

CAPÍTULO

1

Entendendo o núcleo 5G na prática, através de uma implementação de código aberto

Entendendo o núcleo 5G na prática, através de uma implementação de código aberto

João Paulo Lobianco Silva ((INF/UFG)

Samuel Wanberg Lourenço Nery (INF/UFG)

Rogério S. e Silva (INF/UFG & IFG)

Antonio Oliveira-Jr (INF/UFG & Fraunhofer Portugal AICOS)

Kleber Cardoso (INF/UFG)

Cristiano Bonato Both (UNISINOS)

Novembro 2020 - Minicurso 1 - SBrT2020

Resumo

The deployment of advanced Internet of Things (IoT) services requires strict communication requirements which will be achieved by 5G. The release 15 provided by 3GPP introduced a service-based architecture with softwarization, virtualization and network slicing. In this context, the mini course intends to present in practice the 5G system and implementations of the software components used. In addition, this mini course will demonstrate an open-source implementation of the 5G 3GPP core network, integrated with a non-3GPP network (IoT LoRaWAN).

Introdução

A forma de prestar serviços está passando por uma grande transformação em toda a sociedade [1]. Por exemplo, a adoção de serviços como telemedicina, veículos autônomos e Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) promoverão uma grande revolução em nossas vidas [2, 3, 4, 5, 6]. Esses serviços possuem diferentes e restritos requisitos que demandam novas arquiteturas de telecomunicação para garantir a qualidade dos serviços prestados. Entretanto, o projeto, desenvolvimento e implantação dessas arquiteturas precisam evoluir para atender de forma rápida e flexível esses requisitos rigorosos de comunicação. Atualmente, existe uma grande expectativa que as redes móveis de quinta geração (5G) atendam a esses requisitos [7].

O projeto para redes de quinta geração (5G) é especificado pela 3GPP¹ (*3rd Generation Partnership Project*) e apresenta mudanças significativas em toda a arquitetura de redes móveis celulares [8]. Por exemplo, o Lançamento 15 [9], finalizado em junho de 2019, apresentou uma nova arquitetura para redes celulares, com base em serviços e micros serviços (*Service-Based Architecture - SBA*). O Lançamento 16 [10], finalizado em julho de 2020, está focado na expansão do sistema 5G (*5G System - 5GS*), por exemplo, introduzindo a definição de serviço prioritário de multimídia, serviços da camada de aplicativos em *Vehicle-to-everything* (V2X), acesso via satélite 5G, acesso à rede local em 5G, convergência sem fio e cabeada para 5G, posicionamento e localização de terminais, comunicações em domínios verticais e automação de rede [8].

Sistemas 5G estão sendo desenvolvidos e aprimorados para (pretensiosamente) fornecer conectividade em qualquer lugar. O Lançamento 15 do Sistema 5G com as especificações 3GPP, compreendendo o 5G Core (5GC) e 5G New Radio (NR) com equipamentos de usuário (*User Equipment - UE*) 5G, está sendo implantado comercialmente em vários países, usando frequências abaixo de 6 GHz e ondas milimétricas. Embora o foco principal do Lançamento 15 tenha sido nos serviços aprimorados de banda larga móvel, o foco do Lançamento 16 está nos novos recursos para *Ultra-Reliable Low Latency Communication* (URLLC) e IoT Industrial, incluindo comunicação sensível ao tempo (*Time Sensitive Communication - TSC*), serviços de localização aprimorados e suporte para redes não públicas (*Non-Public Networks - NPNs*). Além disso, alguns novos recursos cruciais, como NR em bandas não licenciadas (*NR-Unlicensed*), *Integrated Access & Backhaul* (IAB) e NR V2X, também estão sendo introduzidos como parte do Lançamento 16, bem como aprimoramentos para *Multiple-Input Multiple-Out* (MIMO) massivo, convergência sem fio e cabeada, SBA e fatiamento de recursos.

SBA projetada para sistemas 5G apresenta, entre outras características, a separação estrutural do plano de controle e plano de dados (adotamos plano de usuário como sinônimo nesse documento), alta inserção de funções virtuais e um novo conceito de fatiamento de rede (*Network Slicing*). A presença de fatiamento de rede nessa arquitetura visa apoiar a criação de múltiplos serviços *End-to-End* (E2E) virtuais e isolados. Para entender a evolução do 5GS é importante situá-lo no contexto da evolução das redes móveis. 5GS baseia-se nos conceitos da computação em nuvem, cujo núcleo é orientado à serviços (SBA), com suporte nativo a fatiamento de recursos de rede, virtualização e computação móvel de borda [11]. Duas opções arquiteturais são propostas para o 5GS [7]:

- **Arquitetura Não-Autônoma (*Non-Standalone - NSA*):** a rede de acesso e sua nova interface de rádio (NR) devem ser usadas em conjunto com a infraestrutura de núcleo existente (*Evolved Packet Core - Control and User Plane Separation – EPC-CUPS*).
- **Autônoma (*Standalone - SA*):** NR está conectado ao novo núcleo 5G (5GC), com todos os serviços projetados para a quinta geração de redes móveis. Nessa arquitetura,

¹3GPP-A Global Initiative: <https://www.3gpp.org/>

a característica fundamental é que os elementos são definidos como funções de rede, as quais fornecem serviços a outras funções, ou qualquer outro “consumidor” autorizado, mediante interfaces.

Os aspectos das arquiteturas NSA [9] e SA [10], que permitem a implantação virtualizada das redes 5G, podem ser totalmente distribuídos, redundantes e escaláveis. Além disso, as várias instâncias de funções de rede podem estar presentes individualmente ou em conjunto com serviços e microsserviços, representando a plenitude dessa nova geração de redes móveis.

A rede de acesso 5G usando NR SA e o núcleo 5G estão padronizados pela 3GPP, ou seja, um UE conecta, de forma confiável, diretamente à rede de núcleo 5G. Entretanto, existem redes de acesso não-3GPP que a operadora móvel não confia no ponto de acesso ao qual o equipamento de usuário, ou seja, o dispositivo, está conectado. Pode ser uma rede local sem fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN) (por exemplo, de uma casa) ou uma rede IoT (por exemplo, sensores e dispositivos IoT de uma indústria ou propriedade rural). O UE canaliza todo o tráfego para um *gateway* na rede, o qual é confiável para a operadora móvel. Esse é o acesso não-3GPP padronizado no Lançamento 15 para 5G. Para um melhor entendimento, a Figura 1.1 apresenta um cenário para sistemas 5G com uma rede de acesso 3GPP e seus UEs, conectados em uma *Radio Access Network* (RAN), e uma rede de acesso não-3GPP com seus UE-IoT. Essas redes estão conectadas ao 5G-Core (SBA), utilizando os planos de controle e de usuário, para interconectar a rede de dados (*Data Network* - DN) - principalmente a Internet.

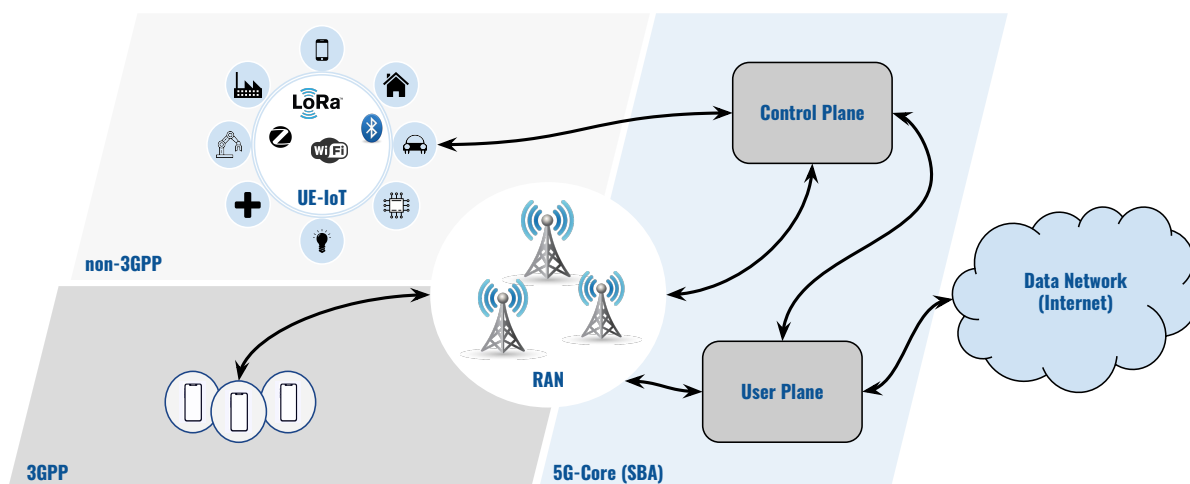


Figura 1.1 – Cenário de um sistema 5G.

A integração de redes de acesso não licenciadas (por exemplo, WLAN e DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*)) com redes celulares licenciadas tem sido discutida a mais de uma década e está especificada nos Lançamentos 15 e 16. Entretanto, a integração de redes de acesso IoT (por exemplo, redes *Low Power Wide Area Networks* - LPWAN) não está especificada e deve usar a Função de Interconexão não-3GPP (*Non-3GPP Interworking function* - N3IWF) para acesso ao núcleo 5G. Com o crescimento massivo das redes IoT e uso

em grande escala pelas indústrias e cidades inteligentes, cresce o interesse na integração de redes IoT não-3GPP à sistemas 5G. Dessa forma, neste minicurso, apresentamos um caso de uso dessa integração utilizando o my5G/my5-core.

my5G² é uma iniciativa de software de código aberto que pretende tornar o sistema 5G acessível para todos. my5G-core³ é um *fork* do projeto free5GC⁴. Esse projeto implementa o núcleo da rede 5G (5GC), seguindo as especificações técnicas do Lançamento 15 3GPP e posteriores. Nesse contexto, o objetivo deste minicurso é apresentar, na prática, o 5GC (my5G-core) e um caso de uso IoT não-3GPP, através de uma implementação de código aberto da iniciativa my5G. Todo o processo de instalação, configuração, preparação do ambiente e o desenvolvimento de software no contexto do 5GC é apresentado, descrito e disponibilizado para os participantes do minicurso.

Este documento, para além desta **Introdução**, está organizado da seguinte forma: a Seção 1.1 (**Fundamentos de Softwarização**) apresenta os conceitos fundamentais para compreensão do tema; a Seção 1.2 (**O núcleo 5G**) apresenta a arquitetura SBA e as funções (adotamos componentes como sinônimo nesse documento) que formam o núcleo da rede; a Seção 1.3 (**5G em ação: Procedimentos de um sistema 5G**) apresenta as operações que compõem o sistema; a Seção 1.4 (**Desenvolvimento para o my5G-core: Caso de uso IoT não-3GPP**) apresenta o desenvolvimento do caso de uso 5GC (utilizando o my5G-core) e os resultados do estudo de caso contemplando o desenvolvimento de um UE IoT genérico com acesso não-3GPP ao núcleo da rede 5G; e a Seção 1.5 (**Material de apoio em repositório público**) descreve brevemente o conteúdo suplementar deste minicurso (códigos, vídeos) disponível em um repositório público e o seu endereço para acesso.

1.1 Fundamentos de softwarização

Sistemas 5G estão sendo desenvolvidos com o suporte das mais recentes tecnologias disruptivas, tais como, Redes definidas por software (*Software Defined Networks* - SDN), Virtualização das Funções de Redes (*Network Function Virtualization* - NFV), Computação em nuvem (*Cloud Computing*), Arquitetura baseada em serviços (*Service-Based Architecture* - SBA) e Containerização. Desta forma, é possível observar que a softwarização (i.e., a adoção de funcionalidades desenvolvidas em software, em vez de, integradas ao hardware) orienta o desenvolvimento das redes de comunicação, e é o caminho natural para a sua evolução. Alguns importantes conceitos habilitadores para desenvolvimento de sistemas 5G são apresentados em seguida.

Redes definidas por software (SDN) – é uma abordagem de rede em que o plano de controle é desacoplado do hardware específico de comunicação e fornecido um aplicativo de software [12]. SDN é um paradigma de redes programáveis que foi proposto como uma abordagem para facilitar a evolução das redes. O objetivo das SDNs é fornecer uma interface

²<https://github.com/my5G>

³<https://github.com/my5G/my5G-core>

⁴free5GC, National Chiao Tung University, <https://www.free5gc.org/>

de programação aberta, permitindo o desenvolvimento de aplicativos que possam controlar e gerenciar dinamicamente a conectividade entre os elementos da rede [13].

Virtualização das funções de rede (NFV) – implementa funções de rede por meio de técnicas de virtualização de software e as executa em hardware comum (*commercial off-the-shelf* - COTS). Os dispositivos virtuais podem ser instanciados sob demanda sem a instalação de novos equipamentos [14]. A virtualização das funções de redes impacta em uma importante mudança no fornecimento de serviços de telecomunicações. Implementar as funções de rede em software é uma abordagem viável para tornar os equipamentos de rede mais abertos e, portanto, permitir que os provedores de serviços de telecomunicações sejam mais flexíveis, mais ágeis na implantação de novos serviços, o que pode levar a reduções significativas de custos [15, 16].

