



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Caio Roscelly Barros Fagundes

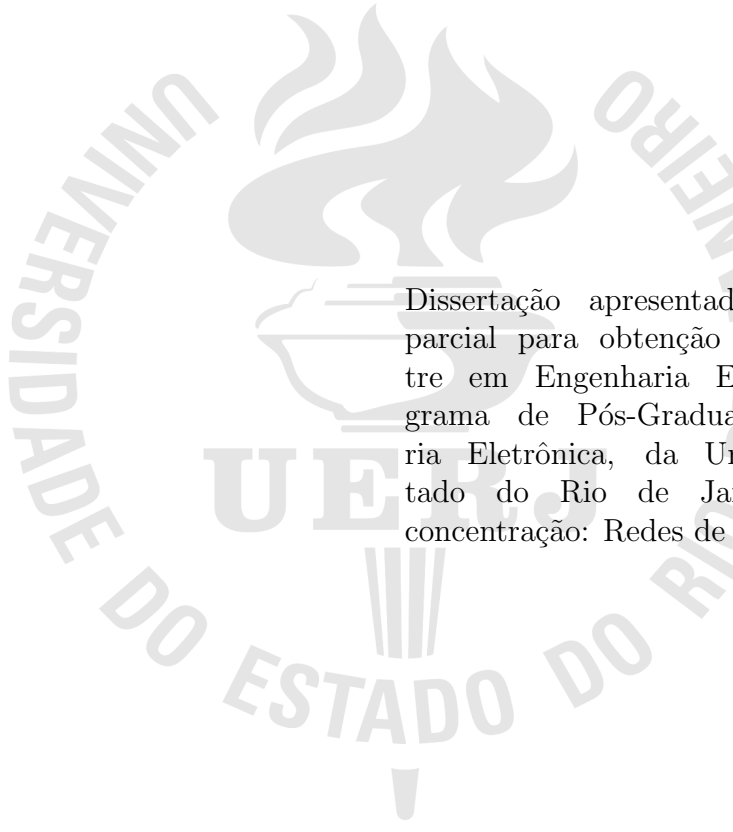
Modelos para Fatiamento de Redes 5G

Rio de Janeiro

2022

Caio Roscelly Barros Fagundes

Modelos para Fatiamento de Redes 5G



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Eletrônica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Lisandro Lovisolo

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rubinstein

Rio de Janeiro

2022

Caio Roscelly Barros Fagundes

Modelos para Fatiamento de Redes 5G

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovado em: 31 de outubro de 2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Marcelo Rubinstein (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa
Escola Politécnica da UFRJ

Profa. Dra. Natalia Castro Fernandes
Faculdade de Engenharia da UFF

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre apoiou minhas escolhas e minha dedicação aos estudos, principalmente minha Mãe e meu Pai. Minha fé, que me manteve firme na busca pelo meu sonho de me tornar um Mestre. A todas as pessoas que estiveram comigo nessa jornada e de alguma forma me apoiaram.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço à Faculdade de Engenharia da UERJ, que me formou bacharel em Engenharia Elétrica e me concedeu a oportunidade de cursar mestrado em Engenharia Eletrônica pelo PEL.

Segundo, agradeço a todos os professores que dedicam sua vida à criação de uma sociedade melhor através do ensino, principalmente aos professores Lisandro e Marcelo, que apoiaram minha jornada de mestrado.

Por último, agradeço aos colegas de curso e servidores da UERJ, que continuam sempre apoiando o ensino desta universidade. A UERJ e a educação brasileira devem resistir!

RESUMO

Roscelly, Caio. *Modelos para Fatiamento de redes 5G*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A quinta geração de comunicações móveis, 5G, demanda diversos tipos de uso do serviço. Uma maneira de atender aos diferentes requisitos de serviço é separar os usuários em grupos com demandas semelhantes em uma fatia de rede lógica e dedicada. Isso é conhecido como a técnica de fatiamento de redes (*Network Slicing*). Para atender às diferentes necessidades dos usuários, uma rede 5G conta com um documento contendo as definições dos requisitos do serviço para criar novas instâncias de fatias de rede (NSIs). Essas definições são conhecidas como modelos de fatias de rede, ou NSTs (*Network Slice Templates*). Esta dissertação propõe três NSTs para os principais cenários de uso 5G criados pelo IMT-2020: eMBB (*Enhanced Mobile BroadBand*), URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) e mMTC (*massive Machine-Type Communications*). Além disso, esta dissertação simula uma rede 5G fim-a-fim para analisar se as NSIs simuladas são capazes de atender aos SLAs (*Service Level Agreements*) propostos pelas NSTs para o cenário de uso eMBB. Como resultado, os NSTs propostos neste trabalho fornecerão um referencial técnico-teórico para a criação de NSTs para redes 5G, podendo nortear futuras pesquisas sobre novos modelos para novos cenários de uso do serviço.

