

*I Workshop de Formação em Redes Abertas
17 e 19 de dezembro de 2024 - RNP*

Redes Abertas Programáveis: Experiências e Lições Aprendidas da Emulação à Implantação

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Departamento de Informática

magnos.martinello@ufes.br

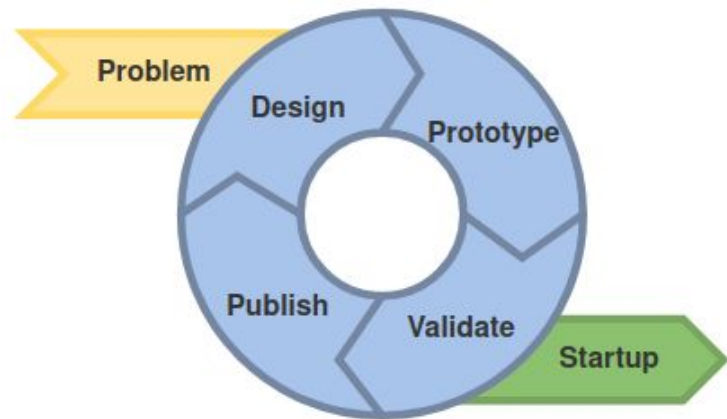
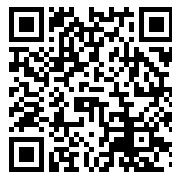
Foto no SBRC 2024

- Programa de Pós-Graduação em Informática (UFES)
- **Linha: Redes de computadores e multimídia**



LabNERDS: Núcleo de Estudos em Redes Definidas por SW

- **Missão:** Inovar em sistemas de rede
- **Áreas:** SDN, NFV, redes autônomas, ...



Agenda

- Evolução da conectividade
 - Gerações, Desempenho, Programabilidade, Interação
 - O que são redes abertas programáveis?
 - Tendências de Softwarização
- A nossa experiência no Lab NERDS :-)
 - Como prototipar soluções com redes programáveis?
 - IA e redes programáveis podem ser combinadas para impulsionar protocolos/padrões em redes abertas ?
 - Implantação de protocolo de roteamento ciente de caminhos

Evolução das Redes : Épocas e suas tecnologias

Época	Tecnologias, aplicações e protocolos	Latência	Largura de Banda
1	FTP, E-mail, Telnet	100 ms	64 Kbps
2	RPC, Computação Cliente/Servidor	10 ms	10 Mbps
3	HTTP, HPC	1 ms	100 Mbps - 1 Gbps
4	Busca na Web, Serviços em Escala Planetária	100 μ s	10 Gbps
5	Aprendizado de Máquina, Computação Centrada em dados	10 μ s	200+ Gbps - 1 Tbps

Evolução das Redes : Desempenho



10 x banda
1/10 latência por época

Época	Tecnologias, aplicações e protocolos	Latência	Largura de Banda
1	FTP, E-mail, Telnet	100 ms	64 Kbps
2	RPC, Computação Cliente/Servidor	10 ms	10 Mbps
3	HTTP, HPC	1 ms	100 Mbps - 1 Gbps
4	Busca na Web, Serviços em Escala Planetária	100 μ s	10 Gbps
5	Aprendizado de Máquina, Computação Centrada em dados	10 μ s	200+ Gbps - 1 Tbps

Evolução das Redes : Formas de Interação

Pessoas com computadores

Computadores com computadores

Serviços com serviços

Pessoas com pessoas

Pessoas com "Insights" (visões, entendimentos, percepções, análises, reflexões)

Época	Tecnologias, aplicações e protocolos	Latência	Largura de Banda
1	FTP, E-mail, Telnet	100 ms	64 Kbps
2	RPC, Computação Cliente/Servidor	10 ms	10 Mbps
3	HTTP, HPC	1 ms	100 Mbps - 1 Gbps
4	Busca na Web, Serviços em Escala Planetária	100 μ s	10 Gbps
5	Aprendizado de Máquina, Computação Centrada em dados	10 μ s	200+ Gbps - 1 Tbps

Evolução das Redes : Programabilidade

Época	Tecnologias, aplicações e protocolos	Latência	Largura de Banda
1	FTP, E-mail, Telnet	100 ms	64 Kbps
2	RPC, Computação Cliente/Servidor	10 ms	10 Mbps
3	HTTP, HPC	1 ms	100 Mbps - 1 Gbps
4	Busca na Web, Serviços em Escala Planetária	100 μ s	10 Gbps
5	Aprendizado de Máquina, Computação Centrada em dados	10 μ s	200+ Gbps - 1 Tbps

Programabilidade de Redes:

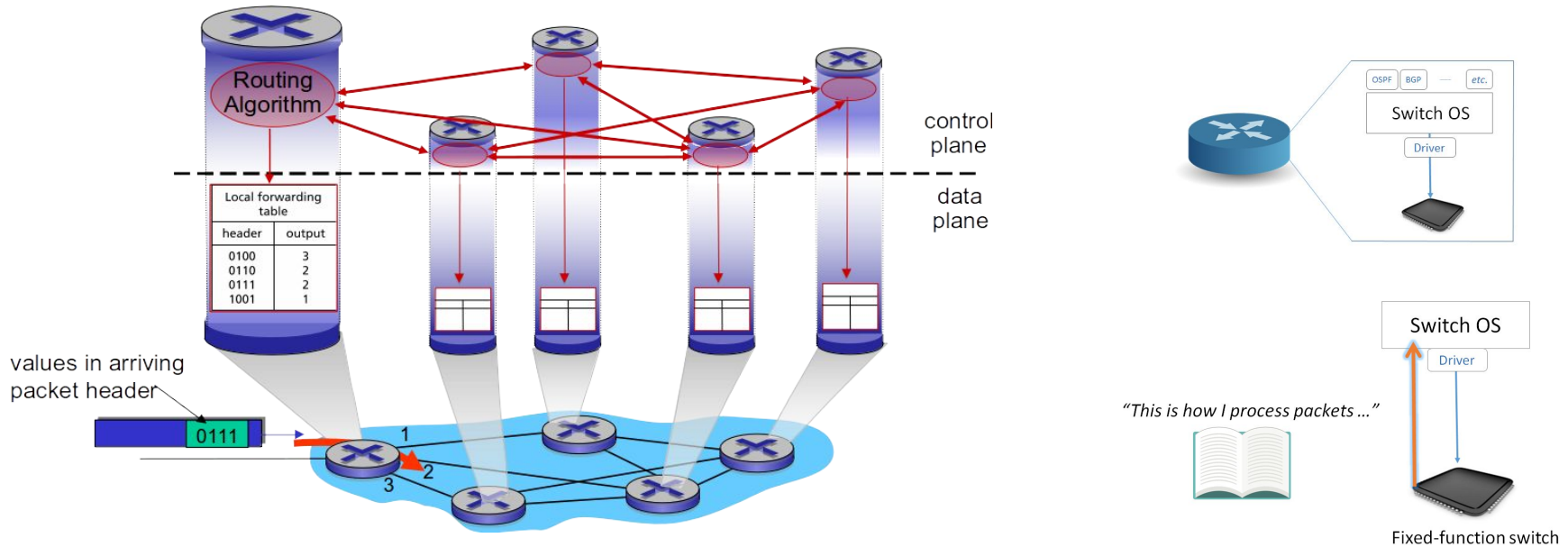
- Pilha de protocolo de redes programável
- Caixas foram “abertas” para novas propostas/soluções
- SDN, P4, INT

Agenda

- Evolução da conectividade
 - Gerações, Desempenho, Programabilidade, Interação
 - O que são redes abertas programáveis?
 - Tendências de Softwarização
- A nossa experiência no Lab NERDS :-)
 - Como prototipar soluções com redes programáveis?
 - IA e redes programáveis podem ser combinadas para impulsionar protocolos/padrões em redes abertas ?
 - Implantação de protocolo de roteamento ciente de caminhos

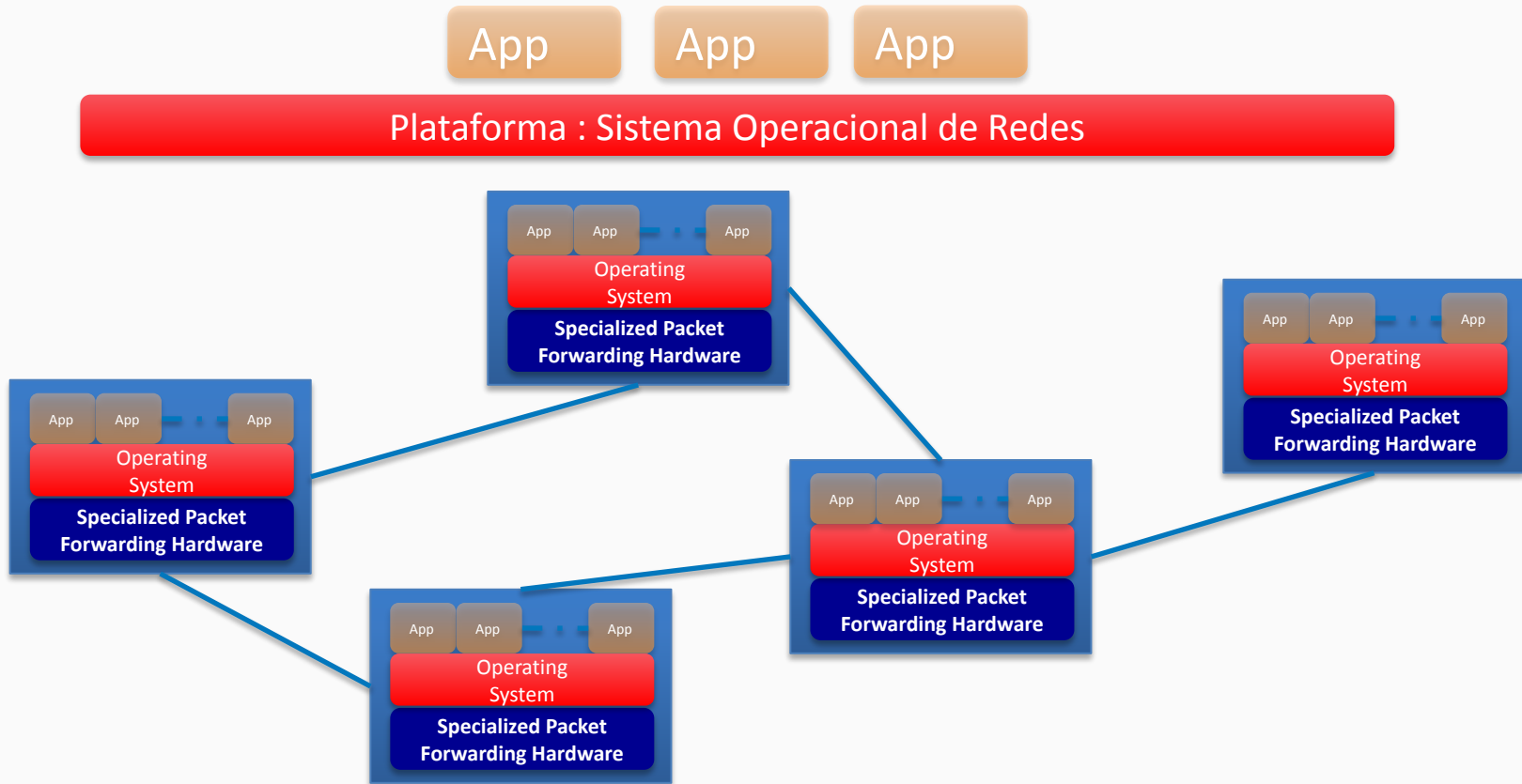
Redes Tradicionais

- Equipamento de rede contém tanto o plano de controle quanto o de dados.

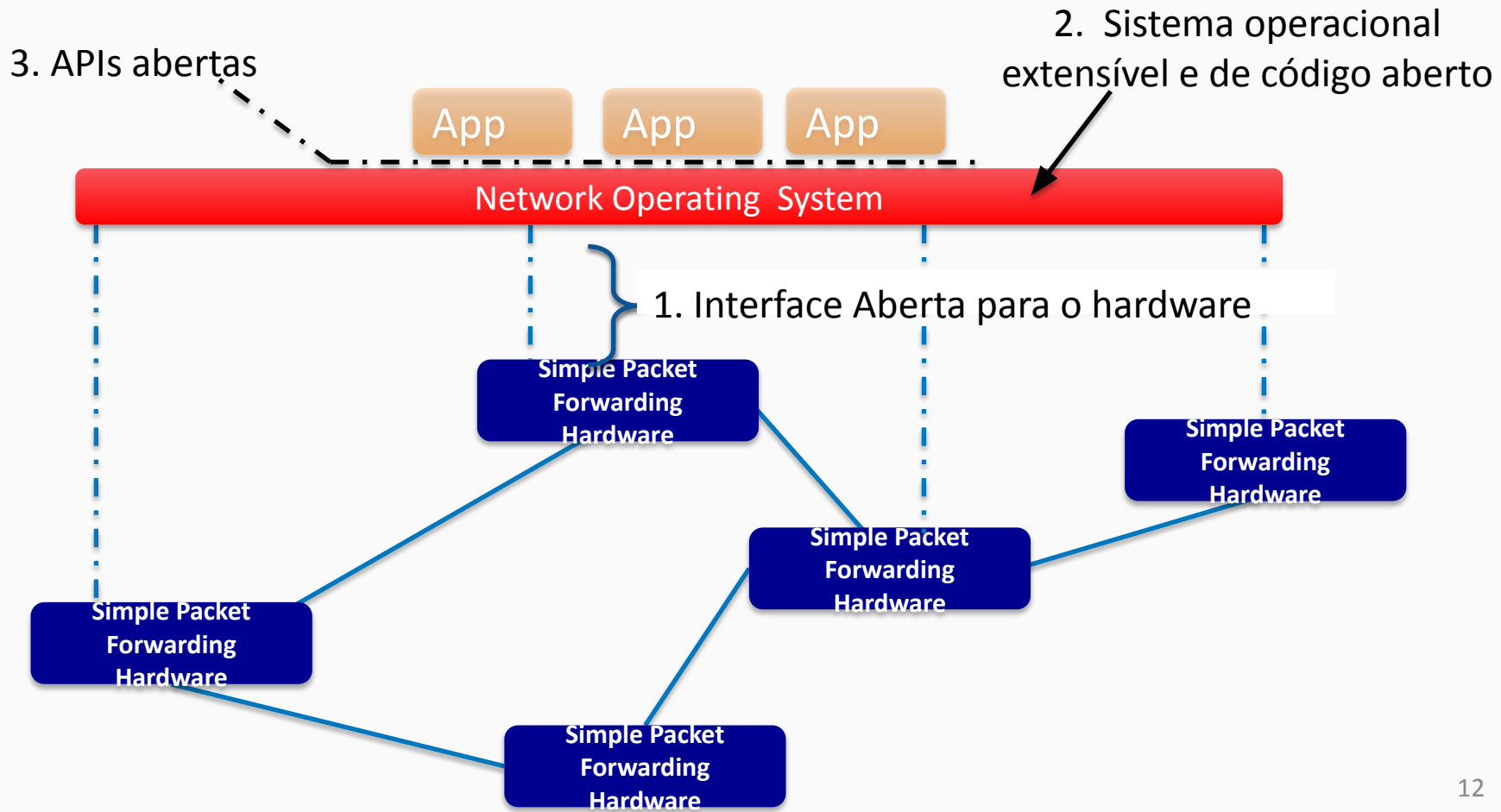


Source: Jim Kurose and Keith Ross, "Computer Networking: A Top Down Approach", 7th edition, Pearson/Addison Wesley, 2016. All material copyright 1996-2016, J.F Kurose and K.W. Ross, All Rights Reserved.

Abrindo as caixas : Redes Definidas por Software



Rede Definida por Software

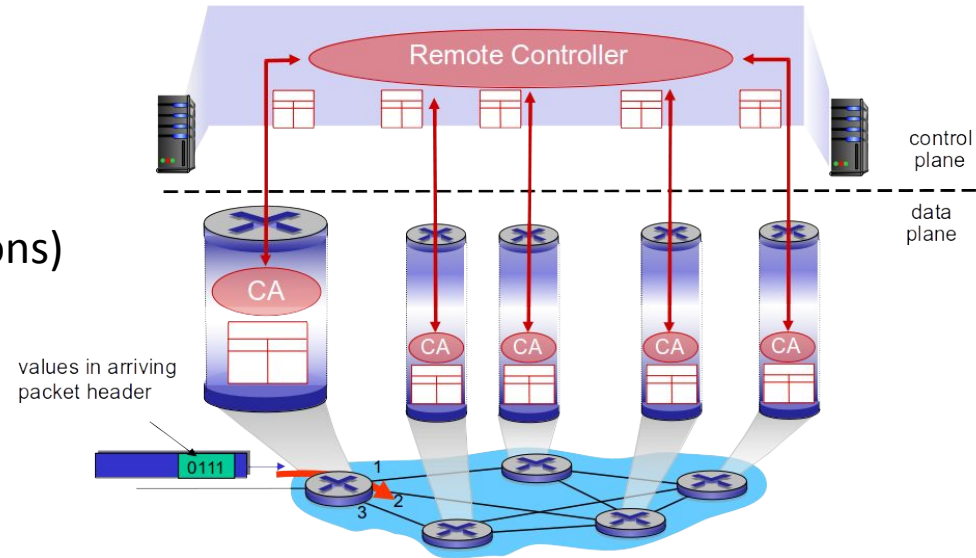


1ª geração SDN: Abertura do plano de dados não programável

- **Software-defined networking (SDN): Redes definidas por software**

- Separa planos de controle e dados.
- Um controlador (logicamente) centralizado interage com agentes locais nos roteadores.
- Plano de dados fixo (match & actions)

wildcards			
in_port		dl_src	
dl_dst			dl_vlan
dl_pcp	pad	dl_type	
nw_tos	nw_prot	pad	
nw_src			
nw_dst			
tp_src	tp_dst		



2ª geração SDN: Plano de dados programável

Linguagem específica para processamento de pacotes P4

"This is how I process packets ..."



