# Estado da Arte em Inteligência Artificial Aplicada a Redes 6G


Aldebaro Klautau, UFPA

**Autores:**
Anderson Marins
Arismar Sodré Junior
Ciro Macedo
Cleverson Nahum
Cristiano Both
Davi Brilhante
Felipe Figueiredo
Joanna Manjarres
José Rezende
Kleber Cardoso
Luan Gonçalves
Lucas Costa
Luciano Mendes
Luiz Pereira
Mariana Mello
Rausley Souza
Roberto Kagami
Rodrigo Moreira
Sand Correia
Sheila Janota
Victor Lopes


Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

# Organização

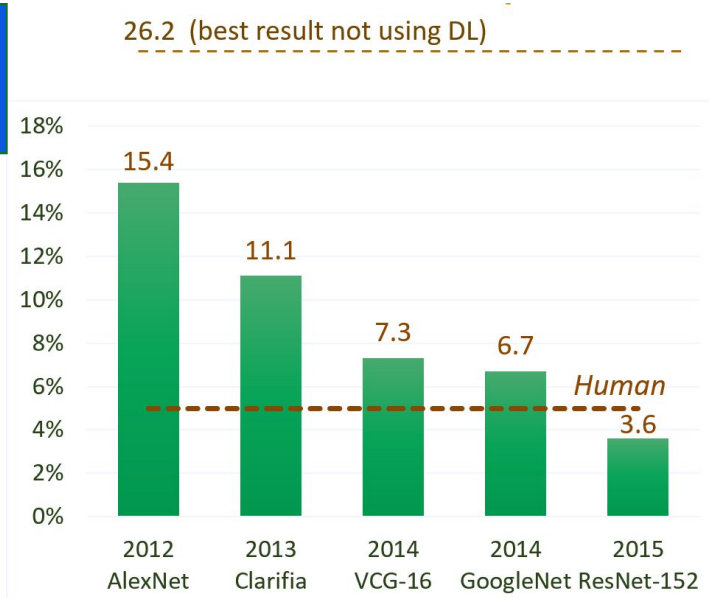
- **Objetivos:**
  - Incentivar familiarização com estado-da-arte em IA para 6G através da leitura do relatório (~130 páginas e ~380 referências)
  - Apresentar visão geral para audiência com formação diversa, provendo contexto extra e compatibilizando com o tempo disponível
- **Agenda:**
  - IA em 6G: Contextualização
  - Conceitos de IA e aprendizado de máquina
  - Roteiro do relatório:
    - IA em Redes de Acesso
    - IA em Redes de Transporte
    - IA no Núcleo e na Orquestração de Recursos e Serviços
    - Padronização para IA
    - Redes 6G como Suporte a Aplicações de IA
    - IA em Redes de Acesso (continuação)
  - Conclusões

# IA em 6G: Contextualização

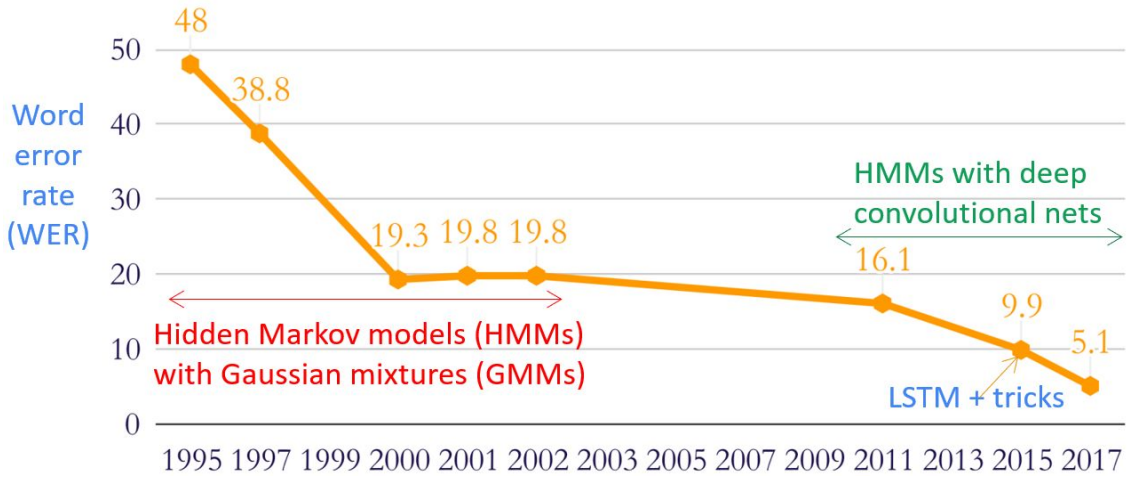
# Comparando IA/ML/DL em comunicações versus em áreas consagradas

Dois “breakthroughs” usando “deep learning” (DL):

Em visão computacional: detecção de objetos com ImageNet em 2012

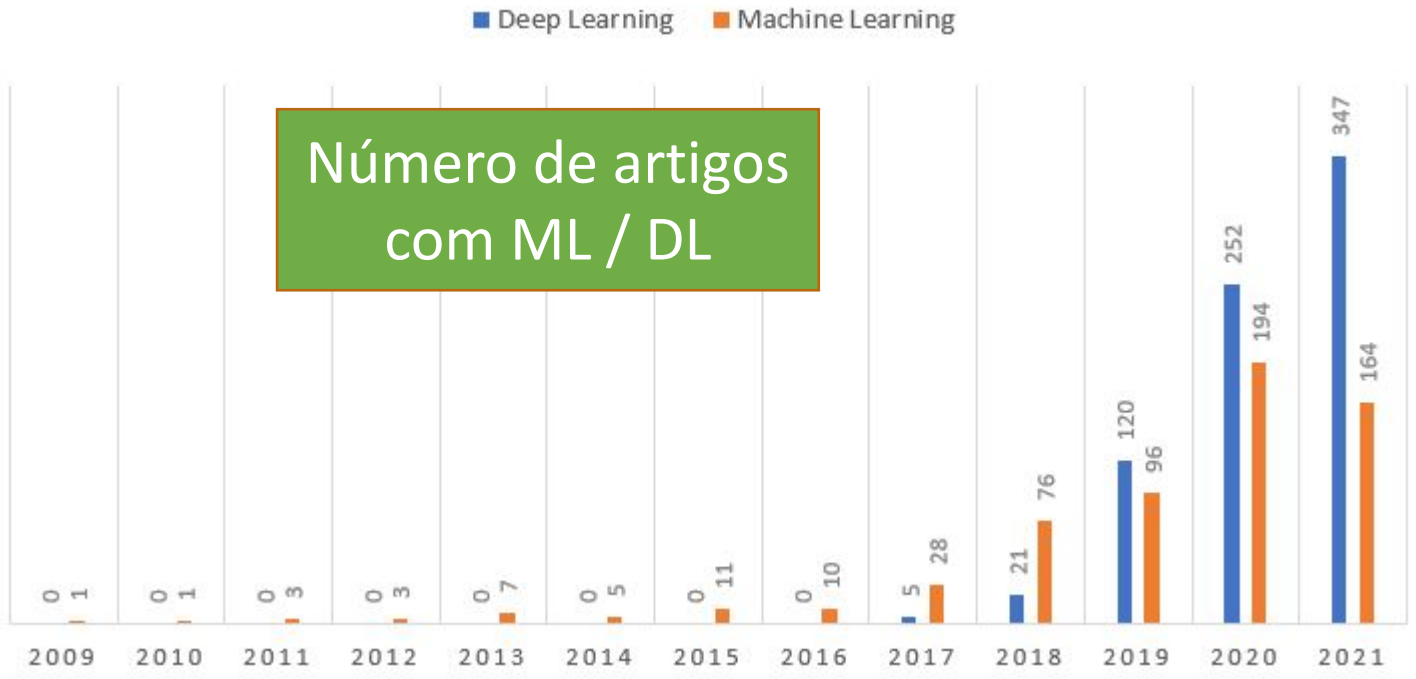



Em reconhecimento automático de fala usando base de dados Switchboard-1 em 2011



# ML/DL em comunicações

## # artigos com **deep** ou **machine learning** em seus títulos




Número de artigos com ML / DL

Apenas artigos das revistas IEEE ComSoc

Coletado via IEEExplore em 10/02/2022

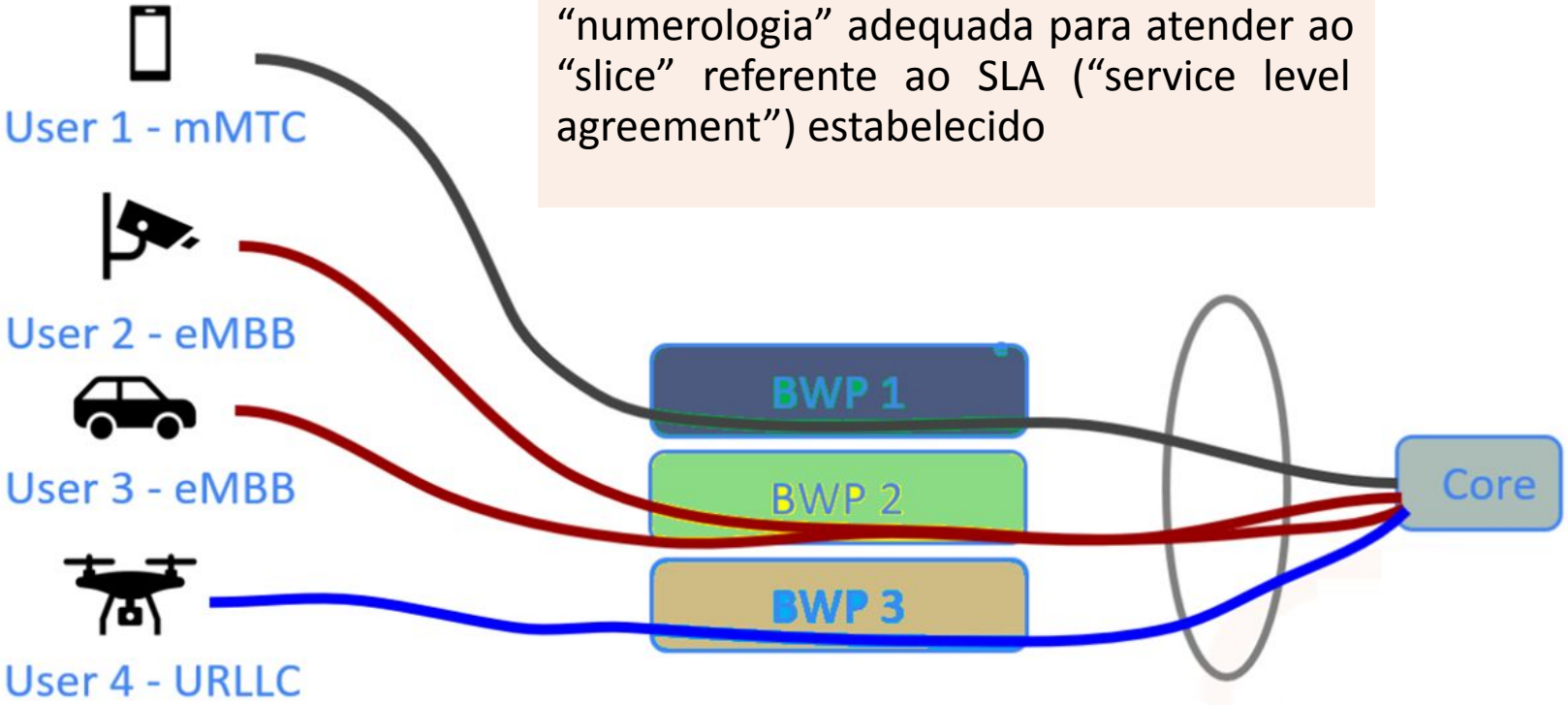
Por que precisamos de IA/ML/DL no 6G?

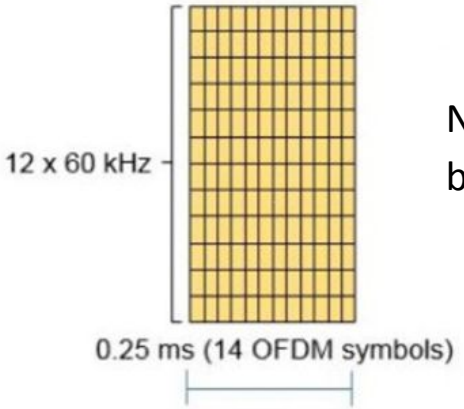
**Only in journals:**

IEEE Communication Letters
IEEE Communication Surveys & Tutorials
IEEE Journal on Selected Areas in Communication
IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking
IEEE Transactions on Communications
IEEE Transactions on Green Communications and Networking
IEEE Transactions on Wireless Communications
IEEE Wireless Communication Letters
IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking

# Como 5G NR habilita serviços com diferentes requisitos e se torna plataforma para novos negócios?

Largura de banda (BW) pode ser dividida dinamicamente em partes (BWP, “bandwidth part”), cada BWP adota a “numerologia” adequada para atender ao “slice” referente ao SLA (“service level agreement”) estabelecido