Cloud Native – é um modelo para permitir acesso onipresente, conveniente e de rede sob demanda a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis (por exemplo: redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços) que podem ser rapidamente provisionados e liberados com o mínimo esforço de gerenciamento ou interação do provedor de serviços [17]. O conceito *Cloud Native* trata da abordagem de como os aplicativos podem ser criados e operados na computação em nuvem. Esse conceito pode ser aplicado para as tecnologias, a arquitetura e as ferramentas e envolve tecnologias relacionadas a contêineres, microsserviços e Interfaces de Programação de Aplicações (*Application Programming Interfaces* - API), entre outras. A Cloud Native Computing Foundation (CNCF)⁵ define a estrutura e as restrições para que aplicações sejam consideradas *Cloud Native*. Entre as restrições estão a utilização de metodologias de microsserviços e a implantação através de contêineres. Outro pilar crítico é a orquestração dinâmica de contêineres (por exemplo, Kubernetes⁶, Docker Swarm⁷).

Microsserviços – são pequenos serviços autônomos que trabalham colaborativamente [18]. Os microsserviços são componentes de software que podem ser executados como processos e capazes de manter comunicação com outros microsserviços por meio de APIs bem definidas. A abordagem de microsserviços é considerada uma variante da Arquitetura Orientada a Serviços (*Service-Oriented Architecture* - SOA). O objetivo geral do desenvolvimento com microsserviços é tornar os aplicativos mais fáceis de escalar e mais rápidos para desenvolver, permitindo a inovação e acelerando o tempo de entrega de novos recursos. No entanto, alguma complexidade está associada, o que inclui gerenciamento, orquestração e criação de novos métodos de gerenciamento de dados [7]. Por exemplo, no contexto dos sistemas 5G, o conceito de microsserviços pode ser utilizado para a implantação e expansão do sistema, em linha com a rápida evolução da tecnologia da informação. Um dos objetivos da utilização de microsserviços nos sistemas 5G é a possibilidade de decompor os componentes em funções virtualizadas, com baixa granularidade, para tornar o serviço leve e com alta capacidade de compartilhamento. Esse objetivo se encaixa

⁵CNCF: <https://github.com/cncf/toc/blob/master/DEFINITION.md>

⁶Kubernetes: <https://kubernetes.io/>

⁷Docker Swarm: <https://docs.docker.com/get-started/swarm-deploy/>

perfeitamente na necessidade de definir cenários de comunicação para banda larga móvel aprimorada (*enhanced Mobile Broadband* - eMBB), suporte a densidades extremamente altas de dispositivos conectados (*massive Machine Type Communication* - mMTC) e comunicações URLLC, uma vez que oferece modularidade, reutilização de funções e interoperabilidade com redes heterogêneas. Além disso, a introdução de microsserviços e interfaces para acessá-los simplifica os processos de atualização e manutenção dos sistemas 5G, reduzindo o custo de operação e acelerando a introdução de novos serviços [19].

Containerização – A virtualização revolucionou a infraestrutura de TI e permitiu aos fornecedores de tecnologia oferecer diversos serviços baseados em TI aos consumidores. Basicamente, a virtualização no nível do sistema permite que as instâncias de diferentes Sistemas Operacionais (SOs) sejam executadas simultaneamente em um único servidor através de um hipervisor, que cria e executa máquinas virtuais. Os contêineres, por outro lado, são isolados uns dos outros dentro do SO, mas compartilham o núcleo do SO. Os contêineres são amplamente usados em cenários onde é necessário otimizar recursos de hardware para executar vários aplicativos e melhorar a flexibilidade e a produtividade. Além disso, os ecossistemas e ferramentas para ambiente baseado em contêineres (por exemplo, Kubernetes) estão se expandindo rapidamente [7].

Muitas dessas tecnologias já estão sendo largamente utilizadas na área de Tecnologias de Informação. Além disso, a adoção dessas tecnologias de forma integrada na área de telecomunicação também está se tornando uma realidade. Por exemplo, a próxima seção apresentamos o novo núcleo 5G que leva em consideração a utilização dessas tecnologias, i.e., SBA.

1.2 O núcleo 5G

No contexto das redes de telecomunicações móveis, o núcleo 5G (5G Core - 5GC) é responsável pela execução das rotinas necessárias ao processo de autenticação, autorização, provisionamento de recursos de rede e conectividade. Especificamente em sistemas 5G, o núcleo deve ser capaz de fornecer interoperabilidade entre tecnologias de acesso fixas e móveis, suportando interação entre funções do plano de controle (reusabilidade, conexões flexíveis e descoberta de serviços) e o plano de usuário [20].

De acordo com Hedman et al. [7], 5GC está sendo projetado para usufruir dos benefícios da SBA, por exemplo, (i) desenvolvimento e manutenção mais eficiente, (ii) microsserviços associados a recursos individuais, (iii) instâncias de microsserviços sob demanda para melhor escalabilidade e (iv) ciclos de vida independentes para os microsserviços na atualização do software. Isso possibilita um desenvolvimento mais flexível de novos serviços, pois torna-se possível conectar outros componentes sem introduzir novas interfaces específicas. Nesse contexto, o núcleo é composto de várias funções de rede (*Network Functions* - NFs) que também são chamadas de componentes 5GC, e executa suas tarefas específicas através das interações entre as NFs com a rede de acesso, UEs e com

o plano do usuário (*User Plane Function* - UPF). Além disso, 5GC fornece uma estrutura modular na qual as funcionalidades podem ser implantadas por meio de interfaces que possibilitam o fornecimento e consumo de serviços [21]. Uma NF pode operar de duas maneiras: (i) uma NF consumidora pode solicitar uma resposta de uma NF produtora, por exemplo, para solicitar informações sobre políticas do usuário; (ii) ou pode se inscrever em uma produtora e ser notificada se necessário, por exemplo, se o estado do UE mudar para inativo [22].

Os serviços são acessados através de interfaces baseadas em serviços (SBI) usando APIs e uma combinação dos protocolos HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), REST (*Representational State Transfer*) e JSON (*JavaScript Object Notation*). Construir uma rede de acesso 5G desagregada, virtualizada e definida por software é a direção que a indústria já está tomando (por boas razões técnicas e comerciais) [23, 20], e dividir a rede 5G em seus componentes elementares também é a melhor maneira de explicar como o 5G funciona.

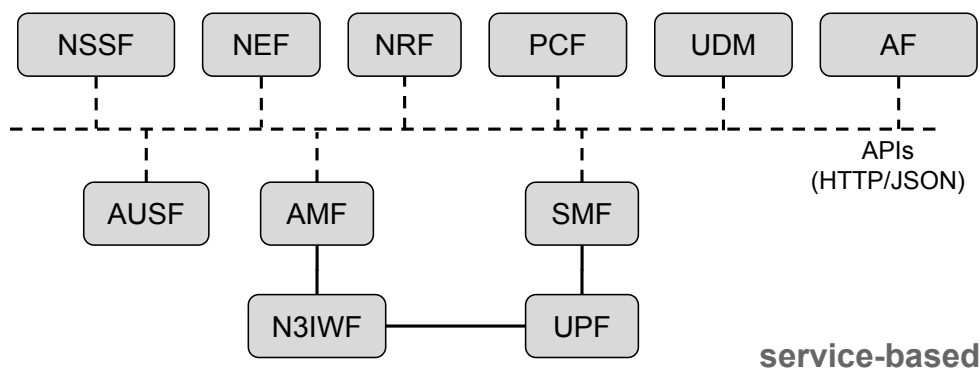


Figura 1.2 – Núcleo 5G.

A Figura 1.2 apresenta o 5GC e as interações entre as NFs no núcleo, das quais se destacam: NSSF - *Network Slice Selection Function*; NEF - *Network Exposure Function*; NRF - *NF Repository function*; PCF - *Policy Control Function*; UDM - *Unified Data Management*; AF - *Application Function*; AUSF - *Authentication Server Function*; AMF - *Access and Mobility Management function*; N3IWF - *Non-3GPP Interworking Function*; UPF - *User plane function*; SMF - *Session Management function*. As principais NFs são descritas a seguir.

1.2.1 Funções de Rede do 5GC

A **Função de Gerenciamento de Acesso e Mobilidade (AMF)** atua no estabelecimento de conexão entre o UE e 5GC. Essa ação aciona um conjunto de procedimentos para identificar o UE, fornecendo uma estrutura de segurança para oferecer um canal de transporte de mensagens. O principal objetivo do componente AMF é garantir que o processo de comunicação ocorra de forma coesa e transparente, considerando a mobilidade do usuário como um fator crítico. A partir das funções implementadas na AMF, a rede pode chegar a um determinado usuário para avisar sobre eventuais mensagens ou ligações recebidas, por exemplo. Além disso, o componente AMF pode permitir que um

determinado UE inicie um processo de comunicação com outros UEs conectados à RAN ou com acesso à Internet. Outra funcionalidade fundamental da AMF é garantir a conectividade que mantém as sessões ativas quando os UEs se movem entre diferentes pontos de acesso.

A **Função de Gerenciamento de Sessão (SMF)** tem a responsabilidade de configurar a conectividade do UE para a DN, bem como gerenciar o Plano de Usuário para essa conectividade. A Figura 1.3 apresenta as principais interações da SMF com outras NFs no 5GC, com destaque para as associações com AMF, UPF, UDM e PCF, descritas a seguir.

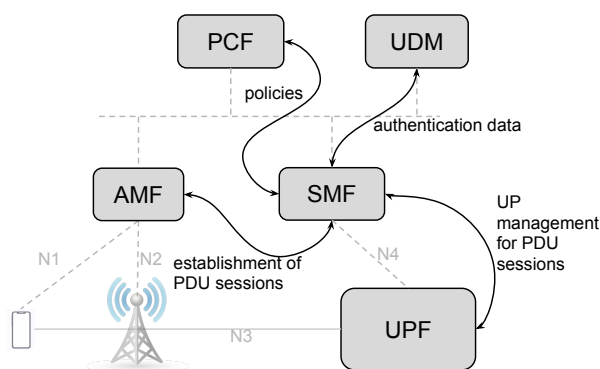


Figura 1.3 – Principais interações da SMF.

- Gerencia as sessões do usuário, que representam os dispositivos dos usuários conectados. A SMF se comunica indiretamente com o UE por meio do AMF, que retransmite mensagens relacionadas à sessão entre os dispositivos e SMF.
- Controla a UPF por meio da interface de rede N4. Esse controle inclui a capacidade da SMF de configurar a direção do tráfego de dados associado a uma UPF para uma determinada sessão de UE e executar ações de monitoramento e controle.
- Interage com a função UDM para a geração de dados de autenticação de dispositivos e autorização de acesso de usuários de acordo com dados de seu plano. Caso haja mais de uma instância SMF na rede, a UDM mantém registro de qual instância está atendendo a um dispositivo específico.
- Interage com as funções relacionadas à PCF, visando executar a política de controle de sessão dos UEs conectados. Essa ação de execução pode ser descrita como uma das principais tarefas associadas a um sistema 5G. Por exemplo, essa ação determina as diretrizes para a conectividade de dados entre um UE e a DN.

A **Função servidor de autenticação (AUSF)** fornece três serviços, (i) autenticação de UEs, via AMF, por meio das credenciais de acessos fornecidas pela UDM, (ii) criptografia para o tráfego seguro de informações nos procedimentos de atualização do UE, e (iii) fornecimento de parâmetros de segurança para proteção na execução dos processos de atualização de *roaming*. A Figura 1.4 apresenta as interações entre a AUSF e a AMF e UDM.

Na interação com a AMF, a AUSF realiza as autenticações dos UEs (3GPP ou não-3GPP), por meio das credenciais criadas pela UDM.

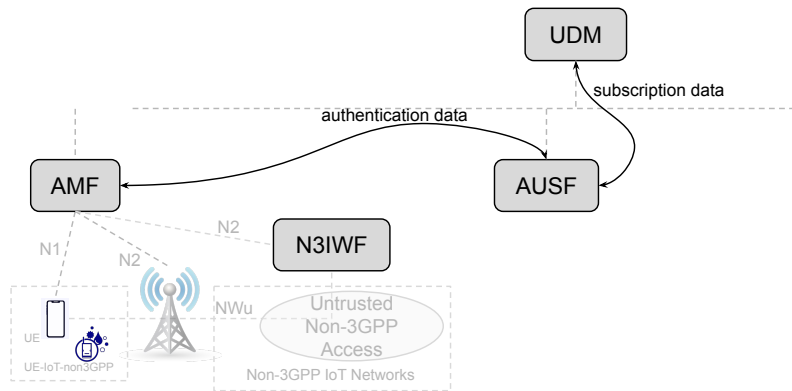


Figura 1.4 – Interações da AUSF

A **Função de Repositório de Rede (NRF)** reúne informações de perfil das NFs que estão disponíveis na rede. A NRF provê às NFs consumidoras de serviços a descoberta e seleção das funções produtoras disponíveis [7]. Quando uma instância de uma NF é implantada ou alterada, por exemplo, devido a necessidade de escala, a NRF é atualizada com novas informações de perfil da NF. Os perfis podem ser atualizados pela própria NF ou por outra, em seu nome [24]. A NRF é uma função centralizadora responsável por guardar as informações sobre quais os serviços são oferecidos e como podem ser consumidos.

