04/2022
- [BBF-ONF, 2022] Relationship between BAA and VOLTHA open source projects for automating the access network for any operator deployment. (2022), Disponível em https://www.broadband-forum.org/marketing/download/BAA_VOLTHA_open_source_projects.pdf, acessado em 28/04/2022
- [Das, 2021] Das, S. "From CORD to SDN Enabled Broadband Access (SEBA) [Invited Tutorial]," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 13, no. 1, pp. A88-A99, January 2021, doi: 10.1364/JOCN.402153.
- [Kani et al, 2018]. Kani, J. et al., "Flexible Access System Architecture (FASA) to Support Diverse Requirements and Agile Service Creation," in Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 8, pp. 1510-1515, 15 April 15, 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2787644.
- [Lee, 2016] Lee, S. S. W.; Li, K; Wu, M. "Design and Implementation of a GPON-Based Virtual OpenFlow-Enabled SDN Switch," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 10, pp. 2552-2561, 15 May 15, 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2540244.
- [Nishimoto et al., 2020] Nishimoto, K.; Asaka, K.; Kani, J.; Terada, J. "Two-Stage Abstraction for Disaggregated Modular OLT Architecture Supporting OpenFlow Control," 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020, pp. 1-3.
- [Nishimoto et al., 2020b] Nishimoto, K.; Asaka, K.; Kani, J.; Terada, J. "Automated provisioning method for a modular PON-OLT device toward Plug & Provision," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 12, no. 9, pp. D9-D16, September 2020, doi: 10.1364/JOCN.390901.
- [ONOS-Main, 2022] ONF ONOS, disponível em <https://opennetworking.org/onos/>, acessado em 28/04/2022
- [SEBA, 2022] ONF SEBA (2022), Disponível em <https://opennetworking.org/seba/>, acessado em 28/04/2022
- [SEBA-RD, 2022] SEBA Reference Design 2.0 (2022). Disponível em <https://opennetworking.org/news-and-events/press-releases/onf-releases-seba-reference-design-v2-0/>, acessado em 28/04/2022
- [Suzuki, 2021] Suzuki, T. et al. "Demonstration of IEEE PON Abstraction for SDN Enabled Broadband Access (SEBA)," in Journal of Lightwave Technology, vol. 39, no. 20, pp. 6434-6442, Oct. 15, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3104298.
- [Suzuki et al., 2019] Suzuki, T.; Kim, S.; Kani, J; Terada, J. "Software Implementation of 10G-EPON Upstream Physical-Layer Processing for Flexible Access Systems," in Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 6, pp. 1631-1637, 15 March 15, 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2883912.
- [Talli et al, 2017] Talli, G. et al. "Technologies and architectures to enable SDN in converged 5G/optical access networks," 2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2017, pp. 1-6, doi: 10.23919/ONDM.2017.7958545.
- [TIP-FIX, 2022] TIP Fixed Broadband (2022), Disponível em <https://telecominfraproject.com/fixed-broadband/>, acessado em 28/04/2022
- [VOLTHA, 2022] ONF VOLTHA (2022), Disponível em <https://opennetworking.org/voltha/>, acessado em 28/04/2022
- [Wang, 2021] Wang, M.; Simon, G.; Amigo, I.; Neto, L. A.; Nuaymi, L; Chanclou, P. "SDN-based RAN Protection Solution for 5G, an Experimental Approach," 2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2021, pp. 1-6, doi: 10.23919/ONDM51796.2021.9492454.