Switch OS

Driver



Fixed-function switch

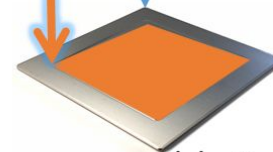
"This is precisely how you must process packets"

```
table int_table {
  reads {
    ip_protocol;
  }
  actions {
    export_queue_latency;
  }
}

action export_queue_latency (sv_id) {
  add_header(int_header);
  modify_field(int_header.action, TCP_OPTION_INT);
  modify_field(int_header.len, TCP_OPTION_INT_LEN);
  modify_field(int_header.sw_id, sv_id);
  modify_field(int_header.q_latency,
    intrinsic_metadata.qec_time_delta);
  add_to_field(tcp_metadata.offset, 2);
  add_to_field(ipv4.total_len, 8);
  subtract_from_field(ipv6_metadata.tcp_length,
    12);
}
```

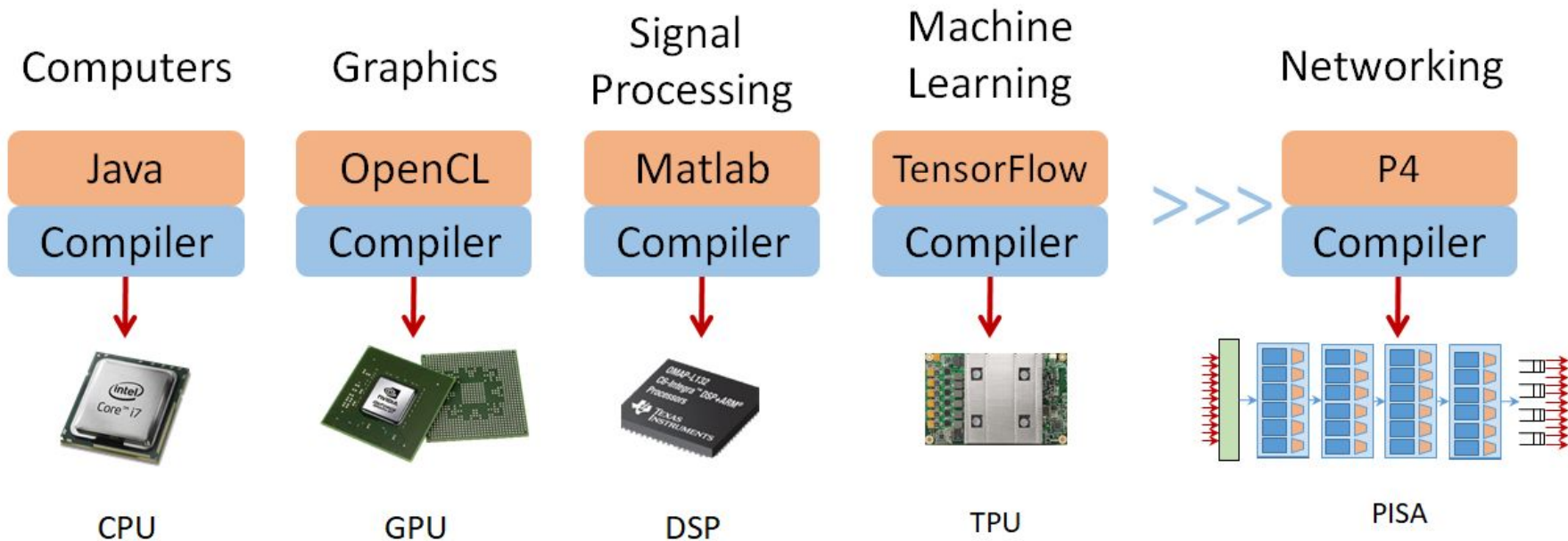
Switch OS

Driver

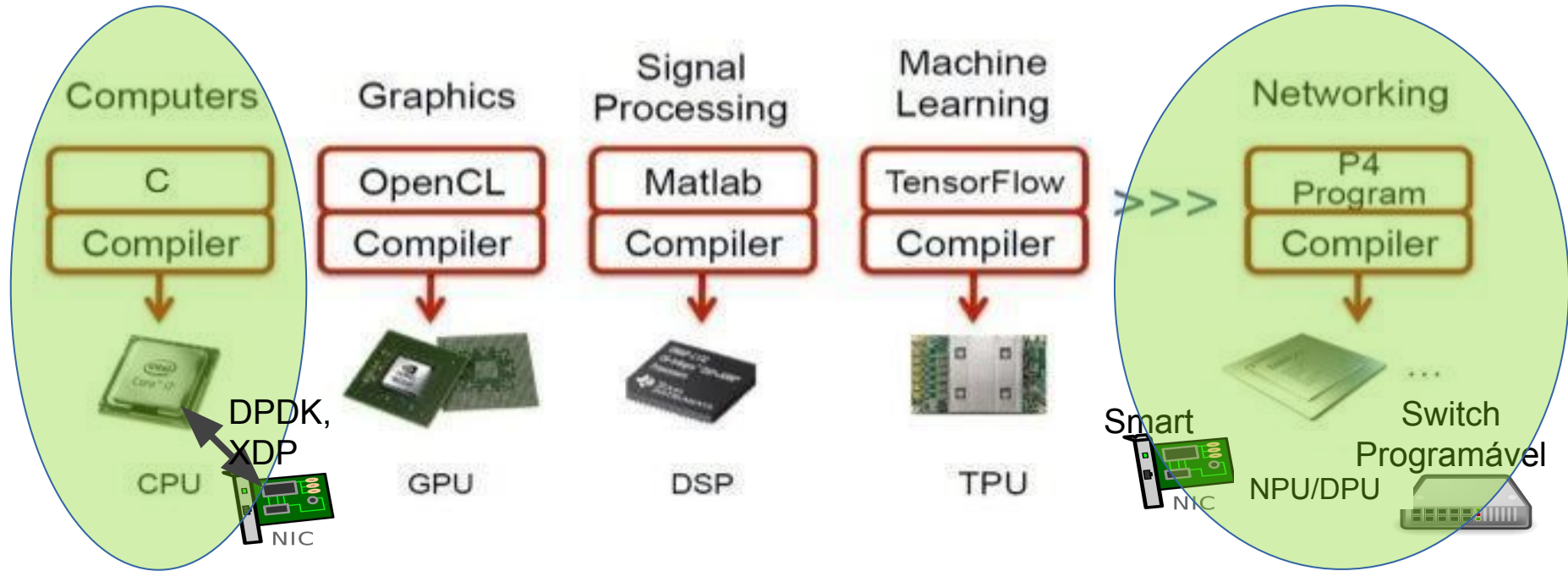


Programmable Switch

Modelos de programação para processamento especializado por domínio



Aceleração usando CPU ou Smart NICS/Switches programáveis



Breve histórico sobre as tecnologias para programabilidade das redes abertas

Desacoplamento dos Planos de Controle e de Dados

Intel DPDK

P4

2004

2008

2010

2012

2014

2016

SDN e Openflow

OVS incorporado no Linux OS

EBPF/XDP



Alguns projetos de redes abertas e suas APIs

O-RAN Alliance foi formada por operadoras globais de telecomunicações como AT&T, Deutsche Telekom, e China Mobile.

SD-Core projet
Open Networking Foundation

SD-Core™ is a cloud native 4G/5G disaggregated mobile core, supports 5G standalone, 5G non-standalone, and 4G/LTE deployments.

Magma projet
Linux Foundation

2018

2019

2020

2021

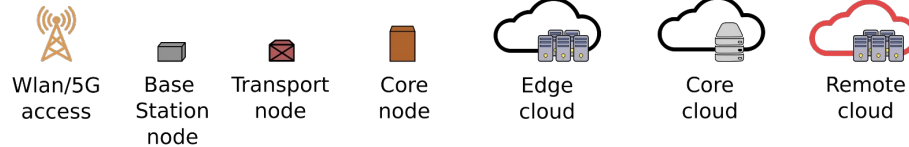
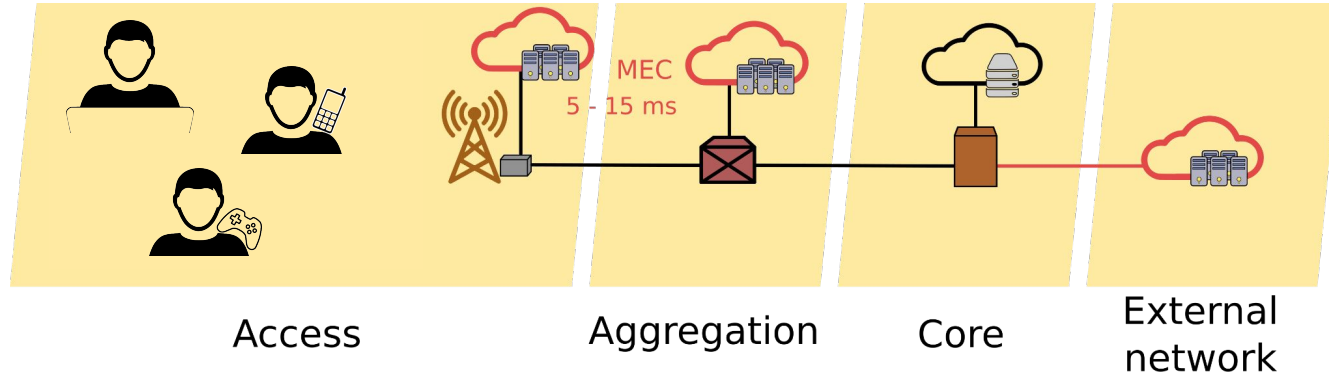
2022

2023

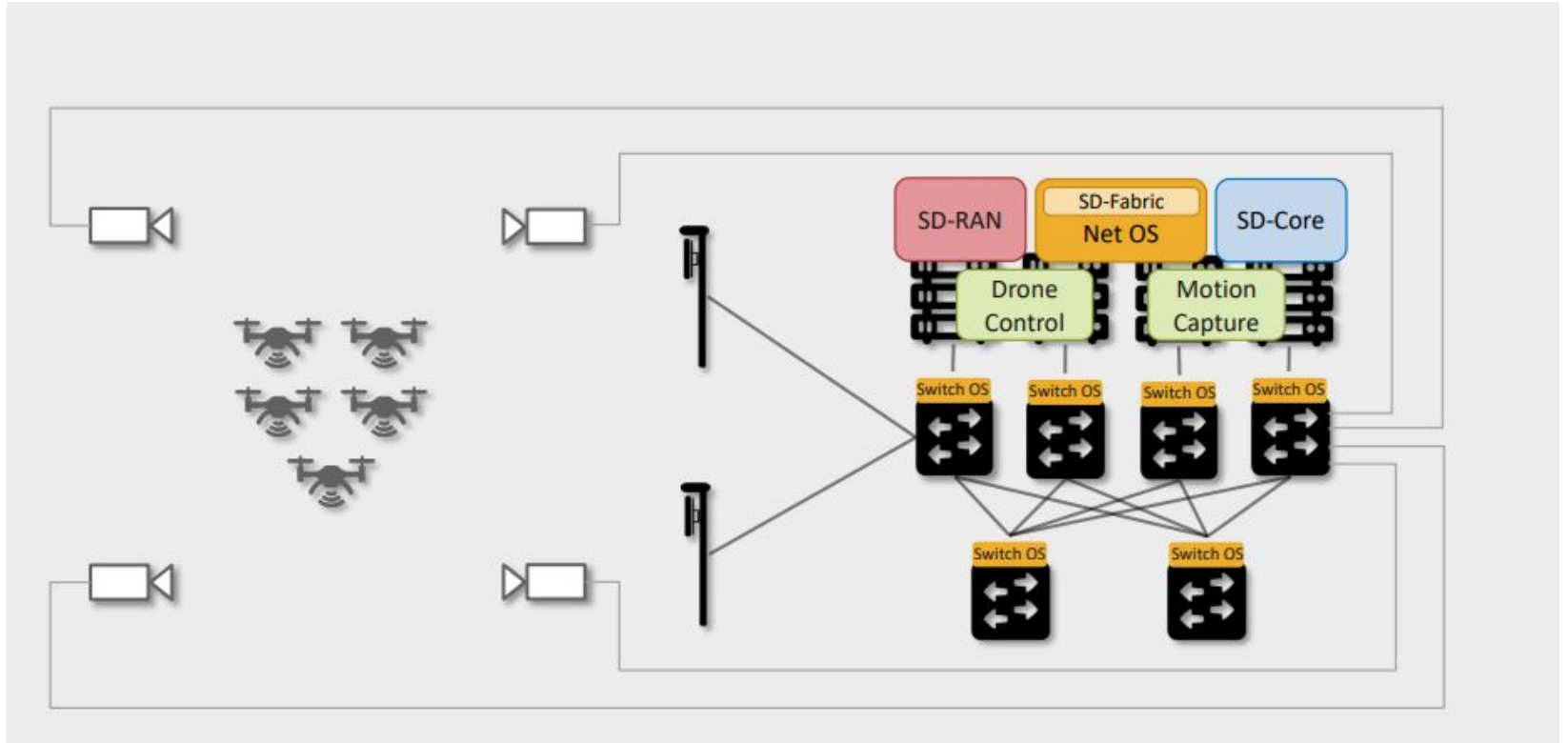
OPERATIONAL DEPLOYMENT
5G Open Source Private 5G Platform

Aether project
Deutsche Telekom

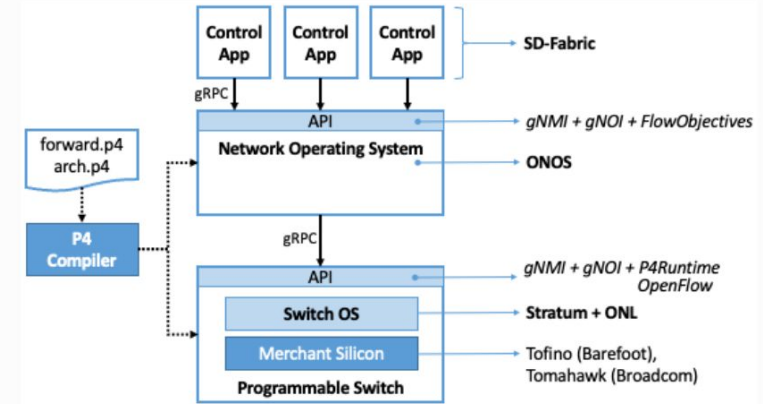
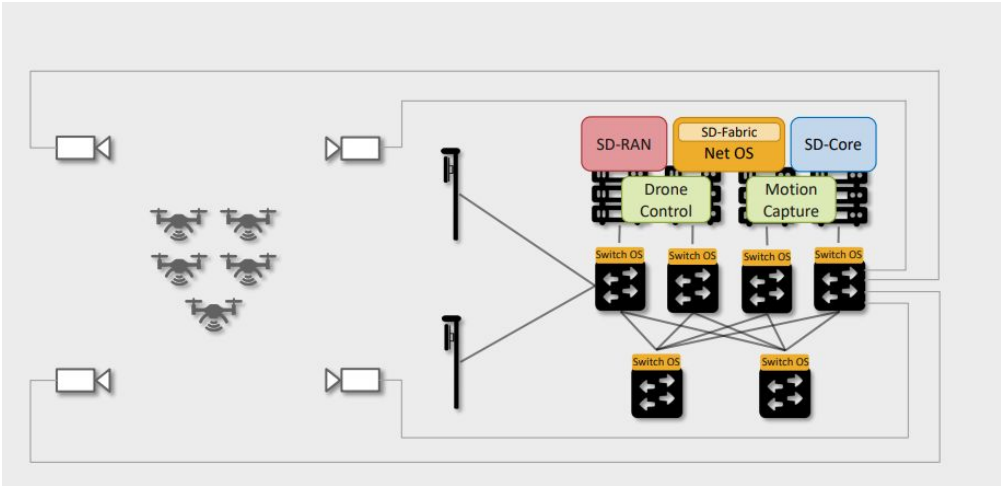
Desafios de Pesquisa : onde inserir código , o que modificar/acelerar ...