Palavras-chave: Modelos de Fatias de Rede e 5G.

ABSTRACT

The fifth generation of wireless mobile communications, 5G, demands diverse types of service use. One way to meet the different service requirements is to separate users into groups with similar demands in a logical and dedicated network slice. This is known as the network slicing technique. To meet the different users needs, a 5G network relies on a document containing the definitions of the service requirements in order to create new Network Slice Instances (NSIs). These definitions are known as Network Slice Templates (NSTs). This work proposes three NSTs for the main 5G usage scenarios created by the IMT-2020: eMBB (enhanced Mobile BroadBand), URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications), and mMTC (massive Machine-Type Communications). Moreover, this work simulates an end-to-end 5G network to analyze whether the NSIs simulated can meet the SLAs (Service Level Agreements) proposed for the eMBB NST and usage scenario. As a result, the NSTs proposed in this work will provide a technical-theoretical reference for the creation of new NSTs related to new 5G usage scenarios and it can guide future research on the simulation of 5G sliced networks.

Keywords: Network Slice Templates and 5G.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cenários de uso do IMT para 2020 e adiante (retirado de [1]).	20
Figura 2	Exemplo de caso de uso para o fatiamento das redes (baseado em [2]).	21
Figura 3	Capacidades-chave para redes 5G para os diferentes cenários de uso (retirado de [1]).	24
Figura 4	Arquitetura fim-a-fim de uma rede 5G e as NFs - RAN conectada ao Core (baseada em [3]).	31
Figura 5	Conceito de plano de controle e plano de dados em uma fatia de rede (retirado de [4]).	36
Figura 6	Comunicação entre diferentes camadas da rede a partir da perspectiva do usuário (retirado de [2]).	39
Figura 7	Arquitetura de gerenciamento e orquestração para o fatiamento das redes (baseada em [5]).	45
Figura 8	Processo de configuração e criação de uma NSI através de um NST e dos recursos de rede NFs (baseada em [5]).	46
Figura 9	Arquitetura da criação de uma NSI a partir de um NST para casos de uso específicos (baseado em [6]).	47
Figura 10	Arquitetura da simulação fim-a-fim da rede 5G.	60
Figura 11	CDF da Taxa de Transferência de dados por UE para download obtida para o cenário eMBB urbano macro.	72
Figura 12	Taxa de transferência de dados média por UE para upload obtida para o cenário eMBB urbano macro.	74
Figura 13	Taxa de transferência de dados média por UE para download obtida para o cenário eMBB urbano macro variando o fator de atividade de 10% até 40%.	76
Figura 14	Latência média (<i>Packet Delay Budget</i>), em milissegundos, para o cenário de uso eMBB Urbano Macro.	77
Figura 15	Taxa de Perdas de Pacote (PER) para o cenário Urbano Macro eMBB.	79
Figura 16	Capacidades-chave aprimoradas para redes 5G. Comparação com IMT-advanced (redes 4G). Retirada de [1].	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Requisitos mínimos relacionados ao desempenho técnico das redes 5G [1,7,8]	25
Tabela 2	SSTs padronizados pelo 3GPP [7].....	40
Tabela 3	Atributos GST e seus respectivos valores (baseado em [6]).....	54
Tabela 4	Proposta de NSTs.	58
Tabela 5	Médias, desvio padrão, percentis e intervalo de confiança para o atributo de Taxa de Transferência de dados por UE para Downlink.	72
Tabela 6	Médias, desvio padrão, percentis e intervalo de confiança para o atributo de Taxa de Transferência de dados por UE para Uplink.....	75
Tabela 7	Médias, desvio padrão, percentis e intervalo de confiança para o atributo de latência (<i>Packet Delay Budget</i>), em segundos, para os cenário de uso eMBB Urbano Macro.....	78