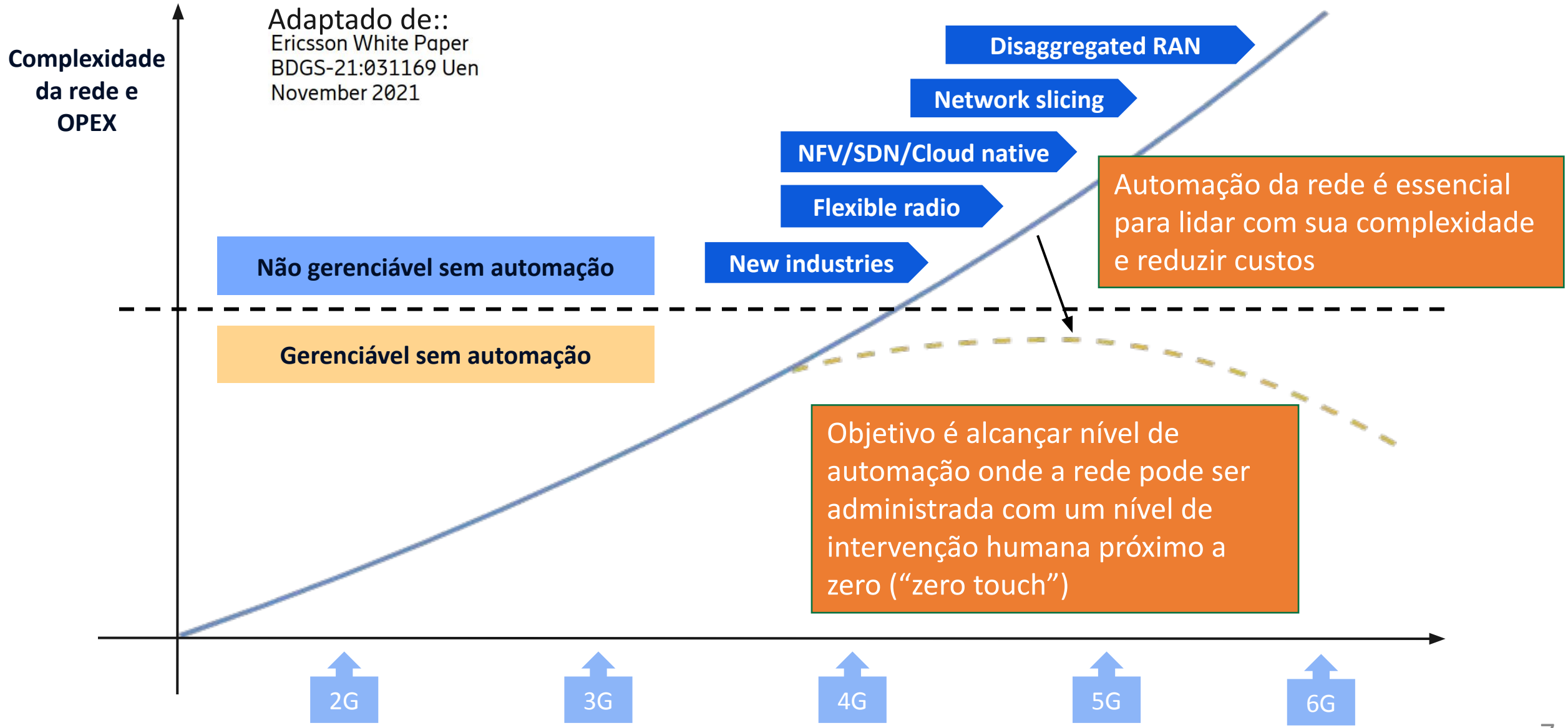




Numerologia 2, para baixa latência

Numerologia 1, usado para eMBB no BWP 2 neste exemplo

Numerologia 0 (LTE), para mMTC

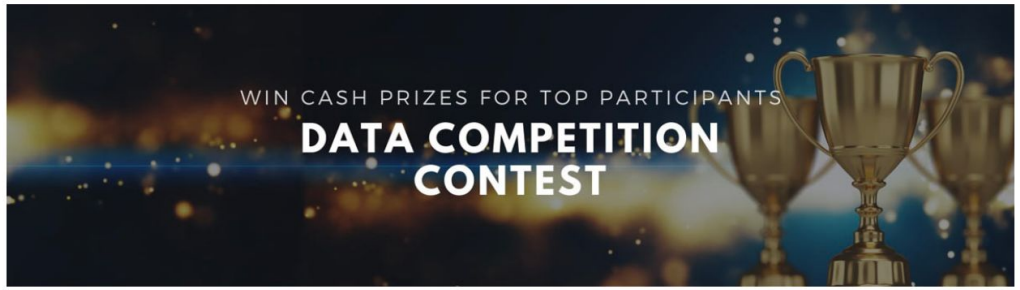
# Necessidade da IA/ML/DL na rede 6G




https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/smo-enabling-intelligent-ran-operations

# Bases de dados públicas e benchmarks

IEEE DataPort™ DATASETS COMPETITIONS IEEE




https://ieee-dataport.org/

Primeira edição em 2020 com a participação de 1300 pessoas de 62 países e premiações

Em 2021 houve 16 problemas/desafios e a grande final aconteceu em Dezembro

https://aiforgood.itu.int/ai-ml-in-5g-challenge
& https://challenge.aiforgood.itu.int/match

| Categoria | Número de bases de dados |
|---|---|
| **Comunicações** | 250 |
| Visão Computacional | 224 |
| Covid-19 | 55 |
| Processamento de imagem | 355 |
| Processamento de sinais | 229 |
| Potência e energia | 235 |

Brasil 6G

Obs: Gravações estão disponíveis

| | |
|---|---|
| Introduction - IEEE Future Networks Testbed Working Group | Ivan Seskar, Mohammad Patwary (Co-Chiars Testbed Working Group) |
| CONNECT testbed infrastructure: from open networking to **digital twins** | Marco Rufini (Trinity College Dublin) |
| Cloud-based Remote Experimentation for Future Networks: Challenges and Lessons Learned | Zhangyu Guan (University of Buffalo) |
| CCI xG Tesbed: Introducing the Next Generation of Testbeds with O-RAN and srsRAN | Aloizio Pereira da Silva (Virginia Tech) |
| IEEE 5G and Beyond Testbed: A New Collaborative Platform for Industry | Ashutosh Dutta (JHU/APL), Anwer Al-Dulaimi (EXFO) |
| Keynote Presentation**: O-RAN Overview: Standards, Software, and Test** | Ian Wong (Viavi/O-RAN) |
| Chameleon: Reproducible Experiments in the Edge to Cloud Continuum | Katarzyna Keahey (University of Chicago) |
| POWDER Platform: Increasing Experiment Automation & Composability | Neal Patwari and David Johnson (University of Utah) |
| Requirements and Challenges in Scalable Wireless Testbed Experimentation | Violet R. Syrotiuk (Arizona State University) |

| | |
|---|---|
| Slices: European Scientific Large-Scale Infrastructure for Computing/Communication Experimental Studies | Serge Fdida (Sorbonne) |
| The impact of open-source testbeds on **cellular security** research | Roger Piqueras (Google) |
| Keynote Presentation**: Academia, Industry, Non-profits, and Government: It Takes a Continent to Invent a Network** | Eric Burger (Next G Alliance) |
| AERPAW - Considerations for Designing Usage Models for a Computing-supported CyberPhysical Research Platform | Rudra Dutta (North Carolina State University) |
| COSMOS Testbed: Programmable **Optical x-Haul** Networking | Tingjun Chen (Duke University) |
| Long standing focus on Experimentation in Europe - From Federated Testbeds to Advanced Vertical Pilots | Jorge Pereira (EU Commission) |
| ARA Wireless Living Lab for Smart and **Connected Rural Communities** | Hongwei Zhang (Iowa State University) |
| Bristol 5G/6G Testbed and Trials | Dimitra Simeonidou (University of Bristol) |
| Mu-Net: Community-shared infrastructure for **mobile underwater acoustic networks** | Aijun Song (University of Alabama) |
| PAWR + Colosseum: Federating Physical and Virtual Wireless Testbeds to accelerate 5G and Beyond Research | Abhimanyu Gosain (Northeasern University) |

# Início da 2ª geração de IA/ML/DL p/ COM.

[Seide et al] Switchboard-1 breakthrough

[Alex Krizhevsky et al] ImageNet breakthrough

1344 artigos em ML / DL para comunicações nas revistas IEEE ComSoc

Três ingredientes:
1) bases de dados **públicas e** benchmarks;
2) plataformas experimentais
3) Interfaces e modelos **padronizados**

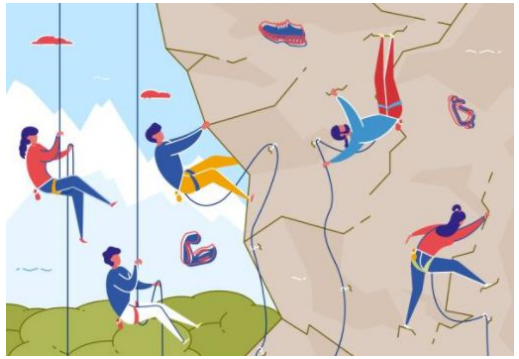
5G

6G + AI

2011 | 2012 | … | 2021 | 2022 | … | 2030

1ª geração de IA/ML/DL para comunicações

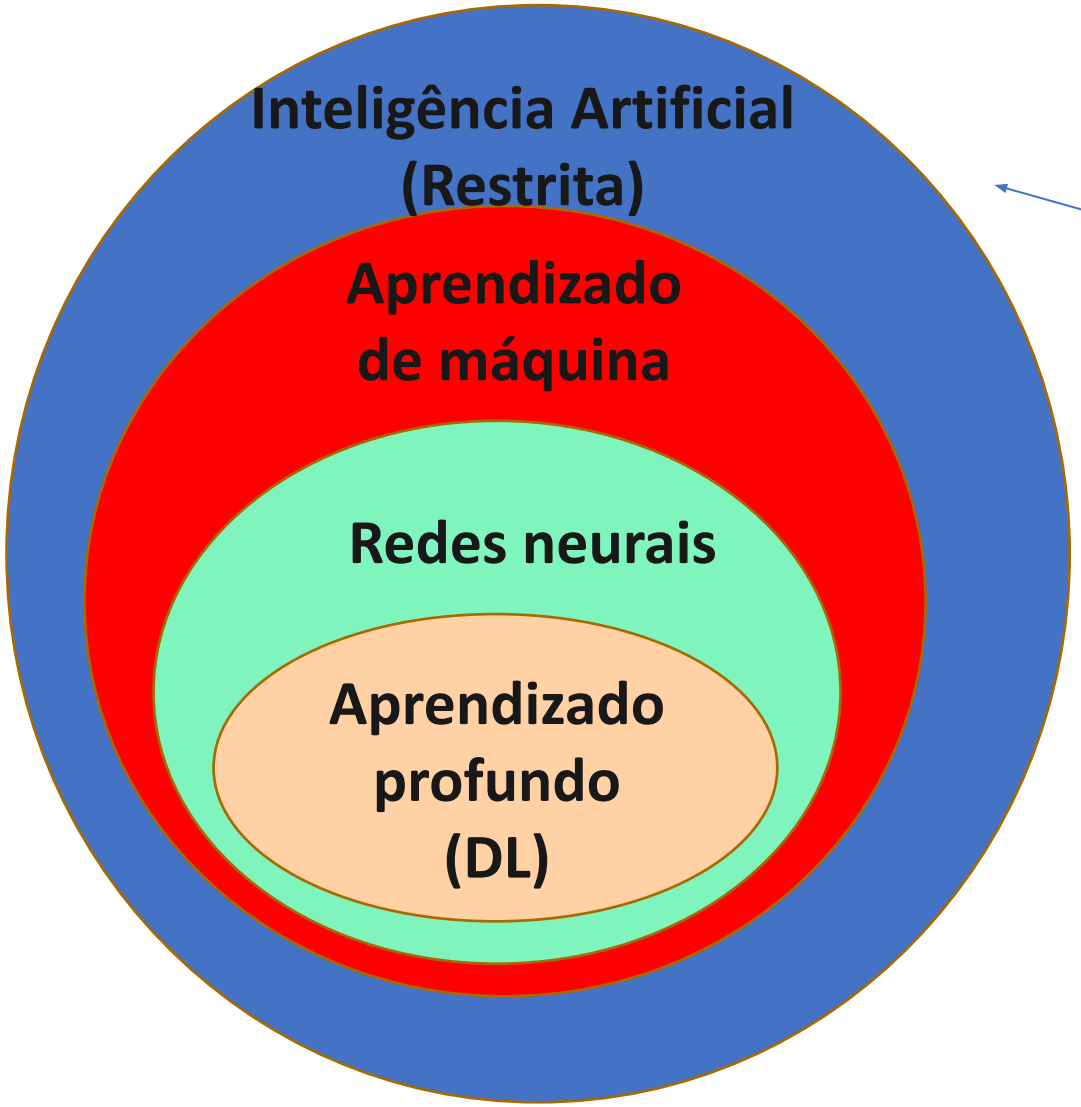
2ª geração

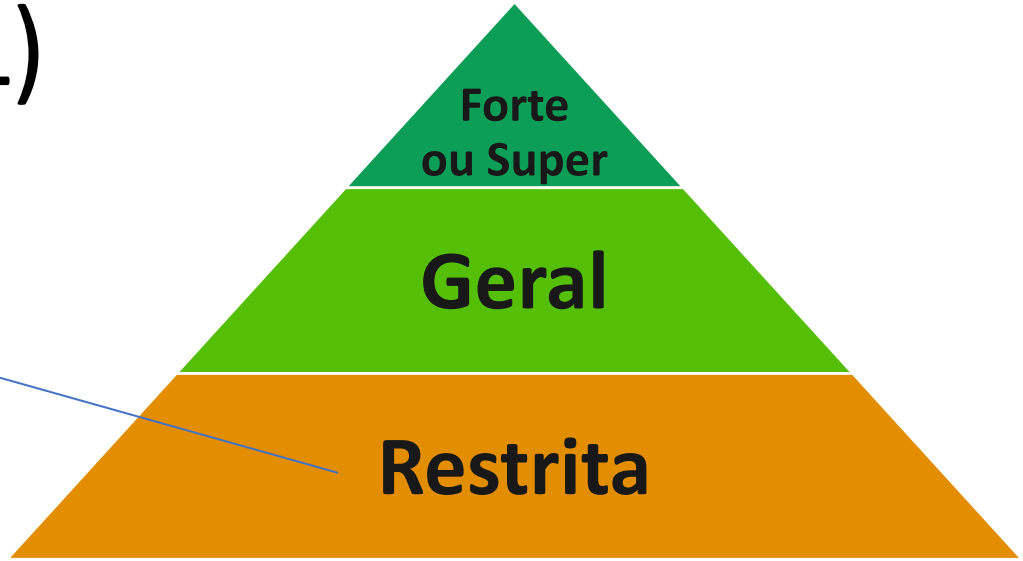


Sobre as bases de dados:
Predominância dos privados/pessoais, orientadas aos artigos, experimentos específicos

# Conceitos de IA e AM

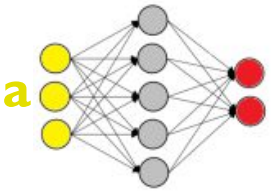
# IA, aprendizado de máquina (ML) e aprendizado profundo (DL)



