



# Tópicos em Redes de Computadores Chegando ao 5G

**Prof. Elias P. Duarte Jr.**

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Departamento de Informática

[www.inf.ufpr.br/elias/topredes](http://www.inf.ufpr.br/elias/topredes)

# Sumário

- Hoje vamos estudar a arquitetura da rede 5G também focando em componentes semelhantes 4G
- Um livro disponível na Internet:
  - <https://5g.systemsapproach.org/>
  - 5G Mobile Networks: A Systems Approach, Larry Peterson et. al. → *Private 5G: A Systems Approach*
    - *chamo atenção, em particular, para as leituras indicadas ao longo dos capítulos: excelentes!*

# 5G: mais que velocidade

- Apesar de que 5G é várias vezes mais veloz que 4G...
- ...5G é mais que simplesmente uma rede mais rápida
- Suporte a IoT – Internet of Things (Internet das Coisas): bilhões de dispositivos em todo o mundo
  - dispositivos de naturezas diversas
  - grande densidade: +1 milhão por KM<sup>2</sup>
- Suporte para sistemas de missão crítica
  - confiabilidade ultra elevada, acima dos “cinco noves”: 99,999%
  - incluindo latência mínima, inferior a 1ms
  - mobilidade em altas velocidades, 100km/h

# 5G: Inovação

- Alavancar novas tecnologias e novas aplicações
  - Realidade aumentada, realidade virtual
  - Veículos autônomos
- Além de aplicações em um outro contexto importante: “Indústria 4G”
  - Em particular: robôs autônomos
- Enxames de dispositivos autônomos cooperando para uma atividade fim: carros, drones, máquinas industriais incluindo agricultura, robots, dispositivos domésticos, equipamentos médicos e hospitalares...

# 5G: Padrões

- 3GPP: A organização responsável pelos padrões 5G
  - *3rd Generation Partnership Project: [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org)*
- Os padrões estão em permanente evolução: *releases*

# Faixas de Frequência

- A rede WiFi usa 2 faixas de frequência “liberadas” pelos governos: 2,4 e 5GHz
- No caso das redes 5G diversas faixas foram recentemente leiloadas no Brasil
  - Faixas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz
  - Valor da venda inicial chegou a R\$47,2 bilhões

# Rede de Acesso para a Internet

- Sob a perspectiva da Internet como um todo, as redes celulares são redes de acesso (*access networks*)
- Conhecidas como “a última milha”, elas conectam usuários à infraestrutura de rede
- A principal alternativa às redes celulares: fibra ótica
- No caso das redes celulares: dispositivos se conectam a estações base (torre de antenas das células), que por sua vez são conectadas a uma Central de Comutação
  - MTSO - *Mobile Telephone Switching Office*

# The Edge Cloud

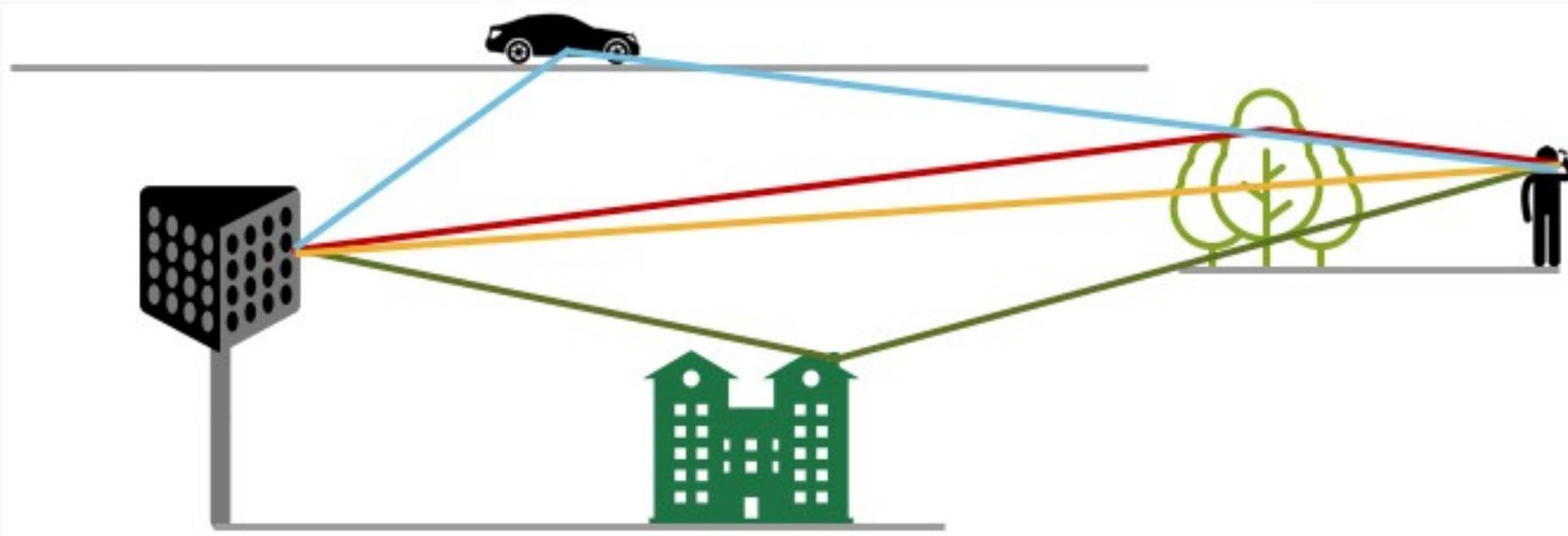
- As nuvens de datacenter não conseguem atender a demanda de novas aplicações
  - que têm requisitos fortes de alta vazão e baixo throughput
  - por exemplo: realidade virtual, realidade aumentada, IoT, veículos autônomos
- Assim: a ideia é trazer a nuvem para mais próximo da borda: Edge Cloud
- Entre as várias alternativas para hospedar a nuvem da borda: a Central de Comutação

# Implementação da Rede 5G

- Toda em software sobre hardware de prateleira
- Condizente com a nuvem
- Um caminho de duas mãos:
  - por um lado a nuvem está [parcialmente] hospedada na rede 5G
  - por outro lado diversas aplicações da rede 5G executam na nuvem

# Um Desafio de Transmissão 5G

- Um sinal transmitido na faixa de frequência utilizada pelo 5G reflete em objetos fixos e móveis
  - percorrendo *múltiplos caminhos* até chegar ao destino
- Ambos origem & destino podem estar se movendo



# Recebendo Múltiplas Vezes

- Chegam efetivamente múltiplos sinais ao destino
- O período de tempo em que estes sinais podem chegar varia de 1 a 30 $\mu$  segundos
- O período em que o meio fica dedicado para o sinal é dito “tempo de coerência”  $T_c$



# Tempo de Coerência

- $T_c = c/v * f$
- $c$ : velocidade do sinal (aprox. velocidade da luz)
- $v$ : velocidade de movimentação do destino → quanto maior, menor  $T_c$
- $f$ : frequência utilizada → quanto maior, menor é o  $T_c$ , ondas de comprimento menor
- Para piorar: torres de celular utilizam MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*)
  - diversas antenas, cada uma transmitindo em uma direção diferente, mas com interseção

# Solução: CQI

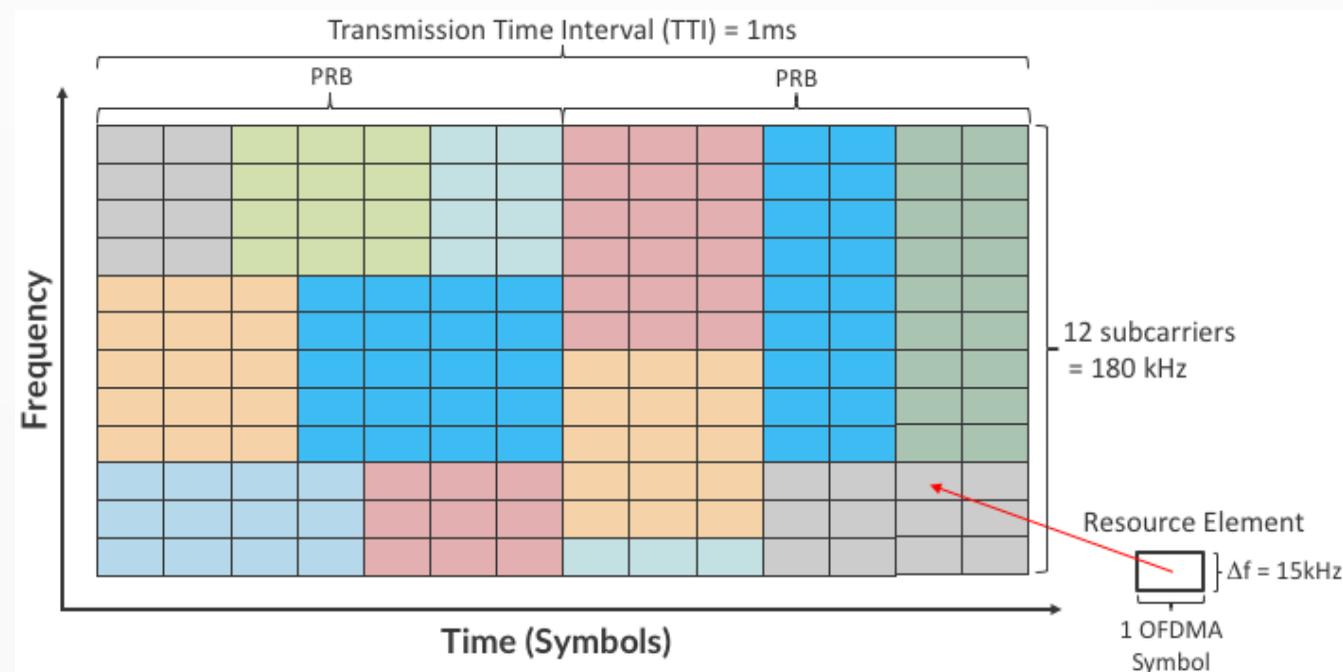
- Cada celular deve ficar periodicamente comunicando com a estação base
- Determina a qualidade do sinal, o nível de ruído, etc.
- Mensagens CQI - *Channel Quality Indicator*
- No LTE transmitidas a cada milisegundo!
- Dependendo das condições, a frequência e outras características são definidas para a comunicação

# 4G e 5G: *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM)

- Lembrando: 2G → FDMA; 3G → CDMA
- 4G & 5G são baseadas em OFDM, que faz a multiplexação de transmissões simultâneas em frequências ortogonais
  - frequências ortogonais: não interferem entre si
- Para o OFDM ser eficiente: é preciso escolher as frequências cuidadosamente
- Vamos ver como é usada em 4G e depois 5G

# Multiplexação 4G

- Baseado em OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
- 12 faixas de frequência ortogonais entre si
- Dispositivos usam canais de frequência estreitos (15Khz) que podem ser vistos no plano bidimensional



# OFDMA: Escalonamento de Dispositivos

- Cada retângulo corresponde à unidade mínima que pode ser escalonada para comunicação (15KHz) → RE - *Resource Element*
- Em um RE são codificados de 4 a 6 bits normalmente
- Em um Transmission Time Interval (TTI) que dura 1ms, cada dispositivo recebe o número necessário de REs → na figura representados por cores diferentes
- As alocações são feitas de cada vez para um grupo de  $7 \times 12 = 84$  REs, chamado de *Physical Resource Block* (PRB)
- O escalonamento é feito com base no CQI (1 por TTI, 1ms)