LISTA DE SIGLAS

IMT-2020	International Mobile Telecommunications 2020
3GPP	Third Generation Partnership Project
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	Radiocommunication Sector of ITU
ITU-T	Telecommunication Sector of ITU
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
IETF	Internet Engineering Task Force
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
5G-PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
3G	Third Generation of wireless mobile telecommunications
4G	Fourth Generation of wireless mobile telecommunications
5G	Fifth Generation of wireless mobile telecommunications
IoT	Internet of Things
NFV	Network Functions Virtualization
NF	Network Function
VNF	Virtualized Network Function
SDN	Software Defined Networks
RAN	Radio Access Network
NG-RAN	New Generation Radio Access Network
C-RAN	Cloud-Radio Access Network
MEC	Multiple-Access Edge Computing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
mMTC	Massive Machine-type Communications
URLLC	Ultra-reliable and Low Latency Communications

QoS	Quality of Service
NS	Network Slice
NSI	Network Slice Instance
NST	Network Slice Template
S-NSSAI	Single Network Slice Selection Assistance Information
NSTI	Network Slice Type Indicator
SST	Slice Service Type
PLMN	Public Land Mobile Network
NSSF	Network Slice Selection Function
UE	User Equipament
KPI	Key Performance Indicators
SD	Slice Differentiator
PDU	Protocol Data Unit
CSC	Communication Service Customer
CSP	Communication Service Provider
NSC	Network Slice Customer
NSP	Network Slice Provider
AMF	Access and Mobility management Function
NACF	Network Access and Control Function
SMF	Session Management Function
NFR	Network Function Registry
PCF	Policy Control Function
UPF	User Plane Function
NEF	Network Exposure Function
USM	Unified Subscription Management function
ASF	Authentication Server Function
AF	Application Function
DN	Data Network Function
GST	Generic Slice Type
NEST	Network Slice Type
5QI	5G QoS Identifier
PDB	Packet Delay Budget

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	REDES 5G: REQUISITOS E CENÁRIOS DE USO	18
1.1	Conceitos Básicos sobre 5G	18
1.2	Diretrizes da tecnologia 5G	19
1.2.1	<u>Cenários de uso para redes 5G</u>	19
1.2.1.1	<u>Exemplos de cenários de uso das redes 5G</u>	20
1.2.2	<u>Capacidades-chave para as redes 5G</u>	21
1.2.3	<u>Requisitos técnicos mínimos das redes 5G</u>	24
2	TRABALHOS RELACIONADOS	27
2.1	Redes 5G e Network Slicing Templates	27
2.2	Cenários de Uso da Rede	27
2.3	Simulação de Redes 5G	28
3	REDES 5G: ARQUITETURA E NETWORK SLICING	30
3.1	Arquitetura 5G fim-a-fim	30
3.2	Fatiamento de Redes (<i>Network Slicing</i>)	33
3.2.1	<u>Visão geral</u>	33
3.2.2	<u>Termos e definições</u>	34
3.2.3	<u>Aspectos Funcionais</u>	37
3.2.4	<u>Indicação e seleção da fatia de rede</u>	39
3.2.4.1	<u>Indicação da fatia de rede</u>	40
3.2.4.2	<u>Seleção da fatia de rede</u>	41
3.2.4.3	<u>Estabelecimento da Sessão em uma fatia de rede</u>	42
3.2.5	<u>Papéis em uma Fatia de Rede</u>	42
3.2.6	<u>Principais funções da rede 5G</u>	43
4	PROPOSTA DE NETWORK SLICE TEMPLATES	44
4.1	Aspectos Gerais de NSTs	44
4.1.1	<u>Termos e Definições - NST, GST, NEST e NSTI</u>	44
4.1.2	<u>Configuração, Gerenciamento e Orquestração para Fatiamento</u>	44