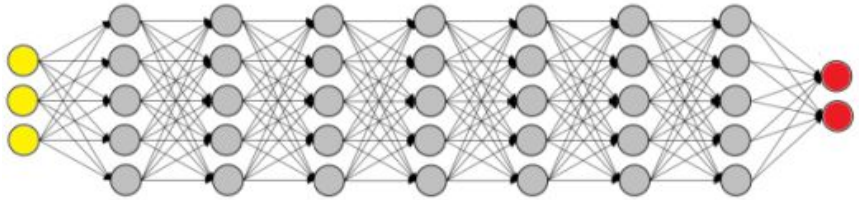




DL é um conjunto de técnicas para treinar e implementar redes neurais com um grande número de parâmetros

Rede rasa




Rede profunda

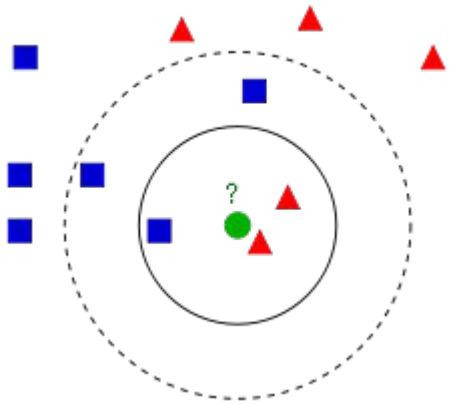


# Algoritmos de aprendizado supervisionado (maioria suporta classificação e regressão)

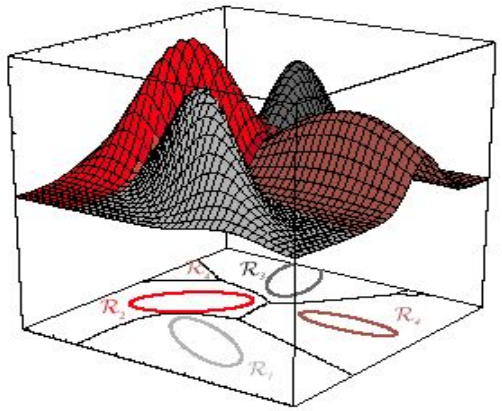
Exemplo de **classificação**: “link adaptation”, prever o MCS (“Modulation and Coding Scheme”)

Exemplo de **regressão**: estimar potência a ser alocada

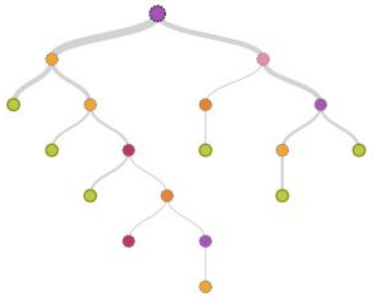
K-vizinhos mais próximos (KNN)



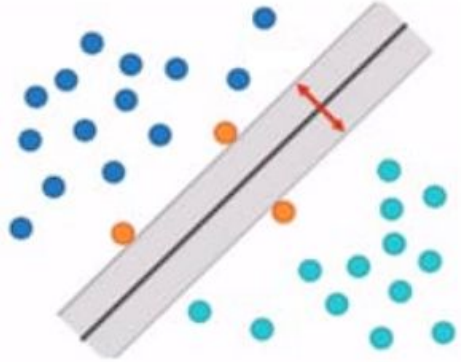

Naïve Bayes



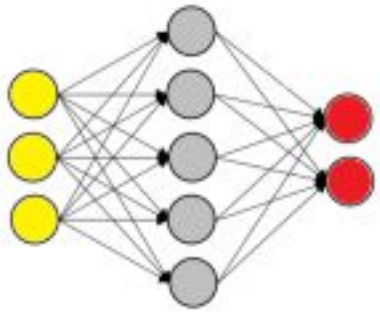
Árvore de decisão



Máquina de vetores suporte (SVM)



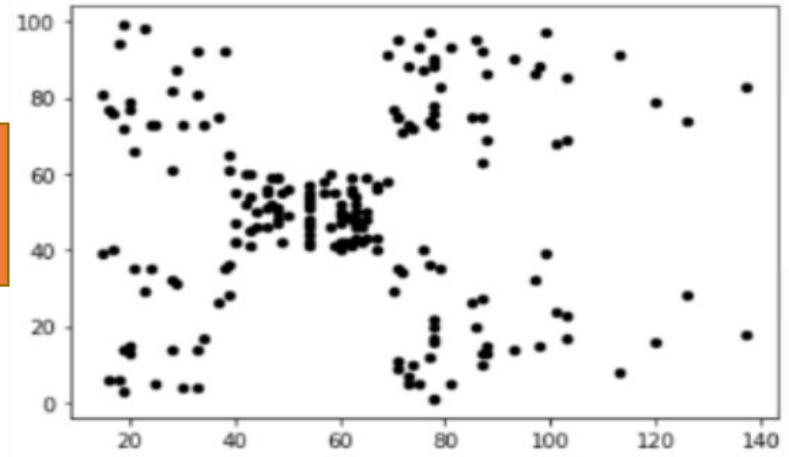
Redes neurais artificiais (ANN)



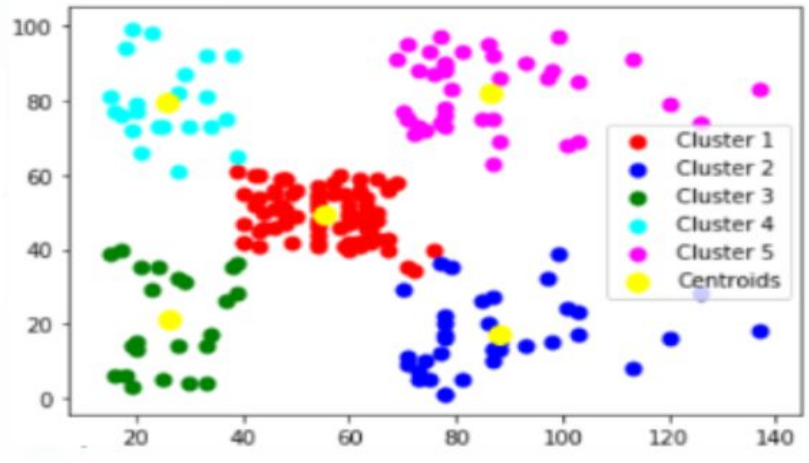
# Alternativas para o aprendizado supervisionado

## Aprendizado não supervisionado

Dados sem rótulo

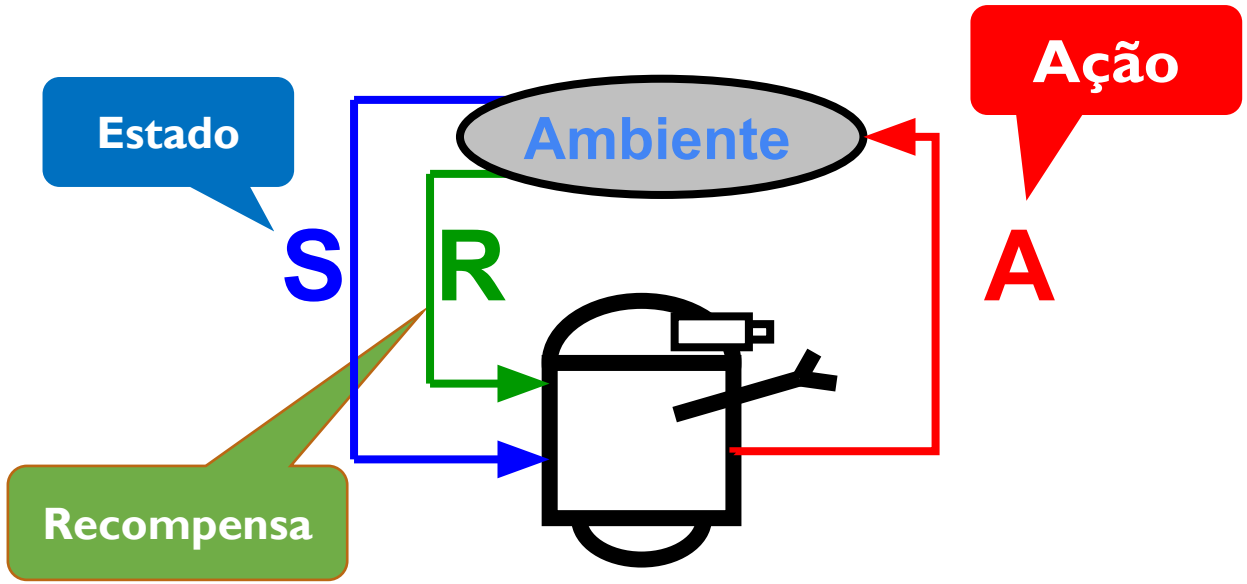



K-means clusterização com K=5 centróides




Adapted from https://ai.plainenglish.io/what-is-k-means-clustering-3060791cb589?gi=ba862c73fd17

## Aprendizado por reforço

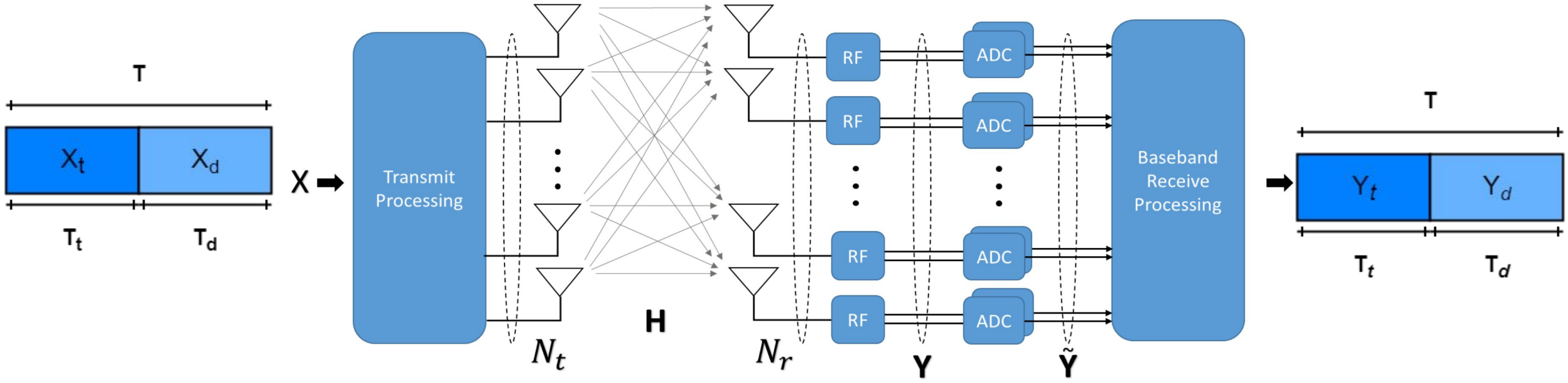



Objetivo: Encontrar uma política que maximize o retorno ao longo da execução (episódio, se não for uma tarefa contínua)

# IA em Redes de Acesso

# Gerenciamento de feixes em MIMO

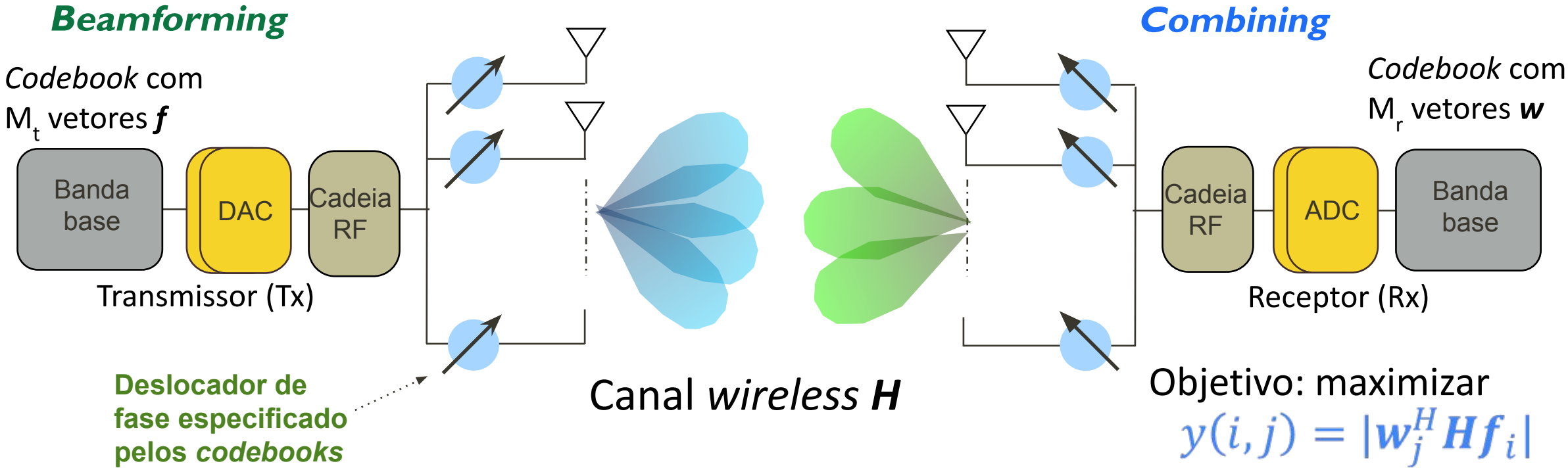
- Modelo do sistema: MIMO massivo, eventualmente incluindo conversores analógico-digital (ADCs)
- Assume canal não varia durante o tempo de coerência $T = T_t + T_d$ *usado para treinamento* (pilotos) e dados, respectivamente
- Exemplo de tarefa: Estimar canal **H baseado nos pilotos recebidos** $Y_t$



# Seleção de feixe em ondas milimétricas usando arquitetura analógica

Brasil 6G

**Alinhar os feixes dos transmissores e receptores**

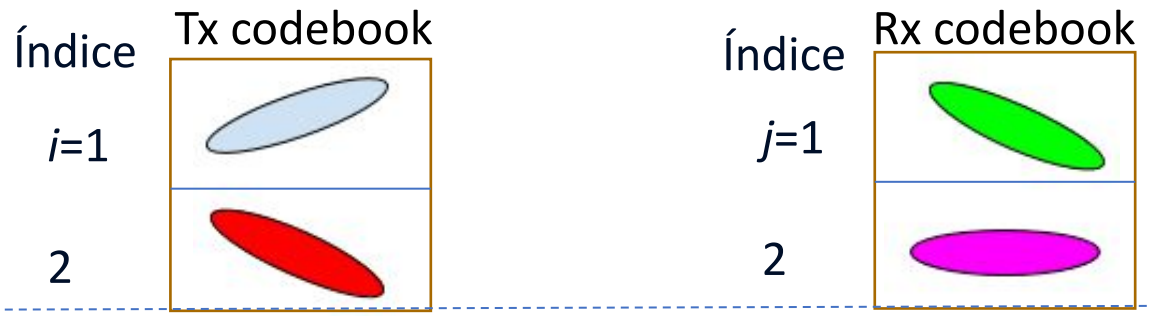



**Força bruta para encontrar o melhor ("beam sweeping"): tenta todas as possibilidades de índices de pares $M_t$ x $M_r$**

