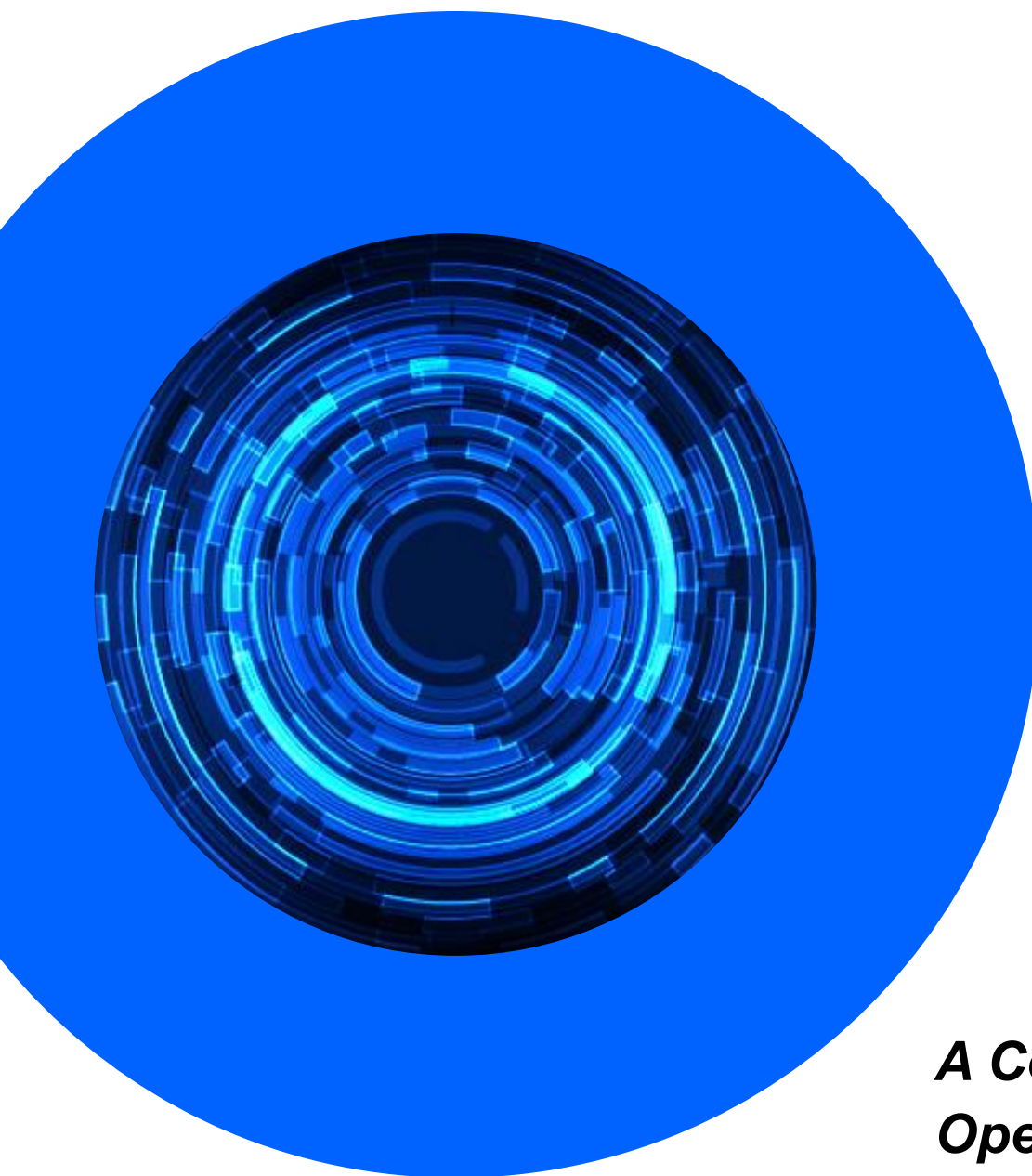


Promovendo abertura
e desagregação em
redes sem fio.



2.

***A Construção e
Operacionalização
de um Testbed em
Escala Nacional***



Setembro, 2026

Projeto OpenRAN@Brasil Fase 3
2026

Instituições Responsáveis

Rede Nacional de Ensino e Pesquisa – RNP
Rua Lauro Müller, 116
Sala 1103 – Botafogo
Rio de Janeiro – RJ CEP 22290-906
www.rnp.br

Fundação CPQD
Diretoria de Tecnologia e Inovação
Rua Dr. Ricardo Benetton Martins, 1.000
Parque II do Polo de Alta Tecnologia
Campinas – SP CEP 13086-902
www.cpqd.com.br

Coordenação Geral

Lucas Bondan – Coordenador de P&D
lucas.bondan@rnp.br
Eduardo Melão – Coordenador de PD&I
emelao@cpqd.com.br

Gestão do Projeto

Leonardo Carvalho Ribeiro – Coordenador de Projetos
Elaine Barioni – Gestora de Projetos

Equipe Técnica

Carine Mineto – Pesquisadora – CPQD
Diego Abreu – Analista de P&D – RNP
Fernando N. N. Farias – Coordenador de P&D – RNP
Gabriel Vassoler – Analista de P&D – RNP
Guilherme Ruyz – Analista – CPQD
Luiz Gustavo Riveros – Pesquisador – CPQD
Murilo Silva – Analista de Operações e Sistemas – RNP

Pesquisa e Conteúdo

Eduardo Melão

Design

Paprika

Revisão Técnica

Maria Silvina Medrano
Rodolfo Costa
Tiago Sutili

Apoio Institucional / Parceiros

RNP

CPQD

Inatel

Instituto Eldorado

Apoio Financeiro

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

Data de Publicação

Setembro de 2026

1. Resumo executivo

Este *white paper* detalha o planejamento técnico, a infraestrutura e a governança para a **Construção e Operacionalização de um Testbed em Escala Nacional** no âmbito do Programa OpenRAN@Brasil. A iniciativa visa diminuir as limitações históricas impostas pelos modelos verticais e ecossistemas proprietários fechados, oferecendo uma infraestrutura experimental estável e multidomínio de alta fidelidade. Concebido como um ambiente aberto de testes para pesquisadores (da academia e da indústria), prestadores de serviços de comunicação e experimentadores, este legado tecnológico serve como um laboratório vivo estratégico para mitigar os riscos da adoção de arquiteturas abertas e desagregadas em escala real no país.

Pilares estratégicos do Testbed nacional

A consolidação desta infraestrutura nacional de grande escala fundamenta-se em três pilares essenciais:

- **Interoperabilidade plena e abertura multidomínio:** unifica horizontalmente os domínios sem fio (RAN), comutação de pacotes (IP/Ethernet) e óptico (DWDM/FTTx) sob um plano de controle centralizado e programável via software e APIs abertas.
- **Pesquisa aplicada de alta fidelidade:** fornece um ambiente físico realista para experimentar novos softwares com as imperfeições e limitações do mundo real, permitindo a emulação controlada de estresse (latência, vazão e jitter) e o monitoramento de variáveis em tempo real.
- **Estímulo à colaboração e à inovação aberta:** cria um ecossistema neutro multi-institucional que integra de forma orgânica a academia, indústrias de tecnologia, *deep techs*, integradores e o governo para expandir a cadeia de suprimentos nacional.

Estrutura por domínio técnico

O ambiente experimental trata cada segmento da rede como um bloco programável modular dotado de hardware especializado e pilhas de software abertas, dividindo-se em cinco domínios principais:

- **Computação em nuvem e borda (*cloud / edge*):** baseia-se em *clusters* Kubernetes gerenciados por ferramentas de automação e *hypervisors* de código aberto (KVM, Proxmox VE), executados em racks de servidores de alta capacidade.
- **Acesso sem fio (RAN):** adota a desagregação funcional em unidades de rádio (*Radio Unit* – RU), unidades distribuídas (*Distributed Unit* – DU) e unidades centralizadas (*Central Unit* – CU), permitindo a coexistência de pilhas de software comercial consolidadas e soluções experimentais em código aberto com interoperabilidade entre fabricantes.
- **Pacotes programáveis (P4):** utiliza switches *white-box* com processadores programáveis Intel Tofino rodando o sistema operacional Stratum e controlados pela plataforma SD-Fabric, viabilizando o processamento de dados diretamente em hardware à taxa de linha.
- **Acesso de banda larga fixa (FTTx):** faz uso da plataforma VOLTHA para abstrair e expor OLTs e ONUs como switches Ethernet virtuais, garantindo a interoperabilidade entre fabricantes em redes GPON/XGS-PON.

-
- **Transporte óptico (DWDM):** emprega transponders abertos e desagregados configurados remotamente via NETCONF/YANG e pela interface de abstração TAI, garantindo o provisionamento dinâmico em redes metropolitanas.

Casos de uso e validação prática

A robustez da arquitetura proposta e a superação dos silos tecnológicos tradicionais foram validadas por meio da execução de três cenários integrados de testes de alta complexidade:

- **Prevenção inteligente de sobrecarga (direcionamento de tráfego):** uso de aplicativos preditivos baseados em inteligência para monitorar a saúde da rede móvel. Em vez de esperar a conexão do usuário degradar, o sistema antecipa a sobrecarga de uma região e transfere automaticamente os dispositivos móveis para outras antenas com maior capacidade. O ganho direto é a garantia de uma experiência de uso contínua, proativa e sem interrupções para o cliente final.
- **Integração descomplicada de fibras ópticas de múltiplos fornecedores:** demonstração de que é possível operar equipamentos de internet fixa de fornecedores variados utilizando um único sistema gerencial, quebrando a dependência histórica de fabricantes exclusivos. Através de ferramentas de automação (como scripts personalizados que simplificaram comandos complexos do sistema), tornou-se possível ativar, desativar e aplicar serviços a novos clientes de forma ágil, automatizada e totalmente transparente.
- **Ativação automatizada e ultraveloz de redes privadas 5G:** criação e configuração de uma rede 5G corporativa de forma 100% automatizada por meio de softwares de orquestração. O grande avanço tecnológico foi programar os próprios equipamentos físicos de conexão para processarem o tráfego pesado de dados da rede de forma direta, aliviando o esforço dos servidores centrais e da rede de transporte. Isso resulta em uma infraestrutura altamente eficiente, com tempo de resposta quase instantâneo (baixíssima latência) e máxima velocidade no escoamento de dados.