# CQI e QCI

- Além do CQI, é também usado o QCI: *QoS Class Identifier*
- Indica classes e prioridades diferentes, dependendo da necessidade das aplicações
- Além do escalonamento em termos de REs, é necessário determinar qual a melhor antena para usar para cada dispositivo (MIMO - múltiplas antenas)
- Dependendo do CQI, QCI, demanda, entre outros fatores, são também escolhidas as tecnologias de transmissão de sinais mais adequadas (codificação & modulação)

# 5G: Ainda Mais Flexibilidade

- Em termos de como os dispositivos e comunicações são escalonados
- Começa pela especificação das ondas: toda uma gama de faixas de frequência (não apenas uma!)
  - comprimentos de onda, frequências distintos
  - cada uma mais adequada para seus contextos
    - Abaixo de 1GHz: telefonia móvel & IoT em massa - alcance
    - 1-6 GHz: transmissões com maior banda e missão crítica
    - acima de 24GHz (ondas mm): banda super alta, sem obstáculos

# 5G: Diferentes REs

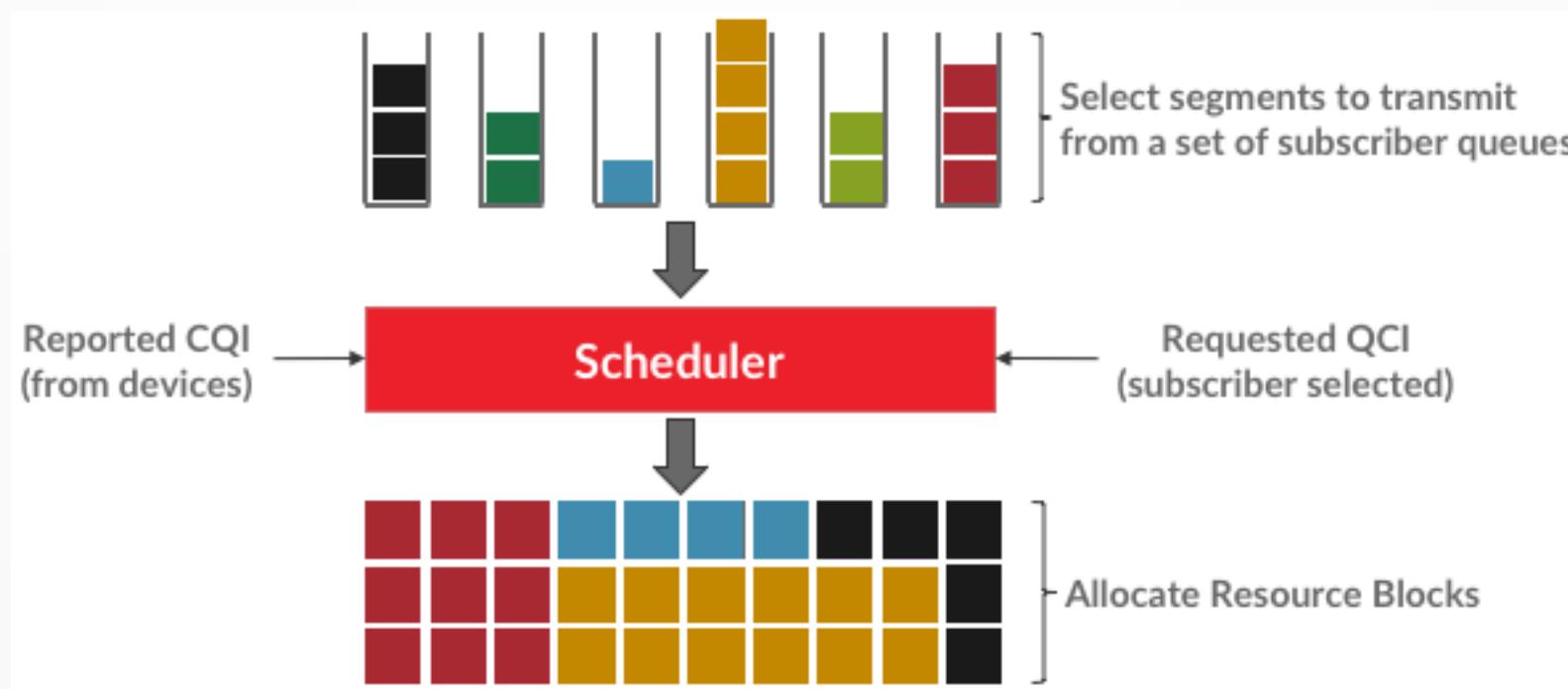
- Diferentes faixas de frequências: diferentes REs
  - 1GHz: banda máxima 50MHz, REs com 15 e 30Khz, intervalos de escalonamento de 0,5 e 0,25ms
    - na figura foi usado o de 0,5ms
  - 1,6GHz: banda máxima 100MHz, REs com 15, 30 e 60Khz, intervalos 0,5; 0,25; 0,125ms
  - Para as ondas milimétricas, banda máxima de 400MHz, REs de 60 e 120KHz com intervalo de 0,125ms
- Com tantas opções: o processo de especificação é chamado de numerologia

# 5G: Parâmetros e Classes de Serviço

- No 5G as classes de serviço incluem:
  - GBR: Guaranteed Bit Rate
  - Delay Critical GBR
  - Non-GBR
- Além de níveis de prioridade, taxa de erro esperada, tamanho máximo da rajada esperada, entre outros
  - rajada (*burst*): uma sequência com grande número de pacotes

# 5G: Alocação de Blocos de Recursos

- Dados os parâmetros faz a alocação de blocos de recursos por dispositivo:

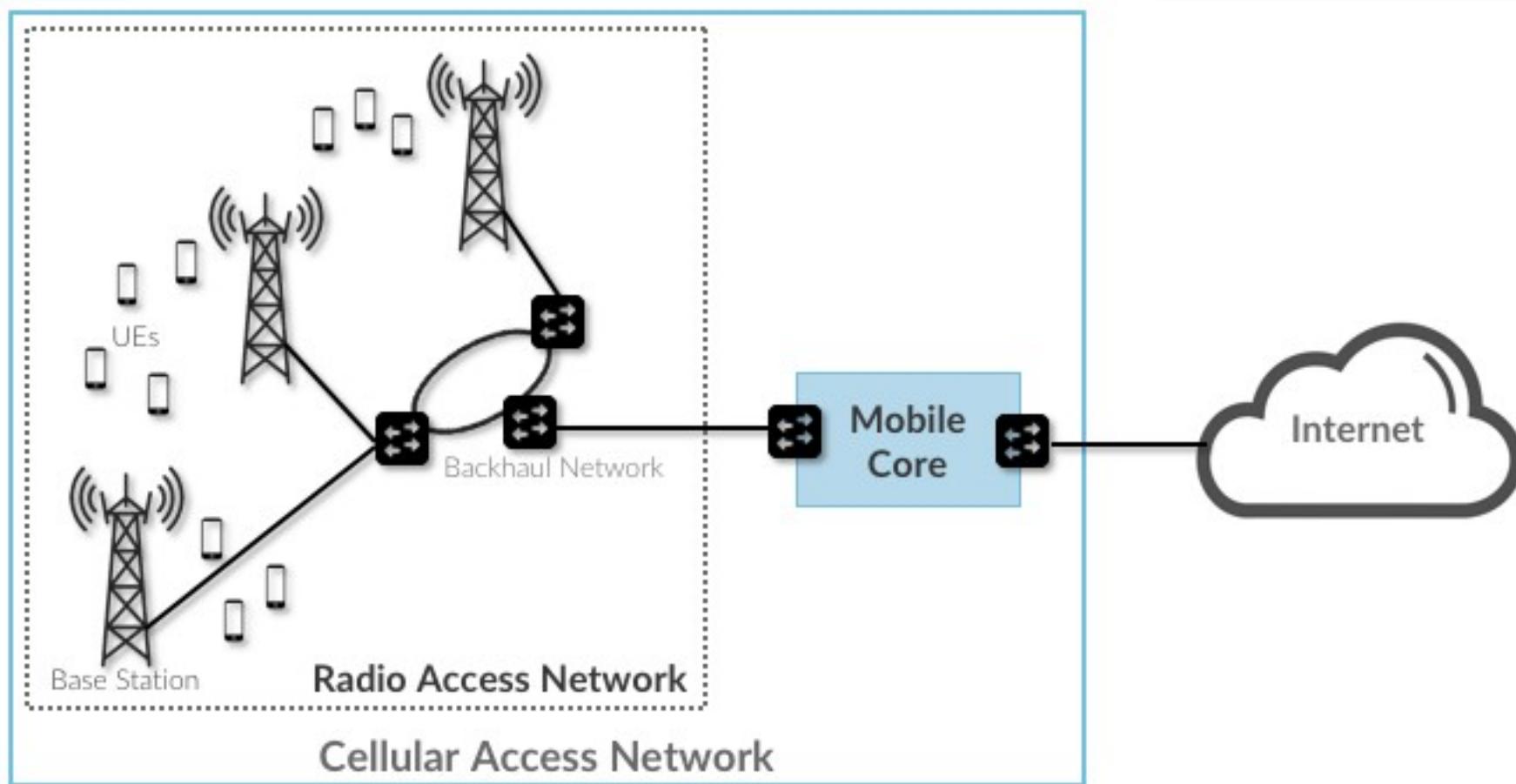


# 5G NR: New Radio

- A especificação da interface aérea do 5G é chamada de NR: *New Radio*
- Permite mais do que simplesmente aumentar a banda disponível
- Novos tipos de aplicações:
  - Comunicação em Cenários de Alta Mobilidade
  - Comunicação Ultra-Confável com Baixa Latência
  - Comunicação em Massa entre Máquinas (IoT)
    - Um padrão específico para IoT: NR-Light

# Arquitetura 4G e 5G

- Os componentes básicos são semelhantes para nós que já estudamos até 3G



# Arquitetura 4G e 5G

- Os componentes básicos são semelhantes para nós que já estudamos até 3G
- A nomenclatura 3GPP deve ser compreendida com cuidado: é o jargão da área
- Dispositivo: UE – *User Equipment*
- Chama atenção o destaque para a RAN (*Radio Access Network*) enquanto entidade
  - a rede celular é constituída da RAN mais o *Mobile Core*
- *Cellular Access Network* → a Rede Celular vista como ponto de entrada para a Internet (nem mostra a rede telefônica!)