A **Função de Exposição de Rede (NEF)** oferece suporte à exposição de eventos e recursos do sistema 5G para aplicativos e funções de rede dentro e fora da rede da operadora [7]. A NEF oferece suporte ao monitoramento de eventos e os disponibiliza para os aplicativos autorizados e outras NFs, por exemplo, localização de UE, acessibilidade, estado do *roaming* e perda de conectividade. A NEF interage com a AMF para sintonia do sistema 5G e para gerenciar o comportamento do UE. Além disso, a NEF pode suportar diferentes conjuntos de funcionalidades e interoperar com outras NEFs no 5GC [25].

A **Função de gerenciamento de dados unificados (UDM)** é um *front-end* para os dados de assinatura do usuário armazenados na função de Repositório de Dados Unificados (*Unified Data Repository* - UDR) e gerencia os dados na rede de forma centralizada. Por meio da UDM, várias outras NFs executam diversas ações, por exemplo, (i) registro e autenticação de UEs, (ii) manuseio da identificação do usuário, (iii) acesso para usuários específicos com base nos dados de assinatura e a aplicação de regras de acesso, (iv) autorizações diferentes para assinantes de *roaming* e assinantes domésticos, e (v) fornecimento de informações à NEF para recuperação de informações/restrições de acesso não-3GPP do assinante. Caso haja mais de uma instância de AMF e SMF na rede, a UDM mantém registro de qual instância está atendendo a um dispositivo específico. A UDM também dá suporte a recuperação dos dados de assinatura individual do UE para seleção de *slice* (dados de autenticação, de sessão, de seleção de SMF e de contexto).

Dentro do 5GC, a UDM fornece e consome serviços das funções AMF, AUSF, SMF, NEF,

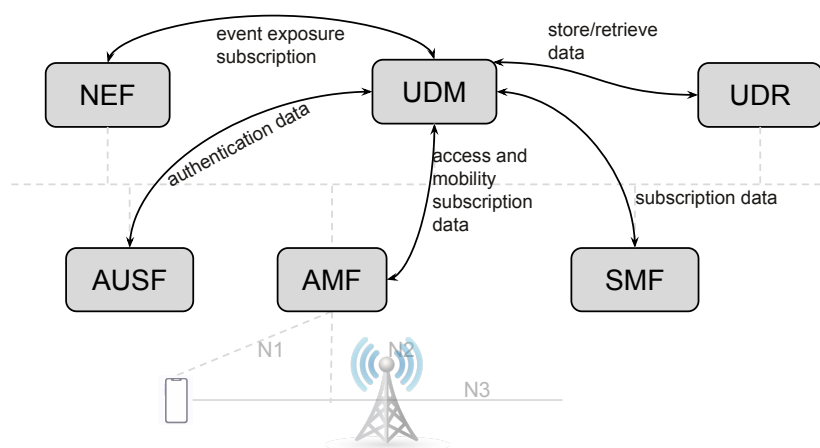


Figura 1.5 – Interações da UDM.

e UDR (entre outras NFs) através da SBI. A Figura 1.5 apresenta alguns exemplos dessas interações, por exemplo, (i) com a AMF, a UDM troca informações acerca do acesso e da mobilidade dos usuários, (ii) com a NEF, a UDM interage para obter informações de acesso de UEs não-3GPP ao 5GC, (iii) com a AUSF para autenticação de dados, (iv) com a SMF para a recuperação de dados de assinante e autenticação de dados, e (v) com a UDR, são realizadas as operações de armazenamento e recuperação de dados.

A **Função de Plano de Usuário (UPF)** tem como principal tarefa processar e encaminhar os dados de usuário. A funcionalidade da UPF é controlada a partir da SMF, i.e., indicando qual UPF deve se conectar com a rede externa e atuar como um ponto de conexão IP para os dispositivos dessa rede externa. Dessa forma, a mobilidade dos dispositivos é ocultada para a rede externa. Isso significa que os pacotes IP com um endereço de destino, pertencente a um dispositivo específico, são sempre roteáveis da Internet para a UPF específica que está servindo a esse dispositivo, mesmo quando o dispositivo está se movendo na rede. Além disso, a UPF pode aplicar marcações de *Quality of Service* (QoS) em pacotes para a rede de rádio ou para redes externas, possibilitando que a rede de transporte possa lidar com cada pacote com a prioridade correta em caso de congestionamento na rede.

A **Função de Políticas de Controle (PCF)** provê as políticas de controle para as funcionalidades relacionadas com o gerenciamento de sessões para o acesso e mobilidade, para a seleção de acesso dos UEs e a seleção de sessões *Protocol Data Unit* (PDU). Além disso, PCF provê suporte para as transferências em *background*.

A **Função de Interconexão não-3GPP (N3IWF)** é responsável pela interação entre redes não-3GPP (por exemplo, IoT) não confiáveis e o 5GC. A N3IWF suporta conectividade baseada nas interfaces N2 e N3 para o núcleo, enquanto suporta conectividade segura IPSec (*IP Security*) com o UE. A Figura 1.6 apresenta as interações da N3IWF no 5GC. No procedimento de registro, o UE se conecta por túneis IPSec ao N3IWF via interface *NWu*; após o registro o UE suporta sinalização NAS com o 5GC pela interface N1 [26]. A N3IWF interage com o plano de controle (AMF) por meio da interface N2 e com a UPF por meio da

interface N3 [27].

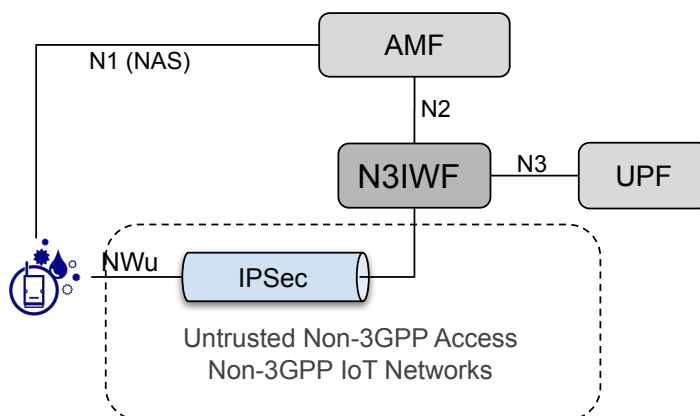


Figura 1.6 – Interações da N3IWF.

A interação entre as várias funções de rede da SBA 5G é discutida em detalhes a seguir respectivamente nas subseções 1.2.2 (Registro, Descoberta e Requisição de Serviços), 1.2.3 (Gerenciamento de Conexão, Registro e Mobilidade) e 1.2.4 (Gerenciamento de Sessão (5GSM)).

1.2.2 Registro, Descoberta e Requisição de Serviços

SBA define a arquitetura através da qual as NFs no núcleo podem produzir e consumir serviços, sem a necessidade de uma interface ponto-a-ponto entre elas. Ao inicializar, cada NF deve informar à NRF quais serviços ela oferece, juntamente com as versões suportadas, além do IP a partir do qual as outras NFs podem consumir cada um desses serviços. Esse procedimento é chamado de Registro de Serviço (*Service Registration*). Quando alguma NF precisa de algum serviço fornecido por outra NF, ela deve consultar a NRF sobre quais as NFs disponíveis que oferecem esse serviço. A NRF retorna uma lista com todas as instâncias de NFs disponíveis. Ao receber a lista, cabe à NF que fez a consulta, decidir a qual instância solicitará o serviço. Esse procedimento de consulta é chamado de Descoberta de Serviço (*Service Discovery*). As NFs que oferecem serviços são chamadas de produtoras, enquanto aquelas que consomem serviços são chamadas de consumidoras. Cada NF age como consumidora em alguns momentos e como produtora em outros. Além disso, é possível uma consumidora se inscrever (*subscribe*) junto a uma produtora, para ser notificada quando determinado evento acontecer. A comunicação de sinalização no 5GC usa o paradigma HTTP e REST, o que facilita a interoperabilidade com outros sistemas.

A Figura 1.7 apresenta um modelo simplificado para exemplificar o procedimento de registro, descoberta e requisição de serviços no âmbito da recuperação das políticas de acesso de um usuário ao sistema 5G. Conforme ilustrado na figura, inicialmente uma NF, neste caso a PCF, registra os serviços que fornece na NRF – **Service registration**, em seguida, a AMF consulta a NRF em busca de uma PCF adequada e, em resposta, recebe uma lista de

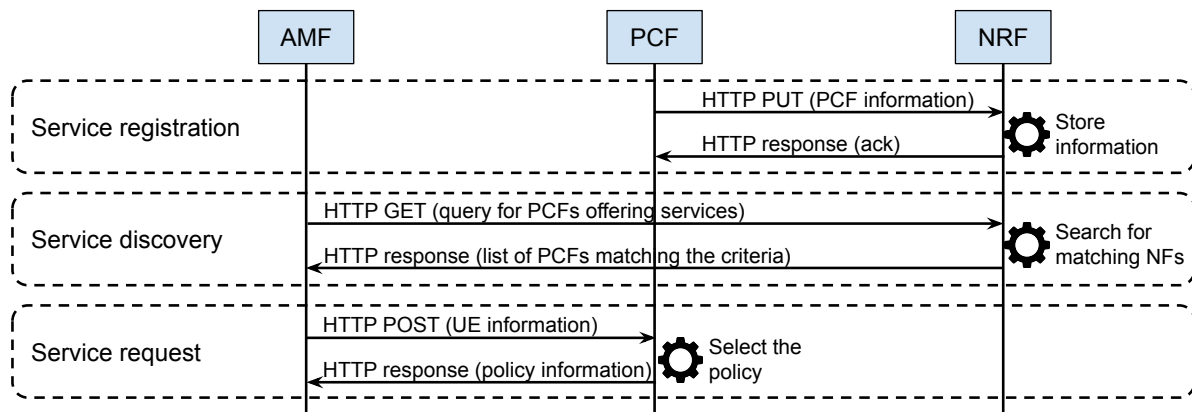


Figura 1.7 – Fluxo de registro, descoberta e requisição de serviços na SBA 5G.

PCFs (segundo critérios) – **Service discovery**. Finalmente, a AMF requisita as políticas de acesso (para um dado UE) fornecidas pela PCF e as recebe como resposta – **Service request**.

1.2.3 Gerenciamento de Conexão, Registro e Mobilidade

As duas principais funções das redes móveis são prover conectividade de dados e mobilidade para seus usuários. No 5G, os conceitos relacionados à conectividade de dados são tratados dentro do gerenciamento de sessão (*5G Session Management - 5GSM*), enquanto os conceitos de mobilidade são tratados dentro do gerenciamento de mobilidade (*5G Mobility Management - 5GMM*), que inclui o gerenciamento de conexão (*5G Connection Management - 5GCM*) e gerenciamento de registro (*5G Registration Management - 5GRM*). Para facilitar o entendimento, os conceitos relacionados a 5GCM, 5GRM e 5GMM são abordados nessa subseção e os conceitos relacionados a 5GSM são tratados na subseção 1.2.4 (Gerenciamento de Sessão (5GSM)).

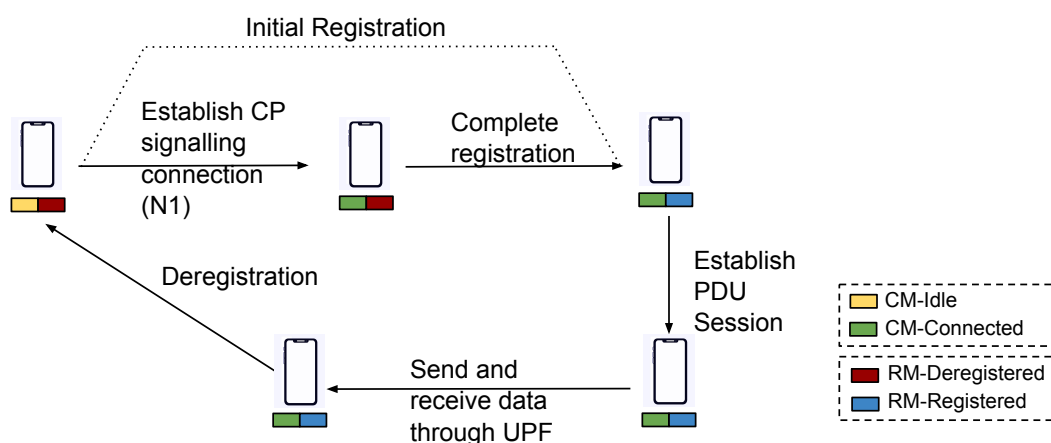


Figura 1.8 – Fluxo básico executado por um UE com as mudanças de estado CM e RM.

O fluxo básico para que o usuário consiga acessar serviços em uma rede de dados (por exemplo, a Internet), é iniciando com a criação da conexão de sinalização com o plano de controle (N1), registro e estabelecimento de uma sessão PDU. É importante destacar, que a

todo momento é preciso manter a continuidade de serviços e sessão, mesmo quando o UE sai da área de registro. Cada uma dessas etapas está relacionada com um ou mais desses quatro gerenciamentos. A Figura 1.8 mostra como os estados de gerenciamento de conexão (*Connection Management* - CM) e gerenciamento de registro (*Registration Management* - RM), representados respectivamente pelos retângulos esquerdo e direito abaixo do UE, são alterados conforme cada etapa é executada. O UE inicia nos estados *CM-IDLE* e *RM-DEREGISTERED*, mudando para os estados *CM-CONNECTED* e *RM-REGISTERED* ao final do procedimento de registro inicial, retornando para os estados *CM-IDLE* e *RM-DEREGISTERED* ao final do procedimento de cancelamento de registro.