O caminho à frente

O foco estratégico da Fase 3 do Programa, com previsão de execução contínua até março de 2028, concentra-se na descentralização da inovação por meio da implantação de laboratórios de teste distribuídos, conhecidos como "ilhas de experimentação", em todas as cinco macrorregiões do território brasileiro. Interconectadas pelo Backbone óptico de alta capacidade da RNP, essas ilhas expandirão a validação do ecossistema Open RAN nacional de cenários laboratoriais para setores verticais críticos para a economia brasileira, tais como a Indústria 4.0, a Agricultura Digital (Agro 4.0), a saúde, a educação e as cidades inteligentes.

2. Contexto e motivação

O gargalo das tecnologias proprietárias

O mercado global de infraestrutura de telecomunicações foi historicamente estruturado sob o domínio de modelos verticais e ecossistemas fechados. Nessa dinâmica tradicional, os grandes fabricantes de hardware (*Original Equipment Manufacturers* – OEM) impõem o fornecimento rigidamente acoplado de equipamentos e softwares de controle proprietários [1]. Esse modelo de arquitetura fechada impõe duas barreiras críticas para o desenvolvimento do setor:

- **Restrição financeira e operacional:** a dependência tecnológica (*vendor lock-in*) retira das operadoras a soberania sobre seus ciclos de atualização e expansão de capacidade. Como consequência direta, há um inflacionamento nos custos de capital (CapEx) e nas despesas operacionais (OpEx), engessando a inovação em novos serviços.
- **Asfixia do ecossistema local:** interfaces e APIs proprietárias atuam como barreiras comerciais e técnicas restritivas para novos atores. Indústrias nacionais de base tecnológica, *startups* e centros de pesquisa locais ficam impossibilitados de integrar suas soluções à malha de rede existente, limitando o crescimento da cadeia de suprimentos interna.

A ruptura desse cenário ocorre por meio do paradigma da desagregação tecnológica. Esse conceito promove o desacoplamento estrutural entre hardware e software: funções de rede modulares são convertidas em software e passam a executar de forma virtualizada sobre hardware genérico de propósito geral ou switches comerciais programáveis conhecidos como *white-boxes* [2]. Para que esses múltiplos blocos funcionais operem de modo eficiente, o ecossistema fundamenta-se na adoção estrita de APIs abertas e interfaces padronizadas.

A Figura 1 mostra o impacto da desagregação tecnológica na cadeia de valor: à esquerda, o gargalo das soluções proprietárias limita a inovação e o ecossistema local; à direita, a separação entre hardware e software promove a flexibilidade operacional, a redução de custos (CapEx/OpEx) e a soberania digital.



Figura 1. Diagrama mostrando o impacto da desagregação tecnológica na cadeia de valor

Benchmarking internacional

A transição global para redes abertas e programáveis exige mais do que validações conceituais em laboratório; ela demanda ambientes experimentais estáveis que mitiguem os riscos de adoção dessas arquiteturas em escala real. Internacionalmente, a construção de *testbeds* nacionais é uma abordagem consolidada para impulsionar a pesquisa aplicada e a maturidade industrial.

Iniciativas globais de experimentação

O avanço científico de tecnologias como a desagregação de hardware e software, o controle inteligente de recursos (RIC) e a inteligência artificial distribuída demonstrou que simulações computacionais puras não são sempre capazes de prever com exatidão o comportamento de sistemas abertos sob condições reais de tráfego, latência e interferência. Isso motivou governos, agências regulatórias e consórcios industriais a financiarem infraestruturas laboratoriais avançadas e Centros de Teste e Integração Abertos (*Open Testing and Integration Centres* – OTIC) dedicados a homologar a conformidade e a interoperabilidade de ponta a ponta no ecossistema Open RAN:

- **i14y Lab (Alemanha):** localizado em Berlim e operado por um consórcio liderado pela Deutsche Telekom em parceria com operadoras como Telefónica e Vodafone, o i14y Lab é um OTIC qualificado pela O-RAN Alliance. A infraestrutura provê serviços de Teste e Laboratório como Serviço (*Test-as-a-Service* e *Lab-as-a-Service*), acelerando o amadurecimento e a certificação de unidades de rádio (O-RU), unidades distribuídas (O-DU), unidades centralizadas (O-CU) e controladores RIC, além de liderar metodologias

padronizadas de teste para eficiência energética e sediar edições periódicas do *O-RAN Global PlugFest* [3].

- **SONIC Labs (Reino Unido):** o *SmartRAN Open Network Interoperability Centre* é uma iniciativa cogerida pela Digital Catapult e pelo órgão regulador britânico Ofcom, financiada pelo Departamento de Ciência, Inovação e Tecnologia (DSIT) do governo do Reino Unido no âmbito da estratégia de diversificação de fornecedores de telecomunicações. Operando como um OTIC neutro, o laboratório oferece suporte a fornecedores consolidados e emergentes para testes de interoperabilidade multifornecedor (*multivendor*), análise de conformidade de protocolos (*gap analysis*) e validação contínua de software em ambientes controlados e realistas [4].
- **Open6G / Colosseum (Estados Unidos):** sediado no *Institute for the Wireless Internet of Things* (WIoT) da Northeastern University e credenciado como OTIC na América do Norte, o complexo integra o *Colosseum*, o maior emulador de redes sem fio com *hardware-in-the-loop* do mundo, equipado com 256 rádios definidos por software (*Software-Defined Radio* – SDR). A iniciativa atua como polo de ponta para a evolução rumo ao 5G avançado e 6G, destacando-se pela emulação em larga escala via gêmeos digitais, validação de algoritmos de inteligência artificial com o ecossistema *OpenRAN Gym*, testes de *xApps* e *rApps* e ensaios em campo (*Over-the-Air*) via licenças experimentais da FCC [5].

Consórcios e modelos de referência

Paralelamente aos ambientes físicos de teste, o mercado passou a se autorregular por meio de consórcios internacionais responsáveis pelas especificações técnicas que sustentam a desagregação:

- **O-RAN Alliance:** lidera globalmente a padronização das interfaces abertas e a introdução de inteligência nativa na rede de acesso de rádio (*Radio Access Network* – RAN) [6].
- **Open Networking Foundation (ONF):** impulsionou arquiteturas de referência voltadas para o plano de dados programável e controle unificado via redes definidas por software (*Software-Defined Networks* – SDN) [7].
- **Telecom Infra Project (TIP):** acelera o desenvolvimento, a validação e a implantação comercial de tecnologias de rede abertas e desagregadas, promovendo a interoperabilidade e a colaboração entre operadoras e ecossistemas de fornecedores [8].
- **Linux Foundation:** por meio de iniciativas como a *Cloud Native Computing Foundation* (CNCF), *Akraino* e *Anuket*, fornece os blocos de software fundamentais para a infraestrutura de nuvem distribuída e computação de borda [9].

A realidade do ecossistema de P&D nacional e o papel do OpenRAN@Brasil

No cenário brasileiro, a despeito da existência de uma comunidade de pesquisa qualificada, o desenvolvimento tecnológico enfrentava um gargalo histórico: a fragmentação da infraestrutura experimental. Os laboratórios acadêmicos e industriais operavam de forma isolada, carecendo de um ambiente integrado sob o mesmo plano de controle que unisse, de ponta a ponta, tecnologias

ópticas elásticas, transporte programável de pacotes e redes móveis celulares de última geração. Sem essa convergência física, o ecossistema de P&D nacional ficava restrito a simulações computacionais, gerando um distanciamento crítico em relação às práticas de implantação de mercado.

Esta lacuna impunha um teto para a inovação local, uma vez que empresas brasileiras e Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs) não dispunham de um ambiente realista para homologar a interoperabilidade de seus produtos frente aos padrões globais abertos.

O Programa OpenRAN@Brasil foi criado para preencher essa lacuna, sendo uma de suas etapas iniciais a criação de um ecossistema prático e dinâmico de experimentação multidomínio [10]. Coordenado pela RNP em uma cooperação entre CPQD, Inatel, Instituto Eldorado e instituições de ensino superior parceiras, o programa unificou esforços de universidades líderes no setor.

Ao conectar múltiplos estados brasileiros através de redes ópticas de alta capacidade e hardware real descentralizado, o projeto estruturou uma malha operacional capaz de injetar cargas controladas e testar cenários de alta complexidade. O OpenRAN@Brasil é, portanto, o plano de fundo prático deste *white paper*, demonstrando como transformar conceitos de desagregação em uma infraestrutura física nacional apta a qualificar recursos humanos e a liderar pesquisas nas eras 5G, 6G e além [11].

Como reflexo direto de sua consolidação prática, o *Testbed* idealizado e implementado pelo projeto já passou a gerar frutos estruturais e permanentes para a soberania tecnológica do país. No ecossistema científico, essa infraestrutura viabilizou uma colaboração multicêntrica inédita entre universidades, permitindo que a pesquisa acadêmica nacional rompesse o teto das simulações computacionais e enfrentasse as reais nuances de engenharia envolvidas nas redes de próxima geração, com várias publicações acadêmicas reunidas na seção Conhecimento do portal OpenRAN@Brasil [12]. Paralelamente, no âmbito institucional e industrial, o amadurecimento técnico proporcionado pelo ambiente de testes culminou em um marco estratégico definitivo: o credenciamento do CPQD como Centro de Competência EMBRAP II em Open RAN junto ao MCTI e seu reconhecimento como o primeiro *Open Testing and Integration Center* (OTIC) credenciado pela O-RAN Alliance no Hemisfério Sul [13]. Esse desdobramento consolida o CPQD como o principal polo nacional de referência para o desenvolvimento tecnológico e alinhamento regulatório de arquiteturas de rede abertas, garantindo que os ativos do projeto permaneçam vivos e sirvam como motor contínuo de inovação para o mercado.