4.1.3	<u>Generic Network Slice Template (GST)</u>	47
4.1.4	<u>Principais Atributos GST</u>	48
4.1.4.1	<u>Descrição dos Atributos</u>	48
4.1.4.2	<u>Atributos de um GST</u>	49
4.2	Cenários de Uso da Rede 5G Propostos para Criação das NSTs ..	55
4.3	Propostas de NSTs	56
5	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE REDE 5G	59
5.1	Recursos Computacionais	59
5.2	Arquitetura da Simulação	60
5.3	Softwares e Ferramentas de Simulação	61
5.3.1	<u>Softwares de simulação da rede RAN e Núcleo 5G</u>	61
5.3.1.1	<u>Instalação, Configuração, Conexão e Uso dos Softwares de simulação da rede 5G</u>	63
5.3.2	<u>Ferramentas de auxílio aos testes de desempenho e análise de resultados</u> ...	66
5.4	Passos para execução da simulação de rede 5G e coleta de dados de desempenho	67
5.4.1	<u>Coleta e tratamento dos dados de avaliação de desempenho da rede</u>	69
6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA REDE 5G E ANÁLISE DE RESULTADOS	71
6.1	Avaliação de Desempenho da Rede	71
6.1.1	<u>Taxa de Transferência de dados para Download e Upload</u>	71
6.1.1.1	<u>Download Tx por UE para o Cenário eMBB Urbano Macro</u>	71
6.1.1.2	<u>Uplink Tx por UE para o Cenário eMBB Urbano Macro</u>	74
6.1.1.3	<u>Download Tx Variando o Fator de Atividade</u>	75
6.1.2	<u>Latência (Limite para atraso de pacote - PDB)</u>	77
6.1.3	<u>Taxa de erros de pacote - PER</u>	79
	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83
	ANEXO A - Configuração dos Elementos para suporte ao Fatiamento da rede	87

ANEXO B - Lista de Comandos para testar e medir dados de desempenho da rede.....	91
ANEXO C - Exemplo do Script para Fator de Atividade	95
ANEXO D - Mais Capacidades-chave aprimoradas para redes 5G	98
ANEXO E - Organizações de Desenvolvimento de Padrões 5G e Network Slicing.....	102
ANEXO F - Principais funções da rede.....	103

INTRODUÇÃO

A quinta geração de comunicação móvel sem fio está sendo criada e padronizada pelo IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications 2020 and beyond*) em parceria com o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) e outras entidades [9]. As redes 5G incorporam novas tecnologias, por exemplo o fatiamento das redes, e impulsionam tecnologias emergentes, como IoT, veículos autônomos e realidade aumentada [10, 11].

Os diferentes usuários de uma mesma rede 5G demandam diferentes tipos e usos do serviço. Uma forma de atender as diferentes necessidades do serviço é separar os usuários com demandas comuns em grupos que utilizem uma fatia da rede lógica e dedicada [6, 12]. As diferentes fatias disponibilizam instâncias da rede que atendem às demandas dos distintos grupos. Esse princípio chama-se de fatiamento de redes (*Networking Slicing*). Em outras palavras, a técnica de fatiamento de redes é utilizada para prover uma rede 5G de ferramentas que lhe confirmam a capacidade para atender aos diferentes requisitos [12] [11] e demandas dos cenários de uso previstos para seus usuários [9].

O fatiamento da rede é uma tecnologia-chave [6] [13] para as redes 5G no sentido de que suportam a mudança das funções da rede (*NFs - Network Functions*) de soluções baseadas em hardware para soluções baseadas em software e com isso permite às redes atingirem alta flexibilidade e programabilidade, assim como reduzir custos [10] [12]. Tal tecnologia divide a rede 5G em instâncias lógicas dedicadas a serviços específicos [6] [12], permitindo o uso potencializado da rede de acordo com as necessidades de uso de cada serviço ou aplicação [6] [11].

O processo de criação de fatias de rede depende da definição de quais parâmetros e requisitos a fatia deve satisfazer para atender aos diferentes grupos e demandas dos usuários. Para tal, redes 5G dependem das definições destes requisitos e seus atributos, para que seja possível a criação de novas instâncias de fatias de rede (*NSIs - Network Slice Instances*). Estes documentos de definições são conhecidos como modelos de fatias de rede (*NSTs - Network Slice Templates*). Portanto, um NST é um documento composto de atributos e valores que traduzem os requisitos do serviço a ser utilizado para requisitos técnicos de fatias de rede, sendo utilizado pela orquestração e gerenciamento de redes 5G para criação de novas fatias de rede.

O IMT-2020 e 3GPP definem NSTs e NSIs [2, 6], mas não fornecem exemplos reais

de NSTs criadas e definidas com seus respectivos atributos e valores. O IMT-2020 e 3GPP [7, 8, 14–16] especificam requisitos genéricos que NSIs devem alcançar, tais como limites inferiores e superiores de latências para diversos casos de uso do serviço. Em contrapartida, o GSMA (*GSM Association*) define um GST (*Generic Slice Template*) [6], que a padroniza a lista de atributos que podem caracterizar um tipo de fatia de rede, padronizando assim os atributos mandatórios e opcionais de um NST sem determinar os seus valores.