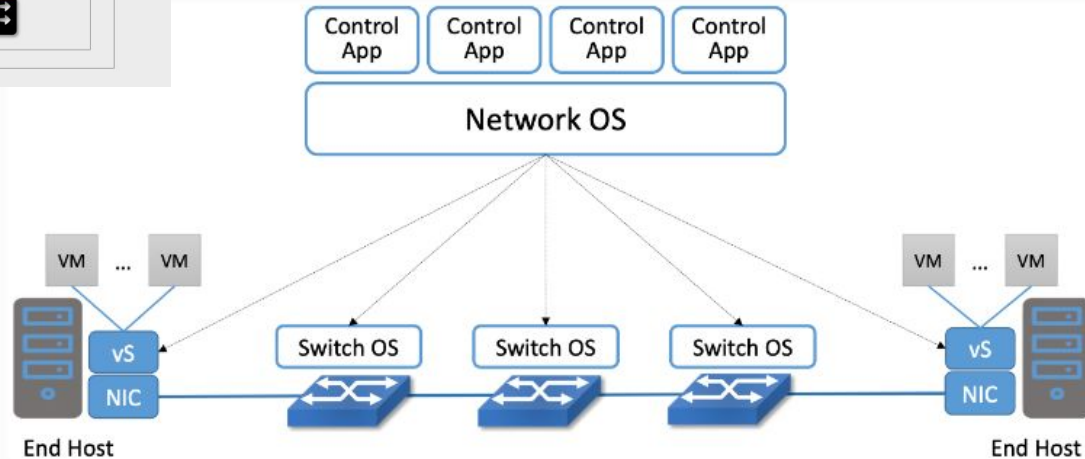
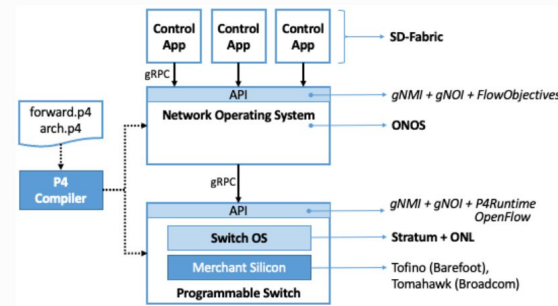
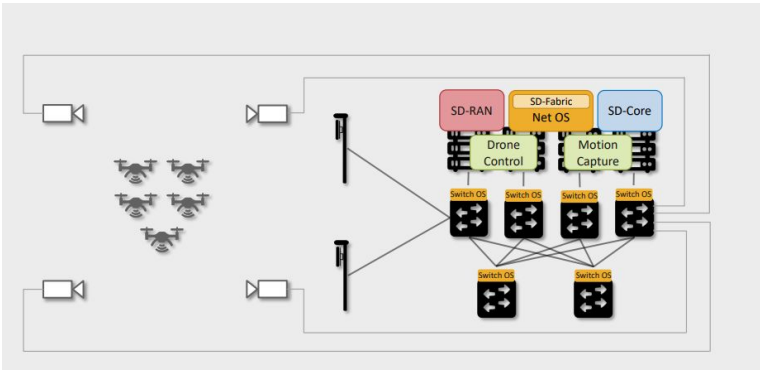
Caso de uso ilustrativo : projeto Aether



Visão da Pilha de Softwares : com exemplos de softwares (APIs) abertos



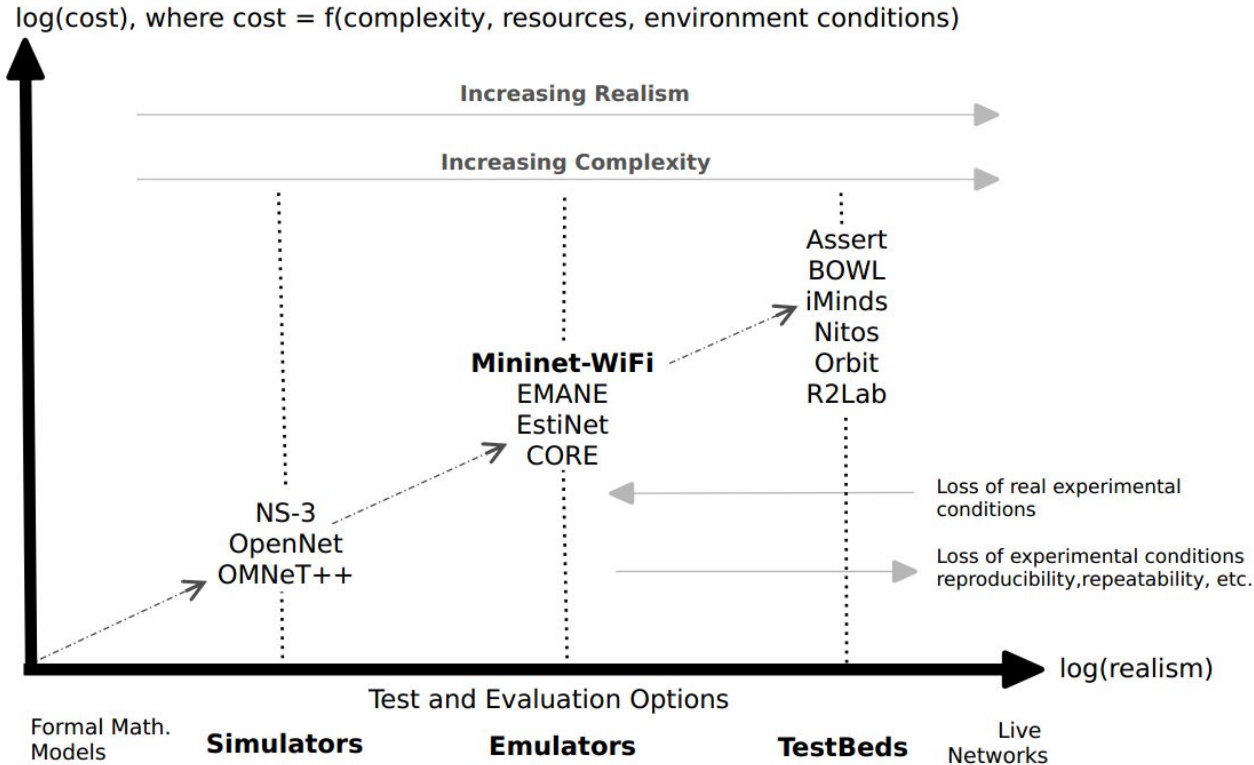
Network OS tem a perspectiva da rede e Switch OS com foco no switch



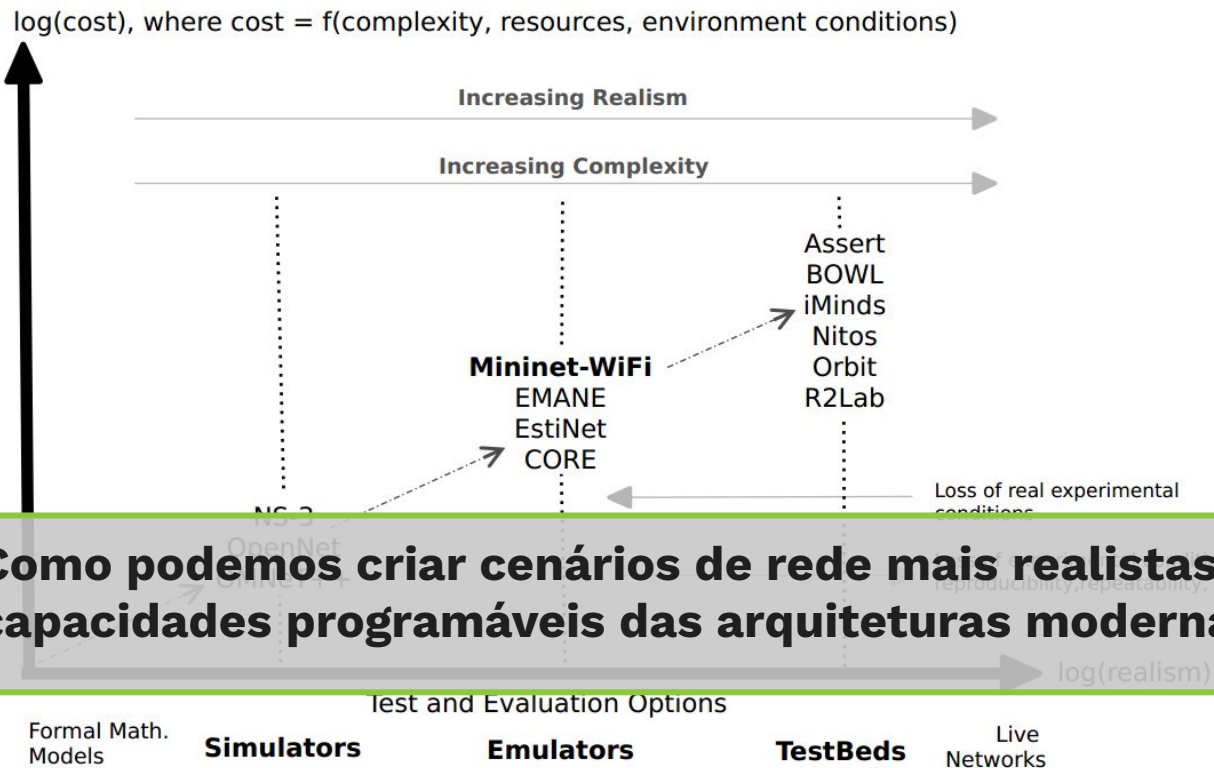
Agenda

- Evolução da conectividade
 - Gerações, Desempenho, Programabilidade, Interação
 - O que são redes abertas programáveis?
 - Tendências de Softwarização
- A nossa experiência no Lab NERDS :-)
 - Como prototipar soluções com redes programáveis?
 - IA e redes programáveis podem ser combinadas para impulsionar protocolos/padrões em redes abertas ?
 - Implantação de protocolo de roteamento ciente de caminhos

Ambientes experimentais para prototipação, prova de princípio e validação

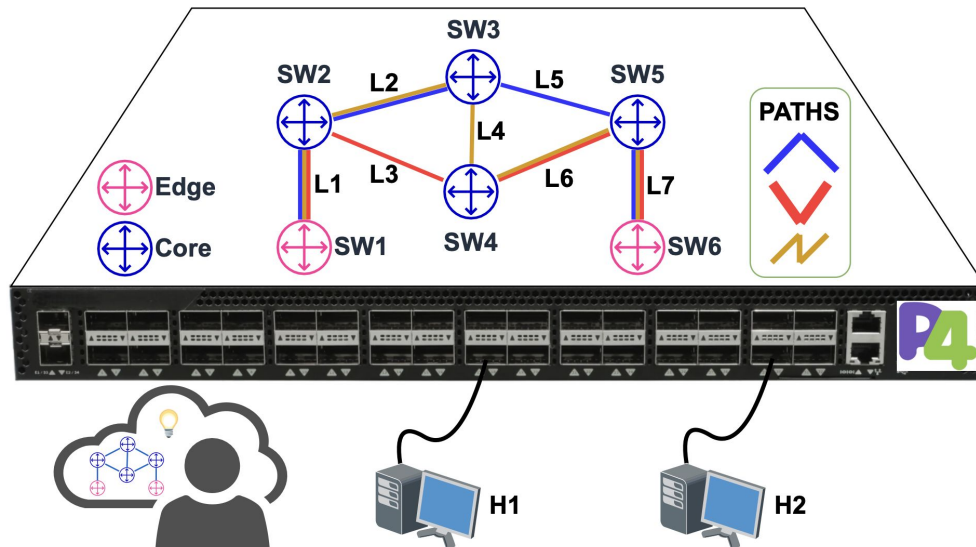


Ambientes experimentais para prototipação, prova de princípio e validação



Como podemos criar cenários de rede mais realistas explorando as capacidades programáveis das arquiteturas modernas de switches?

PINT-Box : Path Aware Networking IN a Tofino Box

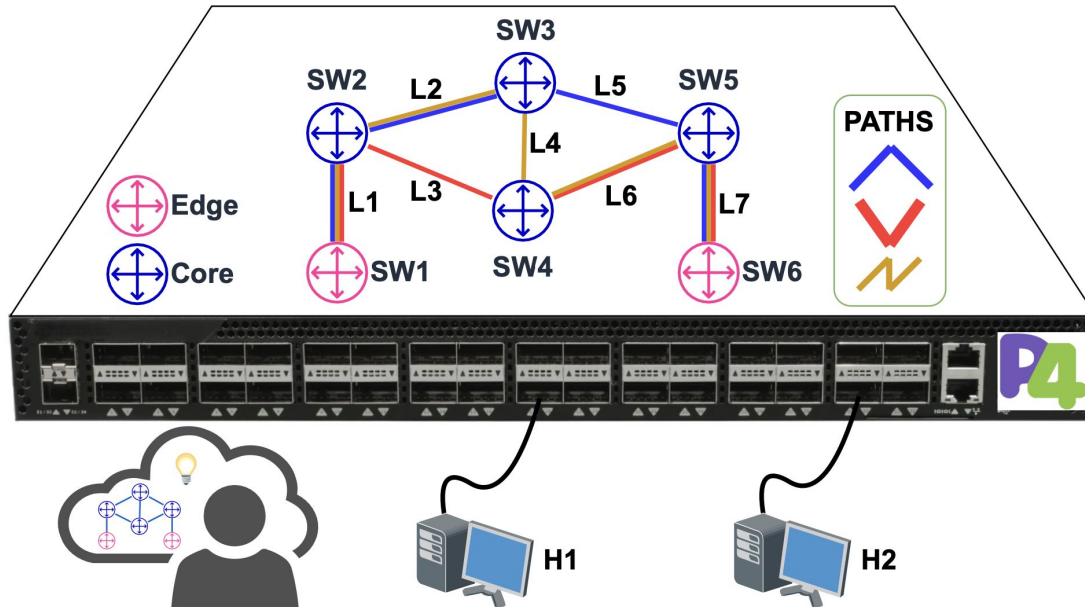


PINT-Box é uma ferramenta de emulação de redes, oferecendo alta fidelidade com taxas de 100Gbps, incluindo várias características de link, como latência, jitter e perda de pacotes, além da opção de personalizar topologias de rede.

Tudo implementado em um único switch Tofino programável em P4.

Source: **PINT-BoX: Path-aware networking IN a Tofino BoX (Best Demo Award IEEE SDN-NFV 2024)**
https://smartness2030.tech/wp-content/uploads/2024/10/NFV_SDN_Everson.pdf

Especificação das características dos caminhos



Path1: L1, L2, L5, L7
L5: Loss 3%, Delay : 5ms

Path2: L1, L3, L6, L7
L3 : Loss 1%, Delay 15ms

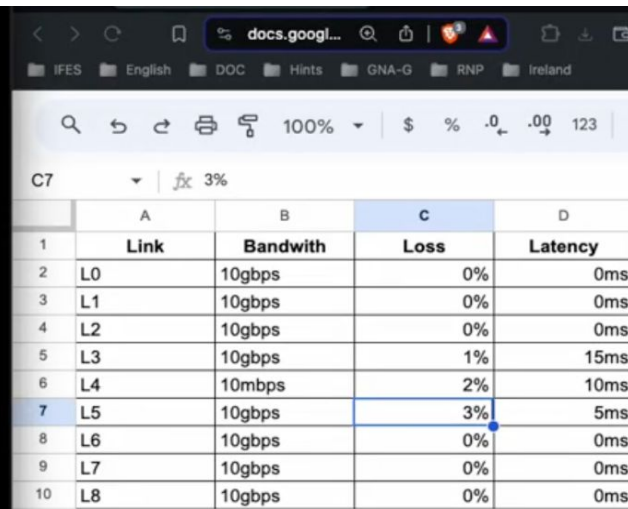
Path3: L1, L2, L4, L6, L7
L4: Loss 2%, Delay 10 ms

Tabela com a configuração dos enlaces

[Link da Demo](#)

```
# include the link configuration
topo.addhost("h1", "6/0", 168, 100000000000, "True", "False", 1920, "10.0.0.10")
topo.addhost("h2", "5/0", 160, 100000000000, "True", "False", 1920, "10.0.0.20")

# addlink(node1, node2, bw, pkt_loss, latency, jitter, percentage)
# bw is considered just for the first defined link
topo.addlink("h1", "sw1", 100000000000, 0, 0, 0, 100) #0
topo.addlink("sw1", "sw2", 100000000000, 0, 0, 0, 100) #1
topo.addlink("sw2", "sw3", 100000000000, 0, 0, 0, 100) #2
topo.addlink("sw2", "sw4", 100000000000, 1, 15, 0, 100) #3
topo.addlink("sw3", "sw4", 100000000000, 2, 1, 0, 100) #4
topo.addlink("sw3", "sw5", 100000000000, 3, 0, 0, 100) #5
topo.addlink("sw4", "sw5", 100000000000, 0, 0, 0, 100) #6
topo.addlink("sw5", "sw6", 100000000000, 0, 0, 0, 100) #7
topo.addlink("sw6", "h2", 100000000000, 0, 0, 0, 100) #8
```



The screenshot shows a Google Docs spreadsheet with a table containing link configuration data. The table has 5 columns: 'Link', 'Bandwidth', 'Loss', and 'Latency'. The rows are numbered 1 through 10, corresponding to the link IDs in the code block. The 'Loss' column shows values of 0% for links L0-L6 and L8, and 3% for link L5. The 'Latency' column shows values of 0ms for links L0-L4 and L8, 15ms for L3, 10ms for L5, and 5ms for L7.