3. **Objetivos estratégicos do Testbed nacional**

A consolidação de uma infraestrutura experimental de escala nacional deve transcender o modelo tradicional de laboratório compartilhado. Ela precisa se estruturar como uma plataforma tecnológica de ponta, *multitenant* e orientada por objetivos técnicos e estratégicos estruturados em pilares fundamentais.

Interoperabilidade plena e abertura multidomínio

Historicamente, os diferentes segmentos das redes de telecomunicações operam como silos operacionais isolados. O primeiro objetivo central de um *testbed* de grande escala é promover a convergência e o rompimento dessas barreiras técnicas.

- **Integração de fronteiras:** a infraestrutura é projetada para unificar horizontalmente o domínio sem fio (RAN), o domínio de comutação e transporte de pacotes (IP/Ethernet) e os domínios ópticos, englobando tanto o transporte de alta capacidade (DWDM) quanto o acesso fixo de banda larga de alta capilaridade (FTTx).
- **Programabilidade fim a fim:** o propósito essencial é submeter essa arquitetura de rede heterogênea a um plano de controle centralizado, permitindo que circuitos e fluxos de dados sejam provisionados, modificados e gerenciados de ponta a ponta diretamente via software, utilizando controladores especializados e APIs abertas.

Pesquisa aplicada de alta fidelidade e validação em escala real

O desenvolvimento de arquiteturas e protocolos de redes emergentes exige um nível de emulação dos processos físicos e lógicos de implementação que modelos analíticos puros ou simuladores computacionais não conseguem reproduzir satisfatoriamente.

- **Fidelidade empírica:** o *Testbed* visa fornecer aos experimentadores um ambiente físico realista, permitindo a execução de novos softwares e algoritmos com a presença de efeitos deletérios, atrasos e as limitações de componentes físicos reais.
- **Injeção de estresse controlada:** a infraestrutura deve suportar a prototipagem e a homologação de aplicações sob condições críticas de estresse, assegurando que variáveis fundamentais de rede (latência, vazão e variação de atraso) possam ser injetadas de maneira controlada e monitoradas em tempo real nas conexões.

Estímulo à colaboração e consolidação do ecossistema de inovação aberta

Um ambiente de testes nacional atua como um catalisador de inovação aberta ao estabelecer um ecossistema neutro de cooperação multi-institucional.

- **Aproximação de atores:** o espaço funciona como um ecossistema aberto estruturado para integrar de forma orgânica a academia, ICTs, indústrias nacionais de hardware e software, integradores de sistemas, *deep techs* e órgãos do governo.
- **Fortalecimento da cadeia nacional:** ao remover as barreiras impostas pelas tecnologias proprietárias, o *Testbed* estimula o desenvolvimento e a validação de soluções tecnológicas locais. Como resultado, amplia-se a competitividade da indústria nacional, expandindo a cadeia de suprimentos de tecnologia e gerando novas oportunidades no mercado nacional.



Figura 2. Visão holística dos pilares estratégicos para a implantação de um testbed nacional

A Figura 2 ilustra a convergência técnica e operacional necessária para uma infraestrutura de experimentação de grande escala: à esquerda, a integração multidomínio (RAN, pacotes e óptica) sob arquiteturas abertas e desagregadas; ao centro, a pesquisa aplicada de alta fidelidade, caracterizada pela emulação e injeção controlada de estresse (como latência e jitter) em hardware real; e à direita, o ecossistema de inovação aberta e colaboração, fundamentado no modelo de cooperação entre academia, indústria e governo para o fortalecimento da soberania tecnológica.

O caso OpenRAN@Brasil como modelo de execução dos objetivos

No âmbito do Programa OpenRAN@Brasil, essas diretrizes estratégicas gerais foram materializadas em metas operacionais objetivas, com foco na construção de uma plataforma baseada em código aberto dedicada ao controle e à gestão unificada de toda a infraestrutura física.

Para validar a arquitetura proposta, o *Testbed* buscou estruturar cenários práticos de experimentação integrando múltiplos eixos tecnológicos:

- **Desagregação de redes móveis:** criação de cenários reais de testes para redes celulares privadas 5G baseadas nos conceitos Open RAN, exercitando a flexibilidade do sistema sob diferentes níveis de desagregação das funções de rádio.
- **Acesso óptico controlado por software:** implementação e validação de conexões ópticas de acesso FTTx gerenciadas programaticamente a partir das ferramentas abertas de abstração VOLTHA (*Virtual OLT Hardware Abstraction*) e de gerenciamento ONOS (*Open Network Operating System*), para o plano de controle de dados, da ONF.
- **Transporte de longa distância:** orquestração e monitoramento de enlaces ópticos de longa distância, operando sob o plano de controle orquestrado do *Testbed* para viabilizar o escoamento de tráfego metropolitano de dados.

4. Arquitetura técnica proposta

A implantação de um *testbed* de escala nacional exige uma arquitetura rigorosamente planejada para garantir flexibilidade, isolamento de experimentos e reprodutibilidade de cenários técnicos. Para evitar o engessamento comum em infraestruturas tradicionais, o seu design adota a separação estrita entre os planos de dados (encaminhamento), controle (sistemas operacionais de rede e controladores programáveis) e orquestração (gerenciamento do ciclo de vida de serviços), conforme ilustra a Figura 3.



Figura 3. Diagrama estrutural da arquitetura de referência do testbed nacional programável

Detalhamento da infraestrutura por domínio técnico

A desagregação exige que cada domínio tecnológico seja tratado como um bloco programável modular, dotado de seu próprio hardware (*white-box*) e de pilhas de software abertas.

Domínio de computação em nuvem e borda (*cloud/edge*)

Para abrigar as funções de rede virtualizadas (*Virtual Network Functions* – VNF) e as funções de rede nativas da nuvem (*Cloud Native Network Functions* – CNF), o *Testbed* requer uma infraestrutura de computação flexível, escalável e de baixa sobrecarga (*overhead*) de virtualização.

- **Orquestração e clusters:** a implementação proposta baseia-se em *clusters Kubernetes*, cuja implantação e gerenciamento automatizado são realizados por meio de ferramentas

de automação como o *Kubespray* ou via *clusters* com *kubeadm* customizadas para cenários experimentais de rápida evolução.

- **Camada de *hypervisors* e hardware:** o isolamento estrito de múltiplos experimentos concorrentes exige a avaliação e o emprego de *hypervisors* de código aberto, incluindo KVM, Proxmox VE, oVirt e XCP-NG. Fisicamente, cada nó regional do *Testbed* é estruturado em racks compostos por servidores de alta densidade, configurados especificamente com CPUs com alto nível de paralelismo, grande capacidade de memória RAM e armazenamento SSD NVMe para mitigar gargalos de E/S (I/O).

Domínio de acesso sem fio (RAN)

O ecossistema móvel do *Testbed* difere das estações radiobase proprietárias e monolíticas, implementando rigorosamente a desagregação funcional definida pelo 3GPP e pela O-RAN Alliance.

- **Desagregação funcional (*splits*):** a arquitetura divide a estação radiobase em três entidades lógicas distintas: a unidade de rádio (RU), a unidade distribuída (DU) e a unidade centralizada (CU). Esta abordagem permite que a CU e a DU operem de forma virtualizada em servidores comerciais de propósito geral (*Commercial Off-The-Shelf* – COTS), enquanto a RU processa a camada física e irradia o sinal de radiofrequência.
- **Coexistência de pilhas de software:** o ambiente integra antenas *indoor* dedicadas a redes privativas 5G. A operação adota uma abordagem híbrida: pilhas de software comercial (como a da Radisys), que fornecem alta estabilidade e interfaces nativas E2, A1 e O1 para comunicação com o controlador inteligente (RAN *Intelligent Controller* – RIC); e soluções experimentais em código aberto (como srsRAN e o SD-RAN da ONF) para permitir modificações no código-fonte por parte dos pesquisadores.

Domínio de pacotes programáveis (P4)

O plano de encaminhamento de pacotes do *Testbed* rejeita os protocolos estáticos e fixados em *chipsets* tradicionais, adotando o paradigma da programabilidade de silício por meio da linguagem P4.

- **Hardware de comutação:** a infraestrutura utiliza switches *white-box* baseados no chip programável Intel Tofino, operando com interfaces de alta velocidade a 100 Gbps (modelos EdgeCore DCS801 e DCS800/Wedge100BF-32X).
- **Abstração de controle e UPF offload:** estes switches rodam o sistema operacional aberto e minimalista Stratum, com controle de fluxos exercido de forma centralizada pela plataforma SD-Fabric da ONF. Essa combinação viabiliza o *offload* (descarregamento) da função de plano de usuário (*User Plane Function* – UPF) do core 5G diretamente nos registradores do switch P4. Com isso, o tráfego de dados dos usuários é processado diretamente no hardware à taxa de linha ("caminho rápido"), eliminando a latência de travessia e poupando os recursos de CPU dos servidores de borda.

Domínio de acesso óptico de banda larga (FTTx)

A rede de acesso fixo por fibra óptica é arquitetada para se comportar como um elemento de borda totalmente programável e integrado aos princípios de redes definidas por software (SDN).