Uma vez que os atributos NSTs são padronizados pelo GSMA, sem preenchimentos dos respectivos valores, uma próxima etapa para a evolução da técnica de fatiamento de redes 5G tende a ser trabalhos que visam estudar casos de uso a fim de definir valores a serem preenchidos para os atributos de NSTs, para os mais diversos cenários de uso do serviço. Por conseguinte, esta dissertação objetiva a proposição de modelos de fatias de rede, contendo os valores dos atributos preenchidos para os principais cenários de uso macro da rede 5G criados pelo IMT-2020: eMBB (*Enhanced Mobile BroadBand*), URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) e mMTC (*massive Machine-Type Communications*). Além disso, a proposição eMBB é aplicada em uma rede 5G simulada a fim de verificar se a NSI eMBB simulada é capaz de atender aos SLAs (*Service Level Agreements*) propostos pelas NSTs para cada cenário de uso. As NSTs são propostas baseando-se em diversos documentos de referência técnica e artigos do IMT-2020 e 3GPP.

Como resultado, a principal contribuição científica desta dissertação é servir de referência técnico-teórica para a criação de NSTs para redes 5G fatiadas, assim como servir de guia de simulação de uma rede 5G fim-a-fim utilizando softwares de código aberto. Deste modo, pesquisadores e partes interessadas no tema podem adotar os modelos aqui propostos em cenários simulados, além de basear-se nesta dissertação para rodar simulações de rede 5G fim-a-fim.

Tanto quanto é do nosso conhecimento, nenhum outro trabalho simula fatiamento de redes 5G fim-a-fim para avaliar propostas de modelos de fatias de rede. Por este motivo, considera-se que a pesquisa e contribuições aqui feitas serão impactantes para a evolução do tema apresentado, tendo relevância no tema de fatiamento de redes 5G.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, sendo: 1) apresentação dos conceitos sobre redes 5G, requisitos, cenários de uso do serviço; 2) trabalhos relacionados; 3) apresentação dos conceitos e técnica de fatiamento das redes; 4) descrição dos atributos

e proposta de NSTs; 5) simulação de rede 5G fatiada para o cenário eMBB; 6) avaliação de desempenho das fatias da rede após simulações. A conclusão encerra o trabalho.

1 REDES 5G: REQUISITOS E CENÁRIOS DE USO

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos sobre a quinta geração de redes móveis, ou 5G.

1.1 Conceitos Básicos sobre 5G

A quinta geração de comunicação móvel sem fio está sendo criada e padronizada pelo IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications 2020 and beyond*) em parceria com o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) e outras entidades [9] mostradas no Anexo E. As redes 5G incorporam novas tecnologias, por exemplo fatiamento de rede (*network slicing*), e impulsionam tecnologias emergentes, como IoT (*Internet of Things*), veículos autônomos e realidade aumentada [11, 17].

Apesar de parecer uma evolução natural do 4G, o 5G traz um novo tipo de rede sem fio que é totalmente projetada para conectar tudo e todos através da internet, incluindo pessoas, máquinas, dispositivos e objetos [18–20]. A tecnologia 5G irá beneficiar economias inteiras e a sociedade ao redor do mundo. Isso acontecerá porque o padrão criado para o 5G irá evoluir para um conjunto de tecnologias que conectam pessoas à pessoas, máquinas a máquinas e pessoas à informação [18–20].

O 5G irá impulsionar tecnologias conhecidas e emergentes, incluindo IoT, análise avançada de dados, inteligência artificial, automação robótica de processos industriais e rurais, robótica avançada, realidade virtual e aumentada, entre outras [18–20].

Além de impulsionar as tecnologias conhecidas e emergentes, o 5G irá transformar muitos setores da sociedade, tais como: processos de fabricação, agricultura, transporte, serviços públicos e privados, cuidados com a saúde, serviços hospitalares, educação, aumento da produtividade humana, entre outros [18–20].