# Arquitetura 4G e 5G: RAN

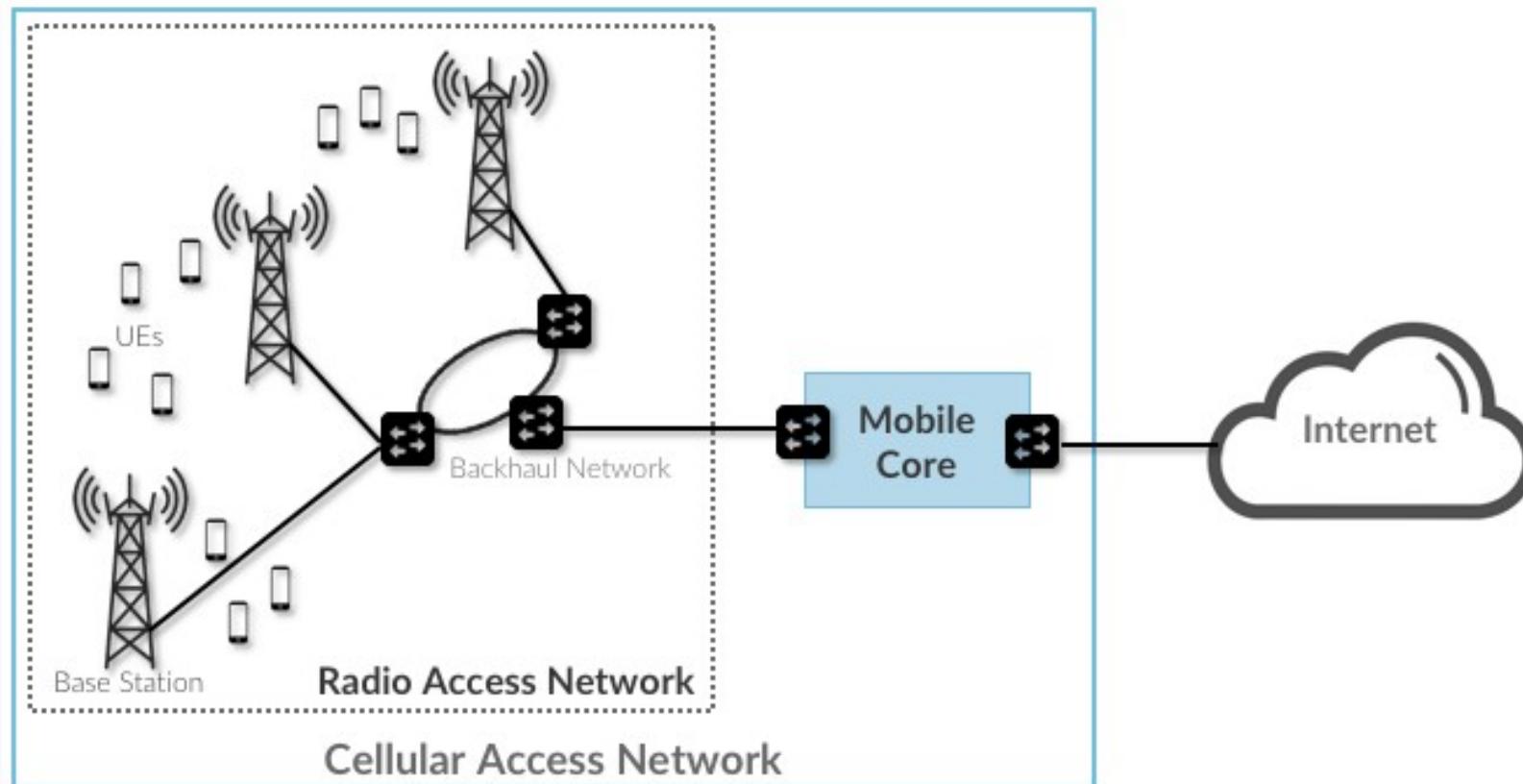
- A RAN gerencia a alocação do espectro, de forma a atender os requisitos de QoS dos usuários e aplicações
- A RAN consiste de um conjunto de estações base
- Nas redes 4G as estações base são chamadas de eNodeB ou eNB ou ainda NodeB
- Nas redes 5G são chamadas de gNB (“g” de new “g”eneration)

# Arquitetura 4G e 5G: Núcleo

- O núcleo da rede celular, por sua vez, é chamado em 4G de *Evolved Packet Core* (EPC) e em 5G de *Next Generation Core* (NG-Core)
- Provê conectividade para a Internet → tanto dados como voz
- Deve estar a par das necessidades de QoS dos fluxos que trafegam
- Deve rastrear usuários móveis, para manter suas comunicações vivas
- Faz o gerenciamento de contabilidade

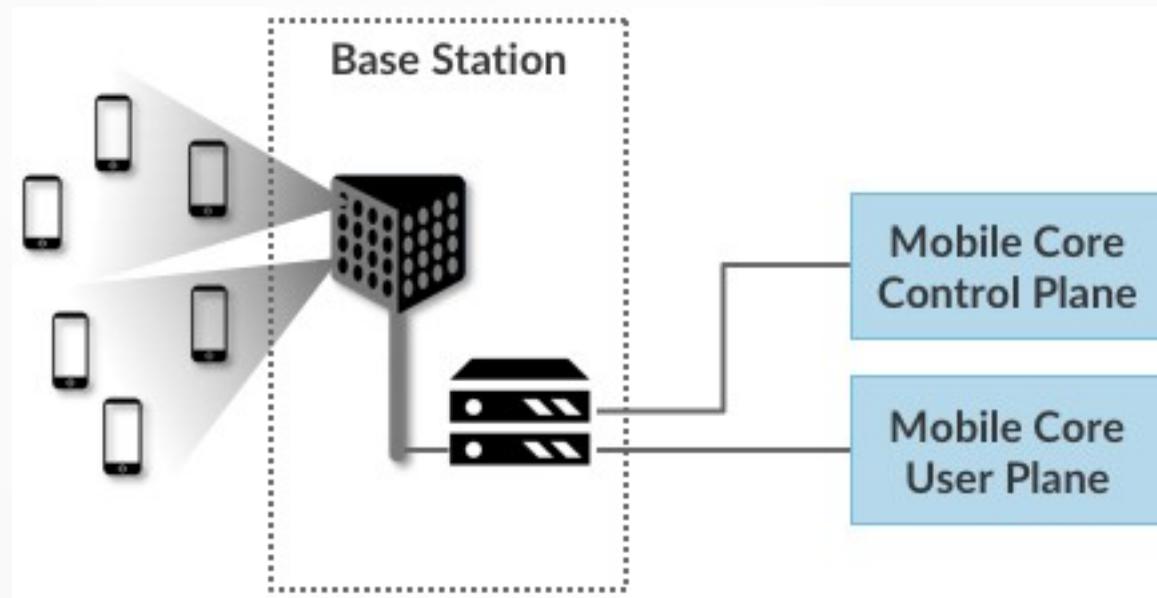
# Rede Celular: Componentes Cabeados

- A rede que conecta as estações base ao núcleo é uma rede cabeada: *backhaul network*
- Em geral uma rede óptica



# Separação de Planos

- O núcleo consiste de duas partes: o plano de controle e o plano de usuário
- CUPS: *Control and User Plane Separation*