- **Ambiente de abstração VOLTHA:** utiliza-se a arquitetura de referência VOLTHA da ONF. O sistema cria uma camada de abstração de software que traduz os comandos SDN em fluxos e configurações dos protocolos ópticos subjacentes. Com isso, OLTs (*Optical Line Terminals*) e ONUs (*Optical Network Units*) passam a ser gerenciadas logicamente como switches Ethernet OpenFlow virtuais, permitindo que a ativação, a desativação e a aplicação de políticas de serviço sejam automatizadas via APIs padronizadas e scripts programáveis.
- **Interoperabilidade *multivendor*:** o design consolida a operação simultânea de tecnologias distintas sobre uma única infraestrutura física de distribuição óptica (*Optical Distribution Network* – ODN). Com a OLT operando com portas físicas dedicadas para tráfego GPON e XGS-PON em paralelo, esses sinais são combinados externamente no início do enlace por meio de filtros de coexistência baseados em multiplexação por comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), permitindo que ONUs GPON e XGS-PON de diferentes fabricantes funcionem simultaneamente na mesma infraestrutura de fibra sem interferência. O plano de controle utiliza o software de gerenciamento de acesso CBAC, operando com controle distribuído ou centralizado diretamente nas OLTs do *Testbed* para gerenciamento flexível de assinantes.

Domínio de transporte óptico (DWDM)

Para garantir o escoamento de dados em altas taxas entre os diferentes nós regionais sem criar gargalos na camada física, o *Testbed* implementa sistemas de transporte óptico de longa distância baseados em multiplexação por divisão de comprimento de onda (DWDM) desagregada.

- **Dispositivos *white-box* de transporte:** utilização de transponders ópticos abertos e desagregados (plataformas de referência Edgecore Cassini e TIP Phoenix).
- **Controle via NETCONF/YANG:** a configuração de canais ópticos é realizada remotamente por meio de sistemas operacionais abertos (como o Goldstone ou o comercial OcNOS). A interoperabilidade de hardware de diferentes fabricantes é assegurada pela adoção da interface TAI (*Transponder Abstraction Interface*) e pelo protocolo NETCONF, permitindo o provisionamento dinâmico de circuitos ópticos via software.

Padrões, APIs e protocolos de interoperabilidade

O funcionamento de um ambiente multidomínio distribuído depende, fundamentalmente, da padronização de suas interfaces. A Tabela 1 consolida os protocolos e APIs mapeados na arquitetura para conectar as camadas de orquestração, controle e dados.

Tabela 1. Protocolos e APIs utilizados em cada domínio

Interface / API	Tipo	Domínio principal	Função na infraestrutura
-----------------	------	-------------------	--------------------------

P4Runtime	<i>Southbound</i>	Pacotes (P4)	Permite ao controlador SDN injetar dinamicamente regras de encaminhamento no silício do switch.
gRPC / REST	<i>Northbound</i>	Orquestração geral	Conecta os orquestradores de alto nível (Nephio/EMCO) aos controladores de domínio específicos.
E2 / O1 / A1	<i>Southbound / Mgmt</i>	Acesso sem fio (RAN)	Protocolos da O-RAN Alliance para telemetria de rádio, gerenciamento de falhas e políticas de IA no RIC.
NETCONF / YANG	<i>Southbound</i>	Óptico (DWDM / FTTx)	Permite a modelagem de dados e a configuração remota de parâmetros físicos nos transponders ópticos.
OpenConfig	<i>Southbound</i>	Transporte geral	Modelo de dados neutro para gerenciamento de telemetria e estado de switches de múltiplos fornecedores.

:

5. Tecnologias-alvo para experimentação

Um *testbed* de escala nacional não deve ser projetado como uma infraestrutura estática; ele precisa funcionar como um motor de evolução tecnológica capaz de antecipar e validar paradigmas digitais emergentes. A escolha das tecnologias-alvo define a relevância científica do ambiente e sua capacidade de atrair projetos de pesquisa de alta complexidade.

No desenvolvimento de infraestruturas modernas, o foco migra de componentes isolados de hardware para sistemas complexos baseados em software, inteligência artificial e alta precisão temporal.

Programabilidade de redes e abstração de infraestrutura (SDN/NFV)

O desacoplamento entre o plano de controle e o plano de dados, aliado à virtualização das funções que antes rodavam em hardware dedicado (*Network Functions Virtualization* – NFV), constitui a base de qualquer rede moderna. Em ambientes de grande escala, o maior desafio reside em gerenciar fluxos de dados de ponta a ponta, abstraindo as particularidades de domínios físicos completamente distintos.

-
- **A abordagem de referência:** o controle unificado impede que a rede seja gerida em silos tecnológicos isolados (nos quais, por exemplo, a gerência óptica não se comunica com a gerência de pacotes).
 - **A implementação no OpenRAN@Brasil:** o projeto adotou o controlador comum ONOS (*Open Network Operating System*) da ONF como o núcleo de sua inteligência de transporte. O ONOS atua de forma unificada sobre os domínios óptico e de pacotes, traduzindo intenções de conectividade de alto nível em fluxos físicos coordenados e caminhos de comutação otimizados.

Inteligência na rede de acesso de rádio (RIC e xApps)

A rede de acesso rádio (RAN) representa historicamente a camada mais cara e fechada das telecomunicações. A arquitetura Open RAN transforma esse cenário ao introduzir o Controlador Inteligente de RAN (RIC), que insere programabilidade nativa e inteligência artificial diretamente no gerenciamento do espectro e dos recursos de rádio.

- **A abordagem de referência:** o RIC é dividido em instâncias de tempo não real (Non-RT) e tempo quase-real (Near-RT). O Near-RT RIC opera em *loops* de controle de 10ms a 1s, hospedando microsserviços customizados chamados xApps.
- **A implementação no OpenRAN@Brasil:** a infraestrutura priorizou a adoção do Near-RT RIC para a execução de *xApps* inteligentes. Essas aplicações manipulam parâmetros críticos de rádio em tempo real, permitindo a validação de algoritmos preditivos baseados em Inteligência Artificial e a execução de fatiamento de rede (*network slicing*) dinâmico diretamente na interface aérea 5G.

Computação de borda de baixa latência e sincronismo temporal

Casos de uso avançados do 5G e futuros cenários do 6G (p. ex. telemedicina, automação industrial e veículos autônomos) exigem que o processamento das aplicações ocorra fisicamente próximo ao usuário final (*Edge Cloud*). Isso impõe o desafio de gerenciar nuvens distribuídas de alta performance e assegurar um sincronismo temporal perfeito entre o software e o sinal irradiado.

- **A abordagem de referência:** a computação de borda precisa balancear o tráfego pesado das antenas locais sem sobrecarregar os links de longa distância do backbone.
- **A implementação no OpenRAN@Brasil:** o ambiente integrou plataformas de processamento de borda hospedadas em máquinas virtuais (*Virtual Machines* – VMs) e trabalhou na desagregação do UPF e em seu posicionamento na borda (*local-breakout*). Essa arquitetura validou cenários de redes sem fio privadas integradas à computação de alta performance na borda. Para viabilizar a operação estável da gNodeB virtualizada, aplicou-se sincronização de precisão temporal estrita via protocolo IEEE 1588 PTP (*Precision Time Protocol*), garantindo o alinhamento de fase e tempo em nível de microssegundos entre as DUs/CUs baseadas em software e as RUs físicas.

Orquestração declarativa baseada em intenções (multi-cloud)

À medida que o *Testbed* expande seu alcance geográfico, o provisionamento manual ou por scripts imperativos tradicionais torna-se inviável. A indústria exige modelos de orquestração automatizados, nos quais o operador define apenas o estado final desejado (*intent-based*) e o sistema se encarrega de configurar a infraestrutura de forma autônoma.

- **A abordagem de referência:** a orquestração moderna deve gerenciar o ciclo de vida completo de funções de rede virtuais e aplicações containerizadas espalhadas por múltiplos *clusters* Kubernetes heterogêneos.
- **A implementação no OpenRAN@Brasil:** o programa concentrou esforços na avaliação prática de orquestradores de última geração, com destaque para o Nephio (projeto da Linux Foundation nativo em Kubernetes) e o EMCO (*Edge Multi-Cloud Orchestrator*). Esses sistemas permitiram testar o gerenciamento declarativo automatizado de fatias de rede complexas e a distribuição de *workloads* de rede através dos múltiplos sites distribuídos do projeto.

Estrutura de governança multi-institucional e grupos temáticos

Para mitigar gargalos operacionais e garantir uma resposta ágil a falhas ou demandas de customização, a estrutura administrativa do *Testbed* afasta-se de modelos centralizados. Adota-se uma parceria estratégica combinando as entidades de coordenação de rede, os centros de engenharia aplicada e as ICTs participantes.

No desenho operacional desenvolvido pelo Programa OpenRAN@Brasil, a governança do *Testbed* foi compartilhada entre o CPQD e a RNP. Para operacionalizar a infraestrutura no dia a dia, a governança foi dividida em Grupos Temáticos focados em domínios específicos de atuação, garantindo que especialistas seniores gerenciem cada camada de desagregação:

- **Domínio de *cloud*:** responsável pela manutenção preventiva e corretiva dos servidores físicos, gerenciamento dos *hypervisors* e estabilidade operacional dos *clusters* Kubernetes distribuídos.
- **Domínio de RAN/RF:** encarregado da conformidade das antenas 5G, calibração de rádio, alocação de canais e suporte técnico às pilhas de software Open RAN comerciais e abertas.
- **Domínio de pacotes:** focado no ciclo de vida dos switches programáveis P4, desenvolvimento de código para o plano de dados e estabelecimento das regras de roteamento de alto desempenho.
- **Domínio óptico / FTTx:** responsável pela integridade dos enlaces DWDM de longa distância, sustentação da ferramenta de abstração VOLTHA e testes de interoperabilidade entre OLTs e ONUs de múltiplos fornecedores.

- **Grupo de aquisições e custos:** grupo dedicado exclusivamente à gestão financeira, planejamento orçamentário e suporte à logística de importação de hardware e insumos científicos.