A tecnologia 5G está sendo criada e desenhada para entregar altas velocidades de conexão através das bandas largas móveis aprimoradas (*eMBB - Enhanced Mobile Broadband*), latências muito baixas com alta confiabilidade na entrega dos dados (*URLLC - Ultra Reliable Low Latency*) e comunicação massiva do tipo máquina (*mMTC - Massive Machine Type Communications*) [9, 11].

A implantação comercial do 5G iniciou-se após 2020, após as padronizações base do IMT-2020, descritas no Anexo E, terem sido finalizadas [21]. Até 2025, a *GSM Association*

(*GSMA*) espera que as conexões móveis 5G cheguem a 12% do total de conexões móveis, alcançando cerca de 1,1 bilhão de conexões [22].

1.2 Diretrizes da tecnologia 5G

O padrão ITU-R (*International Telecommunication Union – Radiocommunication*) para redes 5G, chamado IMT-2020 [1, 15], define o conjunto de requisitos técnicos para redes 5G, cenários de uso propostos para redes 5G, assim como requisitos mínimos para seu funcionamento.

Deste modo, o IMT-2020 aborda os cenários de uso, arquitetura, requisitos e capacidades-chave de uma rede 5G [1, 7, 8, 15]. Os cenários de uso e capacidades-chave aprimoradas das redes 5G, assim como os requisitos técnicos mínimos, são abordados nas seções a seguir.

1.2.1 Cenários de uso para redes 5G

O relatório ITU M.2083 [1] define, de um modo geral, os objetivos e requisitos das rede 5G além de definir casos de uso do serviço e tipos de aplicações que irão ser suportadas pelas redes 5G, como sugere a Figura 1, que incluem [1, 9]:

- **eMBB**: para cenários com altas taxas de transferências de dados, pontos de acesso com alta densidade de usuários, alta capacidade de tráfego de dados, vasta área de cobertura e mobilidade com taxas de transferência aprimoradas. Este cenário prevê que a demanda para banda larga móvel vai continuar a aumentar com o passar do tempo, por isso a necessidade de banda larga aprimorada. O cenário eMBB engloba casos de uso do serviço centrados no uso humano, como por exemplo o acesso à internet sem fio de alta velocidade para serviços de *streaming* de vídeo ou *video-on-demand*, automação robótica de processos industriais e rurais, realidade virtual, realidade aumentada, entre outros [1, 9, 22];
- **URLLC**: para atender a aplicações e serviços de missão crítica. Este cenário possui requisitos rigorosos quanto a latência e disponibilidade, para casos de uso como serviços médicos e de saúde, dirigibilidade de veículos autônomos, jogos eletrônicos, robotização de processos industriais críticos, controle remoto de máquinas e dis-

positivos, jogos em tempo real, automação e sistemas inteligentes para transporte [1, 9, 22];

- **mMTC**: requerem baixo consumo de energia e taxas de transferência baixas, mas possuem um grande número de dispositivos conectados, ou seja, um grande volume de conexões simultâneas. O mMTC cobre cenários para comunicação em larga escala de sensores e dispositivos que transmitem sozinhos um baixo volume de dados e não necessitam de latência baixa, como os sensores dos veículos, sensores no geral (ex.: temperatura e umidade), comunicação massiva entre dispositivos IoT em ambientes urbanos (*smart cities*) e casas inteligentes [1, 9, 22].