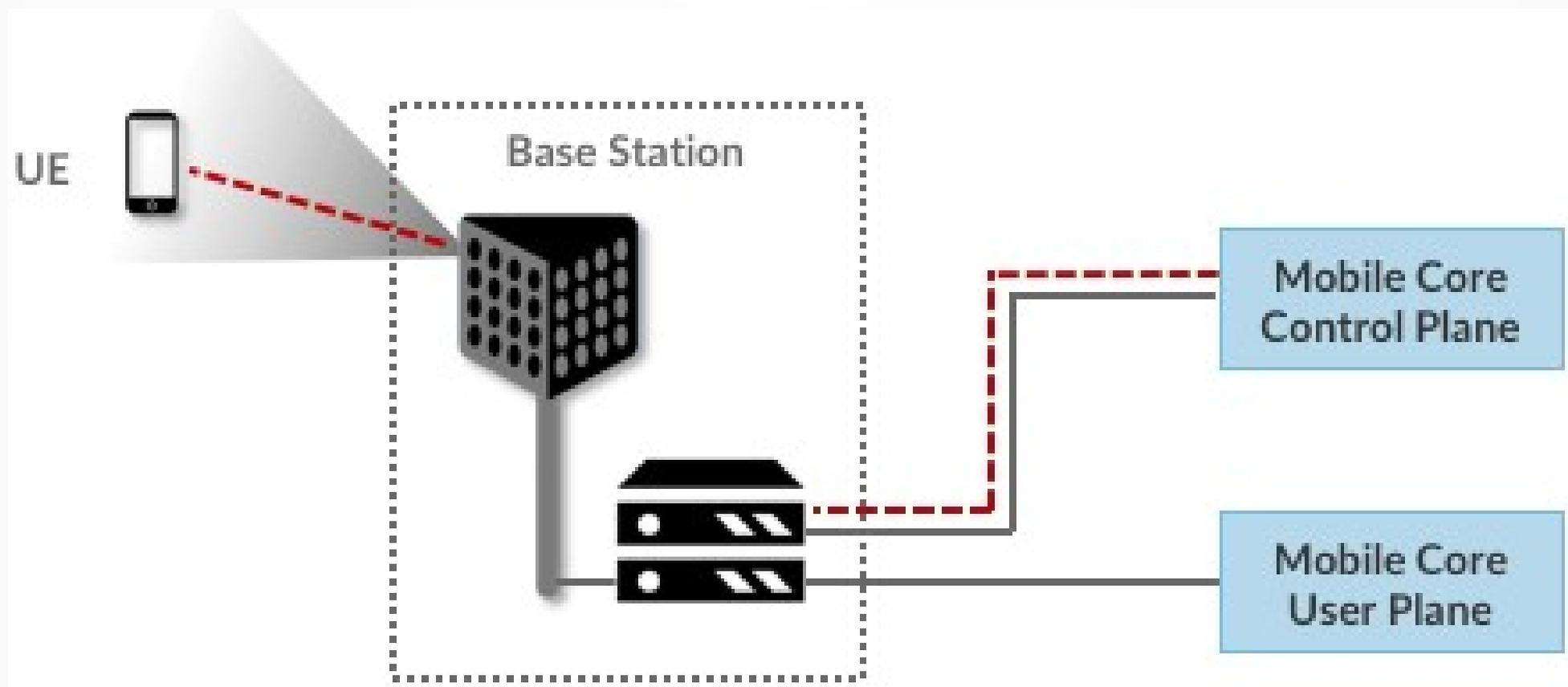


# RAN: Radio Access Network

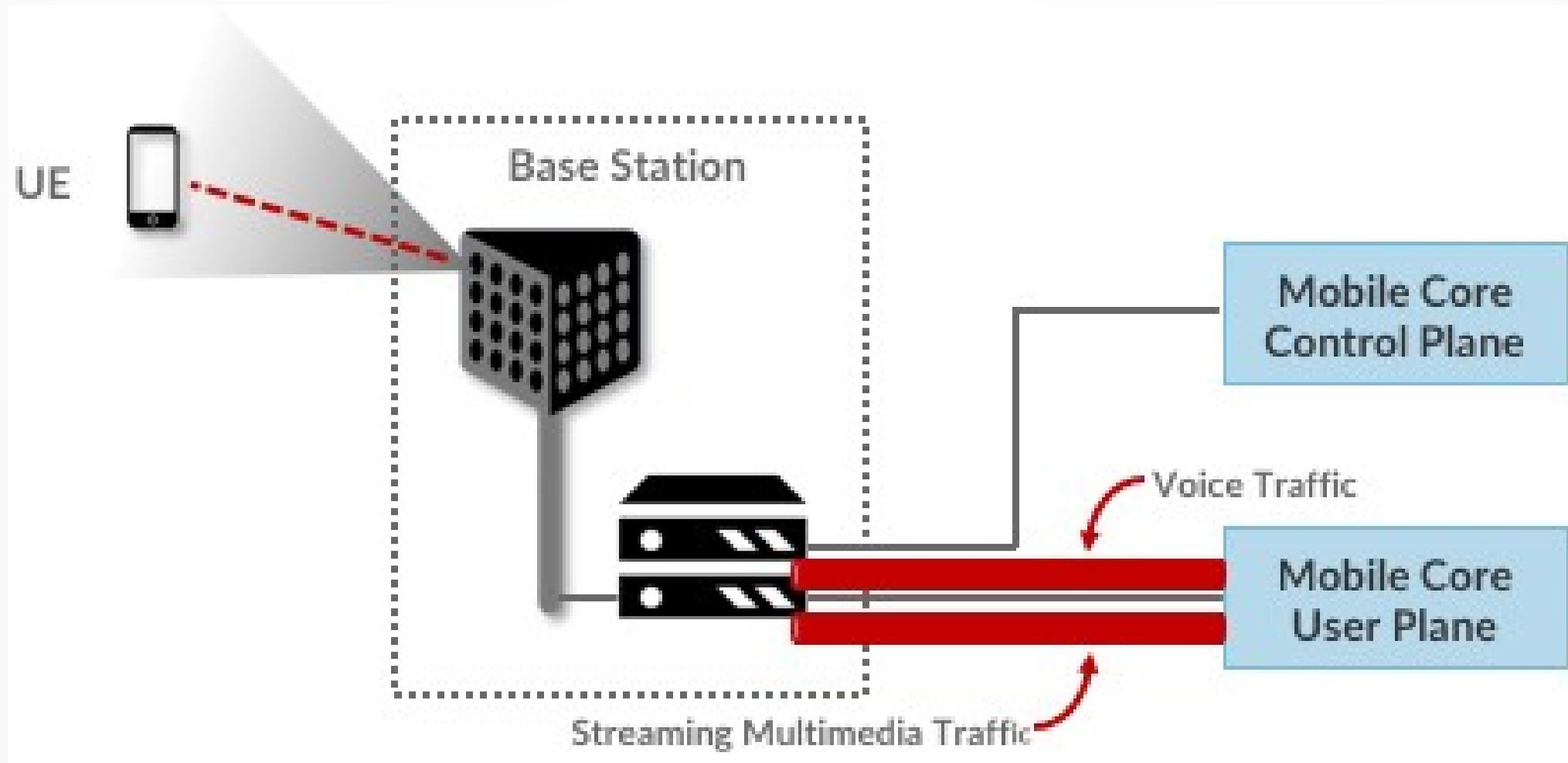
- Um dispositivo (UE, e.g. celular) estabelece comunicação com uma estação base
  - assim que é ligado
  - ou no *handover*, quando se move
- O canal é liberado quando o celular fica muito tempo inativo
- O celular deve se comunicar com o Plano de Controle do núcleo para: registrar, autenticar, fazer controle de mobilidade

# Comunicação UE & Plano de Controle

- Sinalização de controle entre o dispositivo celular e o Plano de Controle



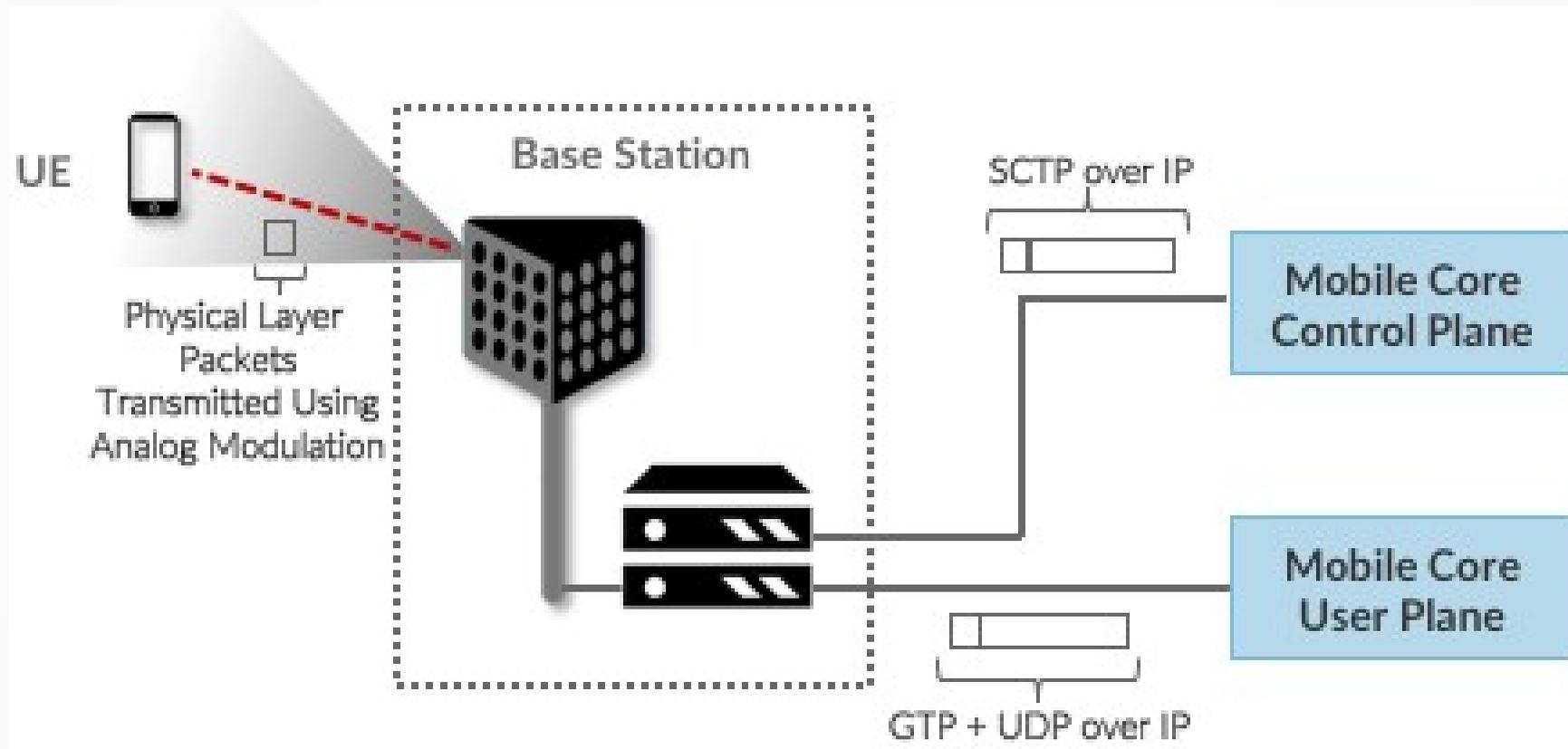
# UE Estabelece Túneis para Plano de Usuário



# Uma Rede IP!

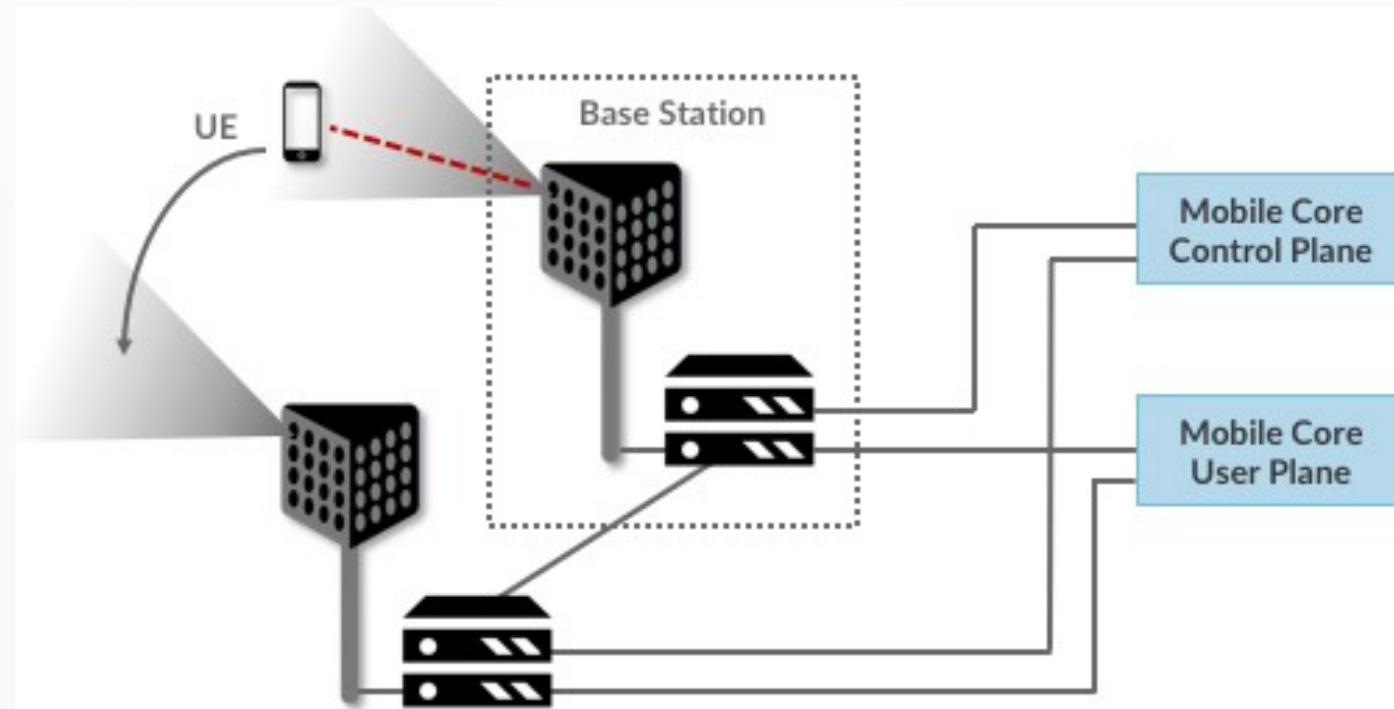
- Toda a comunicação entre a RAN e o núcleo é feita com IP
- Os pacotes que trafegam entre UE e núcleo utilizam SCTP/IP e GTP/UDP/IP
- SCTP (*Stream Control Transport Protocol*) é um protocolo confiável da camada de transporte
  - alternativa ao TCP com suporte para carregar informações de sinalização de telefonia
- GTP (*General packet radio service Tunneling Protocol*) é um protocolo de tunelamento sobre UDP