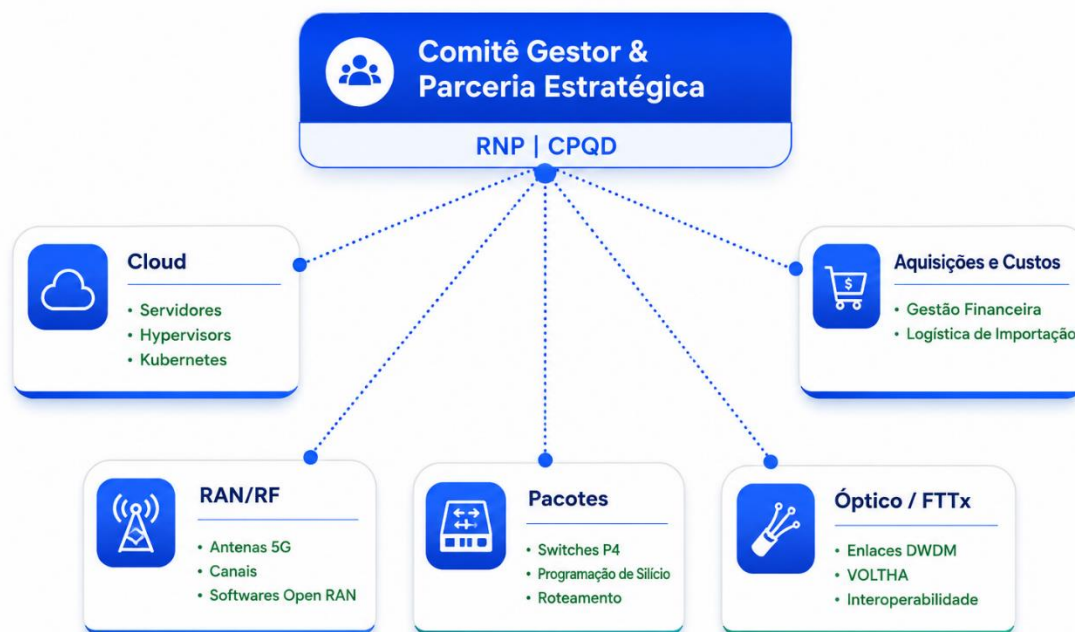


Figura 4. Organograma do modelo de governança multi-institucional e descentralizado do Testbed nacional contando com colaboradores do CPQD e da RNP

Políticas de acesso e gerenciamento descentralizado de recursos

Um *testbed* de escala nacional deve ser tratado como um bem público voltado ao desenvolvimento científico e industrial do país. Portanto, o acesso à infraestrutura deve ser ofertado de forma democratizada e transparente para o ecossistema de P&D.

- **Ecossistema autônomo via portais de autoatendimento:** o modelo operacional descarta o provisionamento manual sob demanda via chamados técnicos tradicionais, que engessam a pesquisa. Em vez disso, disponibilizam-se portais de autoatendimento onde os próprios pesquisadores e experimentadores homologados possuem autonomia para instanciar, modificar e derrubar *pods* de controle e fatias virtuais isoladas em seus respectivos escopos de teste.
- **Gestão de identidade e autenticação federada:** para simplificar o controle de acesso e garantir a rastreabilidade e segurança dos experimentos, o gerenciamento de identidade é integrado às infraestruturas de autenticação federada já consolidadas na comunidade acadêmica e de pesquisa nacional, como o serviço CAFe (Comunidade Acadêmica Federada) da RNP. Isso elimina a necessidade de criação de credenciais isoladas, permitindo que pesquisadores utilizem suas identidades institucionais nativas para acessar o ecossistema de testes de qualquer lugar do país.

Regulamentação e coordenação do espectro de radiofrequência

O teste prático de redes de rádio abertas e desagregadas (RAN) em escala física impõe um desafio regulatório crítico: a emissão de radiofrequência em canais idênticos aos utilizados pelas operadoras de telecomunicações comerciais. Sem uma coordenação estrita e amparo legal, os testes de campo correm o risco de gerar interferências prejudiciais nas redes comerciais que atendem à população civil.

Para solucionar essa barreira técnica e jurídica no âmbito do OpenRAN@Brasil, o comitê gestor do projeto articulou diretamente junto à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) a obtenção de uma outorga científica oficial para operação experimental. O projeto obteve autorização legal para utilizar a frequência de 3,7 GHz, que constitui a banda oficial de operação do 5G comercial no país. Dessa forma, todas as antenas de rádio de alta e baixa desagregação podem operar em condições eletromagnéticas reais equivalentes às do mercado, porém de forma coordenada e controlada, protegendo o ecossistema comercial contra qualquer tipo de degradação de sinal ou interferência.

Com a consolidação da governança e do modelo operacional, cobrimos os pilares administrativos e regulatórios que dão sustentação ao projeto em larga escala.

6. Casos de uso e validação

A validação técnico-operacional de uma infraestrutura experimental distribuída em grande escala não se esgota na verificação de conectividade básica ou no isolamento de seus nós. O sucesso estrutural do ambiente é ratificado pela execução de cenários de teste multidomínio integrados, capazes de estressar simultaneamente as camadas de rádio, pacotes, óptica e orquestração de nuvem sob demandas reais de tráfego e considerando a implementação prática de algoritmos de controle inteligente. Abaixo, detalham-se três casos de uso que demonstram o potencial de experimentação avançada habilitado por este modelo de arquitetura.

Caso de uso 1: Direcionamento inteligente de tráfego via xApp RIC (Traffic Steering)

A otimização de recursos de rádio em redes celulares tradicionais baseia-se em parâmetros estáticos e decisões locais e reativas tomadas diretamente na antena. O paradigma Open RAN altera essa dinâmica ao expor o controle do rádio a algoritmos externos de malha fechada.

- **O desafio tecnológico:** criar um mecanismo capaz de mitigar a sobrecarga de células e prever a degradação do sinal de usuários em movimento antes que ocorra a perda de pacotes.
- **A validação no OpenRAN@Brasil:** foi desenvolvida e homologada uma aplicação inteligente denominada xApp de *Traffic Steering* (TS). Este xApp conecta-se via interface padronizada E2 ao controlador inteligente de rádio em nível próximo ao tempo real (Near-RT RIC). A aplicação coleta métricas contínuas de telemetria e comanda a execução

automática de *handover* (troca de célula de um dispositivo móvel) com base no monitoramento preditivo da carga das células, otimizando de forma proativa a Qualidade da Experiência (QoE) do usuário final.

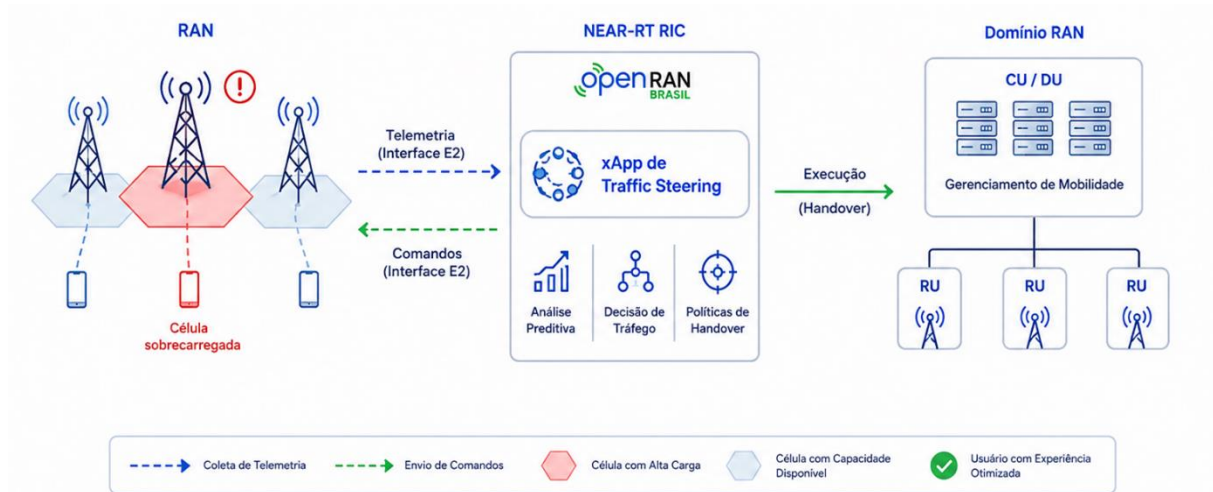


Figura 5. Ilustração descrevendo o caso de uso de direcionamento inteligente de tráfego via xApp

Caso de uso 2: Aprovisionamento automatizado e interoperável FTTx multivendor

O mercado de redes de acesso óptico fixo sofre historicamente com a falta de interoperabilidade dos sistemas de gerência. As operadoras frequentemente ficam impedidas de combinar equipamentos de fornecedores distintos em uma mesma rede em razão da incompatibilidade dos protocolos de gerência de hardware.

- **O desafio tecnológico:** demonstrar que um plano de controle unificado, desagregado do hardware e baseado em software, pode gerenciar de forma transparente módulos ópticos de múltiplos fornecedores e *chipsets* distintos.
- **A validação no OpenRAN@Brasil:** o ambiente utilizou a ferramenta de abstração de hardware VOLTHA para realizar o controle e o provisionamento de múltiplos usuários em cenários de coexistência tecnológica (GPON e XGS-PON) sob uma mesma infraestrutura de fibra óptica operando em um cenário *multivendor*. Os testes indicaram que o sistema de gerência unificado foi capaz de controlar e supervisionar ONUs de marcas e chips distintos sob uma OLT de outro fabricante. Esse processo utilizou adaptadores de software abertos conhecidos como *Open-OLT drivers*, comprovando a viabilidade de redes ópticas de acesso independentes de fornecedores específicos.