4.5. Domínio DWDM

- [Ahsan et. al, 2022] M. Ahsan, A. Ahmed, A. Al-Dweik and A. Ahmad, "Functional Split-Aware Optimal BBU Placement for 5G Cloud-RAN Over WDM Access/Aggregation Network," in IEEE Systems Journal, doi: 10.1109/JSYST.2022.3150468.
- [EdgeCore, 2022] EdgeCore. Disponível em: <https://www.edge-core.com/>. Acessado em: 18/04/2022.
- [GOLD, 2022] OOPT-NOS - Goldstone, disponível em https://palcnetworks.com/casestudies/OOPT_NOS.pdf, acessado em 28/04/2022
- [IPinfusion, 2022] IPinfusion. Disponível em: (<https://www.ipinfusion.com>). Acessado em: 18/04/2022.
- [Manso et al., 2021] C. Manso et al., "First Demonstration of Dynamic Deployment of SDN-enabled WDM Virtual Network Topologies (VNTs) over SDM networks," 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECOC52684.2021.9606167.
- [Mirkhanzadeh et. al, 2017] B. Mirkhanzadeh et al., "Demonstration of an SDN orchestrator for both flow provisioning and fault handling in an Ethernet-over-WDM Network," 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2017.8024936.
- [ODTN, 2022] ODTN. Disponível em: <https://opennetworking.org/odtn/>. Acessado em: 18/04/2022.
- [ONOS-a, 2022] ONOS-a. Disponível em: <https://wiki.onosproject.org>. Acessado em: 18/04/2022.
- [ONOS-b, 2022] ONOS-b. Disponível em: <https://opennetworking.org/onos>. Acessado em: 18/04/2022.
- [OOPT, 2022] OOPT. Disponível em: <https://telecominfraproject.com/oopt>. Acessado em: 18/04/2022.
- [OPENCONFIG, 2022] OPENCONFIG. Disponível em: <https://www.openconfig.net/>. Acessado em: 18/04/2022.
- [OpenDaylight, 2022] OpenDaylight. Disponível em: <https://www.opendaylight.org>. Acessado em: 18/04/2022.
- [OpenDaylight-a, 2022] OpenDaylight-a. Disponível em: <https://docs.opendaylight.org/projects/transportpce/en/latest/developer-guide.html>. Acessado em: 18/04/2022.
- [Yu et. al, 2020] H. Yu, F. Musumeci, J. Zhang, M. Tornatore and Y. Ji, "Isolation-Aware 5G RAN Slice Mapping Over WDM Metro-Aggregation Networks," in Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 6, pp. 1125-1137, 15 March 15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2973311.
- [OpenROADM, 2022] OpenROADM. Disponível em: <http://openroadm.org>. Acessado em: 18/04/2022.
- [Qureshi e Braun, 2021] S. Qureshi and R. M. Braun, "Dynamic LightPath Allocation in WDM Networks Using an SDN Controller," in IEEE Access, vol. 9, pp. 148546-148557, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3124522.
- [TAI, 2022] TAI. Disponível em <https://github.com/Telecominfraproject/oopt-tai>. Acessado em: 18/04/2022.
- [TAPI, 2022] TAPI. Disponível em: <https://wiki.opennetworking.org/display/OTCC/TAPI> Acessado em: 18/04/2022.
- [Cassini, 2022] Cassini at a glance (2022), disponível em <https://www.edge-core.com/solution-inquiry.php?cls=5&id=58>, acessado em 28/04/2022

5. Histórico de alterações do documento consolidado

| Data emissão | de | Versão | Descrições das alterações realizadas |
|-------------------------|-----------|---------------|---|
| 29/abr/22 | | AA | Versão inicial |

6. Execução e aprovação

Elaborado por:

CPQD

Isadora de Figueiredo Moreira
Joao Paulo Sales Henriques Lima
Luciano Martins
Nadia Adel Nassif
Michelle Soares Pereira Facina
Niudomar Siqueira de Araujo Chaves
Pedro Augusto Marques Farias

RNP

Luiz Eduardo Folly de Campos
Marcos Felipe Schwarz

UNICAMP

Christian Esteve Rothenberg

UFPA

Adiel Dos Santos Nascimento
Antônio Jorge Gomes Abelém
Lucas Borges de Oliveira

UFRJ

Fabio David
Pedro Henrique Diniz da Silva

Revisado por:

Luciano Martins

Aprovado por:

Lucas Bondan
Sirley Almeida de Lima

Data da emissão: 29/04/2022