	A	B	C	D
	Link	Bandwidth	Loss	Latency
1				
2	L0	10gbps	0%	0ms
3	L1	10gbps	0%	0ms
4	L2	10gbps	0%	0ms
5	L3	10gbps	1%	15ms
6	L4	10mbps	2%	10ms
7	L5	10gbps	3%	5ms
8	L6	10gbps	0%	0ms
9	L7	10gbps	0%	0ms
10	L8	10gbps	0%	0ms

Agenda

- Evolução da conectividade
 - Gerações, Desempenho, Programabilidade, Interação
 - O que são redes abertas programáveis?
 - Tendências de Softwarização
- A nossa experiência no Lab NERDS :-)
 - Como prototipar soluções com redes programáveis?
 - IA e redes programáveis podem ser combinadas para impulsionar protocolos/padrões em redes abertas ?
 - Implantação de protocolo de roteamento ciente de caminhos

IA + Redes Programáveis



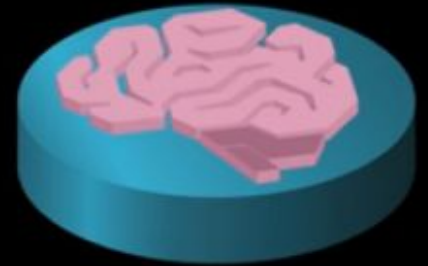
machine
learning

+



programmable
switch

=

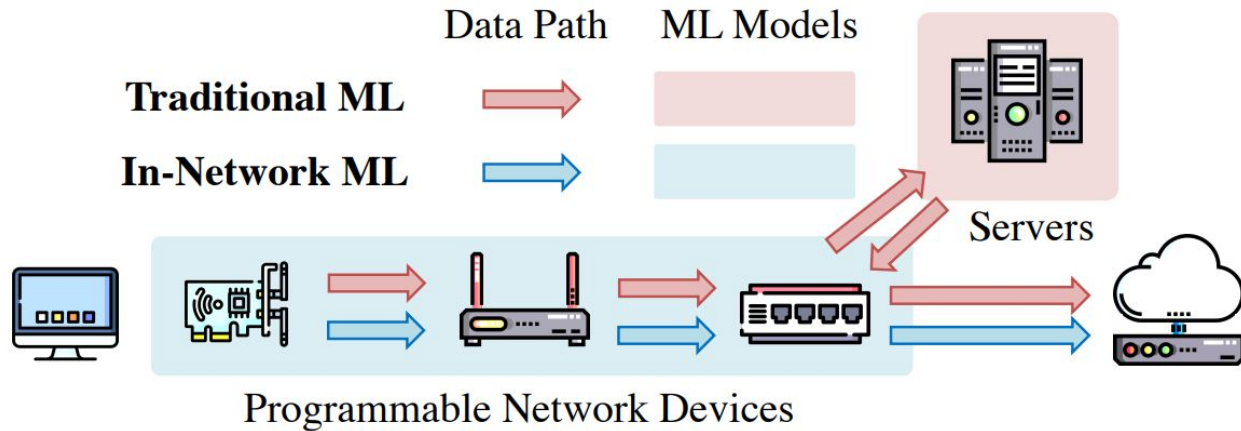


intelligent
switch

Como usar IA em redes abertas ?

- **In-network Machine Learning:**

- Offloading parcial ou total (implantação) de algoritmos de ML executados em dispositivos de rede



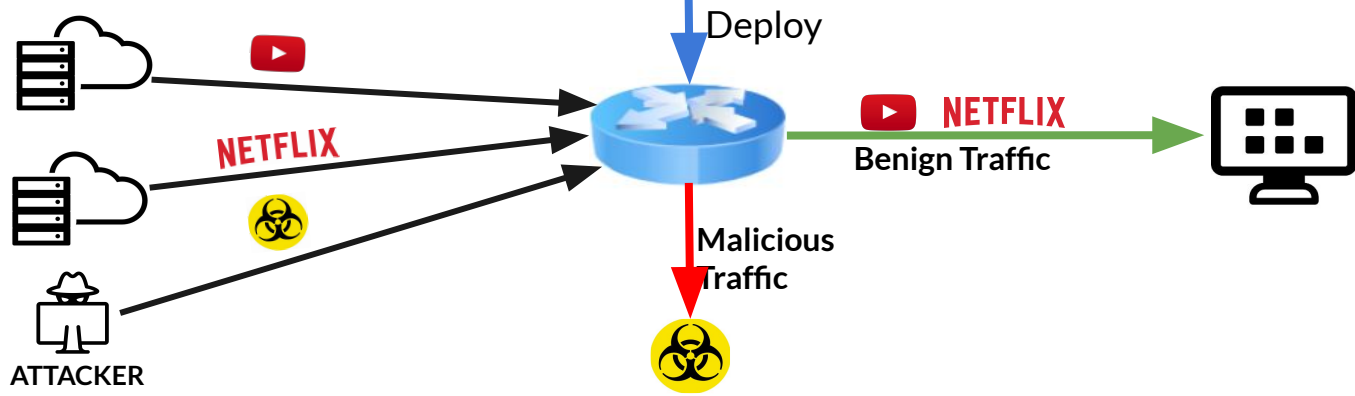
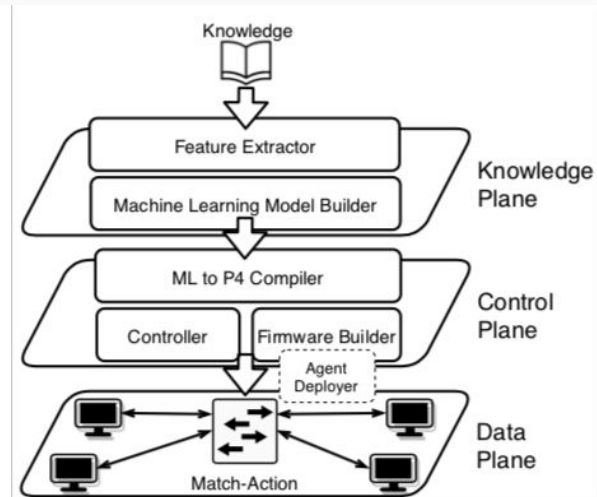
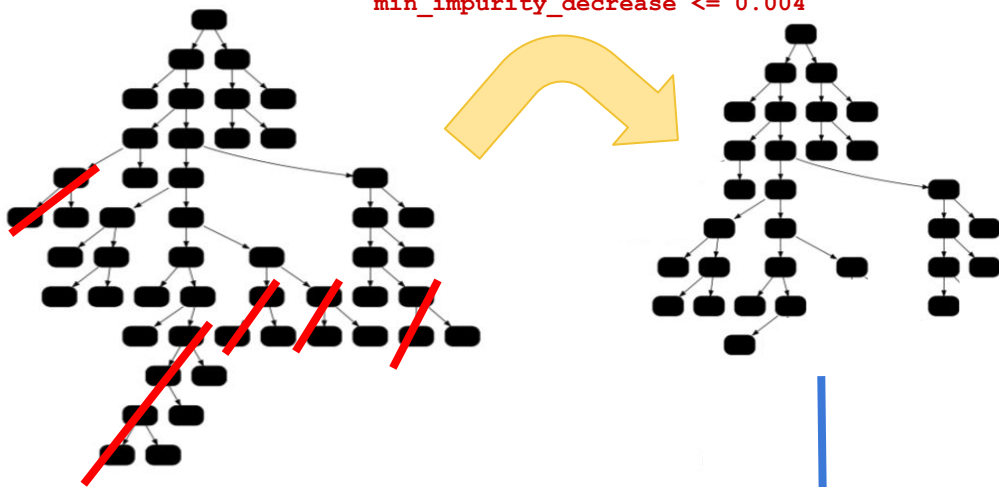
Limitações de programação do plano de dados

- Sem suporte:
 - **Loops:** devem ser decompostos em um pequeno conjunto de passos tratáveis
 - **Operações matemáticas não elementares e ponto flutuante**
 - **Alocação dinâmica de memória**
- Necessário adaptar algoritmos de IA (vários trabalhos existentes)

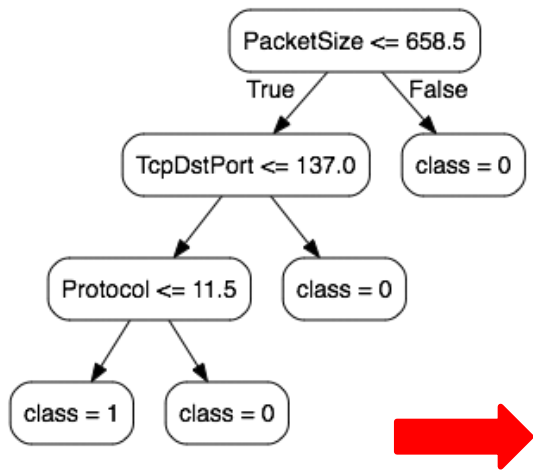
1. Yifan Yuan, Omar Alama, Jiawei Fei, *et al.* **Unlocking the Power of Inline Floating-Point Operations on Programmable Switches.** NSDI 2022.
2. Penglai Cui, Heng Pan, Zhenyu Li, *et al.* **Enabling In-Network Floating-Point Arithmetic for Efficient Computation Offloading.** IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 33, no. 12, pp. 4918-4934, 2022.
3. Matthews Jose, Kahina Lazri, Jérôme François and Olivier Festor. **InREC: In-network REal Number Computation.** IM 2021.
4. Damu Ding, Marco Savi and Domenico Siracusa. **Estimating Logarithmic and Exponential Functions to Track Network Traffic Entropy in P4.** NOMS 2020.

In-network ML: Árvores de decisão em SmartNICs

$\text{min_impurity_decrease} \leq 0.004$



In-network ML: Árvores de decisão em SmartNICs



Decision Tree

```
if (hdr.ipv4.totalen <= 658.5)
  if (hdr.tcp.dstport <= 137.0)
    if (hdr.ipv4.protocol <= 11.5)
      meta.class = 1;
    else
      meta.class = 0;
  else
    meta.class = 0;
else
  meta.class = 0;
```

If-else chain

```
...
table classtable {
  key = {
    meta.class: exact;
  }
  actions = {
    forward_by_class;
    ...
  }
  size = 512;
}
...
apply {
  extract_features();
  hash();
  update_features();

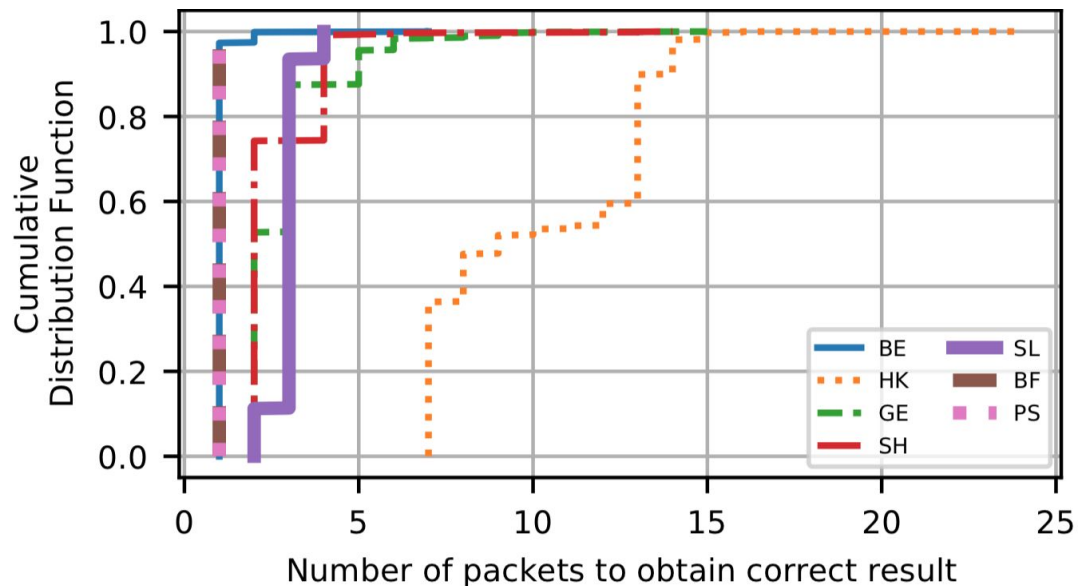
  <IF-ELSE_CHAIN_HERE>

  classtable.apply();
}
...
```

P4 Template

DTs em SmartNICs: Classificação de tráfego para mitigação de ataques

- Mostramos em uma smartNIC que com um pequeno número de pacotes é possível classificar o tráfego com precisão.



Modelos de ML na RAN + Edge SmartNICs

- **Tese de Doutorado Bruno Missi Xavier**

- Título: [Crossing Domains for Accuracy: In-Network Stacking of Machine Learning Classifiers](#), Ano de obtenção: 2024.
- Orientador: Magnos Martinello (UFES)
- Coorientador: Marco Ruffini (TCD, Irlanda)

[Programmable Switches for in-Networking Classification](#) (IEEE Infocom 2021)

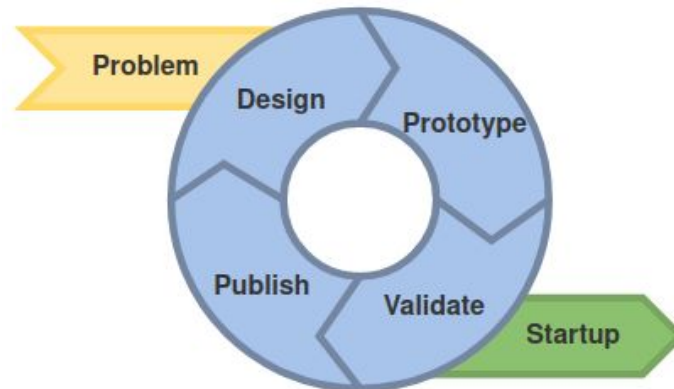
[MAP4: A Pragmatic Framework for In-Network Machine Learning Traffic Classification](#)
(IEEE TNSM 2022)

Agenda

- Evolução da conectividade
 - Gerações, Desempenho, Programabilidade, Interação
 - O que são redes abertas programáveis?
 - Tendências de Softwarização
- A nossa experiência no Lab NERDS :-)
 - Como prototipar soluções com redes programáveis?
 - Como IA e redes programáveis podem ser combinadas para impulsionar protocolos/padrões em redes abertas ?
 - Implantação de protocolo de roteamento ciente de caminhos

DNA do Grupo de Pesquisa LabNERDS

- Laboratório nasce da demanda por redes programáveis
- Prototipação como prova de princípio
- Participação na criação de infraestrutura de testbeds nacionais internacionais de pesquisa em redes
- Desenvolvimento de software de código aberto
- Amadurecimento para inovação



PolKA: motivação

- Um caminho na rede atual é considerado **invisível**, **homogêneo**, **singular**, com dinâmica determinada pela conectividade entre os hosts
- Os hosts têm muito pouca informação sobre os caminhos pelos quais seu tráfego é conduzido e **nenhum controle** além do endereço de destino.

PolKA: motivação

- **Métodos de encaminhamento tradicionais baseados em tabela:**

- Sub-conjunto de caminhos mais curtos → Engenharia de tráfego
- Grande número de estados → Escalabilidade
- Latência para configuração de caminho → Agilidade



Subutilização

Ossificação

Pouco controle
dos caminhos

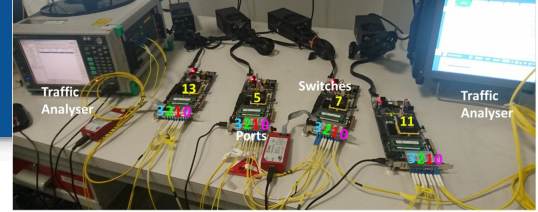
Controle de
congestionamento limitado

PolKA: motivação

- Alternativa: Roteamento na fonte ou **Source Routing (SR)**
 - Uma origem determina um caminho e adiciona um rótulo de rota ao cabeçalho do pacote.
- **Proposta do grupo:**
 - Codificação da rota usando RNS (Residue Number System)
 - Encaminhamento: Substituir tabelas por uma operação aritmética de **mod** (resto da divisão):

$$\text{portID} = \langle \text{routeID} \rangle_{\text{nodeID}}$$

PolKA: Histórico



- **RNS inteiro: protótipo de software ou dispositivos NetFPGA especializados**
 - *M. Martinello et al., "Keyflow: a prototype for evolving SDN toward core network fabrics," in IEEE Network, 2014. (RNS SR applied to core networks with SDN)*
 - *R. R. Gomes et al., "KAR: Key-for-any-route, a resilient routing system," in 2016 IEEE/IFIP DSN. (Fast-failure reaction with RNS SR)*
 - *A. Liberato et al., "RDNA: Residue-Defined Networking Architecture Enabling Ultra-Reliable Low-Latency Datacenters," IEEE TNSM 2018. (RNS SR applied to multicast in DC networks)*
- **C. K. Dominicini et al., "PolKA: Polynomial Key-based Architecture for Source Routing in Network Fabrics," IEEE NetSoft 2020.**
 - RNS polinomial é mais aderente aos switches modernos com P4.
 - O P4 não suporta nativamente a operação de mod.
 - Solução: reuso do hardware CRC (Cyclic Redundancy Check) para mod polinomial.