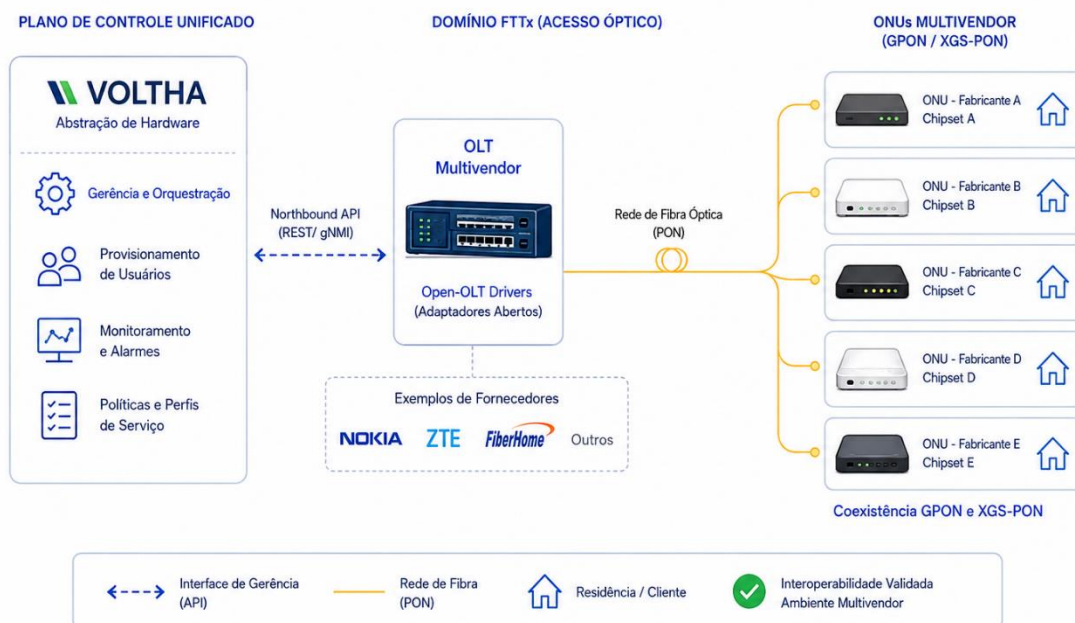


Figura 6. Ilustração descrevendo o caso de uso de aprovisionamento automatizado e interoperável FTTx multivendor

Caso de uso 3: Orquestração fim a fim de redes privadas com UPF offload

A convergência total entre a nuvem e a infraestrutura de telecomunicações exige que serviços de rede complexos (como o core de uma rede móvel privada) sejam instanciados e otimizados automaticamente em nível de hardware, sem intervenção humana manual.

- **O desafio tecnológico:** orquestrar o ciclo de vida de uma rede 5G privada e, ao mesmo tempo, otimizar o roteamento físico para que o tráfego pesado de dados não sobrecarregue os servidores de aplicação da borda.
- **A validação no OpenRAN@Brasil:** demonstrou-se a instanciação completamente automatizada de uma rede celular de borda (baseada na plataforma Aether) por meio dos orquestradores de última geração Nephio e EMCO. O fluxo declarativo configurou a pilha móvel e instruiu os switches programáveis P4 a interceptarem o tráfego de dados dos terminais locais. A função de plano de usuário (UPF) foi descarregada diretamente no silício do switch (*UPF offload*), encaminhando os pacotes para a rede de dados de destino em "caminho rápido" via hardware. O experimento serviu como prova de conceito bem-sucedida de um plano de controle hospedado em nuvem operando de forma integrada a um plano de dados de altíssimo desempenho otimizado em silício.

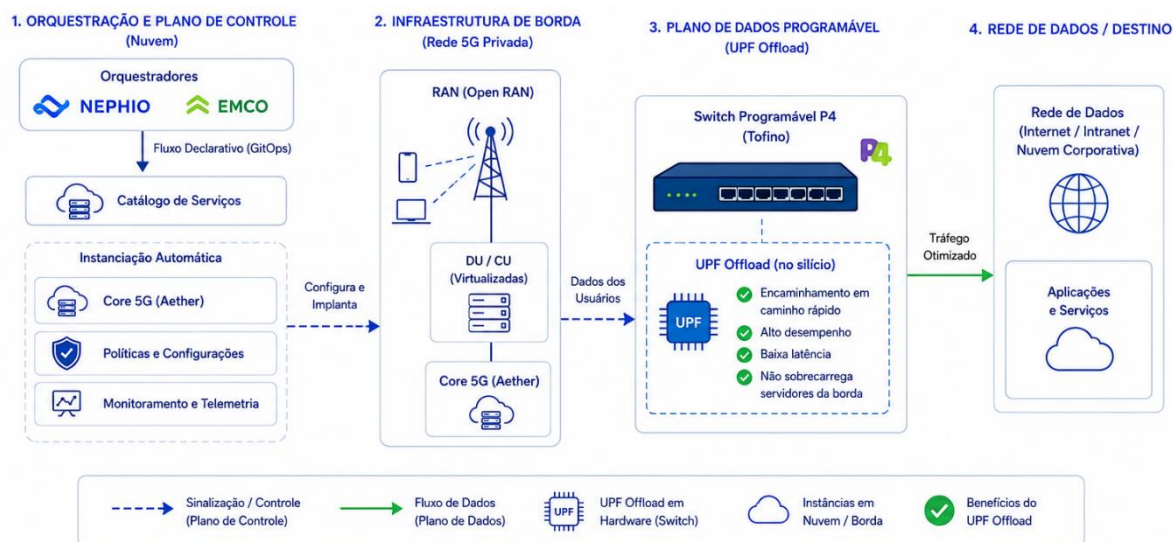


Figura 7. Ilustração descrevendo o caso de uso de orquestração fim a fim de redes privadas com UPF offload

7. Benefícios esperados

A implantação de um *testbed* distribuído em escala nacional deve ser encarada como um investimento estruturante de alto retorno estratégico. Ao fornecer um ambiente real de validação e desenvolvimento, o projeto gera impactos duradouros na economia, na formação técnica e na soberania tecnológica do país.

Os retornos esperados consolidam-se em quatro frentes de impacto prioritárias:

Consolidação da soberania tecnológica e redução do vendor lock-in

A dependência de fornecedores multinacionais fechados expõe as infraestruturas de telecomunicações nacionais a riscos geopolíticos, políticas de preços unilaterais e vulnerabilidades de segurança de código fechado.

- **O impacto estratégico:** a desagregação entre hardware e software e o uso de interfaces abertas mitigam o aprisionamento tecnológico (*vendor lock-in*).
- **A contribuição do Testbed:** o ambiente aberto permite auditar, modificar e controlar diretamente a inteligência da rede. Sob o pano de fundo do Programa OpenRAN@Brasil, este modelo assegura que o país adquira autonomia científica e produtiva sobre as tecnologias críticas do futuro, garantindo que as decisões de evolução da infraestrutura digital respondam aos interesses nacionais e não a políticas comerciais de fabricantes estrangeiros.



Otimização econômica: redução de CapEx/OpEx e aceleração do time-to-market

A introdução de novos produtos e serviços de conectividade no mercado tradicional exige investimentos massivos em laboratórios de teste proprietários e longos ciclos de homologação, o que sufoca o surgimento de novos atores.

- **O impacto estratégico:** a mudança para hardwares de propósito geral (*white-boxes*) e o compartilhamento de uma infraestrutura pública de testes reduzem sensivelmente os custos de capital (CapEx) e operacionais (OpEx) para novas implantações.
- **A contribuição do Testbed:** ao disponibilizar um ecossistema nacional compartilhado, *startups*, integradores locais e operadoras podem testar, estressar e validar novos sistemas em escala real sem a necessidade de replicar infraestruturas caras. Isso acelera drasticamente o tempo de chegada das inovações ao mercado (*time-to-market*), viabilizando novos modelos de negócios eficientes e competitivos.



Formação e retenção de capital humano

Existe um desafio global de profissionais qualificados capazes de operar na interseção entre engenharia de telecomunicações e arquiteturas de nuvem (*cloud-native*). A falta de acesso a equipamentos de última geração nas universidades frequentemente limita a formação ao campo teórico.

- **O impacto estratégico:** a capacitação prática em uma infraestrutura avançada e real de pesquisa e desenvolvimento (P&D) prepara engenheiros e cientistas para os cenários mais complexos da indústria moderna.
- **A contribuição do Testbed:** no âmbito do OpenRAN@Brasil, estudantes, pesquisadores e engenheiros de centros parceiros têm acesso direto a switches P4, transponders ópticos abertos e pilhas desagregadas de rádio 5G. Essa imersão prática permite qualificar e reter profissionais em níveis de excelência, tornando-os aptos a liderar projetos de redes abertas, computação de borda e orquestração automatizada de nuvem, preenchendo uma lacuna crítica de talentos no ecossistema nacional.



Estímulo à cadeia de suprimentos local e inovação aberta

A arquitetura proprietária tradicional atua como uma barreira de entrada intransponível para a indústria nacional de software e hardware, uma vez que soluções locais não conseguem interoperar com ecossistemas fechados dos grandes OEMs.

- **O impacto estratégico:** a padronização global de APIs e interfaces abertas cria um modelo de interoperabilidade estilo *plug-and-play*, abrindo mercados competitivos baseados no mérito técnico da solução.
- **A contribuição do Testbed:** o *Testbed* estimula ativamente as ICTs brasileiras, indústrias de hardware e *startups* a cooperarem no desenvolvimento de novas funções de rede virtuais, módulos de software e xApps inteligentes. Como a infraestrutura valida a conformidade dessas soluções com os padrões internacionais da O-RAN Alliance e da ONF, o ecossistema ganha a oportunidade não apenas de integrar seus produtos à infraestrutura nacional, mas também de exportar hardware e software nacionais para sistemas globais desagregados.



8. Desafios e considerações

A implementação e a sustentabilidade operacional de um *testbed* distribuído em escala nacional impõem desafios complexos que vão além da conectividade básica. Tratar a infraestrutura como um ecossistema aberto e desagregado introduz variáveis de instabilidade, logística e integração que exigem planejamento preventivo rigoroso por parte do comitê gestor.

Abaixo, são analisados os três gargalos críticos identificados na prática para a consolidação desse ambiente de experimentação.

Maturidade das soluções de código aberto (*open source*)

Embora o movimento global de desagregação seja impulsionado pelo ecossistema *open-source*, há uma disparidade significativa entre as especificações teóricas dos consórcios e a maturidade real dos blocos de software disponíveis para implantação.