# Uma Rede IP!



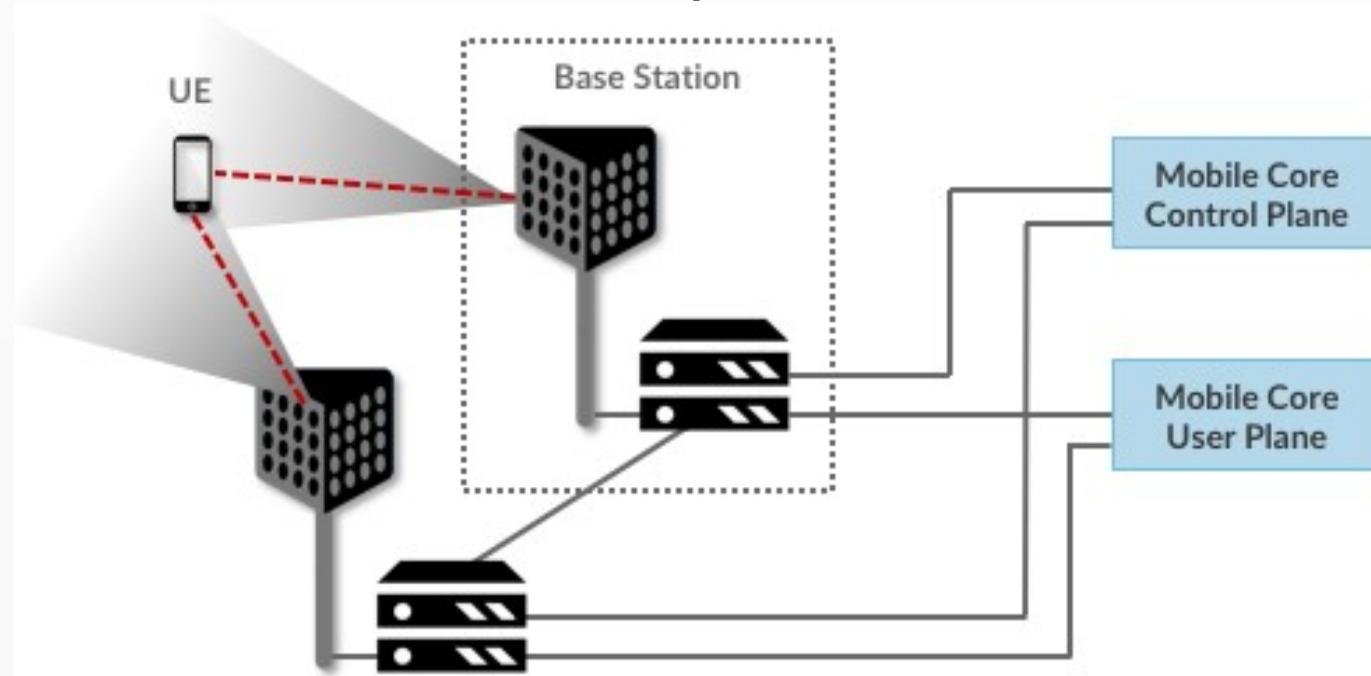
# Estações Base Comunicam Entre Si

- As estações base se comunicam para gerenciar a mobilidade e o handover de UEs
- É necessário transferir a comunicação para o núcleo



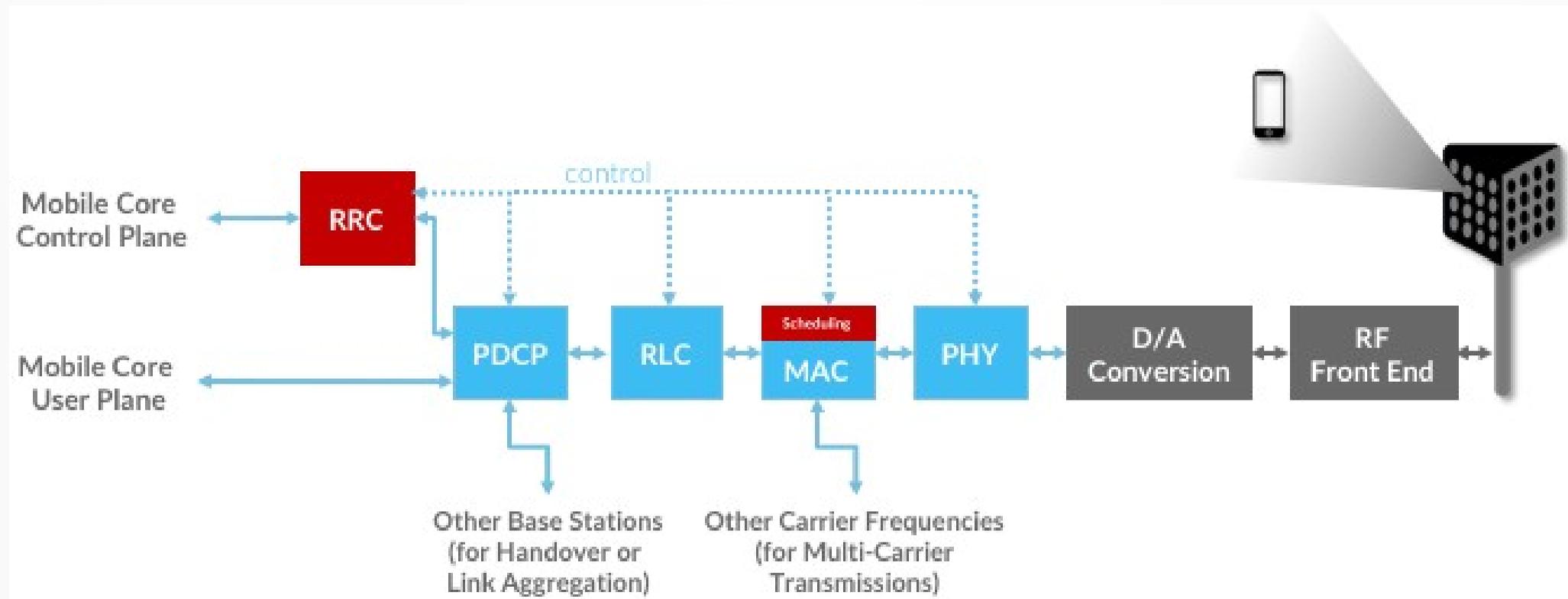
# Transmissões MultiPath

- É possível ter UEs transmitindo para mais de uma estação base ao mesmo tempo
- Agrega múltiplos enlaces - não há handover
- Divide a carga; pode ser necessário tendo em vista a utilização das faixas de frequência



# Por Dentro da RAN

- Pipeline de uma estação base



# Componentes do Pipeline RAN

- RRC (*Radio Resource Control*) – apenas controle, não processa pacotes; políticas e gerência do pipeline em si
- PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) – trata pacotes IP, controle de integridade, define se é para o UE ou para outra estação base
- RLC (*Radio Link Control*) – segmenta e reconstrói pacotes a partir de “segmentos”, a unidade que é codificada e transmitida/recebida na antena

# Por Dentro da RAN – cont.

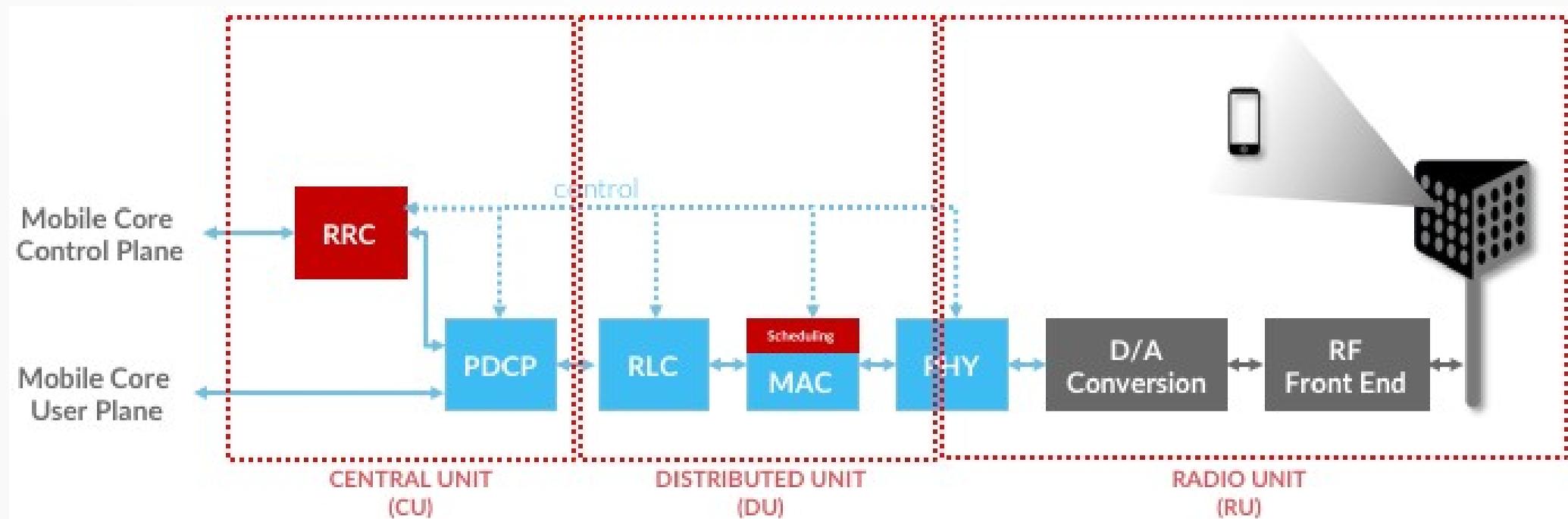
- MAC (*Medium Access Control*) – define o escalonamento de segmentos, o uso da antena para múltiplas transmissões e demandas
  - pode tirar um pacote do pipeline, enviando por exemplo para ser tratado para outras frequências inclusive WiFi
  - é o componente principal!
- PHY (*Physical Layer*) – codificação e modulação da transmissão eletromagnética
- D/A Conversion & RF-Front End, componentes físicos da antena

# A Tendência Atual: Split RAN

- Antes todos os componentes eram implementados na estação base em si
- Hoje: movimento para redes definidas por software, inclusive RAN definida por software
- Componentes organizados em 3 grupos:
  - Unidade Central → RRC + PDCP
  - Unidade Distribuída → RLC + MAC +  $\frac{1}{2}$  PHY
  - Unidade de Rádio →  $\frac{1}{2}$  PHY + antena física

# A Tendência Atual: Split RAN

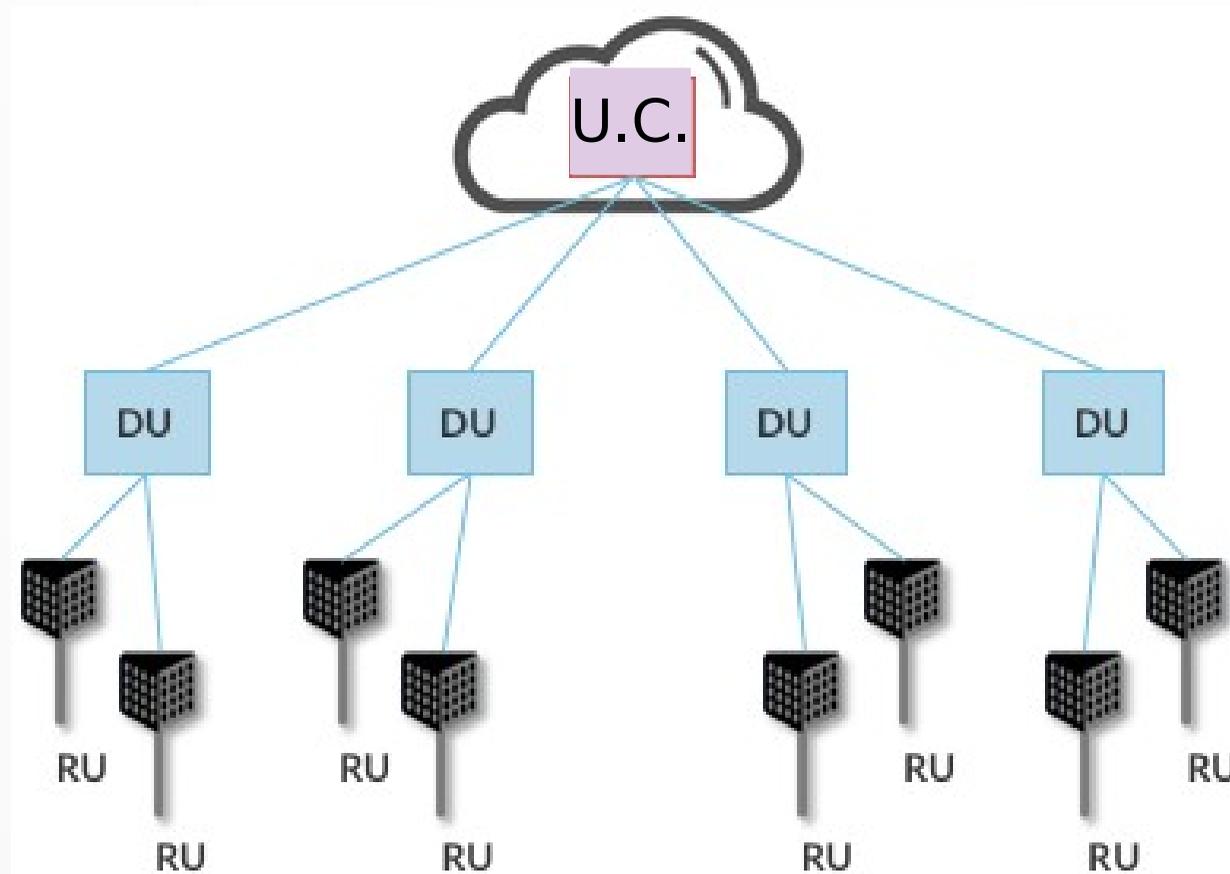
- Unidades: Central, Distribuída e Rádio
- A arquitetura abaixo: adotada pela O-RAN Alliance