O **gerenciamento de conexão (5GCM)** é responsável pelo estabelecimento e término da conexão NAS de sinalização de plano de controle entre UE e AMF, através da interface de referência N1. N1 é uma conexão lógica que compreende as conexões entre UE e a rede de acesso (3GPP ou não-3GPP) e entre a rede de acesso e AMF (N2), como pode ser observado na Figura 1.9. Após o estabelecimento dessa conexão de sinalização, o UE pode interagir com o núcleo para realizar os procedimentos de controle, como registro, autenticação, recebimento de políticas e estabelecimento de sessão PDU.

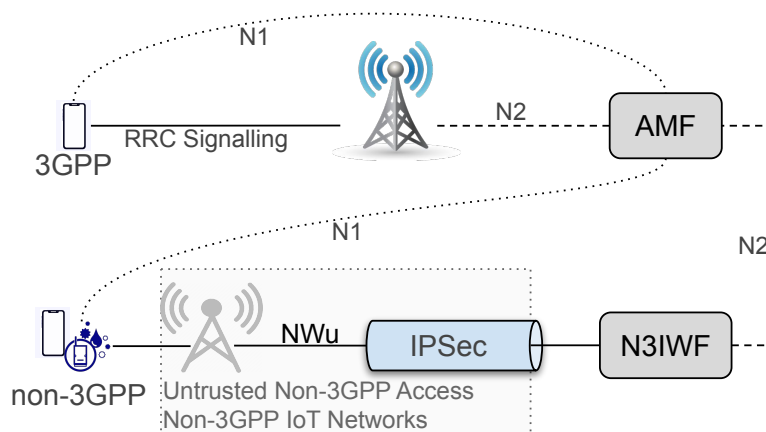


Figura 1.9 – Conexão de sinalização do plano de controle para acessos 3GPP e não-3GPP

Os procedimentos de Registro e Requisição de Serviço podem alterar o estado da conexão de *CM-IDLE* para *CM-CONNECTED*, enquanto o procedimento de Cancelamento de registro pode alterar o estado de *CM-CONNECTED* para *CM-IDLE*. Além disso, para acessos 3GPP, o UE também pode decidir liberar a conexão e entrar no estado *CM-IDLE*, para tentar economizar energia, restabelecendo a conexão e entrando em (*CM-CONNECTED*), quando precisar enviar dados ou em resposta a um *Paging*, isto é, quando a rede notifica o UE que possui dados para entregá-lo.

A conexão pode estar em dois estados, *CM-CONNECTED* ou *CM-IDLE* e são mantidos tanto no UE quanto na AMF. A Figura 1.10 mostra as transições de estado CM no UE e AMF. Conforme ilustrado na Figura 1.10(a), a AMF muda de estado para *CM-CONNECTED* quando o contexto N2 é estabelecido com a rede de acesso, caso contrário, altera para o estado *CM-IDLE*. Além disso, conforme ilustrado na Figura 1.10(b), o UE muda de estado

para *CM-CONNECTED* quando a conexão de sinalização com a rede de acesso é estabelecida, e quando é liberada altera para o estado *CM-IDLE*.

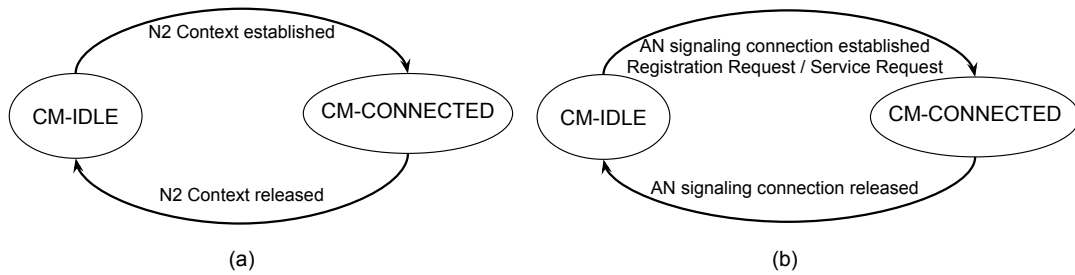


Figura 1.10 – Transições de estado de gerenciamento de conexão no (a) AMF e (b) UE [27].

O **gerenciamento de registro (5GRM)** é usado para registrar e cancelar o registro do UE junto à rede, além de estabelecer o contexto de usuário. O usuário precisa se registrar junto à rede para receber serviços, por exemplo, acesso à Internet. Existem dois estados de registro: *RM-REGISTERED* e *RM-DEREGISTERED*. Basicamente, quando o UE é iniciado, ele tenta se registrar junto ao núcleo, através do procedimento de registro inicial, o qual inclui etapas para criar conexão de sinalização (N1), identificação, autenticação e autorização, criação do contexto de usuário e aplicação de políticas. Caso o registro seja bem sucedido, o UE transita do estado *RM-DEREGISTERED* para *RM-REGISTERED*, além do contexto do usuário ser criado junto à AMF também com o estado *RM-REGISTERED*. Semelhante ao estado de CM, o estado de RM é mantido tanto no UE quanto na AMF. Uma vez que o UE transita para *CM-REGISTERED*, a 3GPP define várias interações entre UE e AMF para gerenciar os estados de CM e RM. Nos acessos 3GPP, o UE deve atualizar seu registro periodicamente ou quando ocorre mobilidade. Nos acessos não-3GPP, somente é necessário refazer o registro quando houver necessidade de atualizar parâmetros de protocolos que são negociados durante o procedimento de registro inicial, uma vez que a 3GPP não prevê mobilidade para esse tipo de acesso. Além disso, UE e AMF possuem temporizadores que são iniciados quando a conexão entra em *CM-IDLE*, sendo suspenso quando retornam para *CM-CONNECTED* ou executando o procedimento de cancelamento de registro implícito, quando expiram.

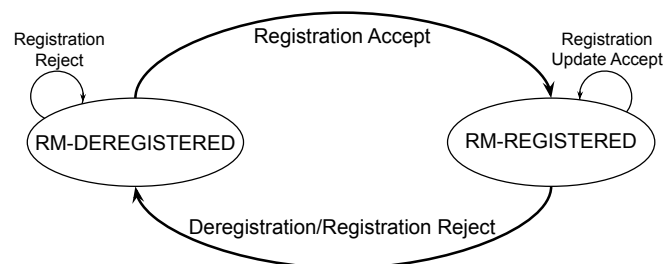


Figura 1.11 – Transições de estado de registro [27].

A Figura 1.11 mostra as transições de estado de RM no UE e AMF. Quando uma requisição de registro ou atualização de registro é bem sucedida, com recebimento da

mensagem *Registration Accept* ou *Registration Update Accept*, o UE e AMF mudam de estado para *RM-REGISTERED*. Quando a requisição é rejeitada ou é realizado o procedimento de cancelamento de registro, UE e AMF altera de estado para *RM-DEREGISTERED*.

O **gerenciamento de mobilidade (5GMM)** é responsável por garantir que a rede consiga alcançar o usuário para notificar sobre chamadas ou mensagens recebidas, que o usuário consiga iniciar comunicação com outros usuários ou acessar serviços (por exemplo, a Internet) e pela continuidade dos serviços e sessões mesmo quando o usuário está se movimentando dentro ou entre tecnologias de acesso [7]. Para isso, o sistema 5G oferece um conjunto de procedimentos para gerenciamento de mobilidade que se dividem em 3 categorias:

- **Procedimentos comuns:** podem ser iniciados sempre que o UE está no estado *CM-CONNECTED*. Inclui os procedimentos para autenticação mútua entre UE e 5GC, identificação, transporte entre UE e AMF, atualização de configuração de UE e reporte de erros.
- **Procedimentos específicos:** só um procedimento pode estar sendo executado por um UE, por tipo de acesso (3GPP ou não-3GPP). Inclui os procedimentos para registro e cancelamento de registro.
- **Procedimentos para gerenciamento de conexão:** utilizado para estabelecimento da conexão de sinalização entre UE e núcleo ou para requerer a ativação de recursos do plano de usuário para envio de dados. Inclui os procedimentos de Requisição de serviço, *Paging* e Notificação.

A rede de acesso é composta por células que representam as antenas de rádio através das quais um UE 3GPP consegue acessar a rede 5G. Essas células estão agrupadas em áreas de cobertura (*Tracking Area* - TA). As células dentro de uma mesma TA fazem *broadcast* (difusão) do identificador dessa TA e é através desse identificador que um UE consegue saber em qual TA ele está atualmente. Durante o procedimento de registro, o UE recebe uma área de registro (*Registration Area* - RA), contendo a lista das TA suportadas por esse registro. Quando o UE se movimenta entre duas células dentro da mesma área de registro, é realizado o procedimento de *Handover* para que a RAN de destino passe a servir o UE. Caso o UE se mova para fora da sua área de registro, ele executa um procedimento de atualização de registro de mobilidade (*Mobility Registration Update*), selecionando uma nova célula, que pode escolher uma nova AMF para servir esse UE, juntamente com uma nova área de registro.

1.2.4 Gerenciamento de Sessão (5GSM)

Nos sistemas 5G, o gerenciamento de sessão é responsável por prover conectividade de dados entre o UE e a rede de dados da operadora, assim como gerenciar os componentes chaves do núcleo da rede para estabelecimento e manutenção do plano de dados [7].

Os recursos de gerenciamento de sessão em rede 5G foram projetados para obter maior flexibilidade de operação, sendo capazes de suportar diferentes casos de uso. Essa característica corresponde ao uso de sessões PDU para o transporte de dados como um meio estruturado e flexível para operar com diferentes tipos de protocolos de comunicação na rede de acesso.

Uma sessão PDU representa uma conexão lógica entre o UE e a rede de dados (DN). PDU é o protocolo referência para transporte de dados no plano do usuário em redes 5G. No 5GC, as funcionalidades de gerenciamento de sessão estão diretamente associadas à camada de sessão PDU. Além disso, o protocolo é responsável por, gerenciar a distribuição de endereços IP, aplicar regras de QoS, gerenciar a mobilidade, garantir segurança e executar rotinas de cobrança e políticas de controle de acesso.

Para conectar com a rede de dados, o UE deve primeiro submeter uma requisição de estabelecimento de sessão PDU para o 5GC. No conteúdo da requisição, é informado o nome da rede de dados (*Data Name Network* - DNN) à qual se conectará. Cada sessão PDU representa uma única conexão entre o UE e a DN (por exemplo, Internet, *IP Multimedia System* (IMS) ou *Mobile Edge Computing* (MEC), entre outras) e também existem os casos de uso específicos de conexão com rede de dados para aplicações industriais ou comerciais privadas.

Ao se associar à rede 5G, o UE através da interface RAN estabelece uma nova conexão com a UPF, e os dados provenientes das aplicações do UE são encapsulados em pacotes PDUs. O tráfego da aplicação é encaminhado para a DN através da UPF no núcleo da rede, por uma rede subjacente, específica para transporte de pacotes PDUs. O tráfego da aplicação do usuário é relacionado com o tipo de serviço que é consumido, exemplos de serviços habituais são: web (HTTP/HTTPS), e-mail (SMTP), e transferência de arquivos (FTP).

Para exemplificar o processo de estabelecimento da conexão PDU em redes 5G, a Figura 1.12 apresenta o plano de usuário, com o esquema da pilha de protocolos da rede de transporte subjacente relacionada à camada de transporte para sessões PDU. Essa camada deve ser separada da rede de transporte responsável por conectar os nós existentes na topologia da rede ao sistema 5G. O plano de usuário representa a conexão da sessão PDU com a DN, sendo construído sob tunelamento dos dados pela rede de transporte com o intuito de garantir criptografia fim-a-fim entre o UE e a DN. Além disso, tem como objetivo desacoplar a camada de sessão PDU da rede de transporte subjacente, possibilitando ao operador da rede utilizar qualquer tecnologia de comunicação na construção da rede de acesso, de forma transparente para a camada da sessão PDU.

Na implantação da rede de transporte subjacente, é utilizado o protocolo IP com diferentes tecnologias de acesso ao meio físico, por exemplo, o protocolo MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), redes convencionais *Ethernet*, enlaces de conexão ponto-a-ponto, e enlaces sem fio. As sessões de PDU são transparentes para a infraestrutura relacionada à camada de transporte na rede *backbone* da operadora, como no caso de roteadores IP intermediários ou comutadores (*switches*) da camada de enlace (Figura 1.12).