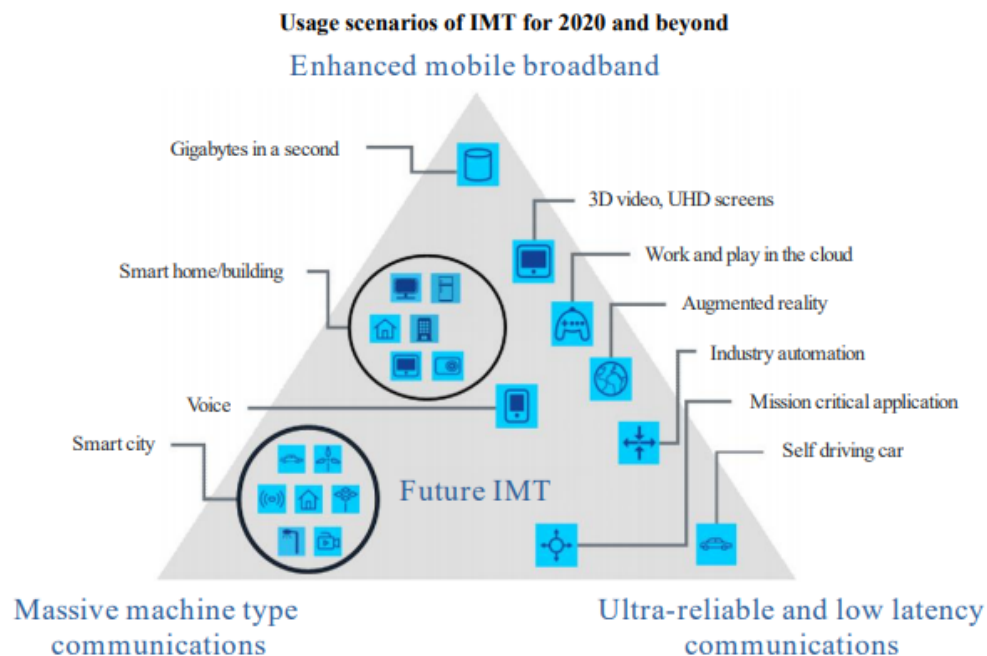


Figura 1 Cenários de uso do IMT para 2020 e adiante (retirado de [1]).

1.2.1.1 Exemplos de cenários de uso das redes 5G

Os requisitos para os diferentes casos de uso da rede devem ser definidos para que as fatias da rede (*NSIs - Network Slice Instances*) tenham a capacidade de prestar serviços obedecendo a tais requisitos. Cada NSI deve atender um caso de uso específico da rede, sendo cada instância criada a partir de um documento de requisitos chamado NST (*Network Slice Template*), a ser detalhado no Capítulo 4.

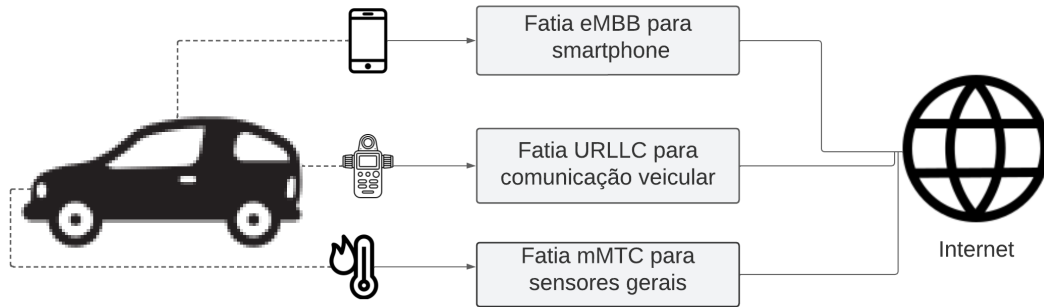


Figura 2 Exemplo de caso de uso para o fatiamento das redes (baseado em [2]).

A Figura 2 mostra alguns exemplos de NSIs para diferentes casos de uso do serviço dentro de uma rede 5G, onde cada instância é composta por requisitos diferentes, que variam de acordo com cada caso de uso. Ainda mais, a Figura 2 mostra um veículo que possui diversos sensores e dispositivos de entretenimento embutido [2], no qual dispositivos do veículo se conectam à rede 5G para solicitar serviços e informações em tempo real do tipo V2X (*vehicle to everything*), através de uma NSI do tipo URLLC. Em contrapartida, um outro dispositivo do tipo multimídia dentro do veículo solicita acesso a uma fatia eMBB para assistir vídeos em alta definição em smartphones e nas telas do veículo. Por último, o veículo possui sensores diversos com informações importantes que precisam ser enviadas para a internet, como temperatura e pressão dos pneus, por isso precisa se conectar à uma fatia mMTC para enviar e armazenar informações na rede.

Portanto, um veículo possui diversos dispositivos (UEs - *User Equipments*) embutidos e no exemplo necessita de pelo menos três tipos diferentes de NSIs para atender suas diferentes demandas. Isso significa que cada dispositivo dentro do veículo deve fornecer as informações necessárias para que as funções de rede consigam indicar e selecionar corretamente NSIs adequadas a cada caso de uso, conforme detalha a Seção 3.2.4.