# O-RAN Alliance

- *O-RAN ALLIANCE is Transforming the Radio Access Networks Industry Towards Open, Intelligent, Virtualized and Fully Interoperable RAN*
- <https://www.o-ran.org/>
- Uma arquitetura aberta para a RAN, baseada em software livre

# Hierarquia de Componentes



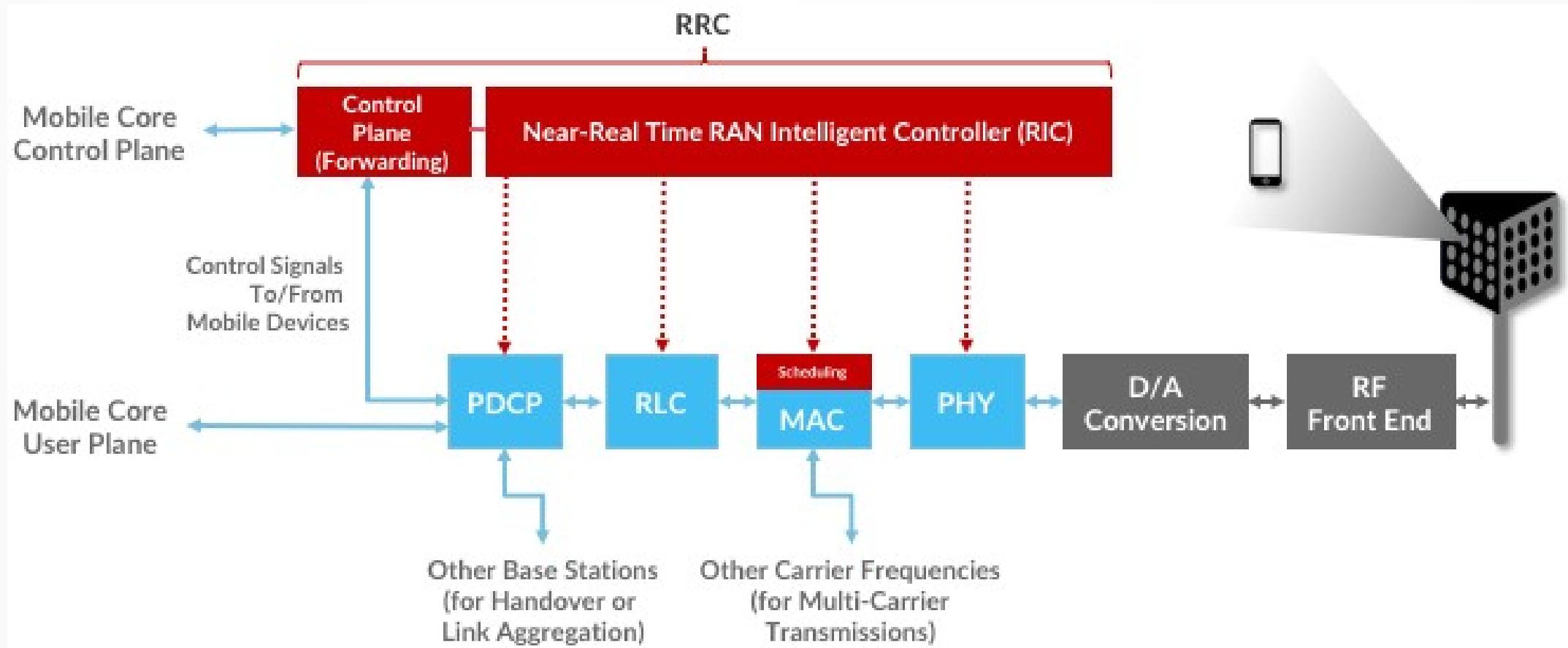
# Requisitos de Tempo Real

- As decisões de escalonamento de segmentos para transmissão via rádio são feitas pelo componente MAC em tempo real
- A latência entre DU e RU deve ser de, no máximo, 1ms
- Tradicionalmente: juntos, na mesma torre
- Mas com 5G e as células femto: 1 DU para múltiplos RUs pequenos e bem próximos

# Software-Defined RAN

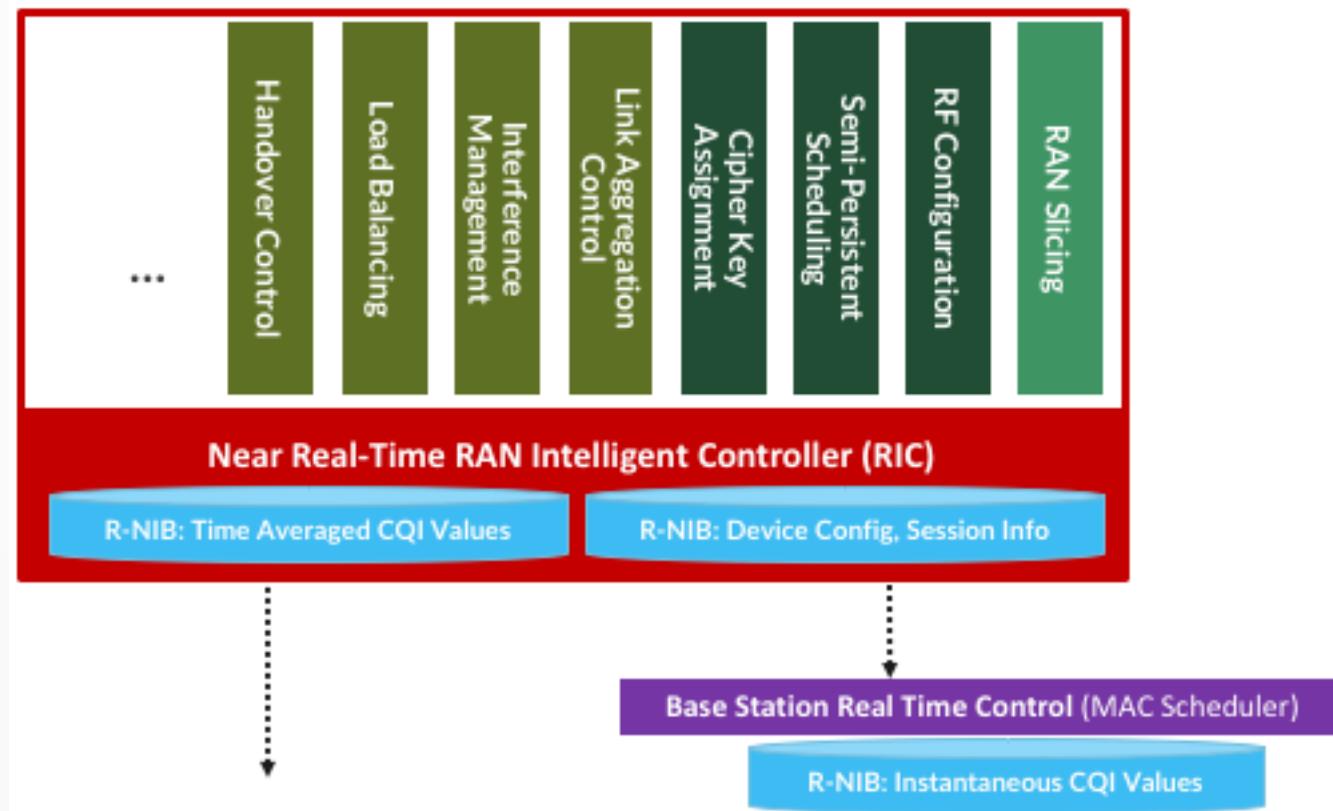
- O RRC vira um controlador, com dois componentes (fig no prox slide)
- O módulo da esquerda -- *Control Plane Forwarding* – provê a interface entre a RAN e o Plano de Controle do Núcleo
- O módulo da direita é muito especial, é o RIC: *opens a new programmatic API for exerting software-based control over the pipeline that implements the RAN user plane*

# Software-Defined RAN



# RAN Intelligent Controller (RIC)

- The “near real time” RIC
- Requisitos de tempo de 10 a 100ms - em comparação com os de 1ms do escalonador MAC