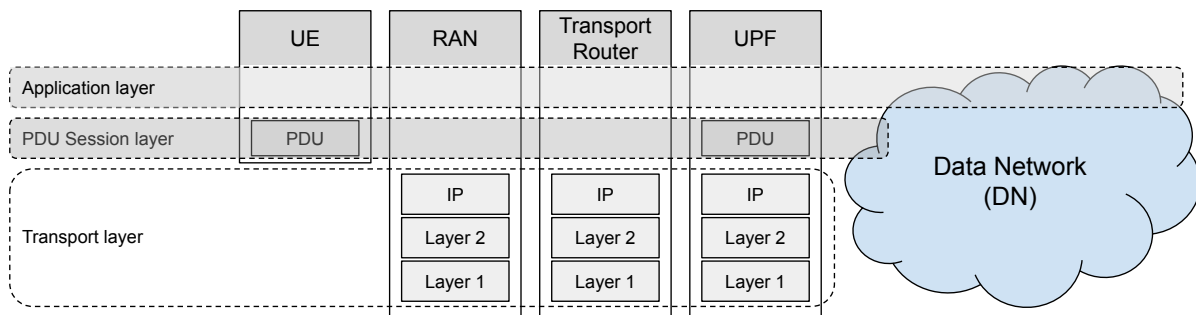


Figura 1.12 – Pilha de protocolos para construção do plano de usuário com estabelecimento da sessão PDU.

O UE pode estabelecer múltiplas sessões PDUs para diferentes casos de uso, em que o acesso simultâneo em mais de uma rede de dados se faz necessário. Por exemplo, em cenários que o UE deseja obter conectividade com a Internet e ao mesmo tempo com uma rede IMS ou uma interface de computação móvel em borda MEC, ou estabelecimento de múltiplas sessões PDU, para um mesma DN simultaneamente por múltiplos caminhos de dados UPF para fins de redundância, persistência e escalabilidade. A Figura 1.13 ilustra diferentes esses cenários.

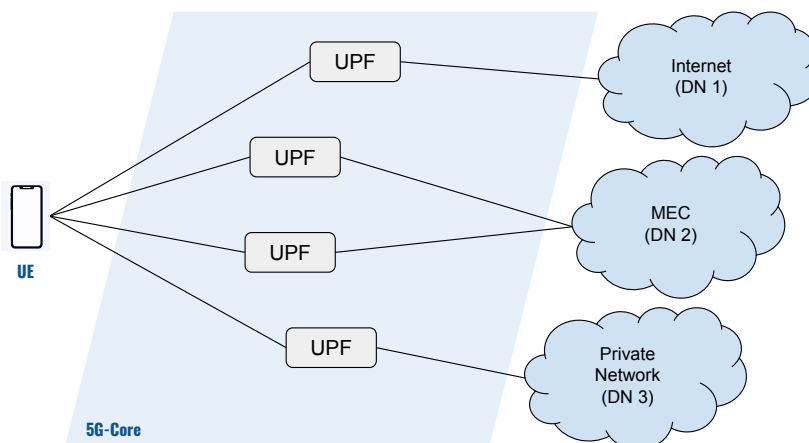


Figura 1.13 – Estabelecimento de múltiplas sessões PDU.

A sessão PDU é o ponto central para o estabelecer conectividade entre o UE e a rede de dados DN. Para isso, alguns parâmetros são fundamentais para descrever as propriedades PDU, sendo que essas propriedades são definidos durante o processo de estabelecimento da sessão e não podendo ser alterados durante o tempo de vida da sessão PDU [7]. Algumas das principais propriedades para sessão PDU são:

- **PDU Session property:** Trata-se do identificador único da sessão PDU, aplicado tanto para identificação de sessão no UE, quanto para a rede de dados.
- **Slice identifier (S-NSSAI):** Refere-se à fatia de rede (*network slice*) em que a sessão PDU irá estabelecer conexão para prosseguir com a conectividade de dados.

- **Data Network Name (DNN):** É o nome da rede de dados específica, na qual a sessão PDU estabelecerá a conectividade de dados.
- **PDU Session Type:** Trata-se do protocolo base, em nível de usuário, para comunicação fim a fim utilizado na rede de transporte subjacente, onde são transportados os pacotes da sessão de PDU. Os protocolos mais habituais são o IPv4 e IPv6, *Ethernet* ou pacotes não estruturados projetados para suportar aplicações IoT (por exemplo, 6LoWPAN, MQTT e CoAP). Por exemplo, para requisição de sessões PDU que utilizam o protocolo IP, o UE deve primeiro configurar a requisição de sessão PDU para o tipo específico do protocolo baseado nas capacidades da pilha IP. Além disso, o UE que possui suporte para IPv6 ou IPv4 deve definir em seu escopo o tipo de sessão PDU de acordo com as capacidades possíveis do UE ou pela política recebida do operador do sistema (por exemplo, IPv4, IPv6 ou IPv4v6 quando ambos são usados). A função de rede SMF é encarregada por definir qual endereço será atribuído ao UE. Quando a SMF recebe uma requisição de estabelecimento de sessão PDU, a SMF seleciona o tipo da sessão PDU endereçada ao UE baseada no tipo de protocolo suportado pela rede de dados.
- **Service and Session Continuity (SSC) mode:** Refere-se à longevidade do ponto de ancoragem do plano do usuário da sessão de PDU. A SSC é uma ferramenta para condução da escolha do plano de dados com a seleção e ancoragem da UPF em melhor disposição na topologia de rede durante a fase de estabelecimento da sessão PDU. A arquitetura 5GC inclui suporte mais flexível para lidar com diferentes níveis de mobilidade de dados, a SCC implementa 3 modos de operação [27], (i) SCC1 – o endereço IP é mantido independente da mobilidade, ou seja, a mesma UPF se mantém acessível para ser usada por toda a rede; (ii) SSC2 – a rede irá liberar e acionar o dispositivo para reestabelecer novas sessões conforme sua mobilidade na rede, ao contrário do SSC1, o SSC2 implica em interrupção do serviço, o que pode, ou não, ser aceitável; e (iii) SSC3 – tenta combinar os benefícios de SSC1 e SSC2, permitindo baixos atrasos por meio da liberação e reestabelecimento das sessões, mas também permitindo disponibilidade de serviço contínuo, o que é obtido mantendo a conexão estabelecida com a UPF de origem até que a sessão seja confirmada na nova UPF de destino. O SSC3 impõe requisitos adicionais ao dispositivo que precisará manter duas sessões para o mesmo serviço por um período de tempo [27, 7].
- **User Plane Security Enforcement information:** Campo destinado para indicar se algum material criptográfico e de integridade de dados está ativo para sessão PDU específica.

Dentro da perspectiva dos sistemas 5G, o gerenciamento de sessão tem como funcionalidade principal o gerenciamento do plano de usuário para as sessões PDU. O plano de usuário trata-se da comunicação Fim-A-Fim entre o UE e a rede de dados para transporte dos dados proveniente das aplicações do usuário. Os procedimentos necessários

para implantar o plano de usuário na estrutura de telecomunicação da rede 5G, pode ser dividido em três etapas: (i) o UE, antes de se conectar à rede de dados, deve se conectar com a tecnologia de acesso da rede 5G, podendo ser via RAN em caso de acesso 3GPP ou através da N3IWF para não-3GPP; (ii) deve ser estabelecida uma conexão com o plano de dados entre a rede de acesso e um serviço de dados UPF, via interface de referência N3; (iii) se necessário, devem ser estabelecidos outros saltos no núcleo da rede 5G por várias UPFs onde a conexão será estabelecida por um processo de ancoragem de sessão PDU (*PDU Session Anchor* - PSA) por meio de interface de referência N9, continuando até o acesso final na rede de dados DN por meio da interface de referência N6.

A Figura 1.14 apresenta a topologia com a pilha de protocolos do plano de usuário devidamente estabelecida para as sessões PDU. Para acessos 3GPP, a conexão do UE passa primeiro pela RAN representada pela comunicação do UE com a nova interface de rádio em sistemas 5G (gNB) via interface de referência uU. Para acessos não-3GPP, a conexão do UE é estabelecida diretamente com o 5GC, via função de interconexão de rede N3IWF via interface de referência NwU. O acesso não-3GPP permite uma flexibilização maior das redes 5G para conectar redes heterogêneas fora do escopo da 3GPP, com uma maior quantidade de casos de uso, por exemplo, aplicações IoT [7].

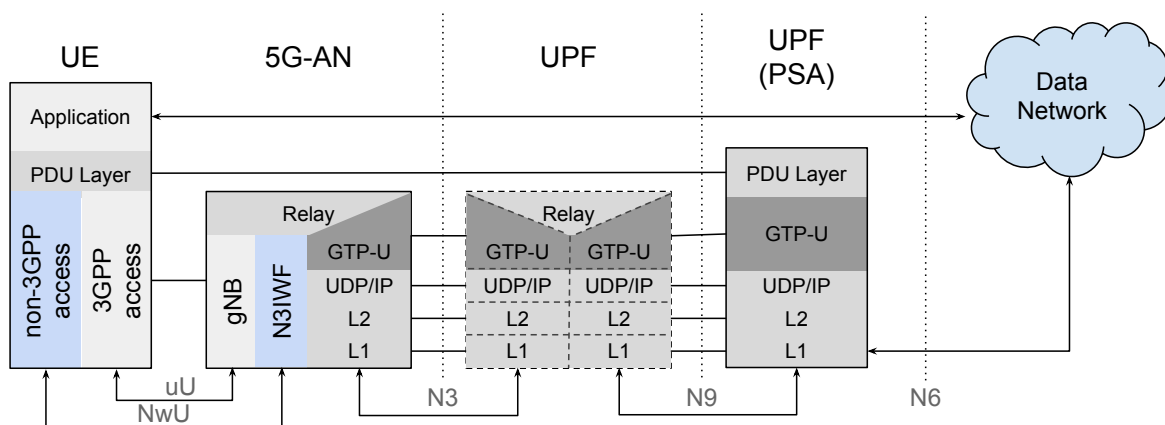


Figura 1.14 – Pilha de protocolos do plano de usuário para sessões PDU.

Ainda sobre o plano de usuário relacionado a Figura 1.14, entre as interfaces de referência N3 e N9, os dados trafegam por meio de tunelamento do protocolo GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol User Plane*) via camada de transporte UDP (vide Figura 1.14). O GTP-U é utilizado unicamente no contexto das redes 5G para transportar dados relativos ao plano de usuário. Os túneis GTP-U são utilizados entre dois nós de rede GTP-U para separar o tráfego em diferentes fluxos de conexão. Dessa forma, um caminho entre a rede de acesso (RAN ou N3IWF) e a UPF é estabelecido com um endereço IP e uma porta UDP para estabelecimento da conexão, e o código de identificador local TEID (*Tunnel Endpoint Identifier*). O TEID está presente no cabeçalho do GTP-U para indicar qual túnel particular dentro da topologia do plano do usuário que os *payloads* vão trafegar. No caminho GTP-U, podem existir múltiplos nós UPF via interface de referência N9 para uma melhor disposição de roteamento e de

recursos de rede PSA até a saída para rede de dados via interface N6. Neste contexto, a próxima subseção descreve os principais protocolos e interfaces pelo qual as funções de rede do núcleo 5G e com o UE interagem entre si.

1.2.5 Principais Protocolos e Interfaces de Referência

O **Estrato sem acesso** (*Non-Access Stratum* - NAS) é um conjunto de protocolos para a transmissão de sinalização entre o UE e a AMF via interface N1. O acesso pode ser 3GPP (por exemplo, gNB), via interface de referência *Uu*, ou não-3GPP (por exemplo, Wi-Fi, LoRaWAN), via interface de referência *NWu*, conforme ilustrado na Figura 1.15. Entre as funções do protocolo NAS destacam-se, (i) o tratamento de registro de UE e mobilidade, o qual inclui controle de acesso (gerenciamento de conexão, autenticação, tratamento de segurança NAS, identificação e configuração de UE), (ii) o suporte de procedimentos de gerenciamento de sessão (estabelecimento e manutenção da conectividade da sessão PDU, e QoS para o plano do usuário entre o UE e a DN) e (iii) o transporte de outros tipos de mensagens entre UE e a AMF (por exemplo, mensagens SMS, protocolos de serviços de localização, dados a UDM, mensagens de orientação de *roaming*, e políticas de UE) [26, 7].

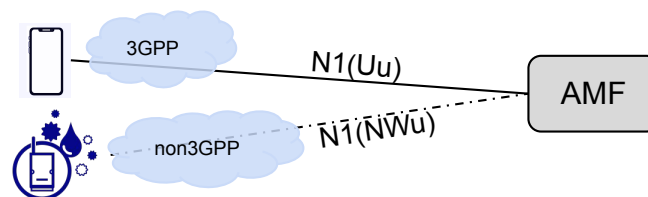


Figura 1.15 – Protocolo NAS.

O NAS consiste de dois protocolos básicos para suportar essas funcionalidades, o protocolo de gerenciamento de mobilidade do 5G (*5G Mobility Management* - 5GMM) e o protocolo de gerenciamento de sessões 5G (*5G Session Management* - 5GSM). O 5GMM é utilizado entre o UE e a AMF e é basicamente o protocolo NAS usado para atender as requisições de registro, mobilidade, segurança e transporte do protocolo 5GSM, transporte geral de outros tipos de mensagens e também é usado para transportar informações entre UE e a PCF, e entre UE e a SMSF (*Short Message Service Function*). O protocolo 5GSM é executado na interação entre o UE e a SMF (através da AMF), oferecendo suporte ao gerenciamento de conectividade de sessão PDU e é transportado sobre o protocolo 5GMM [7].