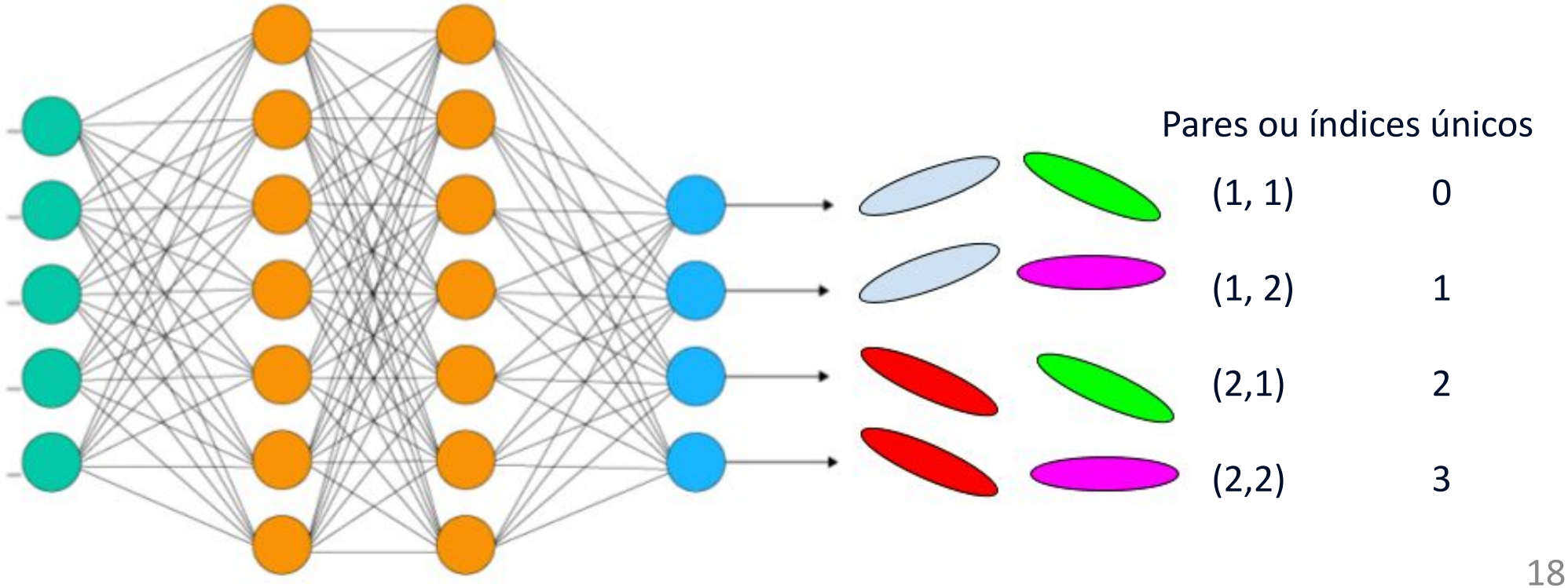
[1] Heath et al, An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems, 2016

# Exemplo de classificação: Seleção de feixe baseada em ML

Exemplo com dois vetores de feixes por codebook




Entradas do sistema de comunicação e também dos sensores como o LIDAR



# Alocação de recursos cross-layer ou multidimensionais

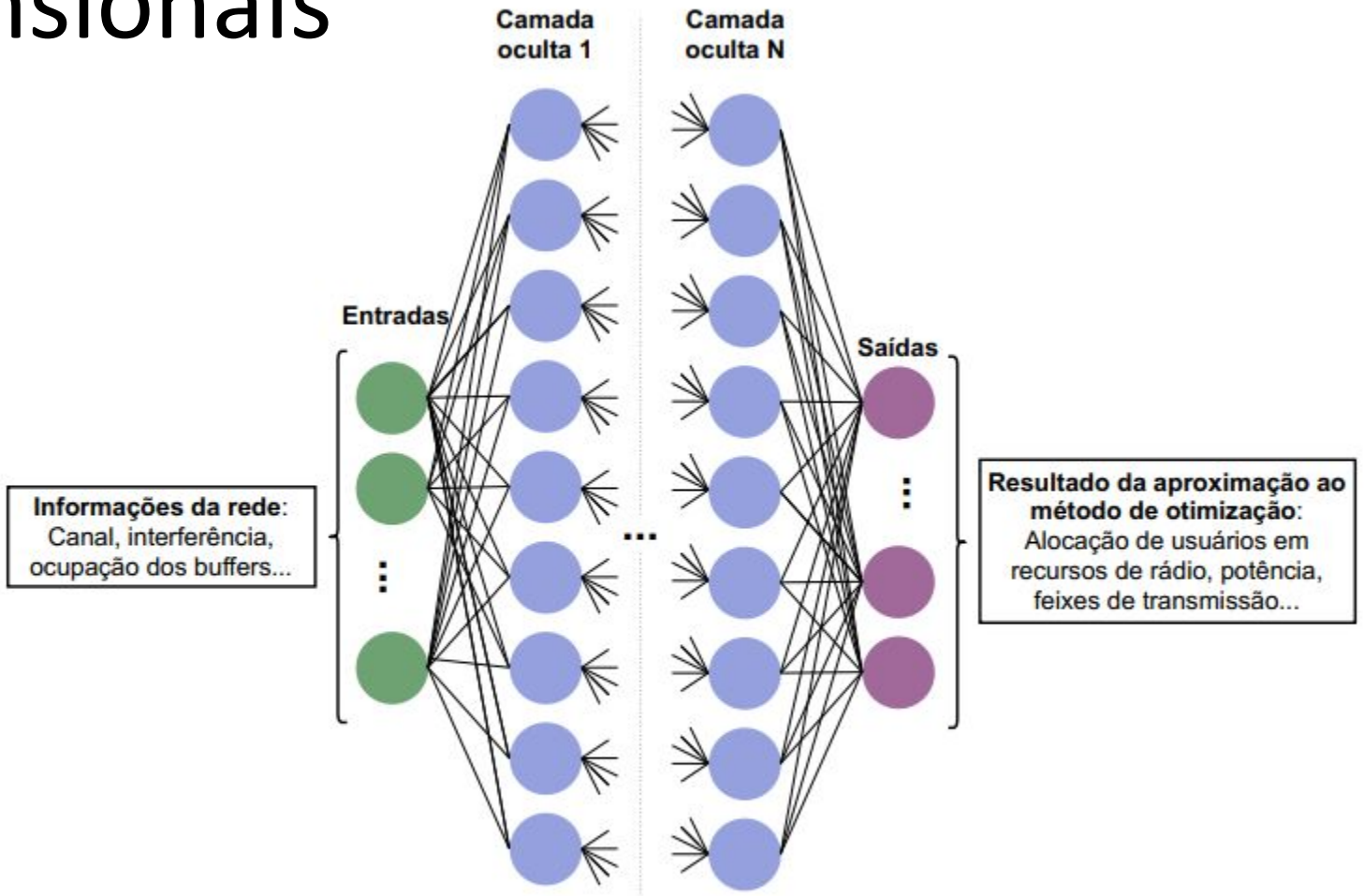



Figura 17: Estrutura de rede neural completamente conectada usualmente utilizada para aprendizado supervisionado de alocação de recursos da camada PHY/MAC.

# Alocação de recursos via aprendizado por reforço (RL)

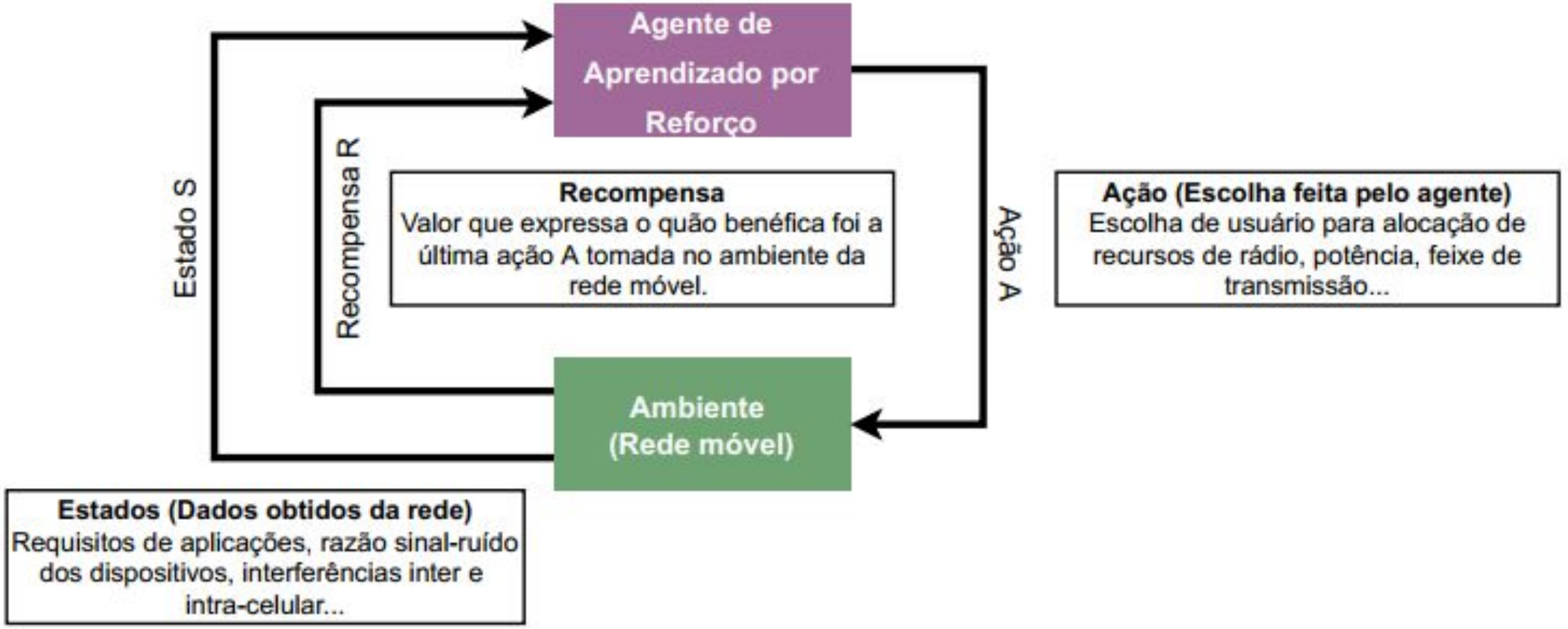
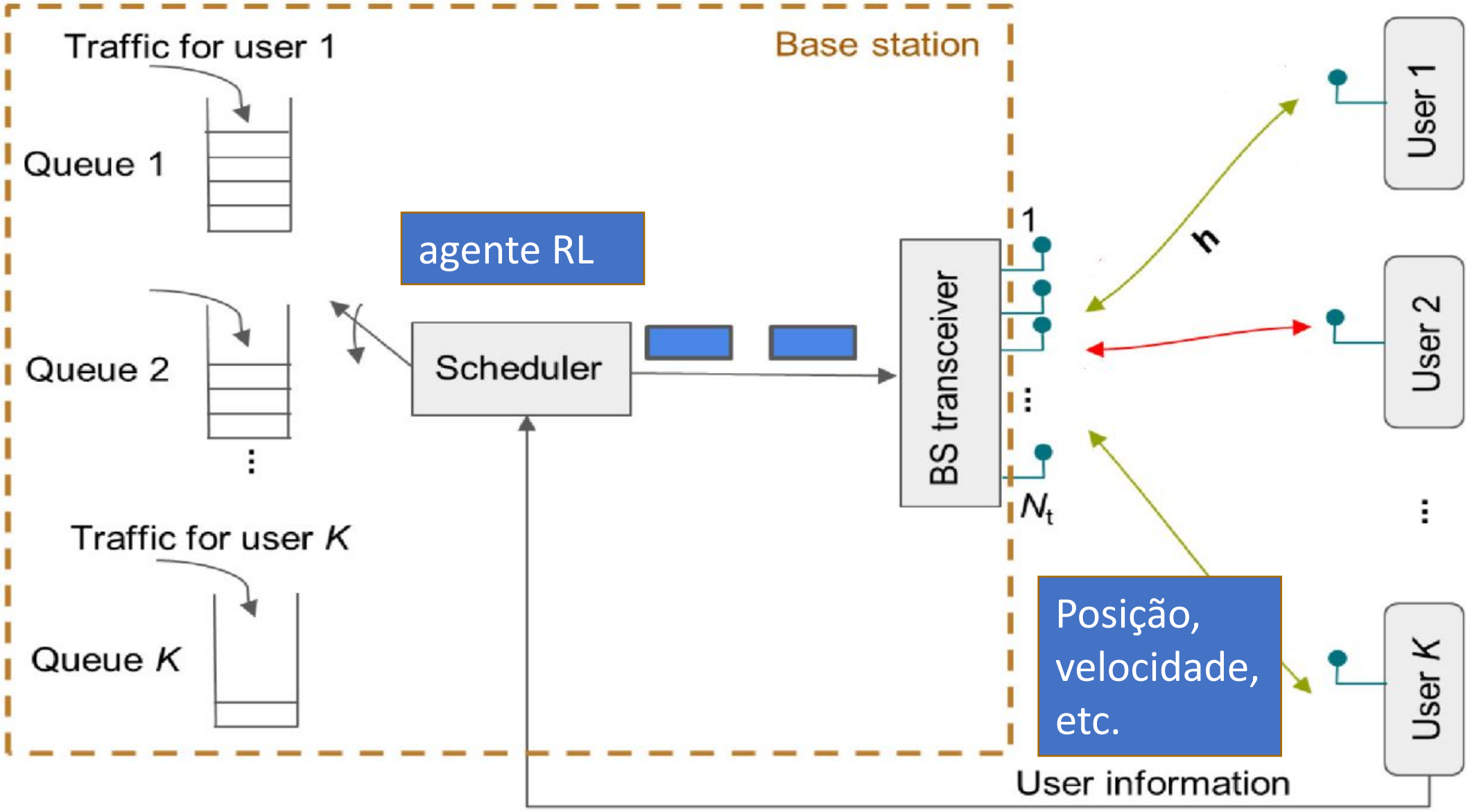



Figura 18: Estrutura da técnica de aprendizado por reforço utilizada para alocação de recursos da camada PHY/MAC.