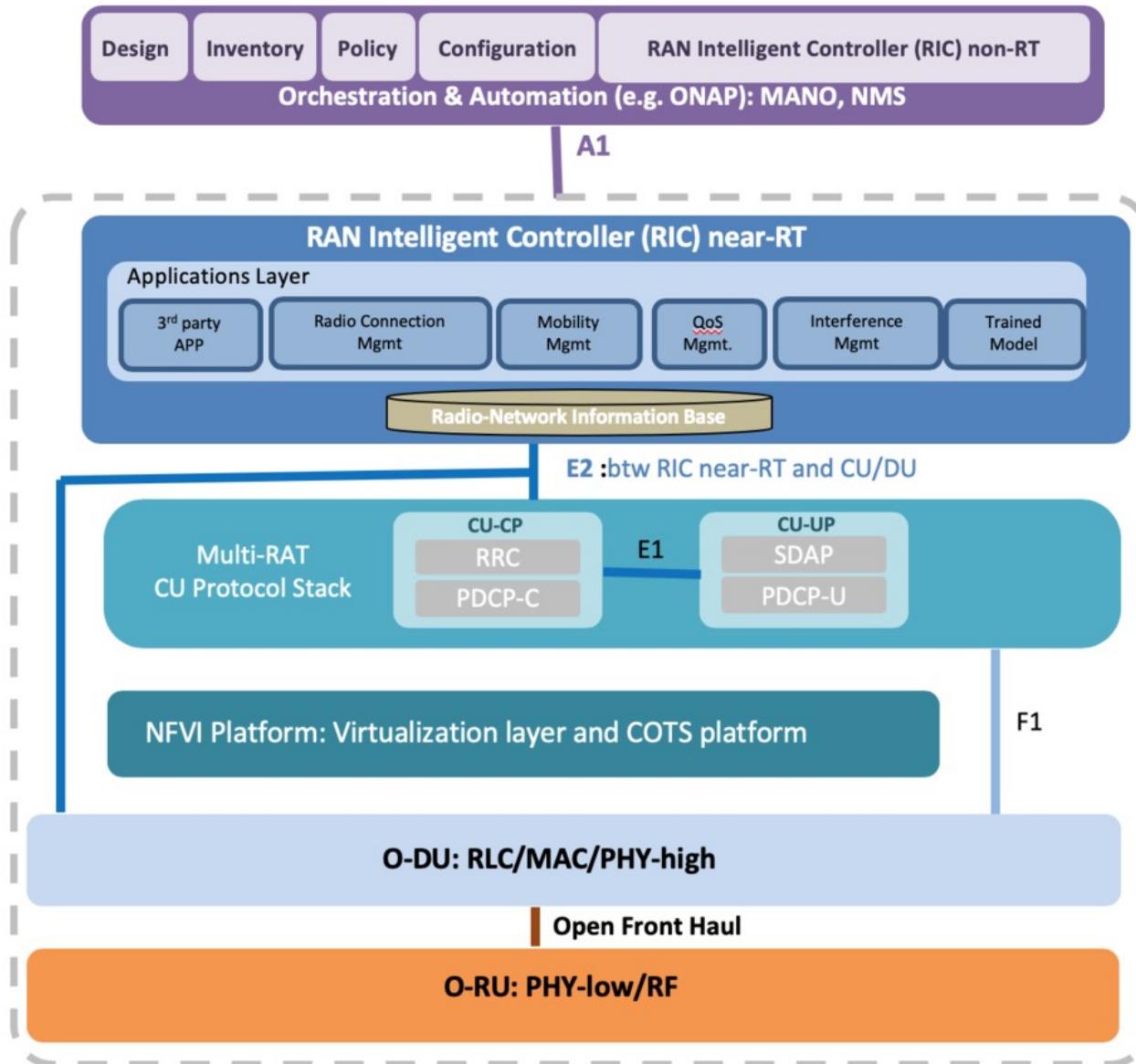
# RIC: R-NIB e Microserviços

- O RIC mantém a *RAN Network Information Base* (R-NIB)
- Uma base de dados com diversas informações: sobre estações base, dispositivos, links e slices
- O mais importante: o RIC é constituído de um conjunto de microserviços
  - chamados de xApps
  - configuráveis
  - para as mais diferentes tarefas

# 2 Tipos de xApps

- RRM Apps & SON Apps
- Granularidade fina: **RRM** (*Radio Resource Management*), estão nas estações base e controlam o escalonamento local, handover, controle de acesso, etc...
- Granularidade mais grosseira: **SON** (*Self-Organizing Networks*) enxergam a rede como um todo, fazendo balanceamento de carga, otimizando cobertura e capacidade, mitigando interferência na rede como um todo, etc...

# Interfaces do RIC



# Interfaces do RIC

- As interfaces têm nomes dados na O-RAN Alliance
- Interface A1: interface com o sistema de gerenciamento da RAN usado pela organização, chamado OSS/BSS (*Operations Support System / Business Support System*)
- Interface E2: interface entre o RIC e os elementos da RAN; a ideia que um elemento informa quais funções ele suporta

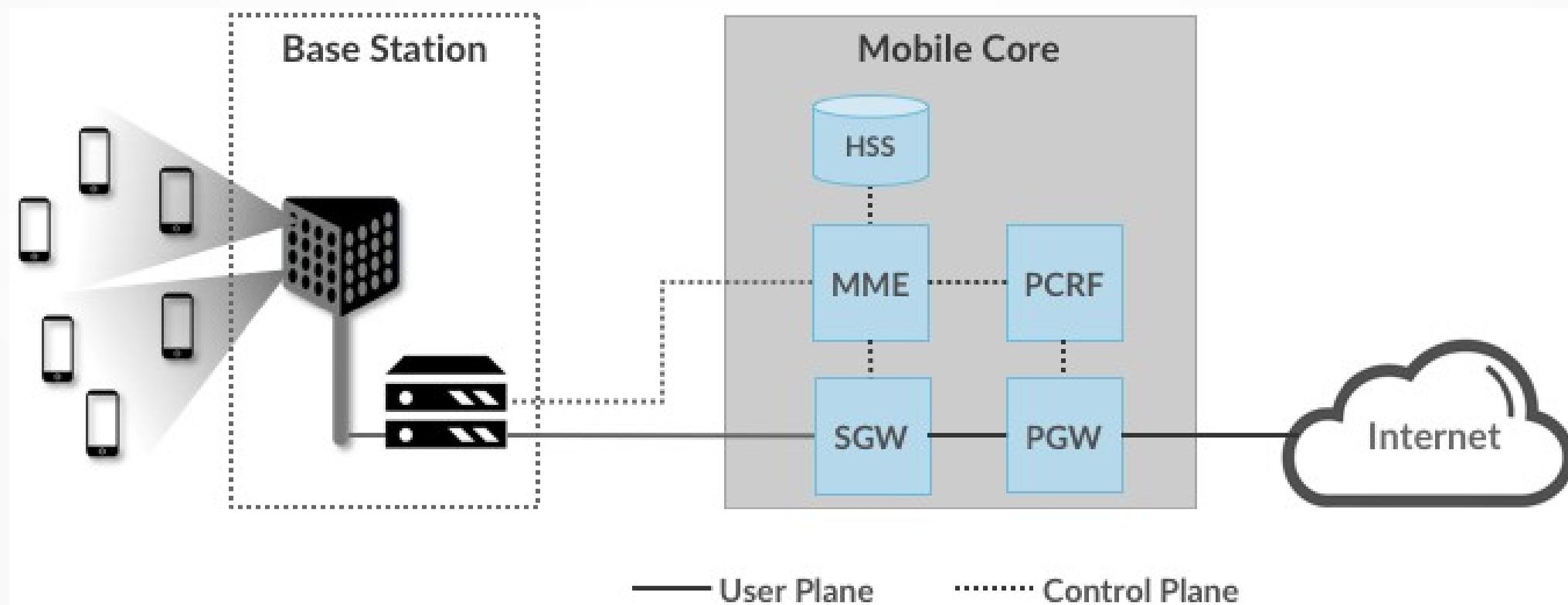
# O Núcleo

- A função principal do núcleo é ser a ponte, entre a RAN e a Internet (nosso ponto de vista ;-)
- Os assinantes/dispositivos devem ser autenticados
- Devem ter a qualidade de serviço especificada em seu SLA: *Service Level Agreement*
- Gerencia a mobilidade de usuários, através das estações base → funcionalidade inexistente na Internet
- O núcleo 5G é baseado em uma arquitetura baseada em nuvens e microserviços

# O Núcleo 4G

- Evolved Packet Core (EPC)
- Tem 5 componentes, 3 no *Control Plane* (CP) e 2 no *User Plane* (UP):
  - MME (*Mobility Management Entity*): faz o rastreamento das UEs na RAN
  - HSS (*Home Subscriber Server*): contém informações sobre os assinantes da rede
  - PCRF (*Policy & Charging Rules Function*): faz gerenciamento de políticas e contabilização
  - SGW (*Serving Gateway*): encaminha pacotes que vem da RAN, inclusive entre estações base
  - PGW (*Packet Gateway*): um roteador IP, conecta com a Internet

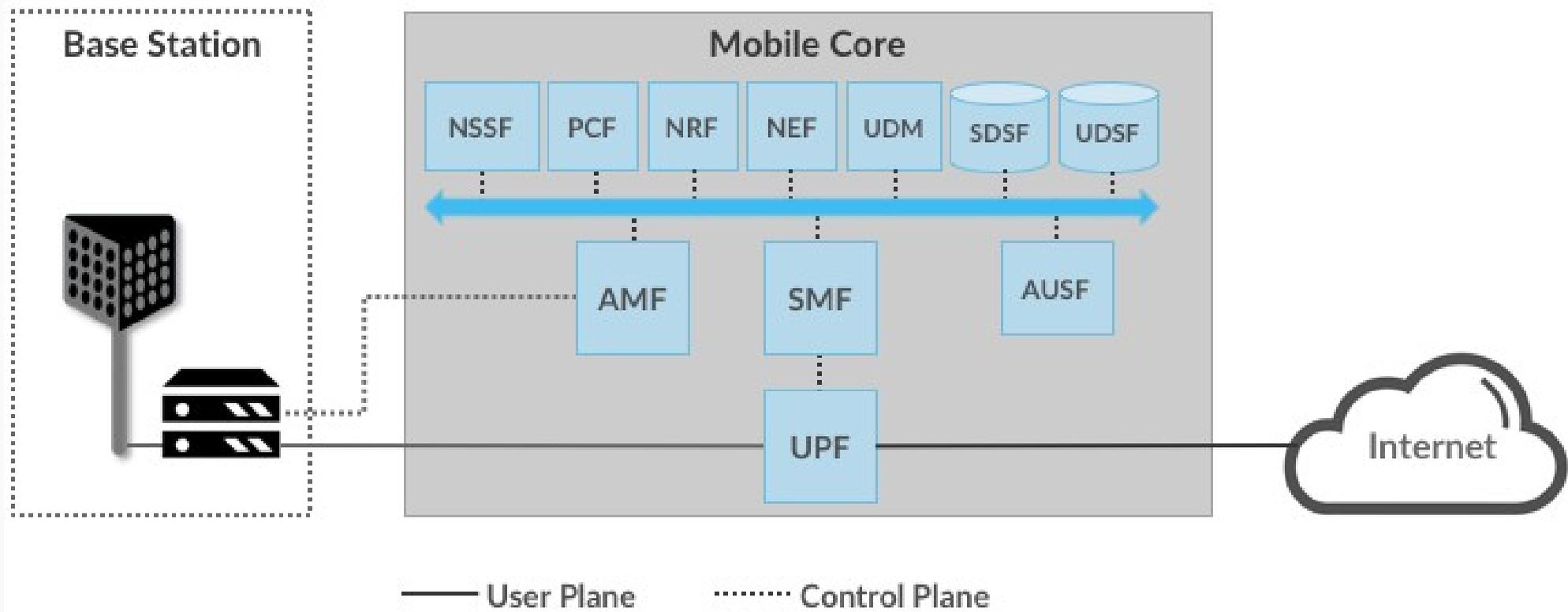
# O Núcleo 4G



# O Núcleo 5G

- NG-Core
- Um núcleo nas nuvens: modelo baseado em nuvens com microsserviços
  - Mais “a ideia” de microsserviços do que uma solução concreta dentro de um framework existente
- Organizado em 3 grupos:
  - o primeiro está no Plano de Controle e remete a componentes do 4G
  - o segundo também está no Plano de Controle, mas não tem correspondente no 4G
  - o terceiro está no Plano de Usuário

# O Núcleo 5G



# NG Core: O 1o Grupo de Módulos

- AMF (*Core Access and Mobility Management Function*): gerencia a conexão e movimentação dos UEs; 4G → parte do MME
- SMF (*Session Management Function*): gerencia a sessão do UE, incluindo obtenção de endereço IP, configuração de roteamento, etc; 4G → PGW
- PCF (*Policy Control Function*): gerencia políticas; 4G → PCRF
- UDM (*Unified Data Management*): gerencia a identidade de usuários; 4G → HSS
- AUSF (*Authentication Server Function*): autenticação; 4G → HSS