O **protocolo de aplicação NG** (*NG Application Protocol* - NGAP) é projetado para uso na interface N2 entre a RAN e a AMF. O grupo RAN 3GPP⁸ também atribui o nome de NG à interface entre RAN e a AMF que na arquitetura geral do sistema é chamada de N2. O nome do protocolo NGAP é, portanto, derivado do nome da interface NG com a adição

⁸The TSG Radio Access Network (TSG-RAN) - <https://www.3gpp.org/specifications-groups/ran-plenary>

de *Application Protocol* (AP), o qual é um termo que foi usado muitas vezes pela 3GPP para denotar um protocolo de sinalização entre duas funções de rede.

O NGAP suporta os mecanismos para lidar com os procedimentos entre a AMF e RAN e também suporta transporte transparente para procedimentos que são executados entre o UE e a AMF ou outras funções da 5GC. O NGAP é aplicável a acessos 3GPP e não-3GPP integrados com 5GC. Isso inclui operações como atualizações de configuração, transferência de contexto de UE, gerenciamento de recursos de sessão PDU e também suporte para procedimentos de mobilidade. NGAP também é usado para transmitir mensagens NAS de *downlink* e *uplink*, bem como suportar operações *CM-IDLE* e *CM-CONNECTED*, por exemplo, na liberação de contexto do UE [28].

A rede de acesso 5G (*5G Access Network* - 5G-AN) e a AMF são conectadas por meio de uma camada de rede de transporte que é usada para transportar a sinalização das mensagens NGAP entre elas. O NGAP depende de um mecanismo de transporte confiável e é projetado para ser executado em cima do *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP). O SCTP compartilha características básicas com UDP e TCP. De maneira semelhante ao UDP, o SCTP fornece transferência de dados orientada a mensagens, mas também fornece (de maneira semelhante ao TCP) transporte confiável, garantindo que os dados cheguem ao destino sem erros. Além disso, o SCTP é um protocolo orientado à conexão, o que significa que todos os dados entre dois terminais SCTP são transferidos como parte de uma sessão (ou associação, como é chamada pelo SCTP). Os *endpoints* SCTP na 5G-AN e na AMF configuram associações SCTP entre elas que são identificadas pelos endereços de transporte usados. Uma associação SCTP é genericamente denominada *Transport Network Layer Association* (TNLA) [29, 30].

O **protocolo de controle de encaminhamento de pacotes (*Packet Forwarding Control Protocol* - PFCP)** é utilizado por meio da interface N4 entre o plano de controle (SMF) e o plano de usuário (UPF) no Sistema 5G. O PFCP utiliza UDP e é complementar ao *GPRS Tunneling Protocol* (GTP) que fornece os meios de controle para um componente de sinalização do plano de controle para gerenciar o processamento e encaminhamento de pacotes realizados por um componente do plano do usuário (*GTP for the User Plane* - GTP-U). [31, 27]. Existem dois tipos de procedimentos PFCP, relacionados ao nó e relacionados à sessão. Os procedimentos relacionados ao nó são usados para estabelecer uma associação de nó entre a SMF e a UPF e ainda para enviar informações no nível do nó entre a SMF e a UPF. Os procedimentos relacionados à sessão são usados para gerenciar as sessões PFCP correspondentes a sessões PDU individuais. Uma Associação PFCP de nível de nó é configurada entre a SMF e a UPF antes de se estabelecer quaisquer sessões PFCP na UPF. Ambas, UPF e SMF, podem tomar a iniciativa de uma associação PFCP, sendo obrigatória quando iniciada pela SMF e opcional quando iniciadas pela UPF [7].

Como já foi descrito o núcleo 5G, a próxima seção apresenta os procedimentos de um sistema 5G para que os serviços sejam ofertados e consumidos.

1.3 5G em ação: Procedimentos de um sistema 5G

Na especificação técnica (TS) 23.502 [32], a 3GPP define uma série de procedimentos que devem ser suportados por um sistema 5G. Os procedimentos são fluxos que definem sequências de mensagens a serem trocadas, bem como ações a serem executadas dependendo da chegada ou retorno de cada uma delas. As NFs no núcleo, RAN e UE, devem implementar as partes que lhes correspondem desses procedimentos, para que assim consigam interagir e serviços possam ser ofertados e consumidos. A seguir, são abordados os procedimentos de registro, cancelamento de registro, requisição de serviços e estabelecimento de sessão PDU.

1.3.1 Registro

O **procedimento de registro** é uma etapa obrigatória para que o UE consiga acessar a maioria dos serviços em um sistema 5G. Esse procedimento é executado em diferentes momentos, dependendo do tipo de acesso (3GPP ou não-3GPP) ou estados 5GCM e 5GRM. A seguir, apresentamos uma lista dos principais tipos de registro:

- **Registro Inicial (3GPP e não-3GPP):** executado quando o UE está em *RM-DEREGISTERED* e deseja acessar serviços que exigem registro, por exemplo, quando o dispositivo de usuário é ligado.
- **Atualização de Registro (3GPP e não-3GPP):** executado quando o UE está em *RM-REGISTERED*, mas precisa atualizar algum dos parâmetros que são negociados durante o procedimento de registro inicial ou em resposta a alguma solicitação da rede, como atualização de configuração de UE, informação de assinante, política ou configuração de *slice*.
- **Registro Emergencial (3GPP e não-3GPP):** executado quando o UE somente precisa acessar serviços emergenciais.
- **Atualização de Registro de Mobilidade (3GPP):** executado quando um UE em *RM-REGISTERED* sai da sua área de registro (área de cobertura). Como a 3GPP não prevê mobilidade nos acessos não-3GPP, somente é executado em acessos 3GPP.
- **Atualização Periódica de Registro (3GPP):** executado periodicamente pelo UE em *RM-REGISTERED*, para garantir que o UE continue alcançável a partir da rede 5G, ou seja, é uma forma de dizer que continua ativo. Os acessos não-3GPP não usam o registro periódico e, pelo contrário, definem um temporizador para cancelamento de registro caso a conexão fique em *CM-IDLE* por muito tempo.

A Figura 1.16 mostra uma versão simplificada do procedimento de registro inicial, focando nas partes mais importantes e ignorando detalhes da conexão entre UE e RAN, que

variam para acessos 3GPP e não-3GPP. A seguir, encontra-se uma descrição das principais etapas de registro:

- ▀ **Requisição de Registro:** representa o início do procedimento de registro e deve conter os parâmetro da rede de acesso, algum identificador de usuário, parâmetros de segurança, o código do *slice* desejado, além de várias outras informações opcionais.
- ▀ **Estabelecimento da N1:** durante o registro, é feito o estabelecimento da conexão de sinalização entre UE e rede de acesso, usando *Radio Resource Control* (RRC) para acessos 3GPP e IPSec para acessos não-3GPP, além da conexão entre rede de acesso e AMF na interface de referência N2, através da associação NGAP de UE.
- ▀ **Criação do contexto de usuário:** é criado o contexto de usuário para guardar informações sobre o usuário, como identificadores além dos estados 5GCM, 5GRM e sessões PDU estabelecidas, os quais são independentes para os acessos 3GPP e não-3GPP. O contexto pode ser armazenado na UDSF ou na própria AMF caso a UDSF não esteja presente.
- ▀ **Autenticação:** durante o registro, é feita a autenticação do usuário. Para isso a AMF interage com outras NFs como AUSF e UDM, passando o identificador de usuário e de *slice* que vieram na requisição de registro NAS.
- ▀ **Aplicação de políticas de UE e de gerenciamento de acesso (Access Management - AM):** opcionalmente, a AMF pode interagir com a PCF para criar e aplicar políticas de usuário (*UE Policy*) e gerenciamento de acesso (*AM Policy*).

Ao fim do procedimento de registro inicial, com o recebimento pelo UE da mensagem *Registration Accept* a partir da AMF, o UE entra no estado *CM-CONNECTED* e *RM-REGISTERED*. O UE também recebe uma lista de TA suportadas pela AMF que formam a área de registro para esse UE. A partir desse momento, os outros tipos de registro irão continuar ocorrendo para garantir que o UE continue ativo e alcançável a partir da rede ou quando houver mudança de área de cobertura. Além disso, quando UE ou AMF ficarem em *CM-IDLE* por muito tempo, ambos podem iniciar o procedimento implícito de cancelamento de registro.

1.3.2 Cancelamento de Registro

O **procedimento de cancelamento de registro** é utilizado para retirar acesso do UE ao sistema 5G e pode ser iniciado tanto pelo UE quanto pela rede [7]. Os cenários mais comuns em que esse procedimento é executado são:

- ▀ **Cancelamento de Registro iniciado pelo UE:** quando o UE decide que não precisa mais estar registrado na rede. Esse procedimento é comumente executado quando o UE é desligado (*switch off*), porém pode ser executado pelo UE a qualquer momento.

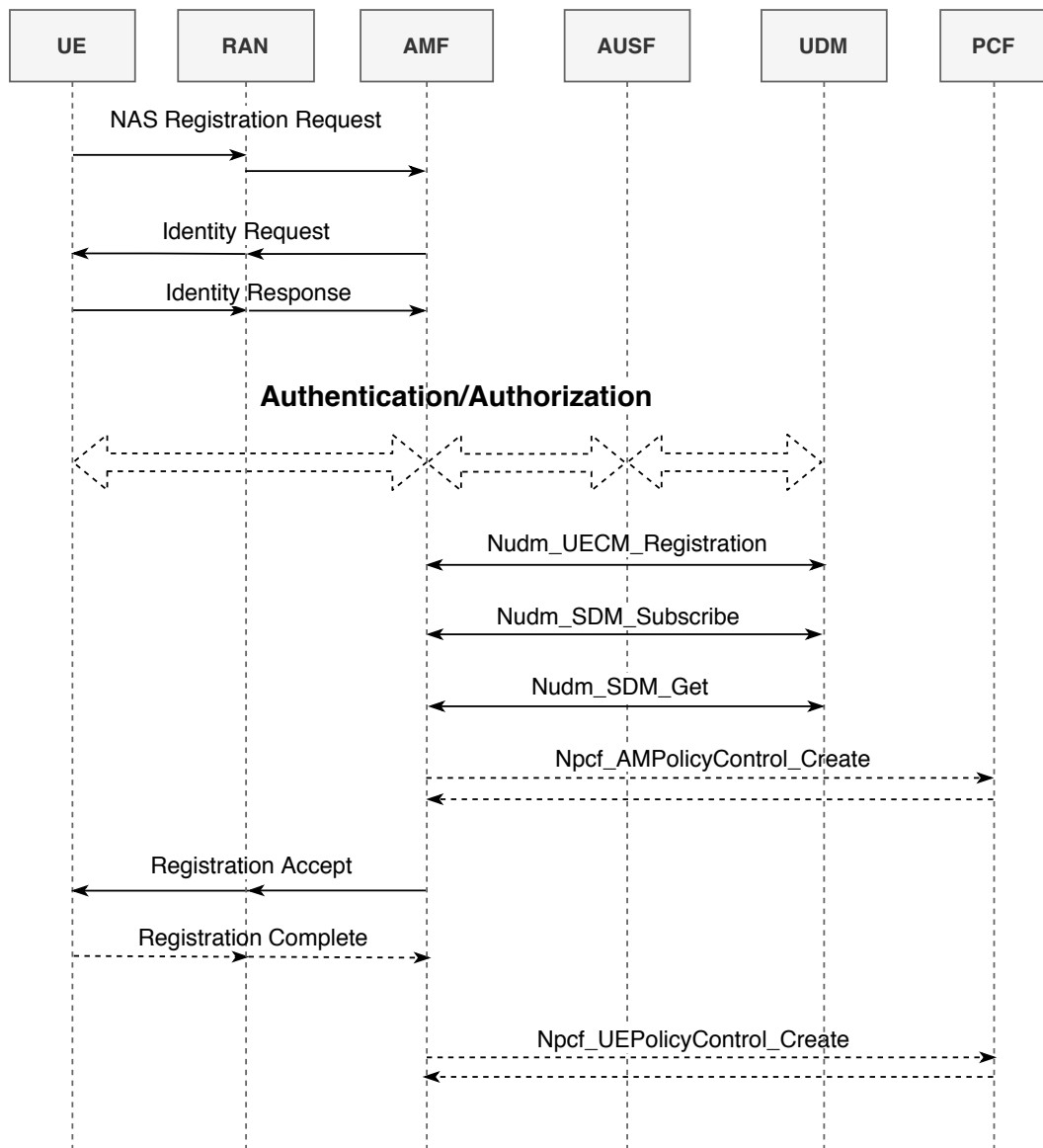


Figura 1.16 – Procedimento de Registro Inicial Simplificado.