# Exemplo:

Problema: alocação e escolha de feixes no *downlink*



# Gêmeos Digitais para Camada Física 6G

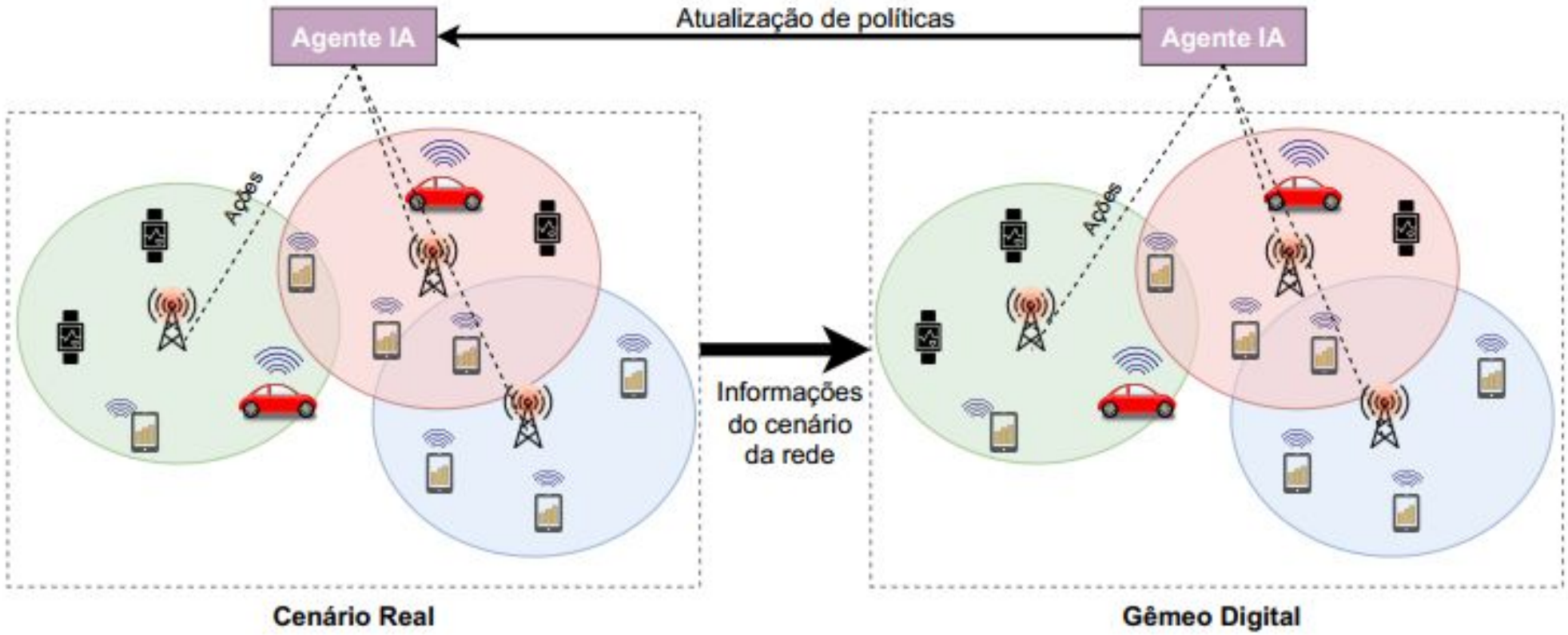


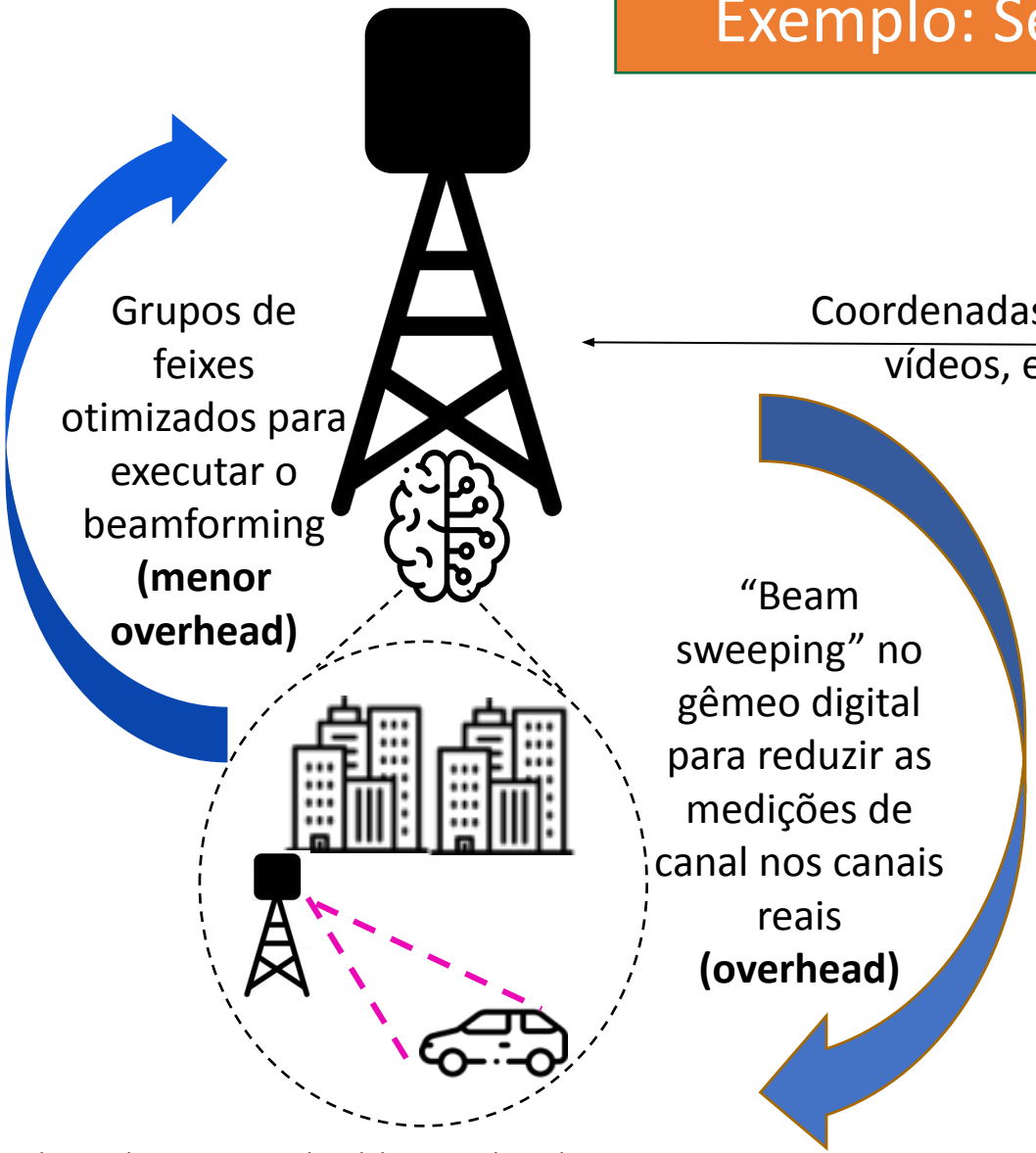

Figura 19: Estrutura de Gêmeo Digital aplicada a rede de acesso utilizando IA para alocação de recursos da camada PHY/MAC.

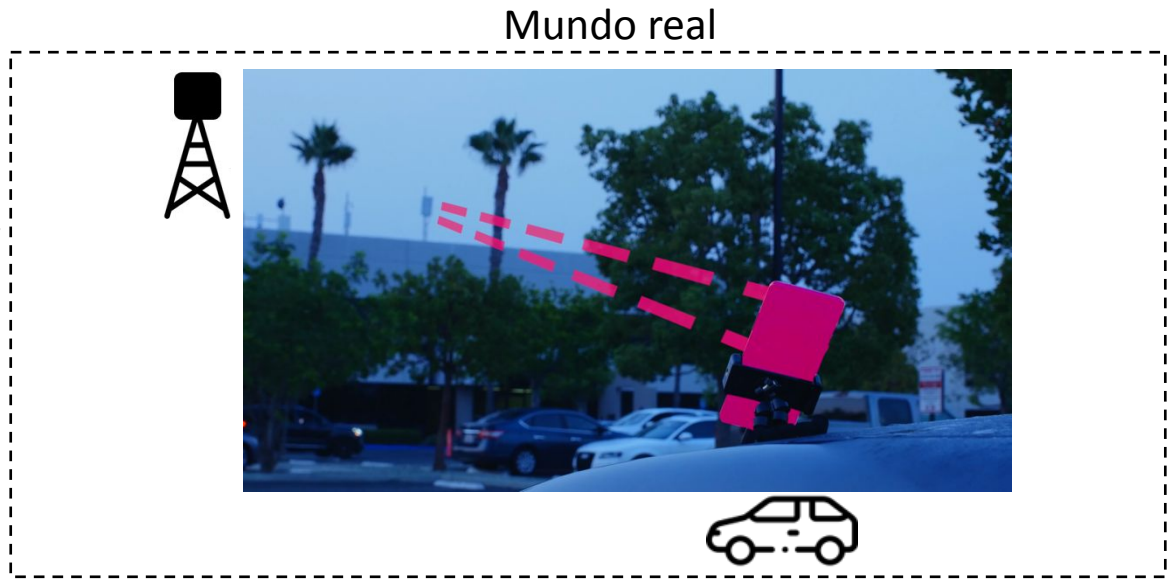
Vide, por exemplo: https://www.youtube.com/watch?v=6o6PUsbaWnA&ab_channel=LASSE-UFPA

# Gêmeos digitais para redução do overhead de comunicação

Brasil 6G

## Exemplo: Seleção de feixe em arquitetura analógica




Realidade virtual em tempo real: **FastNeRF** acelera a renderização 3D fotorealística via Neural Radiance Fields (NeRF) para visualizar cenas em 200 frames/s [1]

Execução de simulações de gêmeos digitais muito mais rapidamente que o tempo real

[1] Garbin et al, FastNeRF: High-Fidelity Neural Rendering at 200FPS, Apr. 2021



23

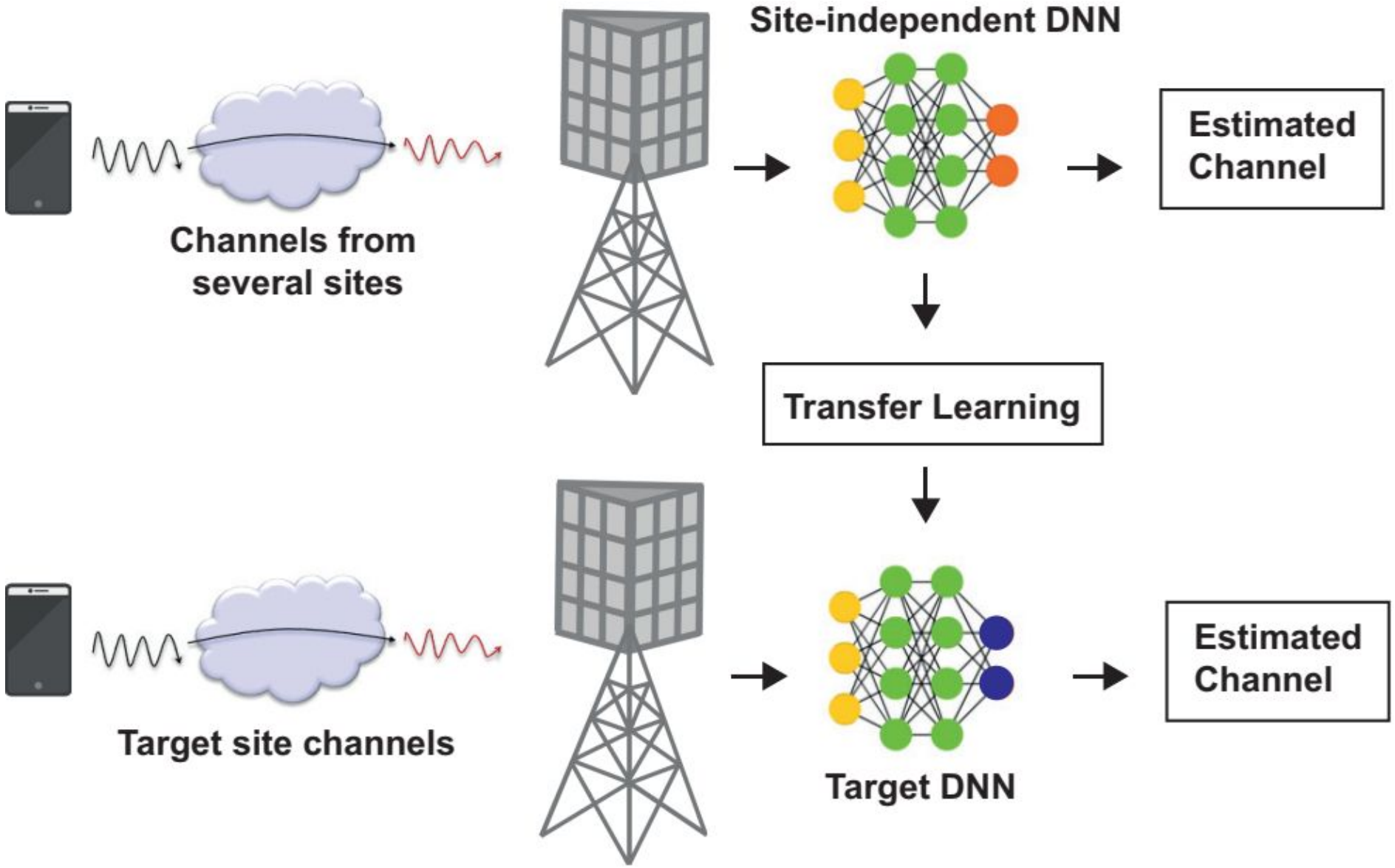
# Extração de características eletromagnéticas para gêmeos digitais

https://cesium.com/platform/cesium-for-unreal/

(a) Imagem original de uma rua obtida através do Cesium.