- **O desafio técnico:** muitos componentes essenciais (principalmente as pilhas de RAN, RIC e os orquestradores de última geração, como o Nephio) ainda se encontram em estágios de maturação intermediária ou de desenvolvimento ativo. A ausência de documentação completa e unificada e a presença de *bugs* estruturais dificultam a sua adoção direta em ambientes que exigem alta disponibilidade.

-
- **A lição do OpenRAN@Brasil:** o projeto detectou que o uso dessas ferramentas abertas exige um esforço considerável de engenharia local e customização laboratorial. Foi necessário dedicar equipes especializadas para realizar correções de código, garantir a estabilidade das pilhas, identificar limitações de funcionalidades e implementar mecanismos de tolerância a falhas que permitissem aos experimentadores executar seus testes sem interrupções constantes causadas por instabilidades nativas do software.

Gargalos logísticos e custos de aquisição de hardware especializado

Por se tratar de um ecossistema voltado à fronteira tecnológica, o *Testbed* depende fundamentalmente de componentes de hardware altamente especializados que, em sua grande maioria, não possuem fabricação ou substitutos no mercado interno.

- **O desafio técnico:** equipamentos como switches programáveis baseados no *chipset* Intel Tofino, servidores de borda com alta capacidade e transponders ópticos reconfiguráveis de alta capacidade de transmissão demandam processos de importação complexos. Essa dependência expõe o planejamento do projeto a riscos severos de atrasos alfandegários, volatilidade cambial e barreiras tarifárias inflacionárias que podem comprometer o orçamento planejado.
- **A lição do OpenRAN@Brasil:** para mitigar os impactos financeiros e os atrasos na entrega de equipamentos, o comitê gestor estruturou uma estratégia de aquisição baseada nos regimes de cota especial de importação de bens destinados à pesquisa científica, conforme regulamentado pela Lei Federal nº 8.010/1990. O uso desses mecanismos legais de isenção tributária foi um fator crítico para viabilizar financeiramente a expansão física do *Testbed* dentro das metas orçamentárias estabelecidas.

Complexidade de integração e orquestração multidomínio fim a fim

O princípio fundamental da desagregação baseia-se em quebrar a rede em blocos; contudo, o desafio científico subsequente reside em como combinar esses blocos de forma coesa por meio de um plano de controle unificado.

- **O desafio técnico:** controlar isoladamente o domínio de rádio, o plano de pacotes ou o transporte óptico já envolve altos níveis de complexidade. No entanto, orquestrar de forma automatizada o ciclo de vida completo de um circuito de ponta a ponta (garantindo que uma requisição na camada de aplicação configure simultaneamente as regras P4 nos switches, os comprimentos de onda nos transponders DWDM e o fatiamento de espectro nas antenas 5G) continua sendo uma fronteira de investigação em aberto tanto na academia quanto na indústria.
- **A lição do OpenRAN@Brasil:** o ambiente técnico exige o mapeamento e o desenvolvimento contínuo de interfaces norte-sul (*Northbound* e *Southbound*) robustas, além do desenho de APIs de *gateway* padronizadas. A integração bem-sucedida requer uma modelagem de dados unificada (como modelos baseados em YANG) para garantir que a tradução de intenções de alto nível não gere conflitos de provisionamento ou inconsistências de estado entre as diferentes camadas físicas da rede distribuída.

9. Metodologia de implantação e indicadores de sucesso (KPIs)

A construção de uma infraestrutura experimental distribuída em escala nacional não deve ocorrer em uma única etapa, sob o risco de inviabilizar o projeto devido ao acúmulo de dificuldades de integração, falhas de software e atrasos logísticos.

Estágios de desenvolvimento da infraestrutura

- **Estágio inicial – Pré-Testbed virtualizado e simulação (curto prazo):** antes de aportar investimentos na aquisição e instalação de grandes quantidades de hardware físico, a prioridade concentra-se no planejamento e mapeamento da infraestrutura. Nesta etapa, alocam-se máquinas virtuais (VMs) na infraestrutura de TI já existente das instituições parceiras para criar um laboratório virtual simulado. Esse ambiente inicial serve para instalar, configurar e validar os primeiros roteiros operacionais de cada domínio técnico. Na experiência prática do OpenRAN@Brasil, esta etapa permitiu antecipar e identificar conflitos de dependência de software e calibrar as versões estáveis do VOLTHA, ONOS, SD-RAN, srsRAN, Aether e dos orquestradores em *clusters* Kubernetes minimalistas, gerando uma linha de base estável antes do comissionamento físico.
- **Estágio intermediário – Implantação e validação física (médio prazo):** com a estabilização das pilhas lógicas de controle, o roteiro avança para a transição para o plano físico real. Os equipamentos definitivos de computação (servidores de alta densidade), transporte de pacotes (switches programáveis P4), transporte óptico (transponders DWDM) e acesso rádio (antenas 5G *indoor*) são instalados fisicamente em seus respectivos racks nos hubs regionais. Realiza-se a interconexão física entre os elementos locais e os circuitos de longa distância. No OpenRAN@Brasil, o foco desta etapa concentrou-se na execução de testes de cobertura de radiofrequência (RF) em campo e na validação da estabilidade elétrica e de rede do hardware instalado, garantindo o pleno alinhamento físico com os parâmetros definidos pelo comitê gestor.
- **Estágio avançado – Customização, casos de uso e integração multidomínio (longo prazo):** com a malha de hardware e software operando de forma estável, a infraestrutura atinge sua maturidade operacional, deslocando o foco da engenharia de base para a experimentação avançada. Implantam-se os orquestradores de última geração (Nephio e EMCO) dedicados ao gerenciamento declarativo automatizado das fatias de rede. O ambiente passa a suportar experimentações de ponta a ponta complexas por parte dos usuários finais. Esta etapa consolida a validação de xApps inteligentes, testes integrados de verticais de cidades inteligentes distribuídas e a abertura plena do ecossistema *para* cooperação ativa com ICTs externas, operadoras de telecomunicações e empresas do setor tecnológico, consolidando o ecossistema nacional de inovação aberta.

Indicadores-chave de desempenho (KPIs)

Para guiar o comitê gestor, as agências reguladoras e as entidades financiadoras na avaliação contínua do retorno do investimento e da eficiência operacional do *Testbed*, devem ser monitorados os seguintes Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs):

- **Nível de interoperabilidade *multivendor*:** mede a quantidade de equipamentos físicos de acesso (como ONUs no domínio óptico e RUs no domínio sem fio) de fabricantes e marcas comerciais distintas operando de forma perfeitamente coordenada sob o comando do mesmo plano de controle aberto e unificado.
- **Tempo médio de provisionamento fim a fim:** monitora a agilidade e a eficiência da automação do *Testbed*, mensurando o intervalo de tempo necessário para configurar e ativar circuitos multidomínio complexos via software a partir de uma requisição de alto nível feita pelo experimentador.
- **Volume de experimentação científica multidistribuída:** avalia o impacto e a atratividade do *Testbed* no ecossistema de P&D, contabilizando o número de universidades, centros de pesquisa, ICTs e empresas privadas ativamente conectadas e consumindo recursos ou instanciando fatias virtuais de teste na infraestrutura distribuída e avançando o estado da arte no tema.
- **Vazão e eficiência de tráfego (UPF *offload*):** mede o desempenho técnico da camada programável de pacotes, calculando o percentual de tráfego de dados do plano de usuário do *core* móvel, que é interceptado e desviado com sucesso diretamente pelo silício dos switches programáveis P4 (UPF *offload*), sem consumir ciclos de CPU dos servidores de nuvem de borda.

10. O caminho pela frente: expansão nacional e maturação de aplicações

A consolidação dos estágios de engenharia e das diretrizes de governança descritas nas seções anteriores fornece o alicerce necessário para que o ecossistema experimental avance rumo à sua escala definitiva. Longe de se restringir a um ambiente confinado de laboratório, o verdadeiro teste de estresse de uma infraestrutura aberta e desagregada ocorre ao confrontá-la com a diversidade geográfica e com as demandas das cadeias produtivas reais do país.

A estratégia de interiorização e as ilhas de experimentação

O desdobramento prático dessa metodologia orienta as diretrizes da Fase 3 do Programa OpenRAN@Brasil, cujas atividades têm previsão de execução contínua até março de 2028. O objetivo central desta etapa é descentralizar a inovação por meio da implantação de laboratórios

de teste distribuídos, conhecidos como ilhas de experimentação, em todas as cinco macrorregiões do território nacional (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul).

Essas ilhas regionais funcionarão como polos locais de difusão tecnológica, acelerando a adoção do paradigma de redes abertas e permitindo testes em cenários diversificados e reais. A interconexão de longa distância entre esses novos nós distribuídos apoia-se diretamente no Backbone óptico de alta capacidade da RNP.

O benchmark técnico e ponto de prova para essa malha nacional reside no sucesso obtido no teste de interconexão distribuída a 600 km entre Campinas (CPQD) e Rio de Janeiro (RNP). Esse experimento comprovou a viabilidade de manter taxas estáveis de transferência de 1 Gbps e latência fim a fim de 18 ms mesmo em redes geograficamente desagregadas, demonstrando de forma conclusiva que a distância não degrada o desempenho da arquitetura Open RAN.

A Figura 8 mostra o mapa com as Ilhas selecionadas para participarem do Programa OpenRAN@Brasil na Fase 3. O mapa está disponível online [14] e, ao clicar em cada ilha, é exibido um pop-up descrevendo a aplicação selecionada.