- ➡ **Cancelamento de Registro iniciado pela Rede:** quando a rede decide que o UE não deve mais estar registrado. A rede pode decidir cancelar o registro do UE a qualquer tempo, por exemplo, por alguma atualização dos dados do assinante, mudança de política ou configuração de *slice*.
- ➡ **Temporizador para cancelamento de registro implícito:** quando o temporizador de cancelamento de registro expira na AMF, ela pode executar o procedimento de cancelamento de registro do UE. Esse temporizador é disparado toda vez que UE ou AMF entram em *CM-IDLE*, sendo cancelado quando retornam para *CM-CONNECTED*, ou executam o procedimento implícito de cancelamento de registro quando o temporizador expira. Esse tempo de espera do temporizador é enviado para o UE pela AMF durante o procedimento de registro e deve ser maior na AMF do que no UE, para que dê tempo do UE refazer a conexão de sinalização de controle

antes que a AMF inicie o cancelamento de registro.

A Figura 1.17 apresenta o fluxo simplificado para procedimento de cancelamento de registro iniciado pelo UE. As trocas de mensagens estão agrupadas em 5 etapas que seguem descritas a seguir:

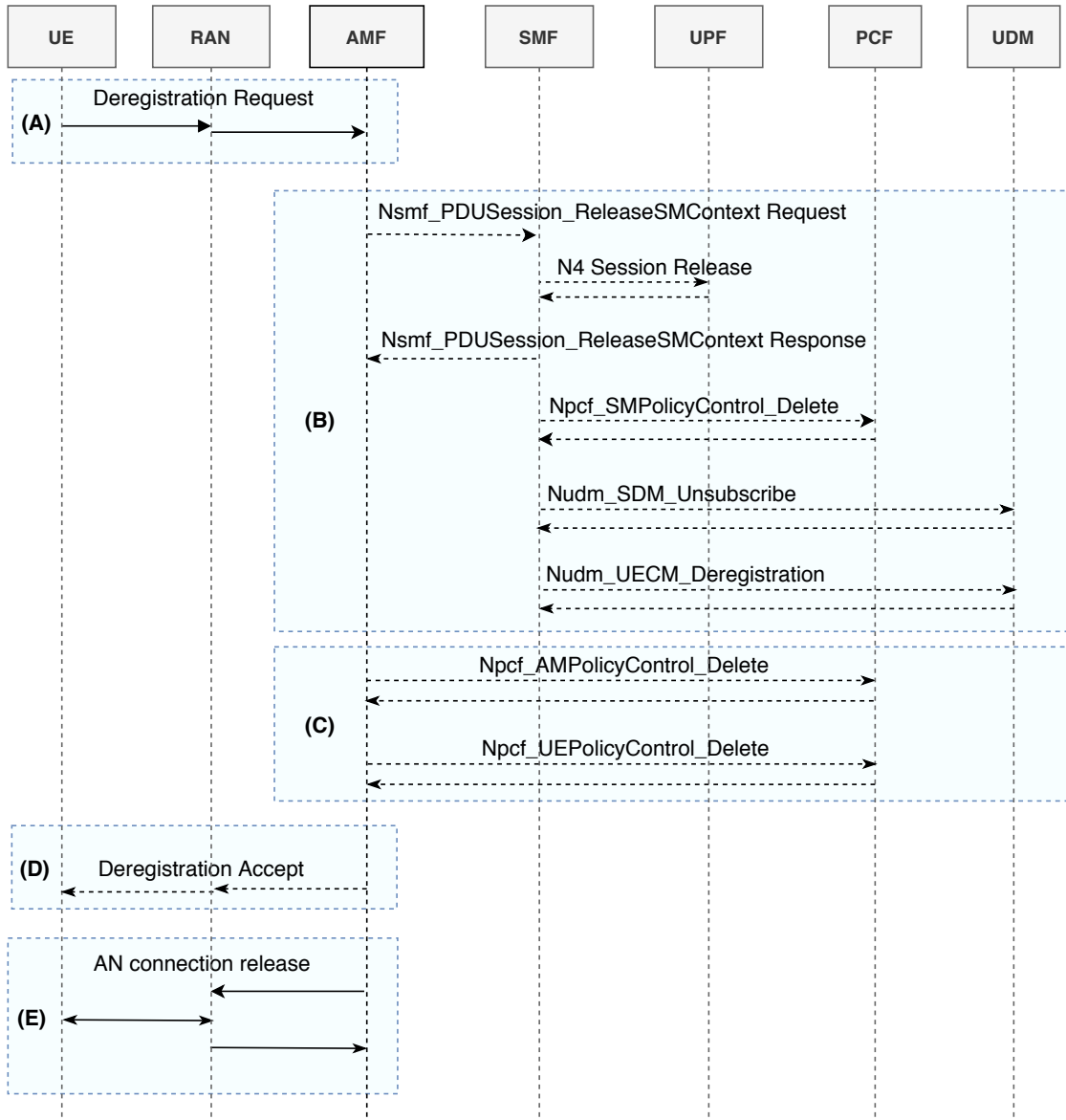


Figura 1.17 – Procedimento de cancelamento de registro iniciado pelo UE (Adaptado de [7]).

- ➡ **(A):** O procedimento de cancelamento de registro inicia com o envio da mensagem *Deregistration Request* do UE para a AMF. Essa mensagem deve conter a identificação temporária do usuário (5G-GUTI), o tipo de cancelamento de registro (*Normal* ou *Switch-off*) e o tipo de acesso (3GPP, não-3GPP ou ambos).
- ➡ **(B):** A AMF envia uma requisição à SMF para que libere os recursos de plano de usuário associados às sessões PDU ativas. Além disso, as políticas de gerenciamento

de sessão também são removidas e a SMF cancela sua inscrição junto à UDM para não receber mais notificações sobre atualização de dados do assinante.

- ➡ (C): Caso haja associações de políticas de gerenciamento de acesso ou de UE estabelecidas, a AMF solicita à PCF que elas sejam removidas.
- ➡ (D): O recebimento da mensagem *Deregistration Accept* pelo UE indica que os recursos junto ao núcleo já foram devidamente liberados e removidos. Essa mensagem é opcional porque em caso alguma falha e seu não recebimento, o UE prosseguirá com a mudança para *RM-DEREGISTERED*. Isso ocorre porque os temporizadores na AMF farão com que ela inicie o procedimento de cancelamento de registro quando o temporizador expirar.
- ➡ (E): As conexões de sinalização do plano de controle (N1) são liberadas e o UE entra em *CM-IDLE*.

1.3.3 Requisição de Serviços

O **procedimento de requisição de serviço** é usado para estabelecer a conexão de sinalização entre UE e AMF e pode ser iniciado tanto pelo UE quanto pela rede. Se for executado pelo UE em *CM-IDLE*, traz o UE para *CM-CONNECTED* após o estabelecimento da N1. Caso seja executado pelo UE em *CM-CONNECTED*, faz com que as conexões de plano de usuário das sessões PDU estabelecidas sejam ativadas. A Figura 1.18 mostra o fluxo simplificado da requisição de serviço iniciada pelo UE. As funções de cada uma das 5 etapas seguem descritas a seguir:

- ➡ (A): o procedimento inicia com o envio de uma mensagem NAS de Requisição de Serviço pelo UE para a AMF. A mensagem contém os parâmetros da rede de acesso, de segurança e a lista de sessões PDU caso o UE queira estabelecer as conexões de plano de usuário para elas.
- ➡ (B): durante a requisição de serviço, a rede pode exigir que o UE se autentique novamente. Essa autenticação segue os mesmos passos do procedimento de registro.
- ➡ (C): caso a mensagem de Requisição de Serviço contenha informações sobre sessões PDU com conexões de plano de usuário para serem ativadas, a AMF notifica a SMF responsável por cada uma das sessões. Além disso, a AMF inclui as informações das sessões PDU na mensagem Serviço Aceito (*Service Accept*) retornada.
- ➡ (D): nessa etapa são estabelecidas a associação NGAP de UE entre rede de acesso e AMF, e a conexão de plano de usuário para esse UE.
- ➡ (E): a AMF então notifica cada SMF novamente para informar o resultado do estabelecimento do plano de usuário e identificador do túnel com a rede de acesso.

com componentes chave da estrutura da rede 5G que fazem parte da execução do plano de controle. Por exemplo, para o caso de uso do acesso via 3GPP, o UE sempre deve iniciar os procedimentos de estabelecimento de sessão, gerando uma nova mensagem de requisição para estabelecimento de sessão PDU. UE inicia o processo de requisição de estabelecimento de sessão PDU enviado uma mensagem de sinalização NAS (*PDU Session Establishment*) via interface de referência N1. No corpo da mensagem, estão os parâmetros de requisição PDU conforme dispostos na Seção 1.2.4. Essa requisição passa pela RAN até a AMF exposto no núcleo da rede. Para o processo de estabelecimento de sessão PDU é assumido que o UE já está registrado na AMF, conforme os procedimentos listados na Seção 1.3.1.

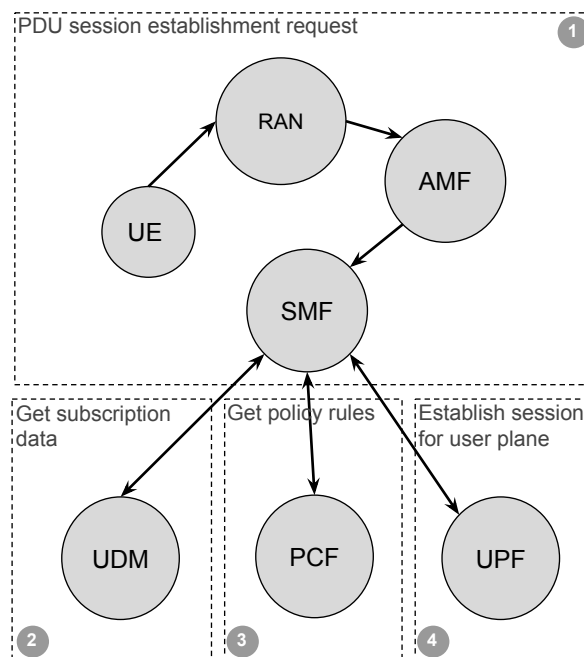


Figura 1.19 – Procedimentos para requisição de estabelecimento de sessão PDU.

Na Figura 1.19 em (1), ao receber a mensagem de requisição para estabelecimento de sessão PDU, a AMF deve primeiro verificar se a mensagem é de uma nova requisição, analisando se o campo do tipo da requisição é de uma requisição inicial e se o ID da sessão PDU não está alocado por alguma outra sessão PDU no núcleo da rede. No caso de uma nova requisição, o próximo passo é prosseguir para o gerenciamento de sessão, para isso, a AMF deve selecionar para qual SMF deverá repassar a mensagem de estabelecimento de sessão PDU, por meio da descoberta de serviços de rede da NRF.

A AMF então remonta os parâmetros da nova mensagem de sessão PDU e os associa ao ID da SMF, repassando para o controle do gerenciamento de sessão do núcleo 5G. Para acionar o gerenciamento de sessão, a AMF envia uma mensagem de requisição *NsmfPDUSessionCreateSMContext* para a SMF com os parâmetros relacionados ao pacote de estabelecimento de sessão PDU original, tais como o identificador único do UE (*Subscription Permanent Identifier* - SUPI), a DNN, o código de seleção do *slice* da rede S-NSSAI, o ID da sessão PDU, entre outros [32]. Ao receber a requisição *NsmfPDUSessionCreateSMContext* da AMF, a SMF deve proceder a verificação dos parâmetros de subscrição e autenticação do UE,

ilustrado em (2) na Figura 1.19. A SMF então submete à UDM uma requisição para verificar se os parâmetros de sessão PDU repassados pela AMF já estão registrados. Caso contrário, a UDM procederá o armazenamento dos dados de subscrição da sessão PDU, para isso a SMF envia uma requisição *NudrDMUpdate* para a UDR com os parâmetros da sessão PDU e envia uma resposta à AMF com o código de identificação do novo contexto para o gerenciamento de sessão armazenado no núcleo da rede [32].

Após etapa de verificação das credenciais, a SMF inicia os procedimentos para estabelecimento da sessão PDU junto à PCF (políticas relacionadas a métricas para cobrança, aplicação de qualidade de serviço para o UE e regras de associação de operação do fluxo de dados e ancoragem para a UPF) [32], ilustrado em (3) na Figura 1.19. Em seguida, a SMF envia uma requisição de estabelecimento de sessão para condução do plano de usuário UPF, com a regras de conectividade da sessão PDU que deverão ser aplicadas na UPF selecionada, conforme ilustrado em (4) na Figura 1.19.

Seguindo para construção do plano de usuário, a SMF inicialmente envia para a rede de acesso por radio RAN, uma mensagem de requisição para configuração de recursos de rádio. A lista completa de parâmetros contidos na mensagem de requisição pode ser consultada em [32]. Seguindo o fluxo de operação para o plano de usuário, é iniciada uma troca de sinalização entre a RAN e do UE relacionada a comandos de protocolos de rádio para gerenciamento de alocação de recursos de rádio necessários para condução do plano de usuário, por exemplo, reconfiguração dos parâmetros de rádio para aplicação de regras de QoS relacionadas à requisição sessão PDU vinda da SMF para a qual se destina a conexão de acesso [32].

Para completar o plano do usuário por parte da rede de acesso, é realizado então o estabelecimento do túnel GTP-U por meio da interface de referência N3 correspondente à sessão PDU, ilustrado em (3) na Figura 1.20. Ao finalizar os procedimentos para estabelecimento dos recursos de rádio e também construção do túnel de dados na interface N3, a RAN deve enviar uma mensagem de confirmação para a SMF e no corpo da mensagem deve conter o ID da sessão PDU e informação que túnel de dados foi devidamente estabelecido na rede acesso 5G.