(b) Versão segmentada por DNN da imagem para fins de atribuição automática de propriedades eletromagnéticas aos objetos.

# “Transfer learning” em 6G, exemplo em estimação de canal

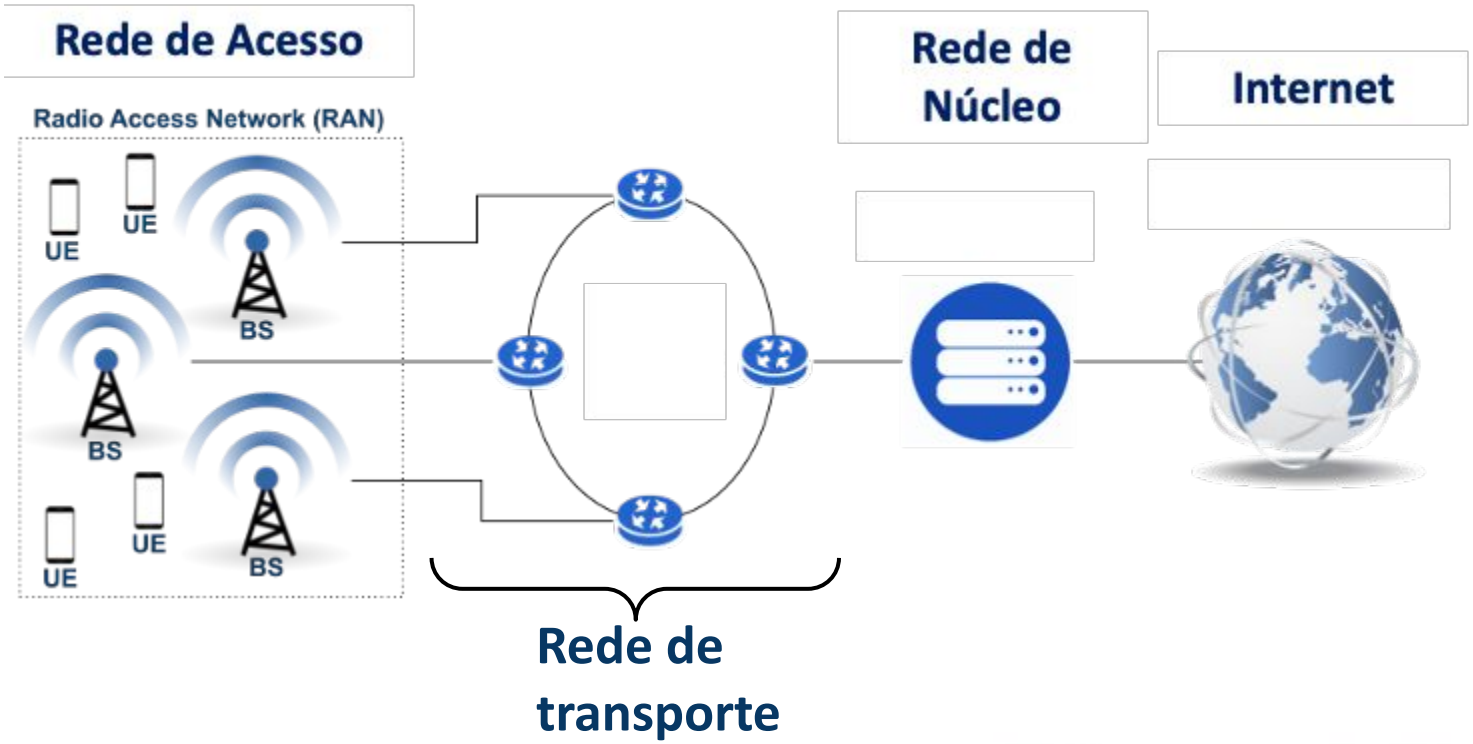


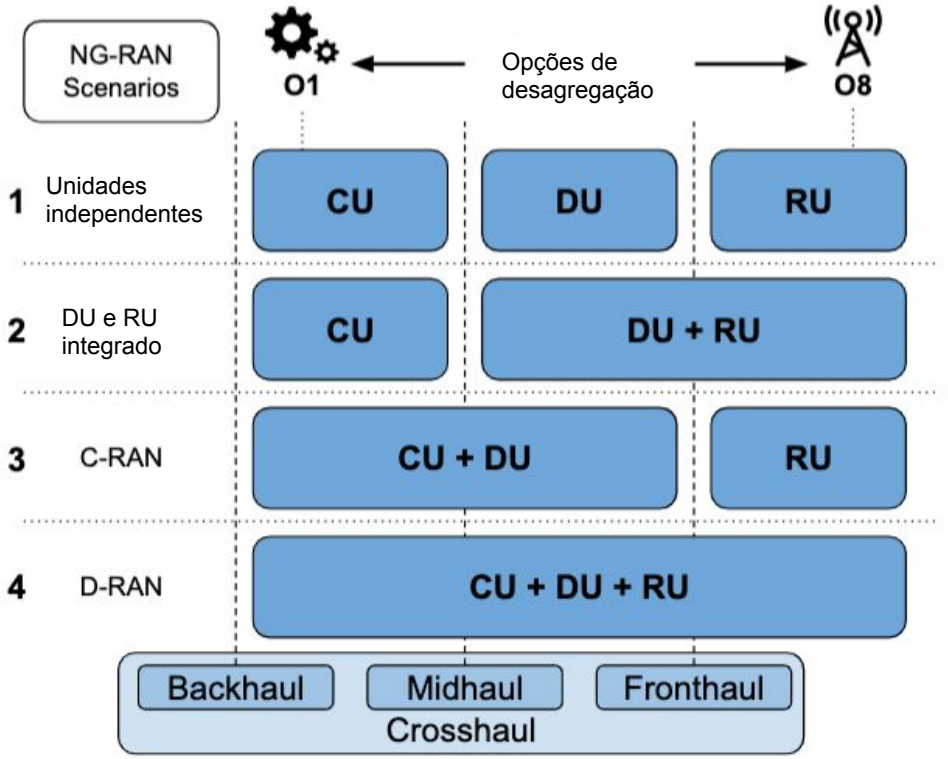


25

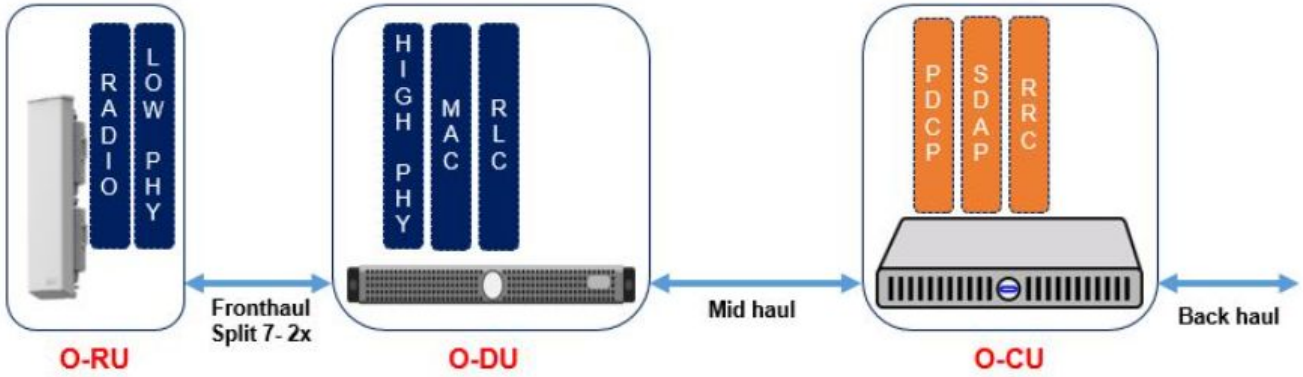
# IA em Redes de Transporte

# IA em Redes de Transporte



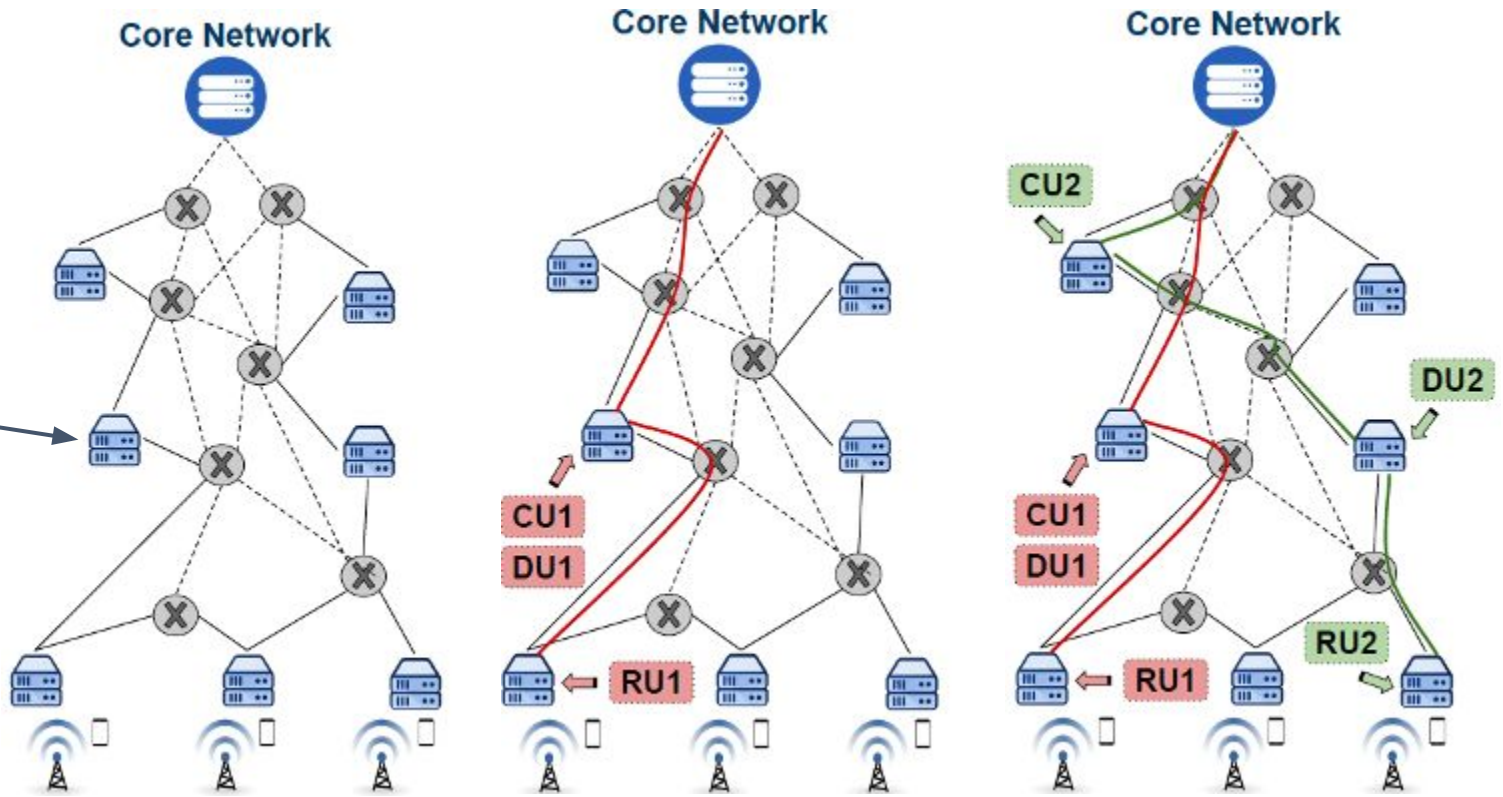




No contexto Open RAN:



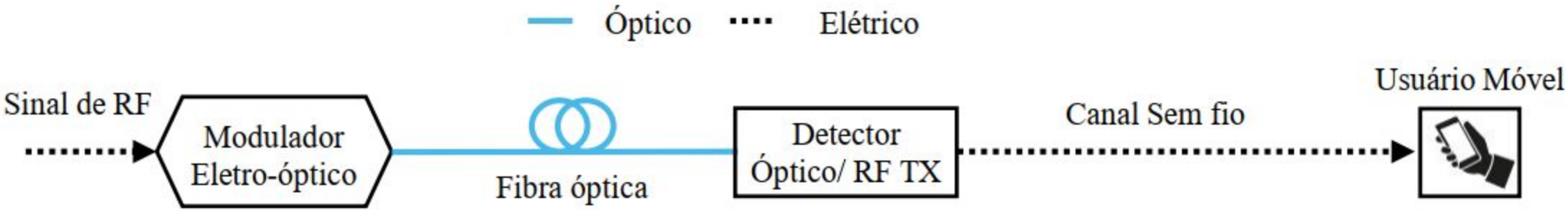
# Posicionamento e implantação de VNF

Recursos computacionais




Qual a posição ótima para funções de rádio virtualizadas considerando múltiplos fluxos?