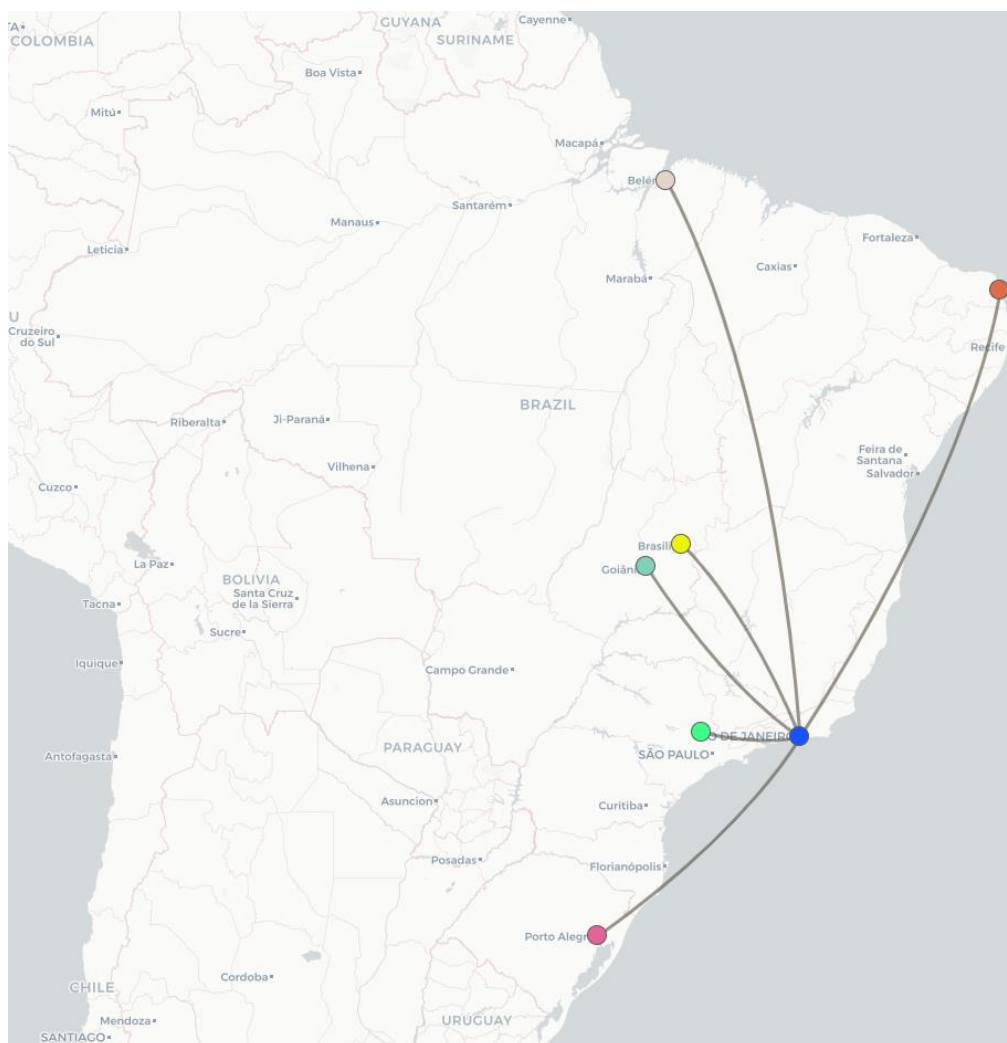


Figura 8. Mapa das ilhas e aplicações do OpenRAN@Brasil Fase 3 [14]

Validação de verticais de mercado e redes privadas 5G

Com a viabilidade técnica da arquitetura e os requisitos de soberania em hardware devidamente fundamentados – frutos da consolidação do software na Fase 1 e do desenvolvimento do protótipo nacional da Unidade de Rádio (O-RU) 5G na Fase 2 –, o foco estratégico do programa migra da validação estrita em laboratório para a transformação real do mercado de telecomunicações.

A flexibilidade, a programabilidade e as funcionalidades avançadas do 5G Open RAN, como o fatiamento de rede (*network slicing*) e a inteligência baseada em aplicativos do RIC, serão exercitadas de forma prática em setores verticais críticos para a economia brasileira:

- **Indústria 4.0 e logística:** aplicação de comunicações em tempo real e fatiamento de rede para otimizar a conectividade de câmeras de segurança, sistemas de visão computacional e robôs móveis autônomos dentro do ambiente fabril.
- **Agricultura digital (Agro 4.0):** validação de conectividade robusta no campo para acelerar o processamento de dados e o treinamento de modelos de Inteligência Artificial voltados à análise de lavouras e manejo agrícola.
- **Saúde, educação e cidades inteligentes (*smart cities*):** ativação de soluções inteligentes e monitoramento preditivo para segurança do trabalho e serviços urbanos descentralizados.

O amadurecimento dessas soluções em cenários reais reduz significativamente o risco percebido pelas operadoras comerciais, mitigando o ceticismo sobre a paridade de desempenho e estimulando a indústria nacional a se posicionar como fornecedora global de componentes de alto valor agregado para o ecossistema de redes abertas.

11. Considerações finais

A construção e operacionalização do *Testbed* nacional consolidam um marco transformador para o setor de telecomunicações, demonstrando a viabilidade prática de romper com o modelo tradicional de arquiteturas proprietárias e fechadas (*vendor lock-in*). Ao unificar horizontalmente os domínios de rádio (RAN), comutação de pacotes programáveis (P4) e transporte óptico (DWDM/FTTx) sob um plano de controle centralizado baseado em software, a infraestrutura supera os silos tecnológicos históricos. Apesar dos desafios inerentes à maturação de soluções de código aberto e aos complexos gargalos logísticos de importação de hardware especializado, o ambiente experimental prova que a desagregação geográfica é perfeitamente capaz de manter altos níveis de desempenho e fidelidade empírica, assegurando a autonomia científica e a soberania digital do país.

Com o horizonte estratégico estendido até março de 2028 na Fase 3 do Programa OpenRAN@Brasil, o caminho à frente direciona-se para a descentralização da inovação por meio de ilhas de experimentação distribuídas pelas cinco macrorregiões do território nacional, interconectadas pelo Backbone óptico de alta capacidade da RNP. Esse desdobramento permitirá transpor os testes laboratoriais para a validação prática em cenários reais e setores verticais críticos da economia brasileira, como a Indústria 4.0, o Agro 4.0, a saúde, a educação e as cidades inteligentes. Dessa forma, o *Testbed* transcende a função de um laboratório compartilhado

tradicional, estabelecendo-se como um motor neutro de inovação aberta qualificado para capacitar e reter capital humano, mitigar os riscos de adoção de redes abertas para operadoras comerciais e impulsionar a competitividade da cadeia de suprimentos local no cenário global.

Referências

- [1] DEUTSCHE TELEKOM; ORANGE; TELEFÓNICA; TIM; VODAFONE. Building an Open RAN ecosystem for Europe. Joint Operator White Paper, 2021.
- [2] GAVRILOVSKA, Liljana; RAKOVIC, Valentin; DENKOVSKI, Daniel. From Cloud RAN to Open RAN. **Wireless Personal Communications**, v. 113, n. 3, p. 1523–1539, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07231-3>.
- [3] I14Y LAB CONSORTIUM. **i14y Lab**: accelerating time to market for disaggregated network components. Berlim: Deutsche Telekom; i14y Lab, 2023. Disponível em: <https://www.i14y-lab.com/>. Acesso em: 21 ago. 2026.
- [4] DIGITAL CATAPULT; OFCOM. **SONIC Labs Annual Report 2023/24**: driving open network innovation and diversification in the UK. Londres: Digital Catapult, 2024. Disponível em: <https://www.digicatapult.org.uk/programmes/programme/sonic-labs/>. Acesso em: 21 ago. 2026.
- [5] POLESE, Michele *et al.* Colosseum: the Open RAN digital twin. **IEEE Open Journal of the Communications Society**, Piscataway, v. 5, p. 5452-5466, ago. 2024. DOI: 10.1109/OJCOMS.2024.3447472.
- [6] O-RAN ALLIANCE. **O-RAN Alliance: Towards an Open and Smart RAN**. [S. l.]: O-RAN Alliance, c2026. Disponível em: <https://www.o-ran.org>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- [7] OPEN NETWORKING FOUNDATION. **Open Networking Foundation (ONF) website**. Palo Alto: ONF, c2024. Disponível em: <https://opennetworking.org>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- [8] TELECOM INFRA PROJECT. **Telecom Infra Project (TIP)**. [S. l.]: TIP, c2026. Disponível em: <https://telecominfraproject.com>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- [9] LINUX FOUNDATION. **The Linux Foundation Projects: CNCF, Akraino and Anuket**. San Francisco: Linux Foundation, c2026. Disponível em: <https://www.linuxfoundation.org>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- [10] REDE NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA (RNP); CPQD. **Programa OpenRAN@Brasil**: ambiente de experimentação avançado para redes abertas: chamada pública e termos de referência MCTI/RNP. [S. l.]: RNP; CPQD, 2021.
- [11] OPENRAN@BRASIL. **OpenRAN@Brasil oferece minicurso no CSBC 2023**. [S. l.]: OpenRAN@Brasil, 2023. Disponível em: <https://openranbrasil.org.br/openranbrasil-oferece-minicurso-no-csbc-2023/>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- [12] OPENRAN@BRASIL. **Conhecimento**. [S. l.]: OpenRAN@Brasil, c2026. Disponível em: <https://openranbrasil.org.br/conhecimento/>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- [13] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL (EMBRAPII). **Laboratório instalado no CPQD é o primeiro centro de testes e integração em Open RAN**

credenciado no Hemisfério Sul. Brasília: EMBRAPII, 2023. Disponível em: <https://embrapii.org.br/laboratorio-instalado-no-cpqd-e-o-primeiro-centro-de-testes-e-integracao-em-open-ran-credenciado-no-hemisferio-sul/>. Acesso em: 6 jul. 2026.

[14] REDE NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA (RNP). **Mapa das Ilhas e Aplicações do OpenRAN@Brasil Fase 3.** [S. l.]: RNP, 2026. Disponível em: <https://openran.mapa.rnp.br/>. Acesso em: 25 ago. 2026.



EXECUÇÃO



COORDENAÇÃO



ORGANIZAÇÃO

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