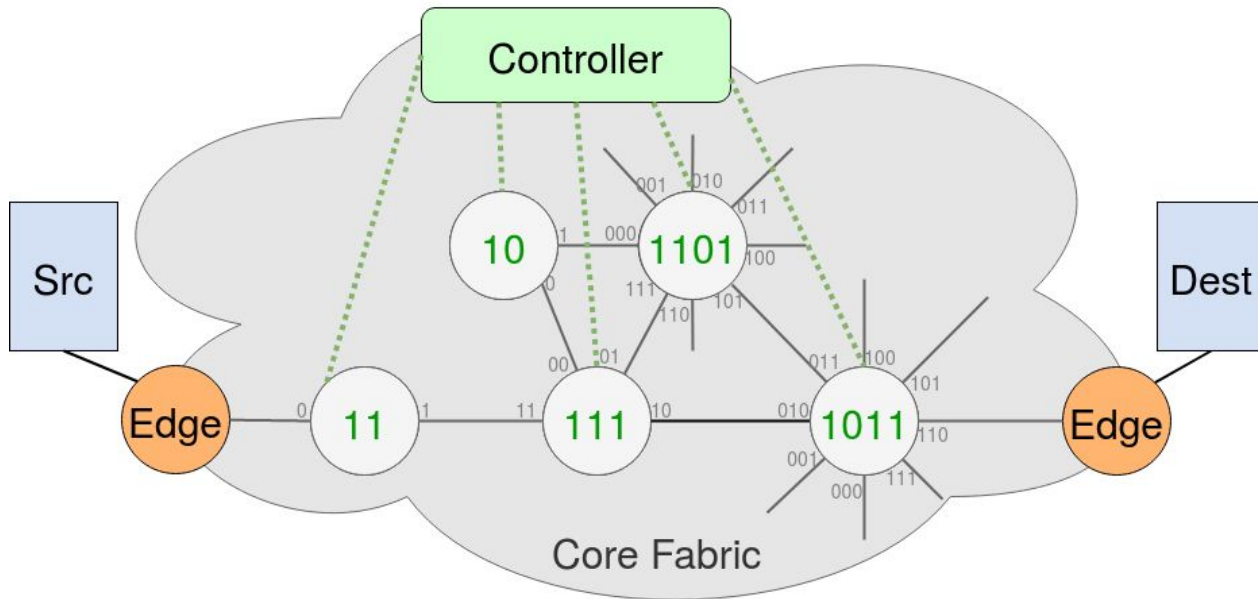
Como o PolKA funciona?

- Codificação de três identificadores polinomiais usando RNS:
 - **routelD**
 - **nodeID**
 - **portID**
- O encaminhamento usa uma operação de **mod** (resto da divisão):

$$\text{portID} = \langle \text{routelD} \rangle_{\text{nodeID}}$$

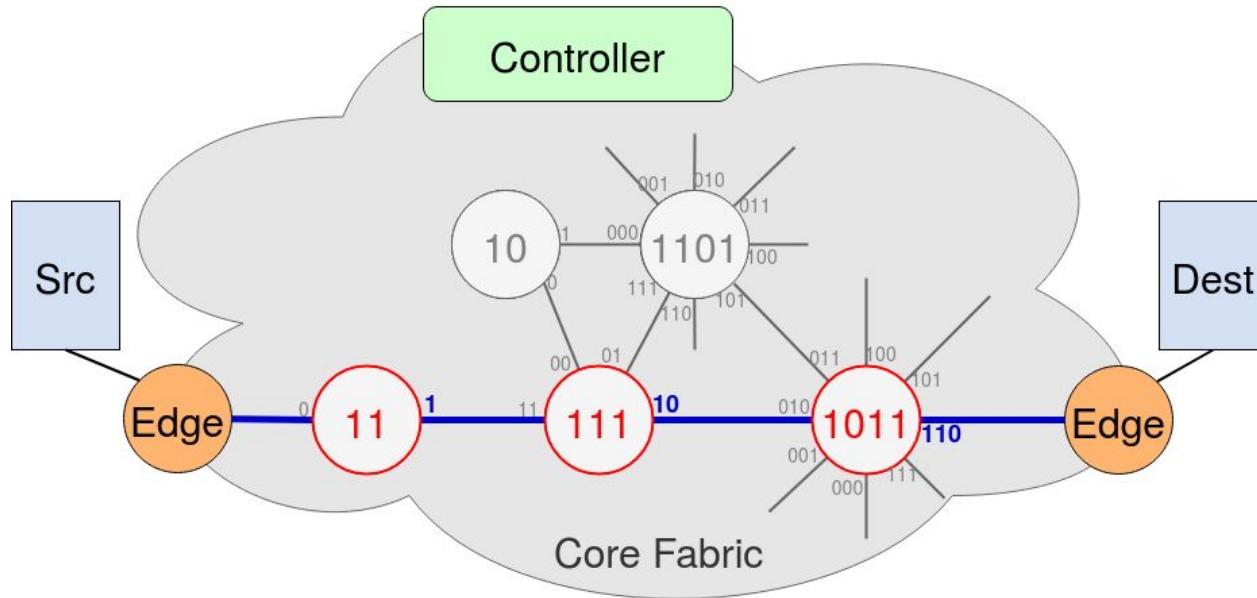
Como o PolKA funciona?

- O controlador configura polinômios para switches (**nodeIDs**) e portas (**portIDs**).



Como o PolKA funciona?

- O controlador escolhe o caminho para um fluxo:
 - Switches: {0011, 0111, 1011}
 - e portas de saída: {1, 10, 110}



nodeIDs

$$s_1(t) = t + 1 = 11$$

$$s_2(t) = t^2 + t + 1 = 111$$

$$s_3(t) = t^3 + t + 1 = 1011$$

portIDs

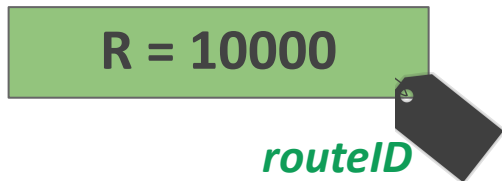
$$o_1(t) = 1$$

$$o_2(t) = t = 10$$

$$o_3(t) = t^2 + t = 110$$

Como o PolKA funciona?

- o **Controlador** calcula o *routeID* usando RNS:



- Encaminhamento:

$$\text{portID} = \langle \text{routeID} \rangle_{\text{nodeID}}$$

$$\begin{aligned} 1 &= \langle 10000 \rangle_{0011} && : S_1 \\ 10 &= \langle 10000 \rangle_{0111} && : S_2 \\ 110 &= \langle 10000 \rangle_{1011} && : S_3 \end{aligned}$$

nodeIDs

$$\begin{aligned} s_1(t) &= t + 1 = 11 \\ s_2(t) &= t^2 + t + 1 = 111 \\ s_3(t) &= t^3 + t + 1 = 1011 \end{aligned}$$

portIDs

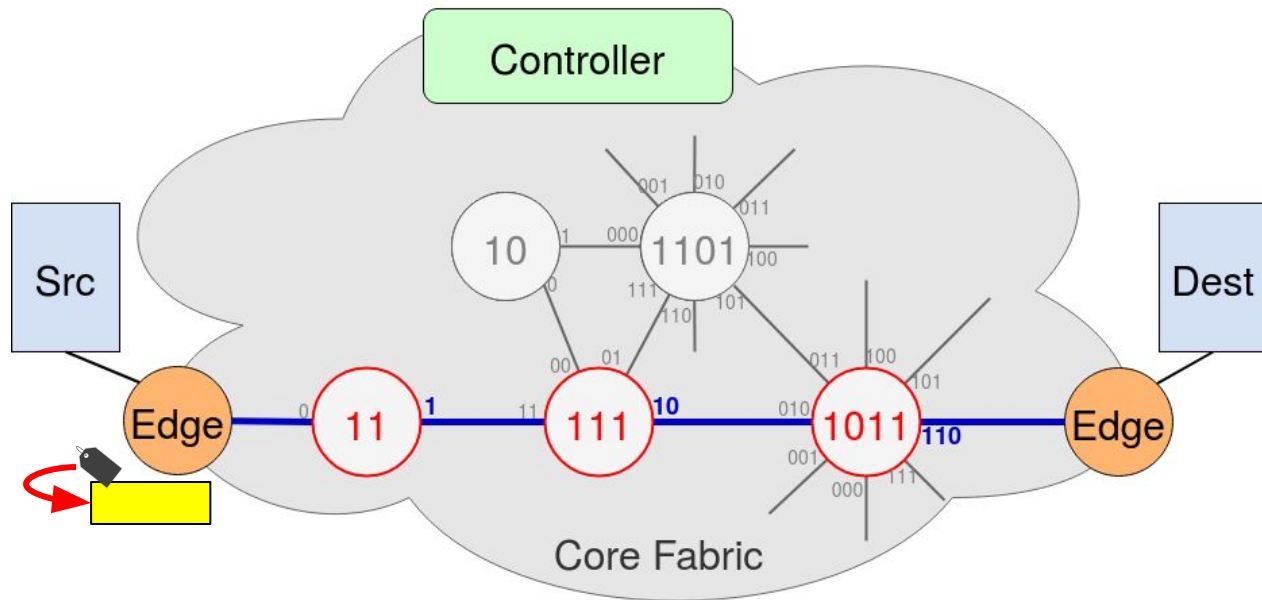
$$\begin{aligned} o_1(t) &= 1 \\ o_2(t) &= t = 10 \\ o_3(t) &= t^2 + t = 110 \end{aligned}$$

Cálculo routeID com RNS

$$\begin{aligned} t^4 &\equiv 1 \pmod{(t+1)} \\ t^4 &\equiv t \pmod{(t^2+t+1)} \\ t^4 &\equiv (t^2+t) \pmod{(t^3+t+1)} \\ t^4 &= 10000 \end{aligned}$$

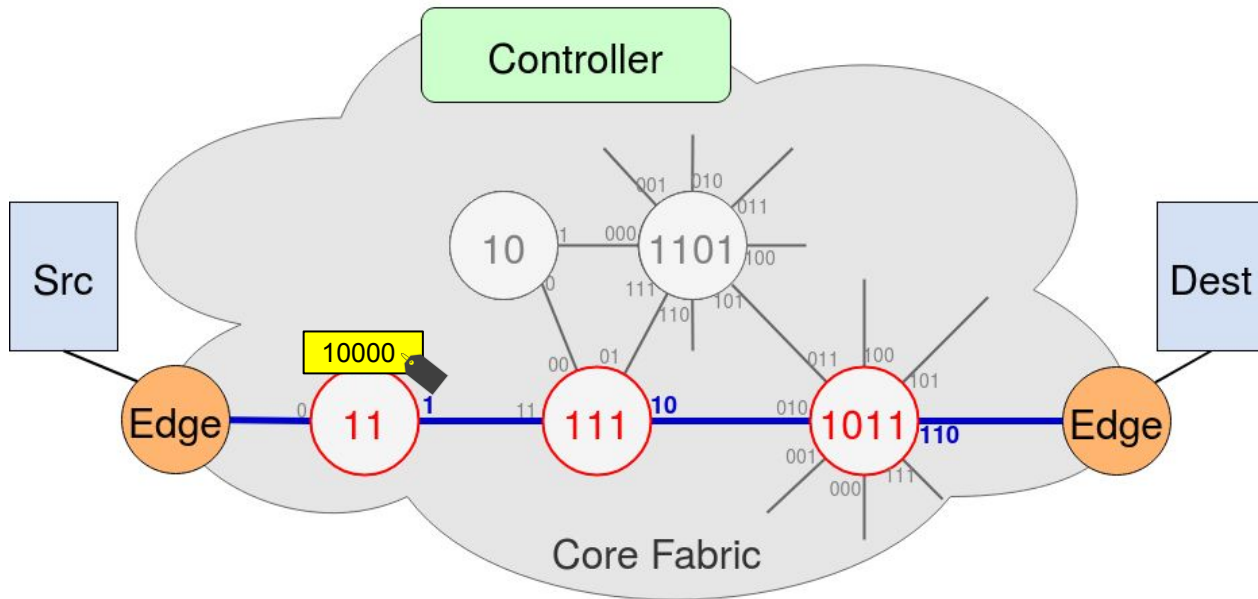
Como o PolKA funciona?

- Quando os pacotes chegam, o nó de entrada adiciona o routeID nos pacotes.



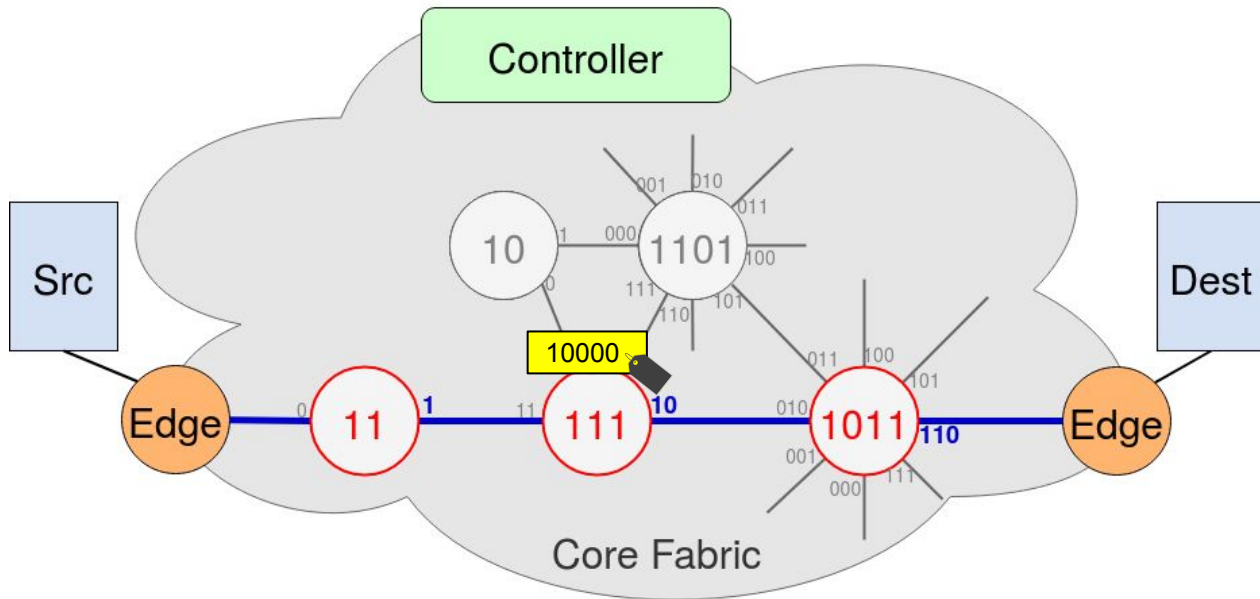
Como o PolKA funciona?

- Encaminhamento usando **mod**: $\langle 10000 \rangle_{0011} = 1 \rightarrow$ porta de saída
- *O routeID não muda! Sem tabelas!*



Como o PolKA funciona?

- Encaminhamento usando **mod**: $\langle 10000 \rangle_{0111} = 10 \rightarrow$ porta de saída
- *O routeID não muda! Sem tabelas!*



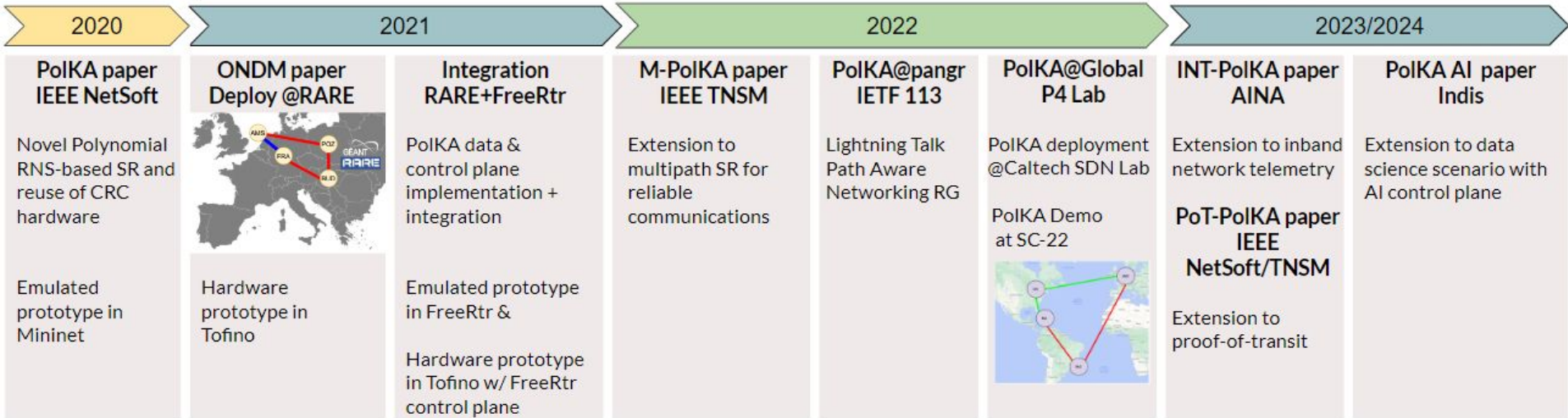
Timeline



O projeto PolKA recebeu o prêmio
2021 Google Research Scholar Award



O projeto M-PolKA recebeu o prêmio
Intel Connectivity Research Grant
(Fast Forward Initiative)