# IA para sistemas com fibra óptica

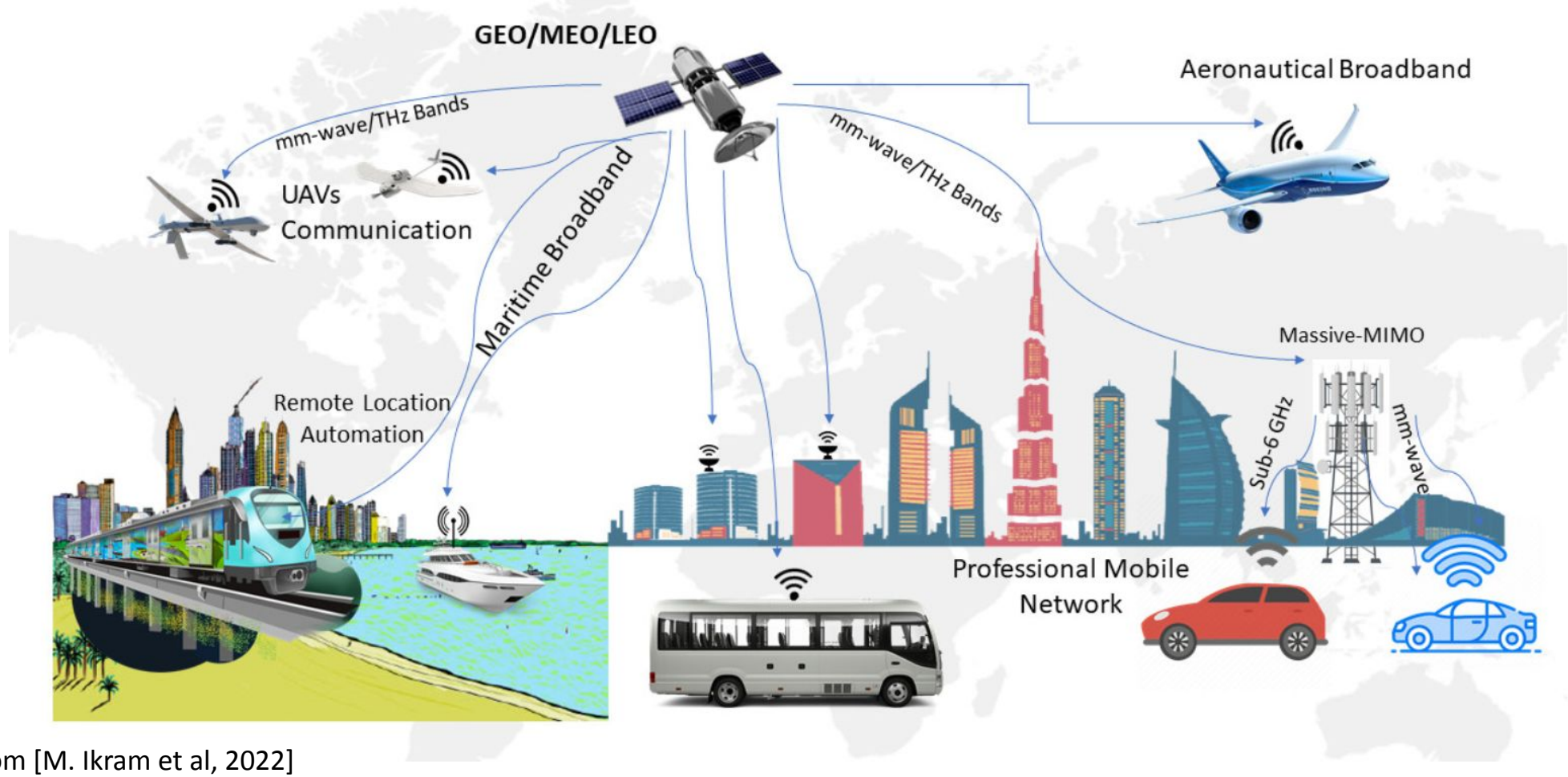



- Geração de harmônicos e Intermodulação
- Ruído de Intensidade do laser
- Ceifamento do laser
- Atenuação
- Dispersão modal
- Dispersão Cromática
- Ruído de disparo
- Ruído térmico
- Perda por propagação
- Desvanecimento devido a múltiplos percursos
- Interferências
- Ruído Gaussiano
- Ruído Térmico

Figura 31: Principais fontes de degradação em sistemas óptico-sem fio (adaptado de [8]).

Rede neural aplicada após a fotodetecção do sinal de RF foi capaz de reduzir em 34 dB os efeitos de intermodulação e da “cross modulation distortion” (XMD) na região linear de operação do sistema RoF em questão

# Outros tópicos: Redes Veiculares, Subaquáticas, Espaciais




From [M. Ikram et al, 2022]

# Padronização para IA

# Órgãos de padronização e consórcios discutindo AI / ML

O-RAN Software Community (SC)

Brasil 6G

| ITU | 3GPP | ETSI | Linux Foundation | O-RAN Alliance | ONF |
|---|---|---|---|---|---|
| Arquitetura para ML Rec. Y.3172 | Network Data Analytics Function (NWDAF) TR 23.791 | Experiential Networked Intelligence (ENI) e Open Source MANO (OSM) | AI em Open Network Automation Platform (ONAP) | RAN Intelligent contr oller (RIC): Near-RT e Non-RT RICs | SD RAN open source near RT-RIC e exemplos de xApps (handover, load balancing) |
| Automação de rede e recursos adaptativos Rec. Y.3177 | Análise de dados no core 5G TS 23.288 | Zero-Touch Network and Service Management (ZSM) | ML e plataformas de dados abertos (ACUMOS, etc) | Fluxo de trabalho voltado a dados para loops de controle fechados | Aether (5G connected edge platform) e ONOS (for SDN) |

# Alguns dos tópicos abordados no relatório:

- Coleta de Dados e Disseminação de Informação
- Transformação de Dados e Geração de Conhecimento
- Arquiteturas para Integração de IA à Gerência de Redes

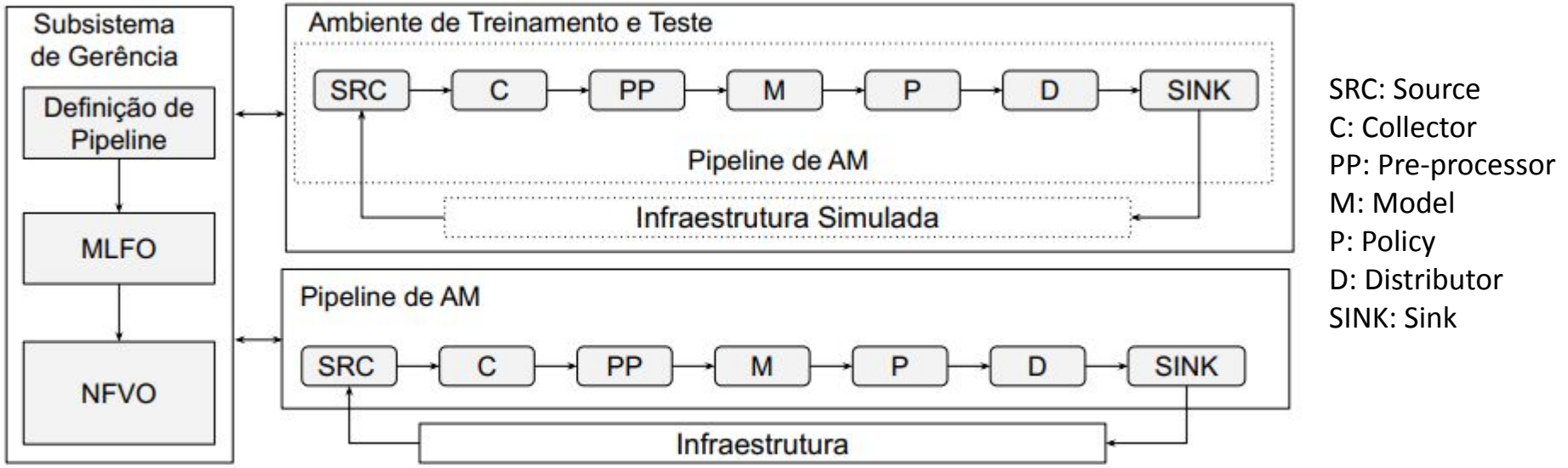



Figura 38: Arquitetura unificada para IA/AM proposta pelo ITU.

# “Closed loops” em 6G usando Open RAN

Em RAN típica, há milhões de decisões tomadas todo segundo apenas sobre qual usuário servir na interface de rádio

Loops fechados para automação da RAN

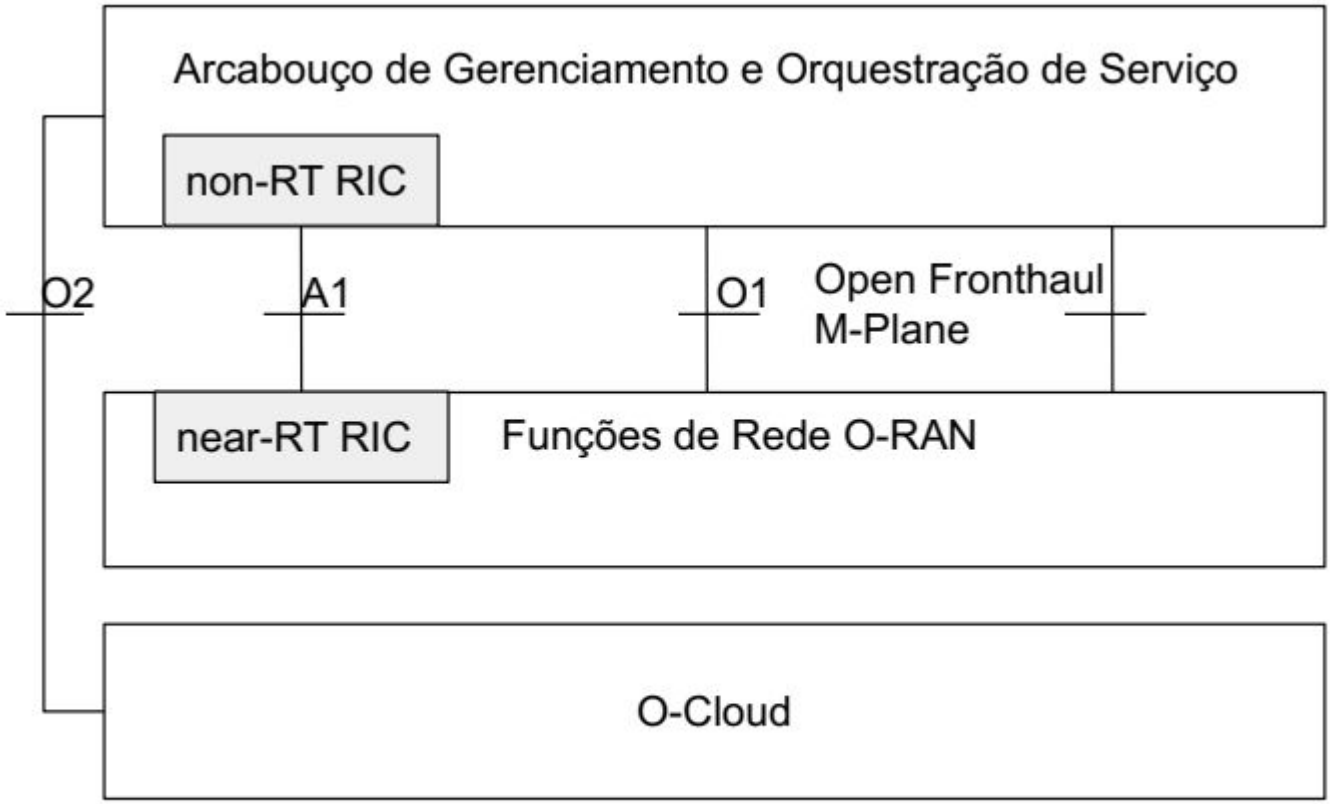
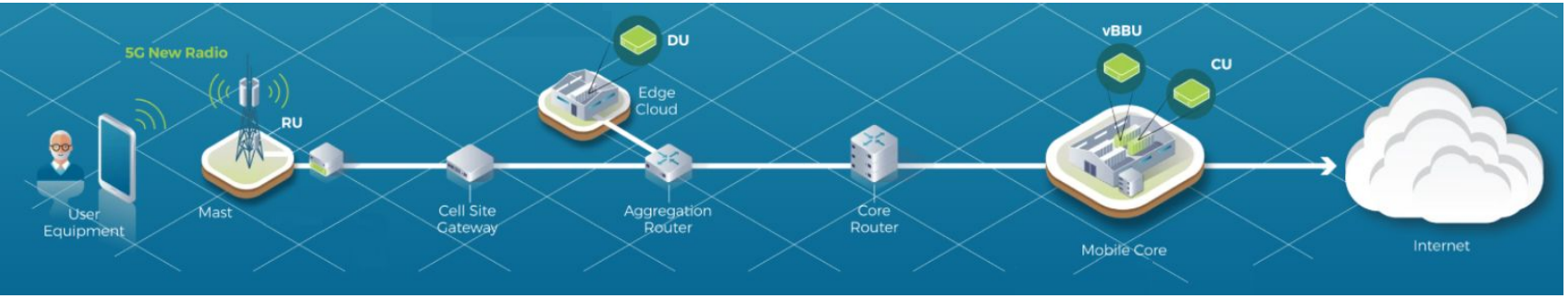
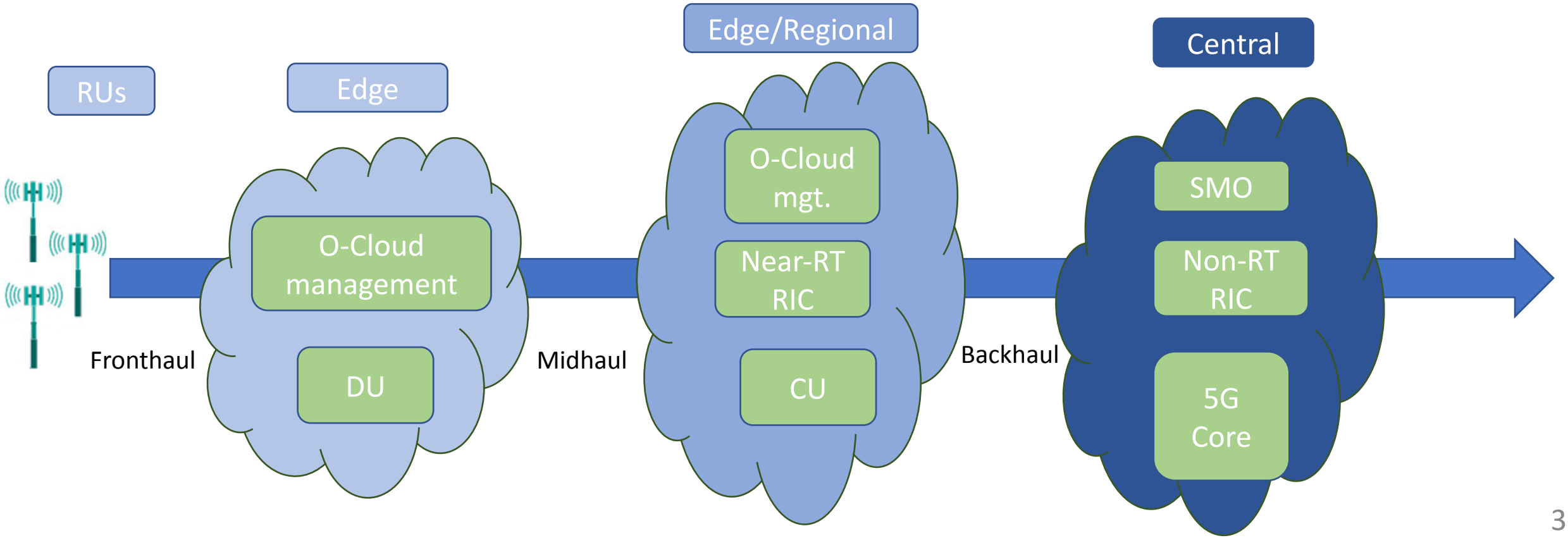



Figura 39: Arquitetura O-RAN em alto nível.