# NG Core: O 2o Grupo de Módulos

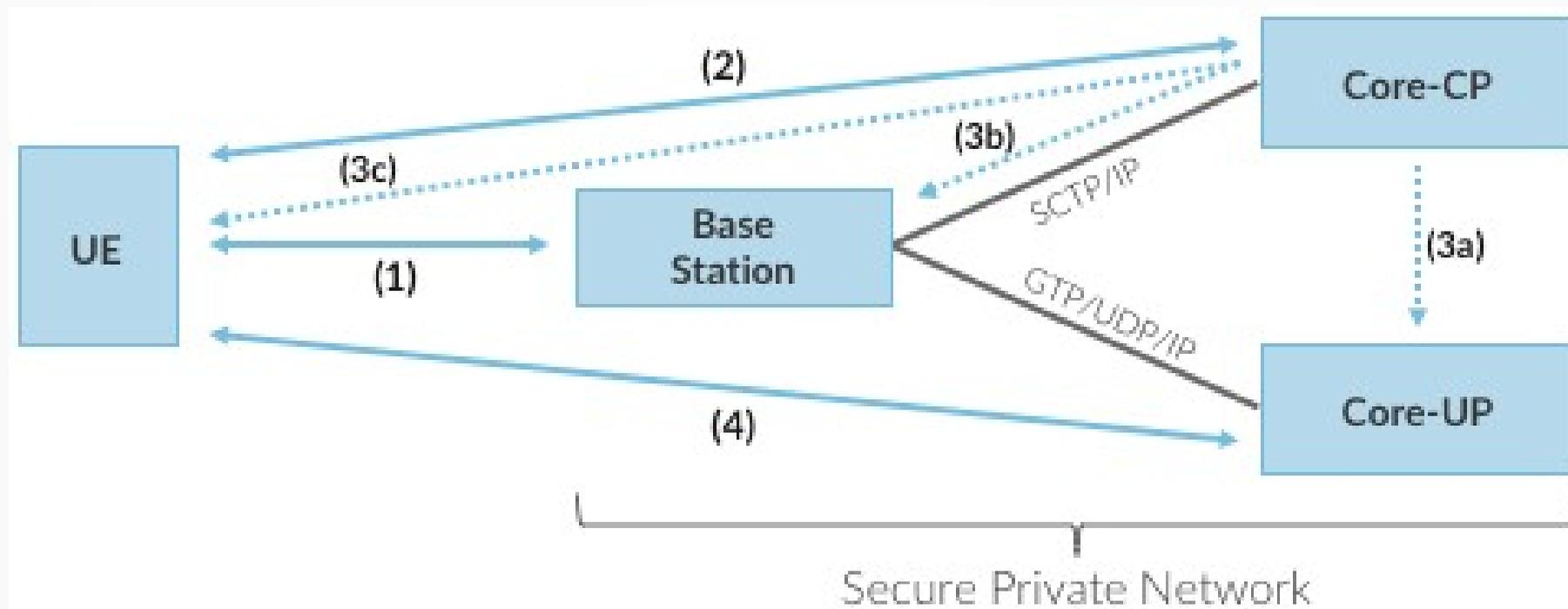
- SDSF (*Structured Data Storage Network Function*): uma base de dados SQL
- UDSF (*Unstructured Data Storage Network Function*): uma base de dados chave/valor (*key-value store*)
- NEF (*Network Exposure Function*): provê uma interface para acesso de terceiros, podendo ser implementada como um “API server”
- NRF (*NF Repository Function*): diretório de serviços disponíveis
  - NF: Network Function
- NSSF (*Network Slicing Selector Function*): atribui slice da rede para UE

# NG Core: O 3o Grupo de Módulos

- Um único componente que executa no Plano de Dados, digo “Plano de Usuário”
- UPF (*User Plane Function*)
  - encaminha tráfego entre a RAN e a Internet
  - corresponde a união do SGW e do PGW do EPC/4G
  - aplica políticas
  - pode realizar funções diversas sobre os pacotes/tráfego: filtragem , DPI...
  - faz e reporta medições de uso de tráfego
  - gerencia QoS sobre o tráfego

# 5G: Segurança & Mobilidade

- A RAN se conecta ao NG Core através de uma rede segura
- Cada UE tem um cartão SIM, com sua chave secreta e informações diversas, incluindo um identificador único



# Um Dispositivo se Conecta

- Na figura do slide anterior são mostrados os passos para conexão
    - (1) O UE é ligado: faz comunicação inicial com a estação base usando canal de rádio temporário, não autenticado
    - (2) A estação base reencaminha a mensagem de conexão recebida do UE para o Plano de Controle do Núcleo
- O UE e o Plano de Controle (MME no 4G ou AMF no 5G) executam protocolo de autenticação

# Cont.: UE se Conecta

- **(3)** Uma vez autenticado (várias alternativas de autenticação e criptografia são possíveis):
  - **(3a)** O Plano de Controle instrui o Plano de Usuário para criar os túneis de comunicação para o tráfego do UE - inclui assinalar endereço IP e configurar QoS de acordo com QCI
  - **(3b)** Instrui a estação base para se comunicar com o UE usando um canal criptografado
  - **(3c)** Define uma chave secreta para o UE se comunicar com a estação base → criptografada com a chave pública do UE :-P
- **(4)** O UE pode agora comunicar normalmente através do Plano de Usuário

# UE se Conecta

- O canal seguro entre UE e Plano de Controle se mantém aberto, para comunicação de controle
- O canal entre o UE e o Plano de Usuário é chamado de “canal de serviço ao portador” - *default bearer service*
  - Podem ser abertos vários canais dependendo de necessidades de QoS e outros fatores

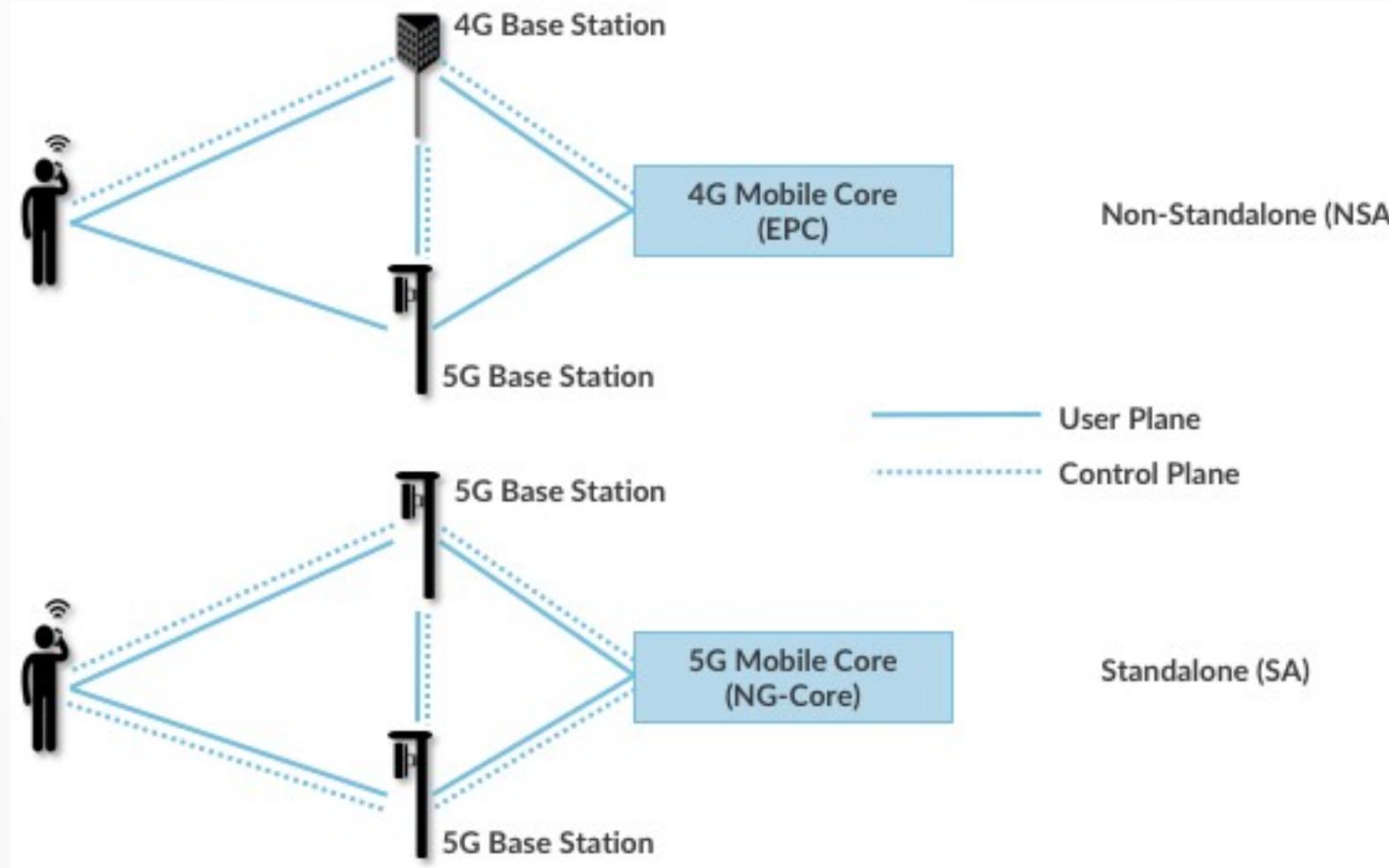
# UE Movimenta de Célula

- Através do canal temporário não autenticado, o UE se comunica com a estação base da nova célula
- Dependendo dos sinais que percebem, as estações base se comunicam para fazer o handoff
- Feito o handoff: o núcleo é informado (Plano de Controle) e os passos 3 são refeitos para a nova circunstância

# A Transição 4G → 5G

- Nós todos aqui estamos em transição 4G → 5G
- Mais precisamente: 4G RAN/EPC → 5G RAN/NG-Core
- Existem várias estratégias para transição, uma importante é chamada de NSA: Non-StandAlone
  - Estações base 5G vão sendo instaladas na rede 4G
  - Neste caso é importante notar que toda a sinalização de controle se mantém 4G
  - as estações base 5G são apenas para o payload das UEs

# A Transição 4G → 5G



# 6G: já em movimento!

- Objetivo: oferecer velocidade na ordem de 1Tbps
- Usa parte do espectro eletromagnético diferente de 5G: de 95 GHz to 3 THz (Terahertz)
  - comprimentos de onda menores, mais desafios
- IoT: 6G aumenta o número de dispositivos que podem ser gerenciados por área
- Latência na ordem de microsegundos
- Novas aplicações se tornam possíveis

# Conclusão

- Nestas aulas chegamos à rede 5G
- Uma rede baseada em software
- Representa uma evolução significativa
  - Principalmente em termos das funcionalidades para tráfego de dados que suporta (*mission critical*, IoT, ...)
- Vimos a arquitetura 5G, bem como a transição 4G → 5G
- Terminamos mencionando 6G: já é tema de pesquisa

**Obrigado!**

Lembrando: a página da disciplina é:  
<https://www.inf.ufpr.br/elias/topredes>