PolKA: Highlights

Networking



Aurojit Panda, New York University

Bertha: Network APIs for the Programmable Network Era

Cristina Klippel Dominicini, Instituto Federal do Espirito Santo

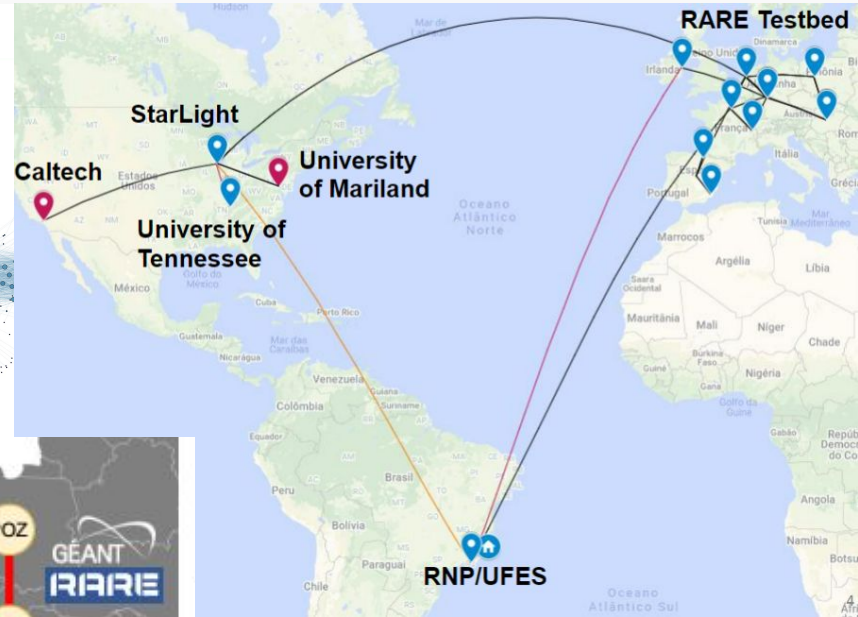
Polynomial Key-based Architecture for Source Routing in Network Fabrics

Noa Zilberman, University of Oxford

Exposing Vulnerabilities in Programmable Network Devices

Rachit Agarwal, Cornell University

Designing Datacenter Transport for Terabit Ethernet



Timeline

2020

2021

2022

2023

2024



Best Demo Award @IEEE NFV SDN

PlnT-BoX : Path aware networking In a Tofino Box

PoT-PolKA IEEE TNSM



SC24 Path-aware by PolKA with AI guidance - Outstanding full paper award @ INDIS 2024

Proof-of-Transit paper IEEE NetSoft PolKA Demo at **SC-23**

Resilient routing with security compliance; Inband Network Telemetry Optimal load balancing



M-PolKA received the Intel Connectivity Research Grant (Fast Forward Initiative)

M-PolKA paper IEEE TNSM Multipath SR capabilities for reliable communications;

PolKA@pangr IETF 113 Lightning Talk Path Aware Networking

PolKA@Global P4 Lab; Deployment @Caltech SDN Lab,

Talk at LHC-ONE; PolKA Demo at **SC-22** M-PolKA talk at ONF



PolKA received the 2021 Google Research Scholar Award

Deployment @RARE - Hardware prototyped in Tofino

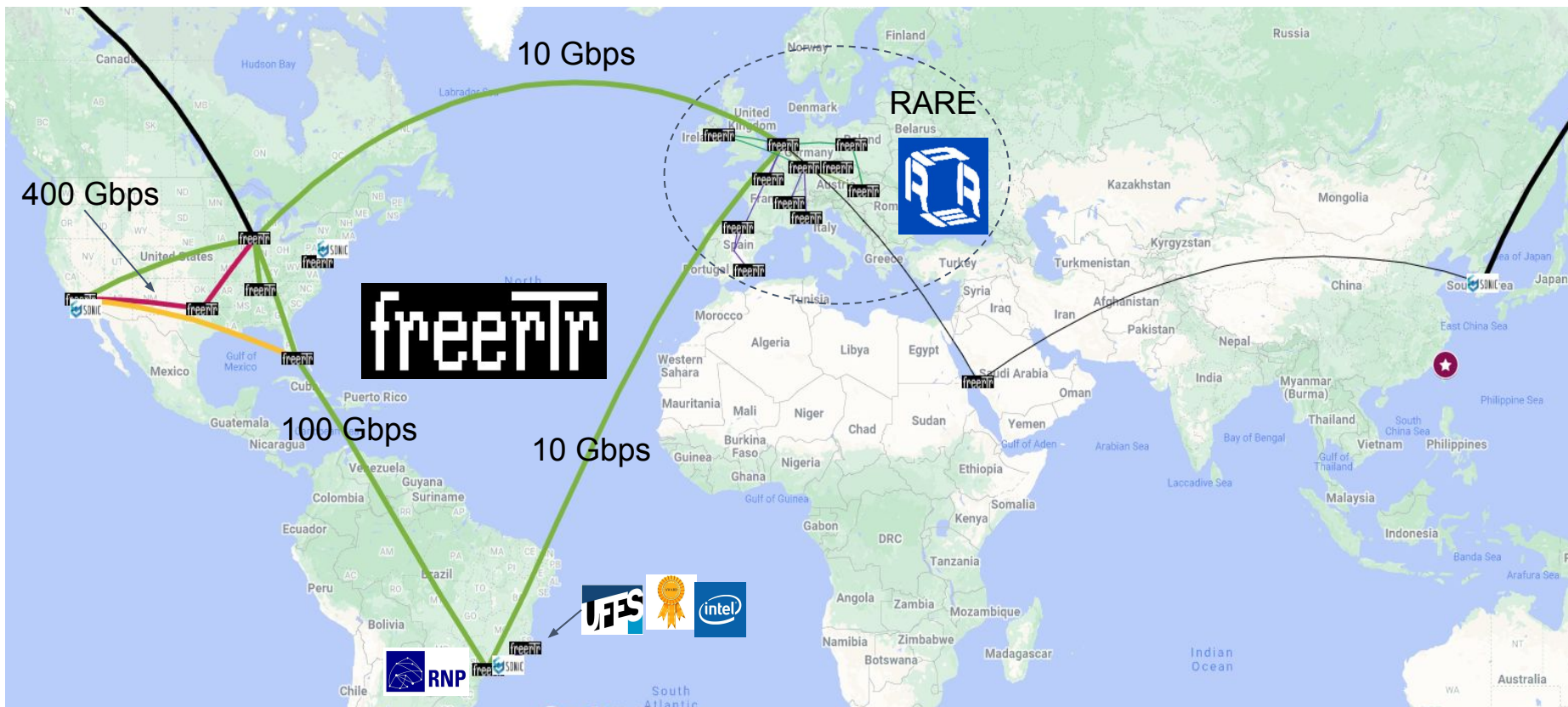
Integration with RARE+FreeRtr PolKA in Tofino with FreeRtr OS

PolKA paper IEEE NetSoft

Routing proposal based on RNS and reuse of CRC hardware

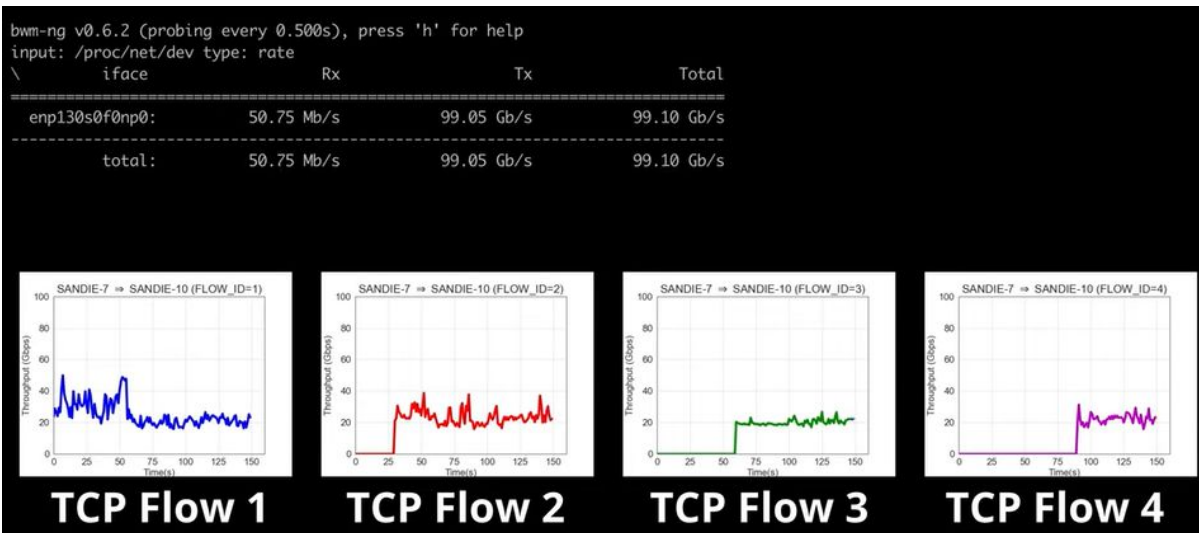
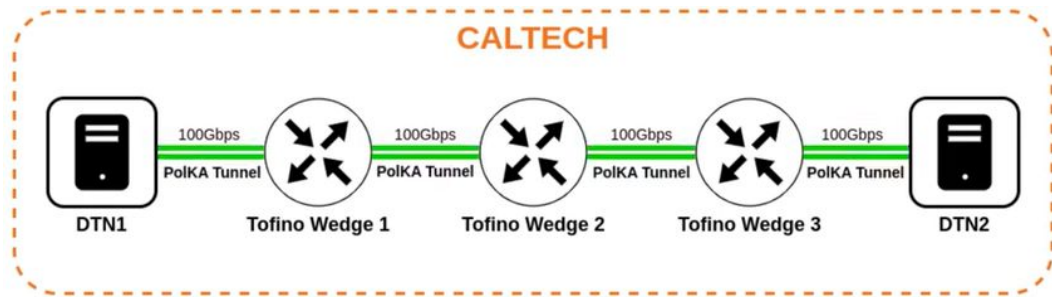
Emulated prototype in Mininet

PolKA integrado no freerTr OS + UFES parte do Global P4 Testbed

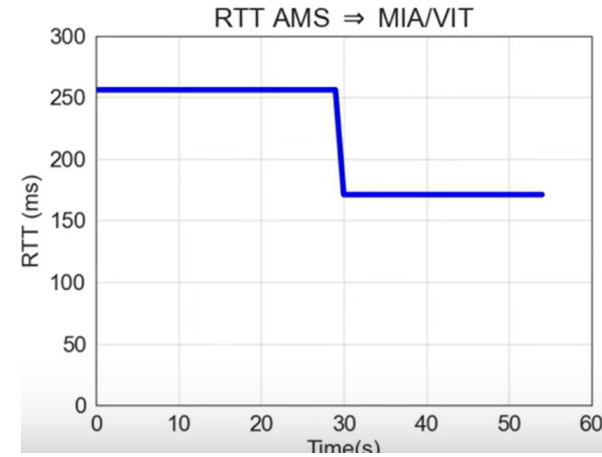
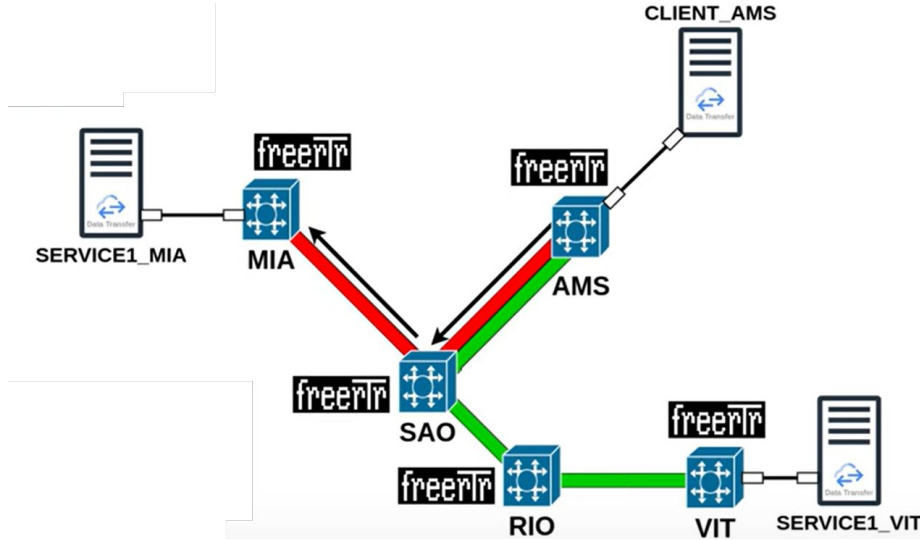
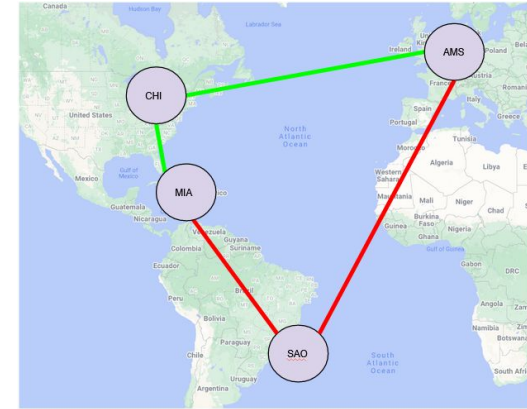


- **Grandes streams de dados com vazão de 100 Gbps**

- **Caltech P4 lab testbed**
- **Vários fluxos TCP agregados direcionados para túneis pré-configurados**



- **Migração ágil de caminhos em Testbed Intercontinental**
 - **Global P4 lab testbed**
 - Configuração de túnel para engenharia de tráfego
 - Define um caminho explícito (routeID)
 - A migração para outro túnel requer uma única atualização na origem do tráfego





SC24

Atlanta, GA | hpc creates.



Path aware networking 



Caltech



- **Plano de dados**

- Roteamento de fonte (**Source Routing**)
- Núcleo stateless e sem tabelas
- Encaminhamento de pacotes re-usando **CRC no P4**

- **Plano de controle**

- Implantação no testbed da Caltech em **switches Tofino**
- Fácil configuração de túneis
- **Integrado** na plataforma **FreeRtr OS**

- Novidades introduzidas para a **SC24**

- ***Path aware networking*** para **Data Intensive Science** altamente adaptáveis
- **Traffic steering** e **Agile path reconfiguration**
- Engenharia de tráfego com alocação de fluxo otimizada.

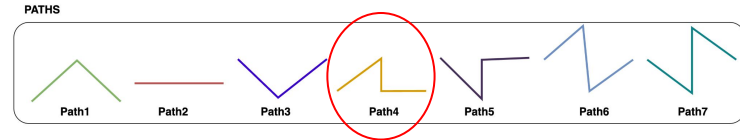
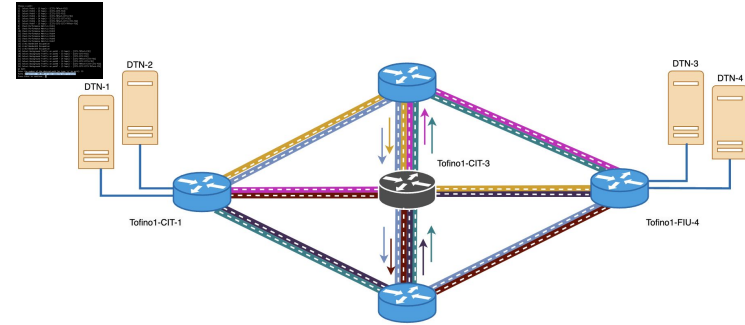


Caltech

Path-Aware - Dashboard

```
Choose a path:
1) Select Path1 - (3 hops) - [CIT1-TNTech-FIU]
2) Select Path2 - (3 hops) - [CIT1-CIT3-FIU]
3) Select Path3 - (3 hops) - [CIT1-CIT2-FIU]
4) Select Path4 - (4 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-FIU]
5) Select Path5 - (4 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-FIU]
6) Select Path6 - (5 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-CIT2-FIU]
7) Select Path7 - (5 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-TNTech-FIU]
8) Check Performance Metrics Path1
9) Check Performance Metrics Path2
10) Check Performance Metrics Path3
11) Check Performance Metrics Path4
12) Check Performance Metrics Path5
13) Check Performance Metrics Path6
14) Check Performance Metrics Path7
15) Link1 Bandwidth Occupation
16) Link2 Bandwidth Occupation
17) Link3 Bandwidth Occupation
18) Select Background Traffic on path1 - (3 hops) - [CIT1-TNTech-FIU]
19) Select Background Traffic on path2 - (3 hops) - [CIT1-CIT3-FIU]
20) Select Background Traffic on path3 - (3 hops) - [CIT1-CIT2-FIU]
21) Select Background Traffic on path4 - (4 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-FIU]
22) Select Background Traffic on path5 - (4 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-FIU]
23) Select Background Traffic on path6 - (5 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-CIT2-FIU]
24) Select Background Traffic on path7 - (5 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-TNTech-FIU]
q) Quit
Enter the number of the desired path (or type 'q' to quit): 15
Path1 Occupation: 100.00% of max capacity over 1 second
Press Enter to continue...
```