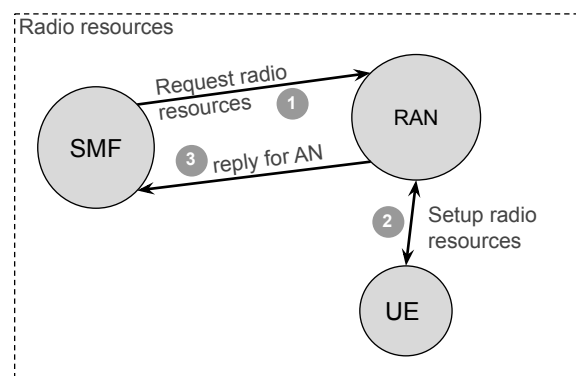


Figura 1.20 – Procedimentos para configuração de recursos de rádio.

Na Figura 1.21, é apresentada a condução final do plano de usuário. A SMF ao receber informações de configuração de túnel da rede de acesso RAN, começa um processo de negociação via interface de referência N4, iniciando os procedimentos de modificação com a UPF selecionada para servir ao plano de dados da sessão PDU. Basicamente, a SMF providência informação relativa a construção do túnel GTP-U com a rede de acesso e também regras do repasse e roteamento para sessão PDU, em específico, até a rede de dados selecionada para servir no transporte dos dados provenientes do UE. Desta forma, a próxima seção discute um caso de uso, com vistas ao desenvolvimento completo, na prática

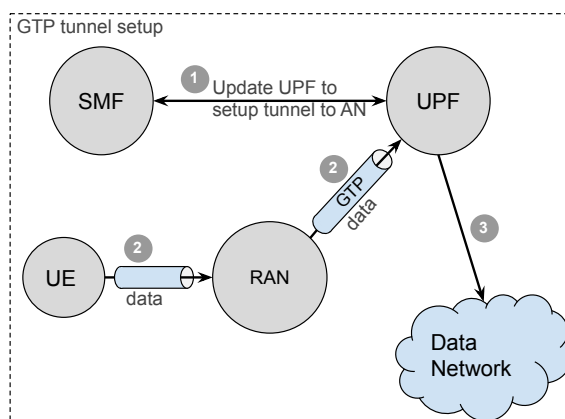


Figura 1.21 – Procedimentos para estabelecimento de conectividade de dados.

1.4 Desenvolvimento para o my5G-core: Caso de uso IoT não-3GPP

O caso de uso 5GC desse minicurso visa apresentar os processos de instalação, configuração, preparação do ambiente e o desenvolvimento de software no contexto do 5GC, adotando como núcleo da rede o my5G-core. Além disso, o caso de uso IoT não-3GPP tem como objetivo apresentar os resultados parciais do desenvolvimento de um equipamento de usuário IoT não-3GPP, integrado ao 5GC. Nesse contexto, apresentamos os processos de instalação e configuração no my5G-core, a instalação e configuração do ambiente necessário ao desenvolvimento e testes, um *tour* pelo código my5G-core e, finalmente, o processo empregado no desenvolvimento do UE-IoT-não-3GPP.

O propósito do caso de uso em estabelecer o acesso IoT não-3GPP tem como benefício expandir as funcionalidades iniciais de comunicação do sistema 5G para que sistemas de comunicação heterogêneos IoT possam ser utilizados por meio da integração com o núcleo da rede 5G. Além disso, esse caso de uso permite a expansão da possibilidade de comunicação sob espectro de frequência de bandas não licenciadas. Dessa forma, as vantagens em utilizar diferentes tecnologias de comunicação sem fio IoT, mesmo com os avanços significativos trazidos pelos novos sistemas 5G, está relacionada à convergência

de diferentes redes de telecomunicação sem fio, i.e., utilizando espectro de frequências licenciadas e não licenciadas.

Tratando especificamente de tecnologia de comunicação para Internet das coisas, o uso de redes LPWA não-3GPP para conectar centenas de milhares de dispositivos IoT, se mostra eficiente em relação a parâmetros de desempenho, tais como consumo de energia [33]. Além disso, a capacidade de integração de tecnologias heterogêneas ao núcleo da rede 5G mostra vantagens para operadores de telecomunicações públicos ao permitir que novas fontes de serviços sejam ofertadas.

Para realizar os procedimentos de acesso via não-3GPP com a estrutura do núcleo da rede 5G, o Lançamento 15 especifica o padrão para acesso não confiável. Seguindo as especificações técnicas da N3IWF, os passos para realizar o acesso não confiável são determinados por meio de protocolos para gerenciamento de contexto de associação segura para condução do plano de controle e plano de dados.

1.5 Material de apoio em repositório público

Como material complementar do minicurso, criamos demonstrações que incluem a execução passo-a-passo dos procedimentos de registro, cancelamento de registro e estabelecimento de sessão PDU. Além disso, são realizadas a captura e análise de tráfego de rede, enfatizando especialmente as pilhas de protocolos envolvidos na comunicação do UE com a rede de acesso e núcleo. Os túneis criados para o tráfego de dados via plano de usuário e para implantação de um canal seguro para o acesso não-3GPP também são mostrados e discutidos. Finalmente, a comunicação da SMF com a UPE, contendo as instruções para processamento e encaminhamento de pacotes para um UE é apresentada.

Todas as demonstrações apresentadas, códigos, procedimentos de instalação, configuração, implantação, vídeos, bem como o respectivo material de apoio para sua execução estão disponíveis no seguinte repositório público:

<https://github.com/LABORA-INF-UFG/SBrT2020-Minicurso1>.

Conclusões

Este minicurso apresentou o núcleo 5G (my5G-core) na prática através de uma implementação de código aberto da iniciativa my5G que pretende tornar o sistema 5G acessível para todos. Além disso, foi discutido os fundamentos de softwarização em 5G e a tendência de integração dos conceitos da Tecnologia de Informação com a área de telecomunicação. Posteriormente, apresentou-se detalhadamente o sistema 5G, enfatizando os procedimentos de registro, requisição de serviços e estabelecimento de uma sessão PDU, bem como as funções virtualizadas definidas no Lançamento 15 e complementadas no Lançamento 16 da 3GPP. Adicionalmente, apresentou-se um caso de uso IoT não-3GPP, descrevendo os processos de instalação, configuração, preparação do ambiente e o

desenvolvimento de software no contexto do 5GC.

Uma grande expectativa surge em relação aos sistemas 5G, seus benefícios e as inúmeras oportunidades acadêmicas e profissionais que virão. O arcabouço ferramental do my5G-core e a base teórica e prática disponibilizada pela iniciativa my5G podem subsidiar o desenvolvimento de negócio, indústria, teses, dissertações e artigos. Por exemplo, o my5G-core é apenas um dos projetos sendo desenvolvidos no my5G. Realizamos esse minicurso com objetivo de disseminar e permitir que todos possam acessar as tecnologias discutidas nesse minicurso, dessa forma, esperamos que todos usem esse material e estejam sempre atentos as atualizações disponibilizadas no nosso repositório.

Bibliografia

- [1] A. Osseiran, J.F. Monserrat, and P. Marsch. *5G Mobile and Wireless Communications Technology*, volume 1. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1 edition, 2016.
- [2] A. Ahad, M. Tahir, and K. A. Yau. 5g-based smart healthcare network: Architecture, taxonomy, challenges and future research directions. *IEEE Access*, 7:100747–100762, 2019.
- [3] D. Kombate and Wanglina. The internet of vehicles based on 5g communications. In *2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, pages 445–448, 2016.
- [4] C. R. Storck and F. Duarte-Figueiredo. A survey of 5g technology evolution, standards, and infrastructure associated with vehicle-to-everything communications by internet of vehicles. *IEEE Access*, 8:117593–117614, 2020.
- [5] L. Chettri and R. Bera. A comprehensive survey on internet of things (iot) toward 5g wireless systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1):16–32, 2020.
- [6] D. Moongilan. 5g internet of things (iot) near and far-fields and regulatory compliance intricacies. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 894–898, 2019.
- [7] P. Hedman, L. Frid, S. Rommer, M. Olsson, S. Sultana, and C. Mulligan. *5G Core Networks: Powering Digitization*, volume 1. Elsevier Science & Technology, United Kingdom, 1 edition, 2019.
- [8] 3GPP. 3rd generation partnership project (3gpp). <https://www.3gpp.org/> Accessed: 2020-10-02.
- [9] J.M. Meredith and M. Pope. 3rd generation partnership project technical specification group services and systems aspects release 15 description. Technical Report 3GPP

- TR21.915 V15.9.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 12 2018. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.915/.
- [10] J.M. Meredith. 3rd generation partnership project technical specification group services and systems aspects release 16 description. Technical Report 3GPP TR21.916 V16.4.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 03 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.916/.
- [11] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M.K. Mahesh. Network slicing in 5g: Survey and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(5):94–100, 2017.
- [12] J. Costa-Requena, V. Guasch, and J. L. Santos. Software defined networks based 5g backhaul architecture. In *Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, IMCOM '15, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [13] M. Anan, A. Al-Fuqaha, N. Nasser, T.Mu, and H.Bustam. Empowering networking research and experimentation through software-defined networking. *J. Netw. Comput. Appl.*, 70(C):140–155, 2016.
- [14] B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, and S. Lee. Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations. *IEEE Communications Magazine*, 53(2):90–97, 2015.
- [15] S. Abdelwahab, B. Hamdaoui, M. Guizani, and T. Znati. Network function virtualization in 5g. *IEEE Communications Magazine*, 54(4):84–91, 2016.
- [16] R. Mijumbi, J. Serrat, J. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(1):236–262, 2016.
- [17] P M. Mell and T. Grance. The nist definition of cloud computing. Technical Report SP 800-145, Gaithersburg, MD, USA, 2011. https://bigdatawg.nist.gov/_uploadfiles/M0006_v1_3333767255.pdf.
- [18] S. Newman. *Building Microservices*, volume 1. O'Reilly Media, Inc., Sebastopol, CA, United States, 1 edition, 2015.
- [19] K. V. Cardoso, C. B. Both, L. R. Prade, C. J. A. Macedo, and V. H. L. Lopes. A softwarized perspective of the 5g networks, 2020. <https://arxiv.org/abs/2006.10409>.
- [20] Nokia. Build a cloud-native 5g core that connects everyone and everything, 2019. <https://www.nokia.com/networks/portfolio/5g-core/#defining-a-new-5g-core> Accessed: 2020-05-22.

- [21] G. Mayer. Restful apis for the 5g service based architecture. *Journal of ICT Standardization*, 6(1):101–116, 2018.
- [22] G. Brown. Service-based architecture for 5g core networks. *A Heavy Reading white paper produced for Huawei Technologies Co. Ltd. Online*, 1:2018, 2017. <https://www.huawei.com/en/press-events/news/2017/11/HeavyReading-WhitePaper-5G-Core-Network>.
- [23] Ericsson. Ericsson mobility report, 06 2019. <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2019>, Accessed: 2020-08-12.
- [24] K. Kymalainen. Network function repository services. Technical Report 3GPP TS 29.510 V16.4.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 07 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.510/.
- [25] S. Arora and K. Kymalainen. 5g system; network exposure function northbound apis. Technical Report 3GPP TS 29.522 V16.4.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 07 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.522/.
- [26] F. Firmin and K. Kymalaine. Non-access-stratum (nas) protocol for 5g system (5gs). Technical Report 3GPP TS 24.501 V16.5.1, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, 07 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/24_series/24.501/.
- [27] M. Pope. System architecture for the 5gs. Technical Report 3GPP TS23.501 V15.2.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 06 2018. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.501/.
- [28] I. Toufik and J. Krause. Non-ng application protocol (ngap). Technical Report 3GPP TS 38.413 V16.2.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 08 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.413/.
- [29] I. Toufik and J. Krause. 3gpp ts 38.410 v16.2.0, ng-ran-ng general aspects and principles. Technical report, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 07 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.410/.
- [30] J. Korhonen and J. M. Meredith. Nr and ng-ran overall description. Technical Report 3GPP TS 38.300 V16.2.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.300/.

- [31] K. Kymalaine. Interface between the control plane and the user plane nodes. Technical Report 3GPP TS29.244 V16.5.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 09 2020. https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/29_series/29.244/.
- [32] M. Pope. Procedures for the 5g system (5gs). Technical Report 3GPP TS23.502 V16.6.0, 3rd Generation Partnership Project-3GPP, Sophia Antipolis CEDEX, France, 09 2020. https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/23_series/23.502/.
- [33] C. Bockelmann, N. K. Pratas, G. Wunder, S. Saur, M. Navarro, D. Gregoratti, G. Vivier, E. De Carvalho, Y. Ji, Č. Stefanović, P. Popovski, Q. Wang, M. Schellmann, E. Kosmatos, P. Demestichas, M. Raceala-Motoc, P. Jung, S. Stanczak, and A. Dekorsy. Towards massive connectivity support for scalable mmhc communications in 5g networks. *IEEE Access*, 6:28969–28992, 2018.