# Elementos Open RAN: RIC e SMO




SMO: Service management and orchestration
RIC: Radio intelligent controller
Near-RT: Near real-time (1 second or less)
Non-RT: Non real-time (more than 1 s)



# IA no Núcleo e na Orquestração de Recursos e Serviços

# Tópicos de pesquisa em IA discutidos:

- Elasticidade e Balanceamento de Carga no Núcleo
- VANT como Parte da Infraestrutura de Recursos
- Gerência e Orquestração de Serviços Fim-a-Fim

Communication service management function (CSMF)

Network slice MF (NSMF)

Network slice subnet MF (NSSMF)

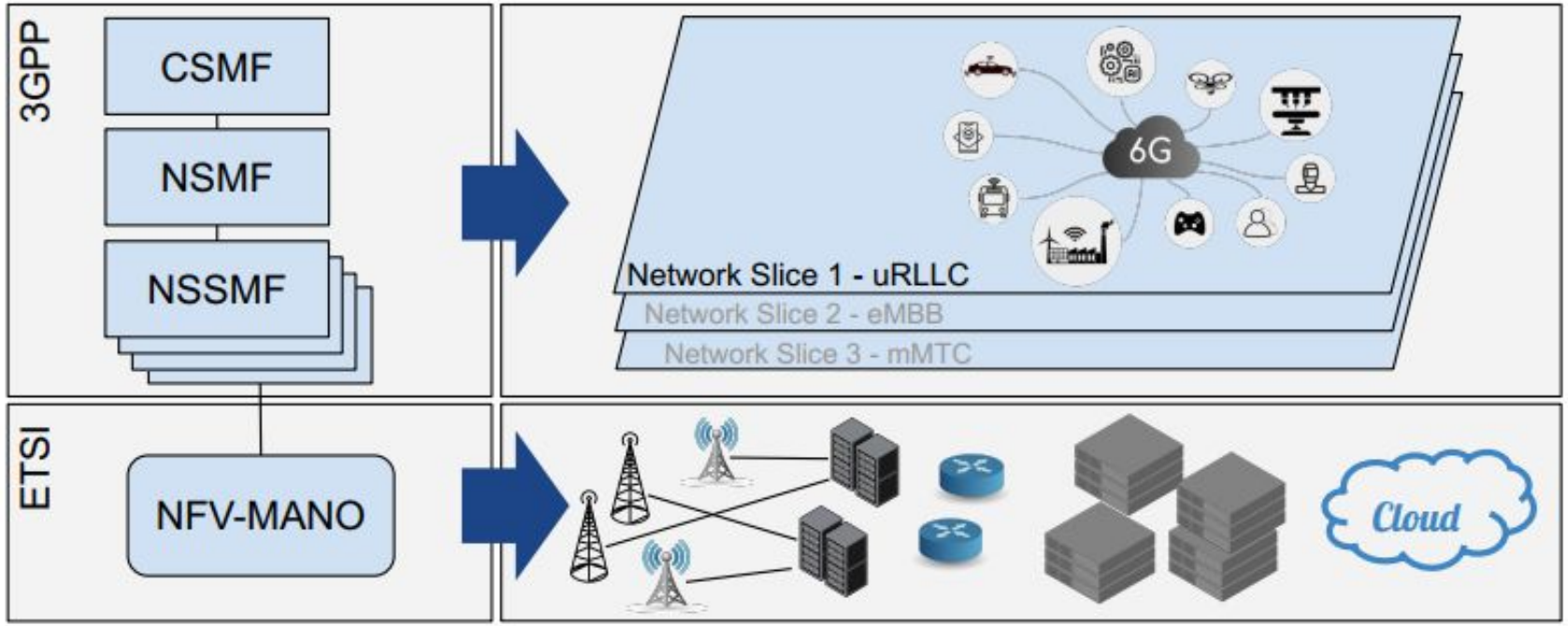



Figura 34: Arquitetura para gerenciamento e orquestração de *slices* segundo o 3GPP.

# Redes 6G como Suporte a Aplicações de IA

# Privacidade e Aprendizado Federado em 6G

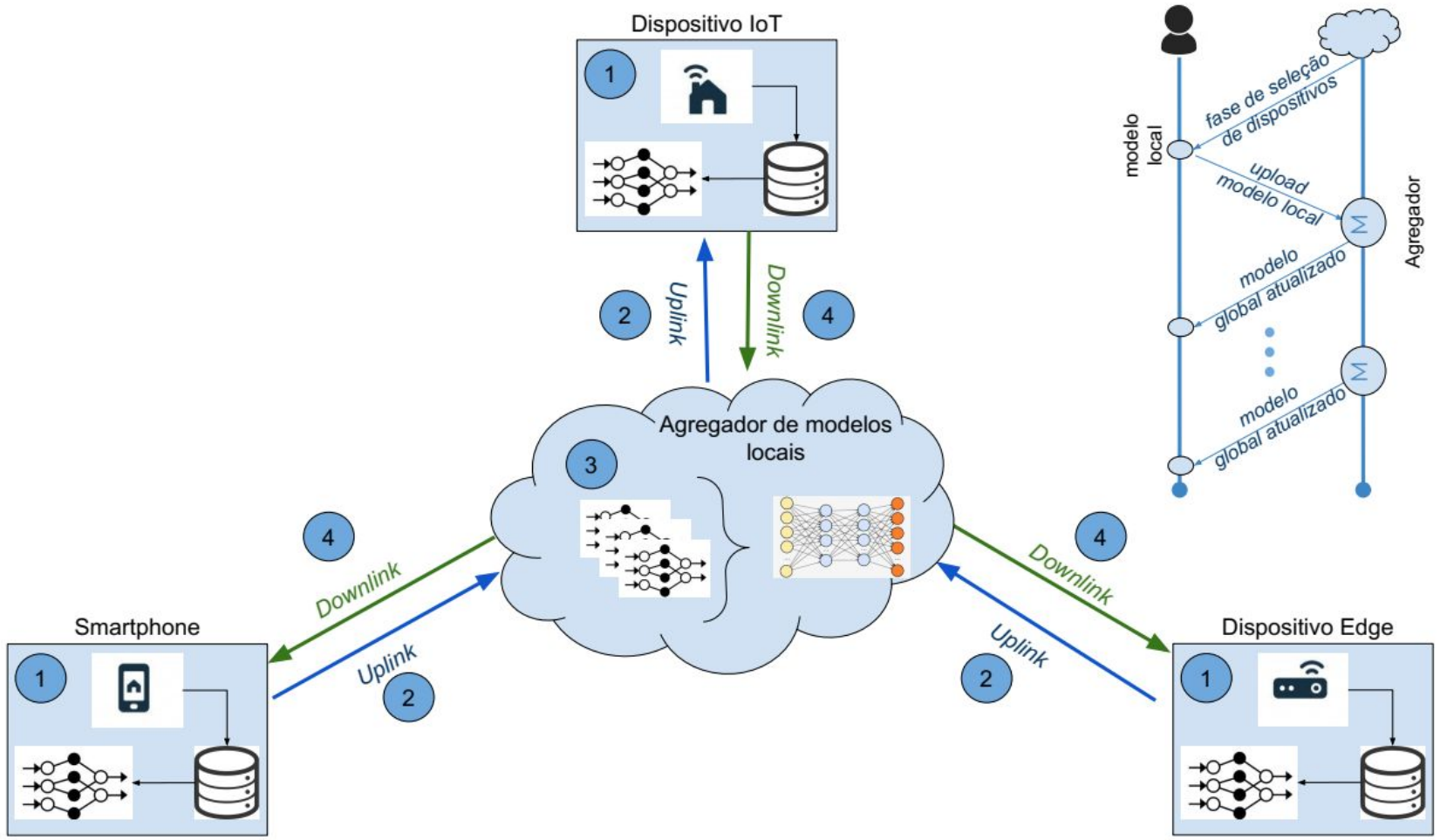
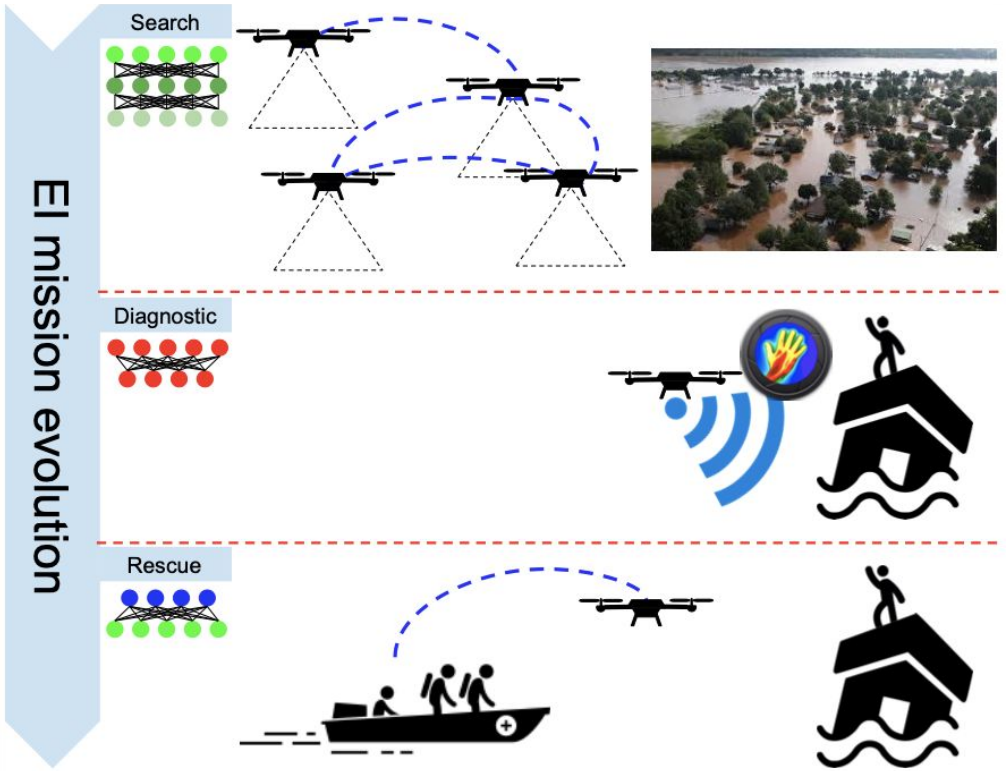
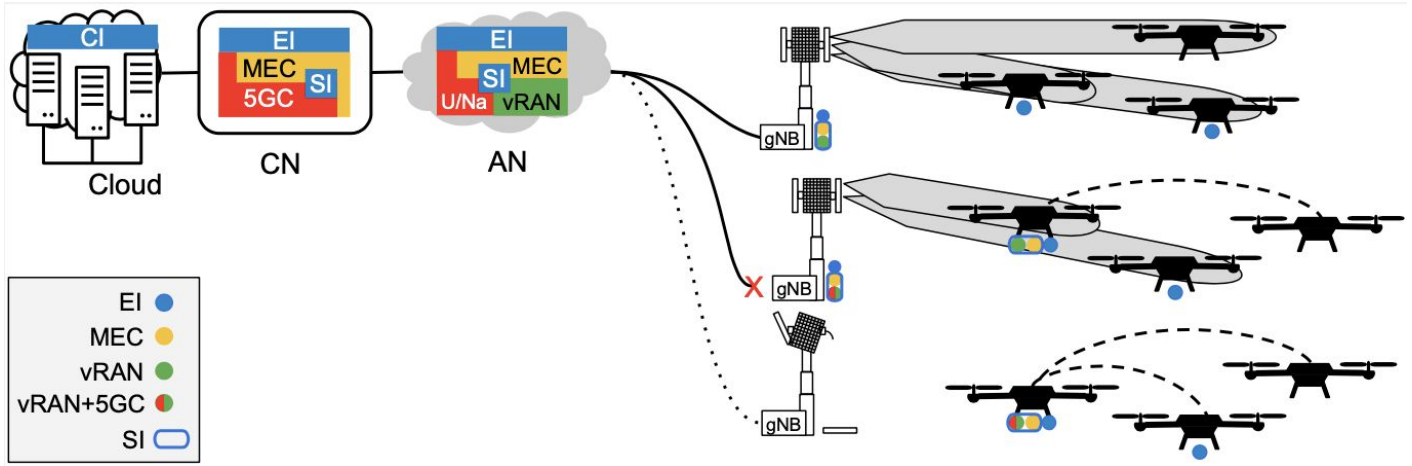



Figura 43: Procedimentos de uma arquitetura baseada em Aprendizado Federado (Adaptado de [13]).

# Inteligência de Borda em 6G: exemplo em busca e salvamento






S. Lins *et al.*, "Artificial Intelligence for Enhanced Mobility and 5G Connectivity in UAV-Based Critical Missions," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 111792-111801, 2021

# Conclusões

Brasil 6G

Estado-da-arte: iniciou a 2ª geração de IA/ML nas comunicações móveis, a qual terá grande impacto no desempenho das redes 6G

Padronização da IA, banco de dados públicos e *benchmarks* serão de suma importância para promover resultados reprodutíveis e diminuir a incredulidade nos resultados de IA para telecom

Open RAN irá acelerar a adoção de IA em 5G / 6G via xApps e rApps. Mesmo quando a RAN não estiver desagregada, SMO e rApps podem ser usados para melhorar desempenho

Grande número de instituições com plataformas experimentais baseadas em projetos de referência e projetos open-source, o que permitirá coleta de massivas bases de dados (por exemplo, canais para "extreme mMIMO" com 512 TRX)

IA em 6G é oportunidade para o Brasil: desenvolvimento de software para redes 3GPP e mercados verticais como agronegócio e saúde, além de soluções customizadas para inclusão digital