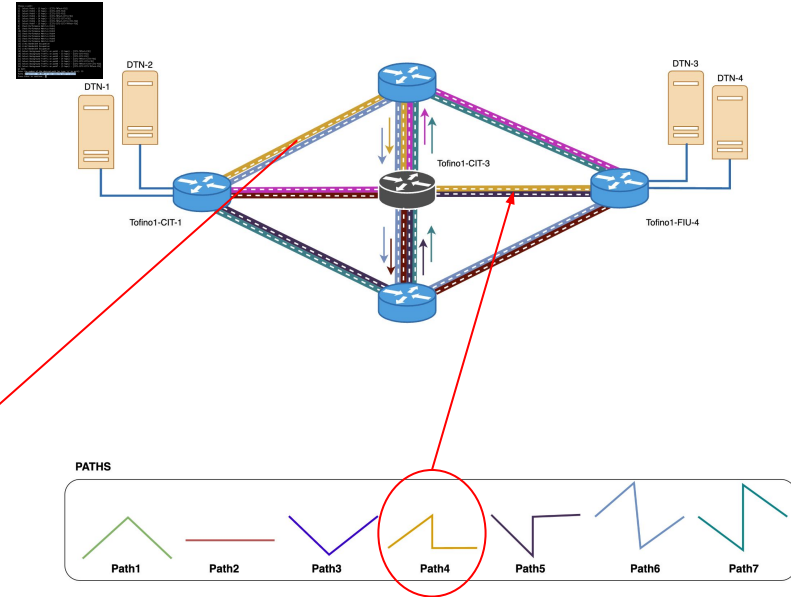
Path-Aware - Estrutura



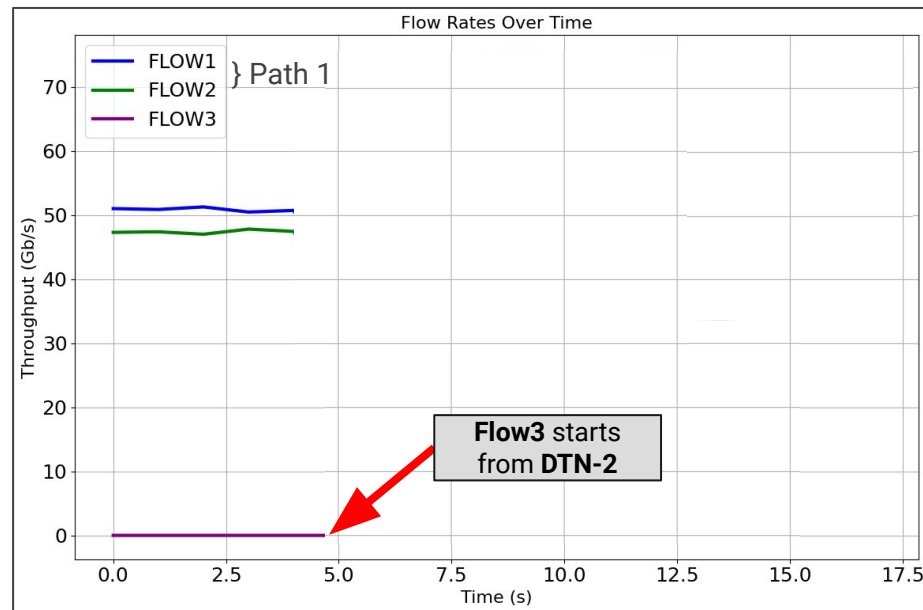
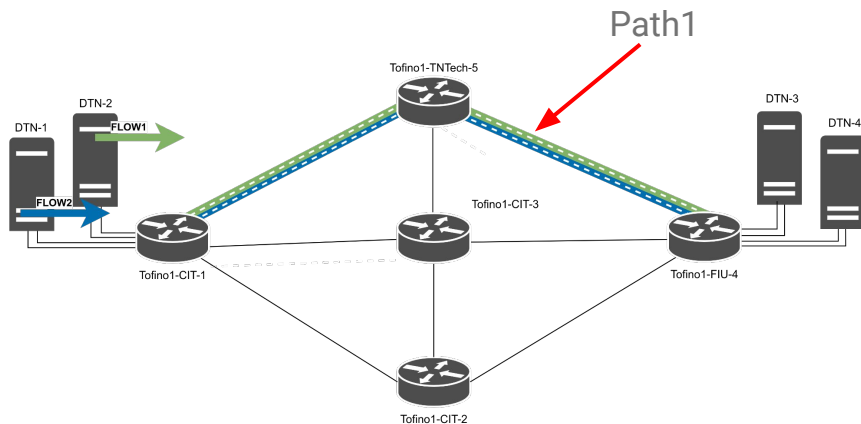
Path-Aware - Dashboard

```
Choose a path:
1) Select Path1 - (3 hops) - [CIT1-TNTech-FIU]
2) Select Path2 - (3 hops) - [CIT1-CIT3-FIU]
3) Select Path3 - (3 hops) - [CIT1-CIT2-FIU]
4) Select Path4 - (4 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-FIU]
5) Select Path5 - (4 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-FIU]
6) Select Path6 - (5 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-CIT2-FIU]
7) Select Path7 - (5 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-TNTech-FIU]
8) Check Performance Metrics Path1
9) Check Performance Metrics Path2
10) Check Performance Metrics Path3
11) Check Performance Metrics Path4
12) Check Performance Metrics Path5
13) Check Performance Metrics Path6
14) Check Performance Metrics Path7
15) Link1 Bandwidth Occupation
16) Link2 Bandwidth Occupation
17) Link3 Bandwidth Occupation
18) Select Background Traffic on path1 - (3 hops) - [CIT1-TNTech-FIU]
19) Select Background Traffic on path2 - (3 hops) - [CIT1-CIT3-FIU]
20) Select Background Traffic on path3 - (3 hops) - [CIT1-CIT2-FIU]
21) Select Background Traffic on path4 - (4 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-FIU]
22) Select Background Traffic on path5 - (4 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-FIU]
23) Select Background Traffic on path6 - (5 hops) - [CIT1-TNTech-CIT3-CIT2-FIU]
24) Select Background Traffic on path7 - (5 hops) - [CIT1-CIT2-CIT3-TNTech-FIU]
q) Quit
Enter the number of the desired path (or type 'q' to quit): 15
Path1 Occupation: 100.00% of max capacity over 1 second
Press Enter to continue...
```

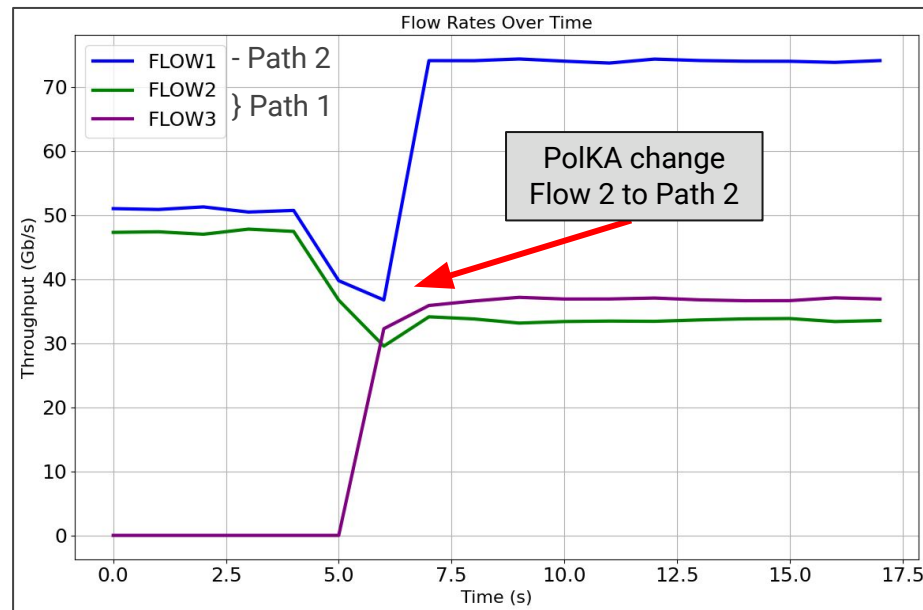
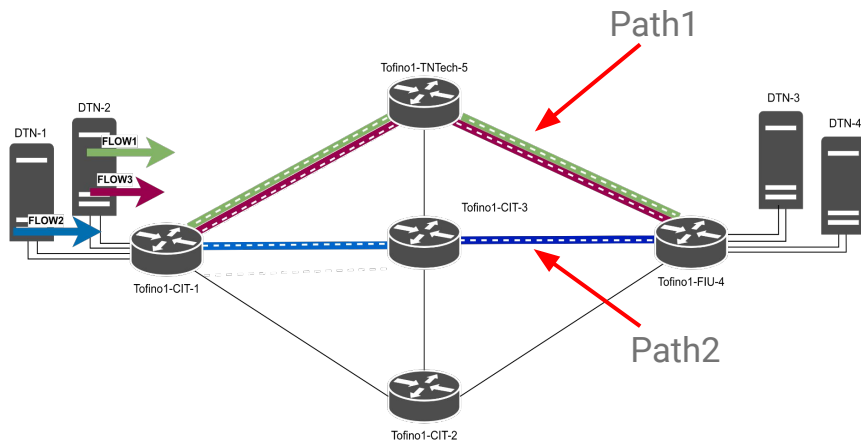
Path-Aware - Estrutura



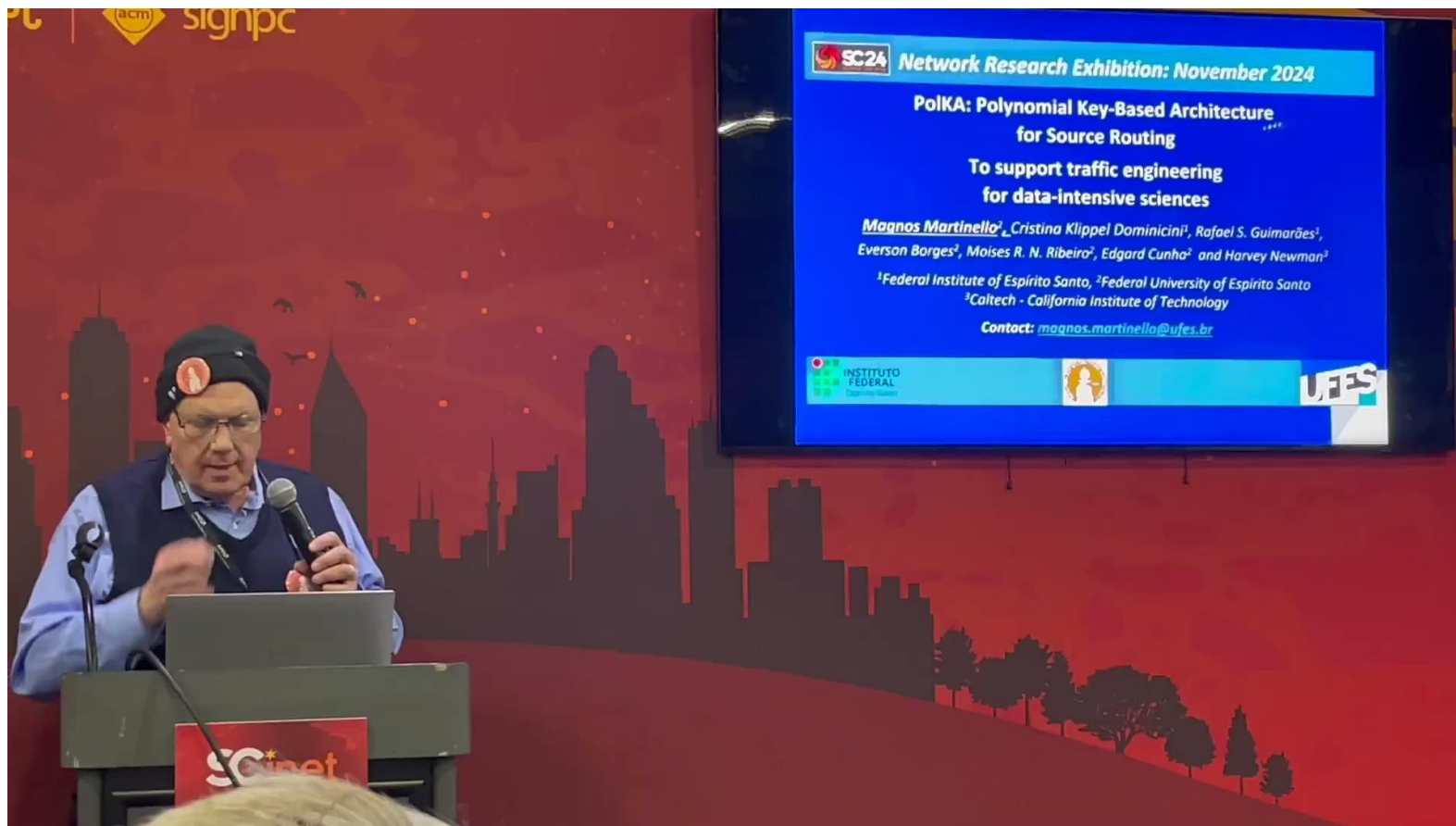
Experimento: Medindo a ocupação do link



Experimento: Medindo a ocupação do link

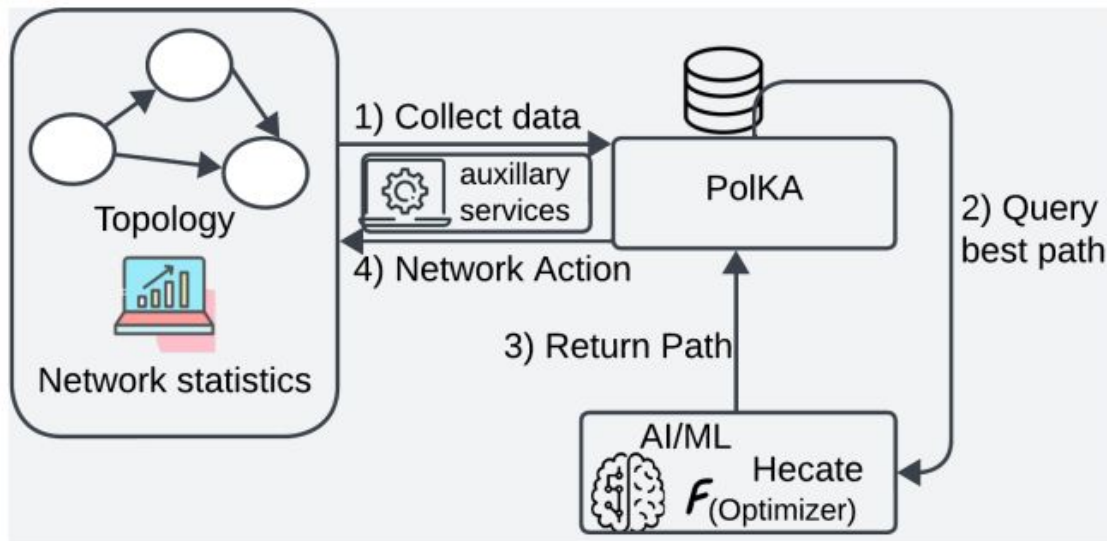


Professor Harvey Newman apresentando o Protocolo na plenária

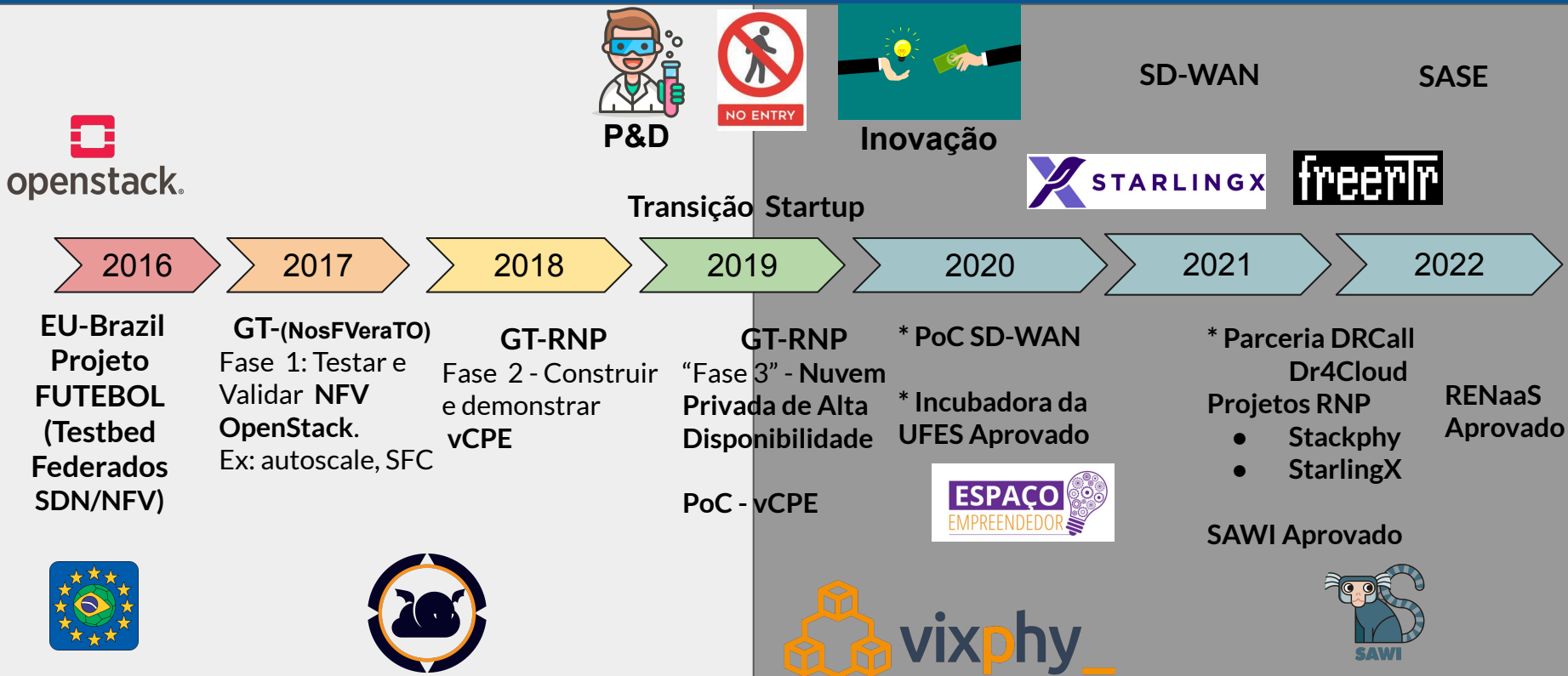


PolKA: Plano de Controle guiado por IA

- Integração de métodos de aprendizado de máquina para previsão de caminhos otimizados para os fluxos.



Ciclo de inovação : spin-off do LabNERDS



Inovação em Redes Avançadas: Redes Sobrepostas, Confiáveis e Seguras



Savvy Access through Worldwide Internet - SAWI

Startup Proponente:

Chamada de Propostas
FAPESP / MCTIC - 2019 (PIPE)

Pesquisa Estratégica sobre a
Internet

Pesquisa Inovativa em
Pequenas Empresas (PIPE) -
FASE 2

FAPESP



Virtualização de serviços de rede em
plataformas de nuvem código aberto.

Parceria Acadêmica:

Universidade Federal do Espírito Santo
(UFES)
Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)
Núcleo de Estudos em Redes Definidas por
Software
(NERDS)

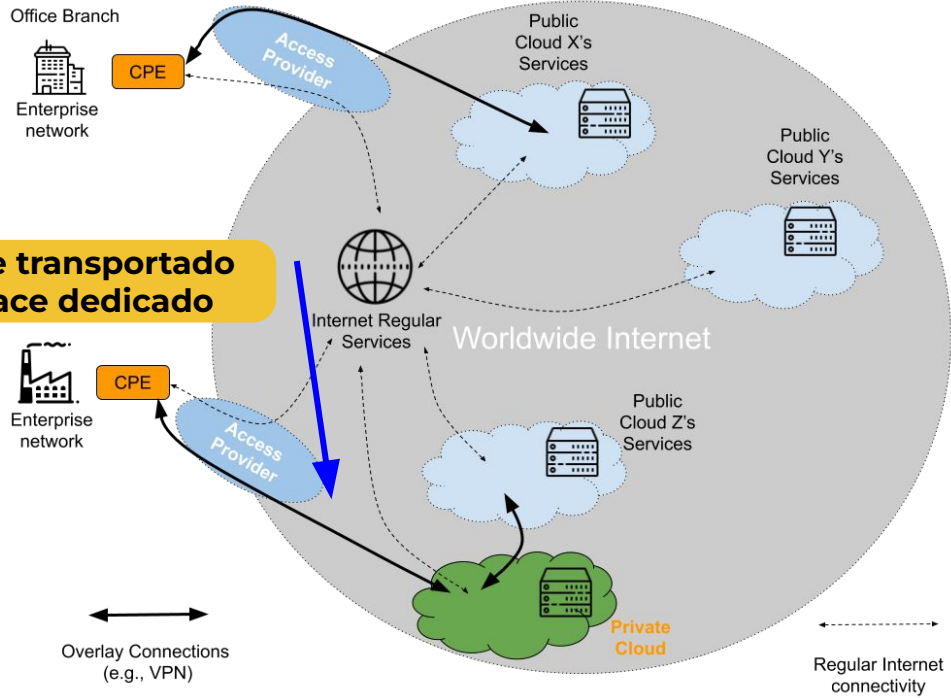


<https://bv.fapesp.br/pt/auxilios/108581/sawi-savvy-access-through-worldwide-internet/>

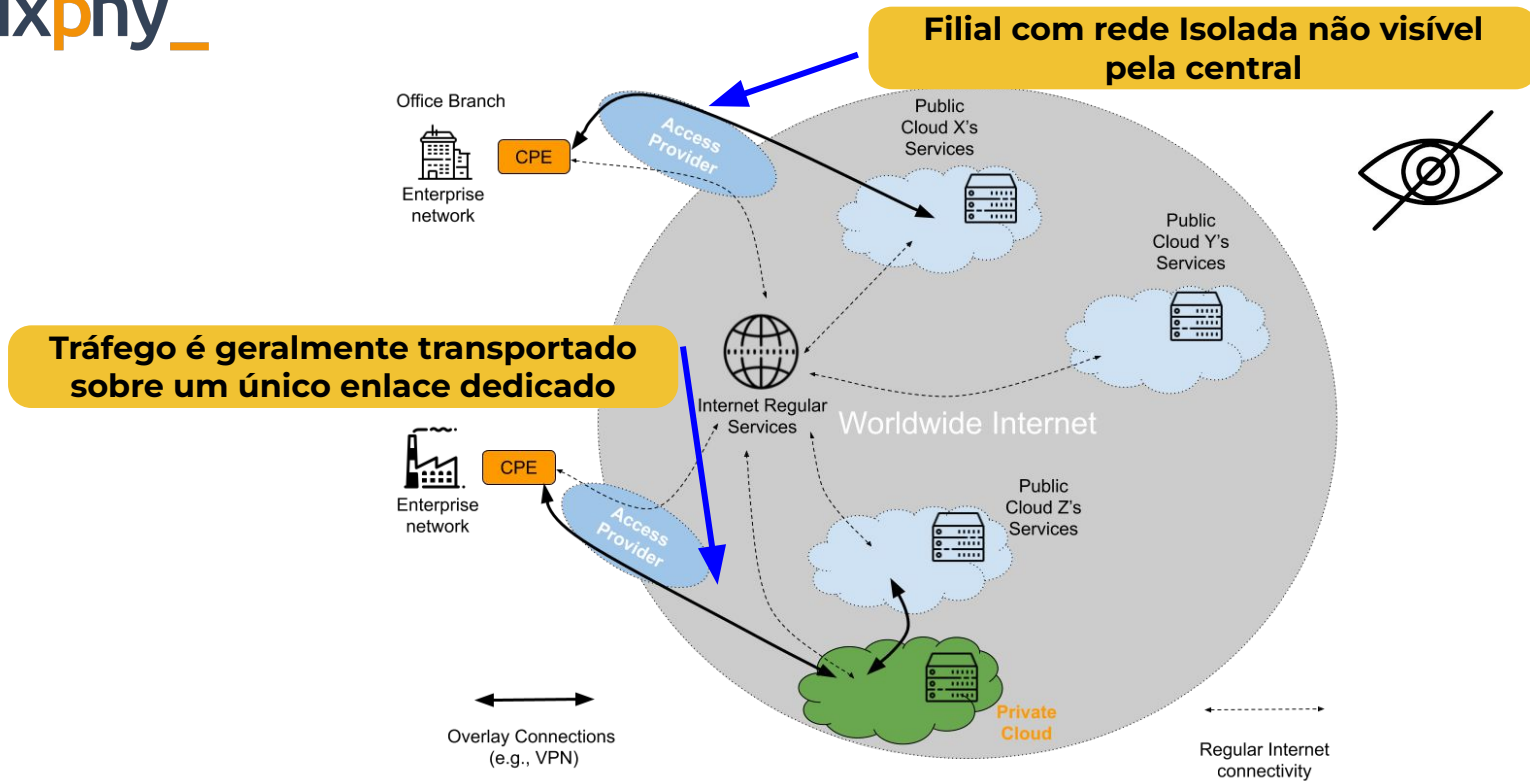
Inovação SD-WAN : spin off do LabNERDS



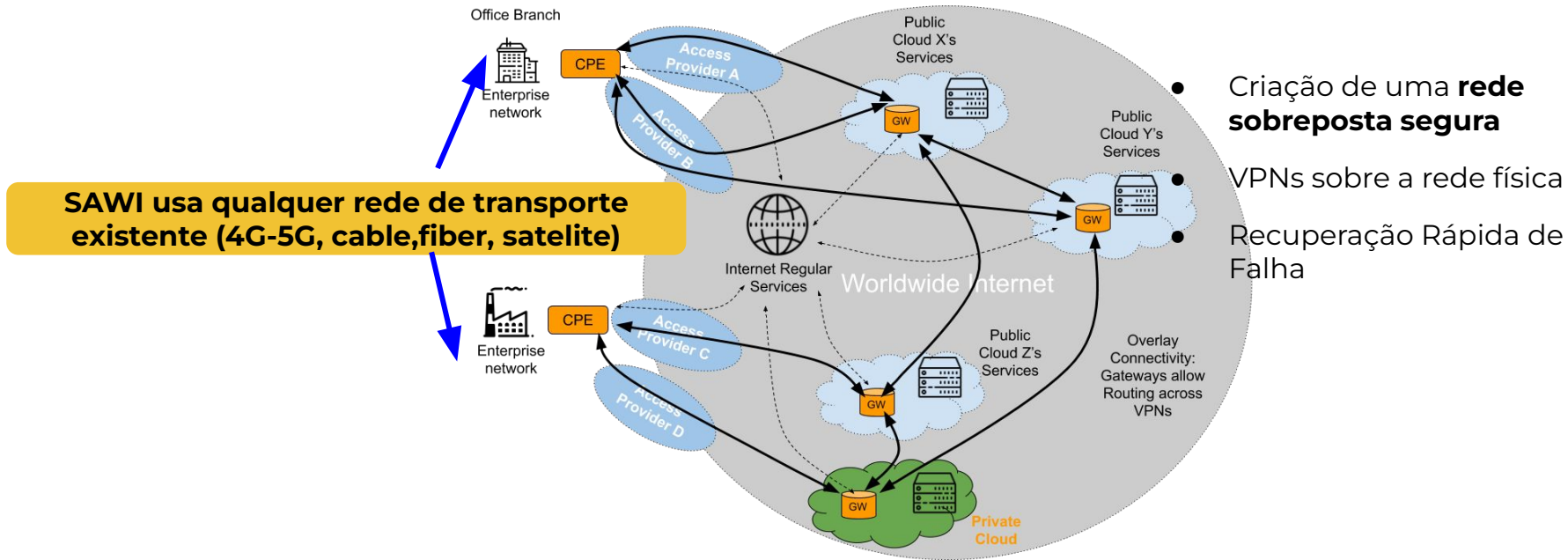
Tráfego é geralmente transportado sobre um único enlace dedicado



Inovação SD-WAN : spin off do LabNERDS



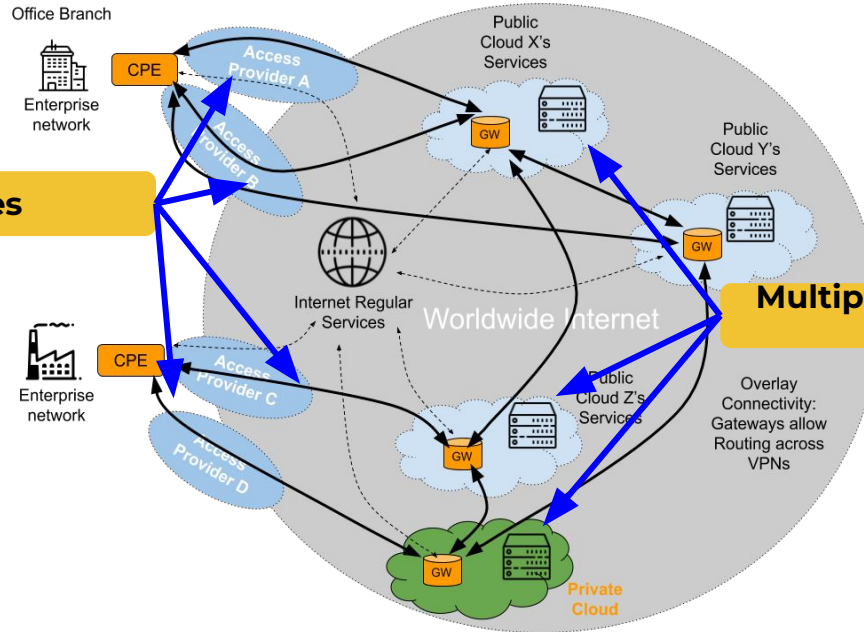
Inovação SD-WAN : spin off do LabNERDS



Multiplicidade e Diversidade

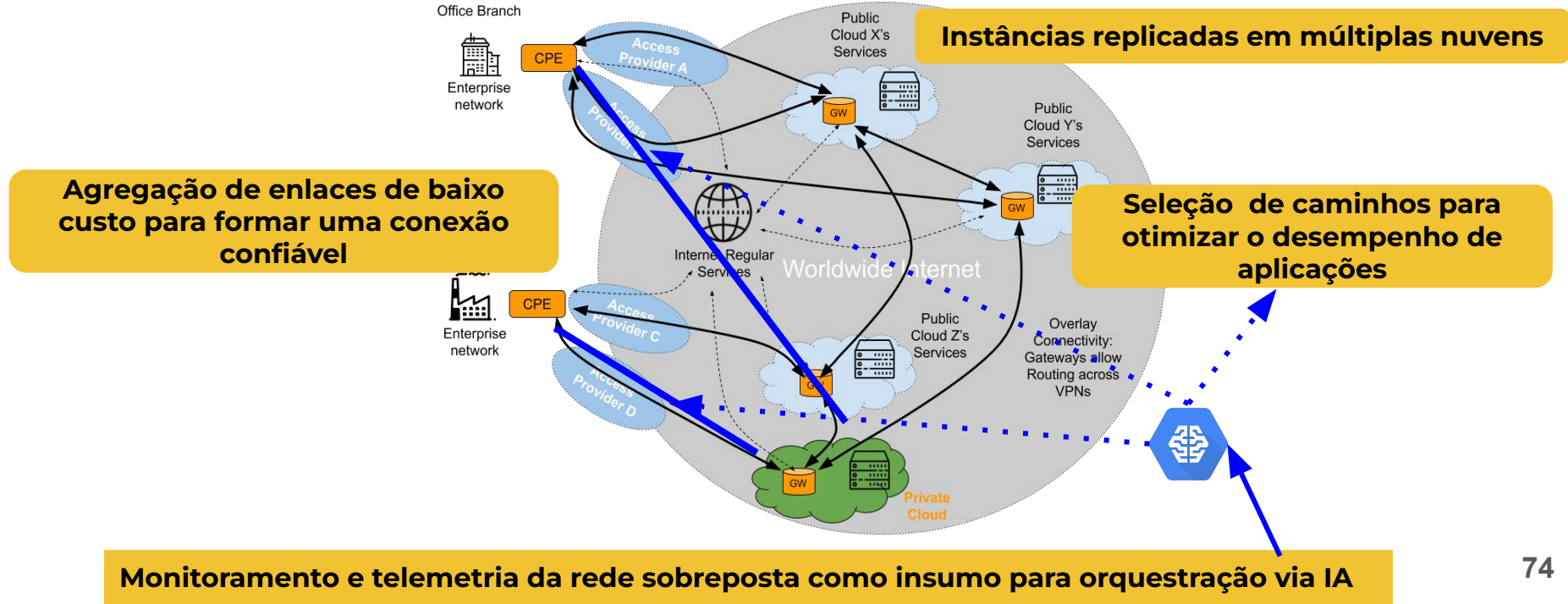


Diversidade de enlaces



Multiplicidade de infraestrutura de nuvem (híbrid)

Orquestração e Predição guiadas por IA



Lições aprendidas

- Vixphy foi encerrada em 2023
- Desafios:
 - Manter mão de obra qualificada , transformar tecnologia em negócio
- Legado mostra que é viável implementar o **SD-WAN impulsionada por nuvens privadas e IA** em plano de dados programáveis de alto desempenho.
 - Empresa **TelcoWeb** tem continuado a empreender a solução
 - RNP contratou uma solução SD-WAN nacionalmente (Cisco)

Recap : Experiências de P&D&I em Redes Abertas

- Construção de ferramenta para emulação de redes em Switches Tofino (Intel) : **PINT-BoX**
- Demonstração da viabilidade de **implementar modelos de ML** (classificadores) dentro da Rede (O-RAN e na Borda -> SmartNICs)
- Proposta, prototipação e implantação de um protocolo de roteamento ciente do caminho : **PolKA**
 - Ideia, publicação, validação em emulação, implantação em testbeds e demonstrações (SuperComputing 2022, 2023 e 2024)
- Experiência de criar uma startup (*Vixphy*) para conexão confiável e segura **SD-WAN**

Conclusões

- Precisamos de um ecossistema combinando laboratório, ambientes experimentais, prototipação, construção de artefatos, testes e demos
 - Ponto central é formar **material humano** nesse ecossistema
- É preciso mais parcerias com a **indústria com projetos de longo prazo** para desenvolver tecnologia nacional (**programa openRAN Brasil**)
- Fundamental entender a realidade da operação de redes
 - Experiências valiosas provenientes da construção de redes de produção e experimentais (testbeds)
 - Na UFES, Pop-ES RNP , Metrovix, PTT-ES, P4Lab, Porvir-5G

Perspectivas futuras e Oportunidades

- Muitas oportunidades de pesquisa/desenvolvimento e inovação!
- Potencial para habilitar uma nova gama de aplicações !!!
 - Integração de slice em redes 5G nativamente no roteamento
 - Consórcio formado para a padronização do Ultra-Ethernet (Switches Tomahawk da Broadcom, Tofino da Intel) HP-WANs
 - Demanda gigantesca por treinamento de LLMs em DC
 - Novos protocolos de roteamento para redes de DC (Nvidia NCCP)
 - Padronização de sinalização de congestionamento L4S
 - Aplicações de roteamento para QKD

Agradecimentos aos Colaboradores



Fotos na Super Computing 2024



**Obrigado pela sua
atenção !**

Contato: magnos.martinello@ufes.br