1.2.2 Capacidades-chave para as redes 5G

O IMT-2020 definiu as capacidades-chave aprimoradas (*key capabilities*) e requisitos mínimos para as redes 5G. As capacidades aprimoradas que uma rede 5G devem possuir, de acordo também com o documento de recomendações ITU-R M.2083 [1], são:

- **Taxa de transferência de dados experimentado pelo usuário:** é a taxa de

transferência de dados média disponibilizada em toda a área de cobertura para um usuário ou dispositivo (em Mbit/s ou Gbit/s). Este requisito é definido para o propósito de avaliação apenas de cenários eMBB;

- **Latência:** Existem diferentes definições de latência em redes de comunicação. As definições divergem entre o ITU-R e 3GPP, pois para o ITU-R, a latência se refere apenas à contribuição do rádio (RAN - *Radio Access Network*) para a latência do plano de usuário [23]; enquanto que para o 3GPP, a latência considera a contribuição das camadas de rádio, núcleo e transporte da rede 5G [23]. Para esta dissertação de mestrado, a latência considerada é a definição do 3GPP. Um tipo de latência é apresentado a seguir:

- **Latência de plano de usuário pelo 3GPP** [8] [23] [24]: 1) Latência ponta-a-ponta ou fim-a-fim (*end-to-end*): é a latência total do pacote para do plano de usuário, tanto para downlink quanto uplink, ou seja, leva em consideração o tempo gasto pela mensagem ao trafegar pela rede de acesso via rádio, pela rede de transporte xHAUL (*fronthaul, midhaul, sidehaul, backhaul*), pela rede de computação de borda de múltiplo acesso (*MEC - Multiple Access Edge Computing*), pela rede de núcleo (Core), que são porções da rede 5G mostradas em mais detalhes na Seção 3.1. É o tempo que leva para transferir um pedaço de informação de uma fonte para um destino, medido na interface de comunicação (UE) a partir do momento que o pacote/informação é transferido pela fonte até o momento em que essa informação é recebida pelo destino com sucesso, e vice-versa; 2) Tempo de transmissão: leva em consideração a latência fim-a-fim mais o tempo que as camadas de aplicação de ambos, destino e fonte, levam para processar a mensagem, em outras palavras, é o tempo medido a partir do ponto onde um pacote de dados é tratado pela interface de camada físicas, rede e aplicação da fonte (UE) até o momento que o mesmo pedaço de dados é recebido pela camada de aplicação do destino, ou seja, recebido após o ponto N6 pelo elemento DN (*Data Network*) abordado na Seção 3.2.6. Em outras palavras, considera a capacidade de processamento do UE; 3) E2E *round trip time* (RTT), ou RTT fim-a-fim, é definido como o tempo que leva para um pacote de dados sair da origem, atingir o destino, ser processado e retornar para a origem.

O requisito de latência é no geral definido para o propósito de avaliação de cenários relacionados a eMBB e URLLC, mas pode ser definido também para mMTC (IoT);

- **Confiabilidade:** refere-se à capacidade de fornecer um serviço com alta probabilidade de sucesso na transmissão dos dados e tem diferentes definições nas visões do ITU-R e 3GPP. O ITU-R considera apenas a confiabilidade da entrega de informação na camada de rádio, enquanto que o 3GPP considera todas as camadas da rede. Para esta dissertação, a confiabilidade considerada é a definição do 3GPP, portanto:

- **Confiabilidade pelo 3GPP** [7] [8]: no contexto de transmissão de pacotes dentro da camada de rede, confiabilidade refere-se ao percentual da quantidade de pacotes IP entregues com sucesso para um sistema destino, dentro de um tempo máximo requerido pelo serviço, dividido pelo número total de pacotes enviados para a rede.

Uma vez que a confiabilidade é a taxa de sucesso na entrega de dados, para o 3GPP a confiabilidade pode ser medida a partir do atributo de taxa de erros de pacote (*Packet Error Rate - PER*), que será abordado na Seção 4.1.4.2. Em outras palavras, quanto menor a taxa de erros de pacotes, maior a confiabilidade;

- **Disponibilidade:** é um requisito definido apenas pelo 3GPP e refere-se à capacidade de fornecer um serviço com um alto nível de disponibilidade, por isso também é chamado de disponibilidade do serviço. É o tempo que a rede está disponível para seus usuários, dentro de um QoS acordado. A disponibilidade é dada em valor percentual;
- Outras capacidades-chave, tais como mobilidade e resiliência, são abordadas no Anexo D.

A Figura 3 mostra as capacidades-chave que as redes 5G devem ter, segundo o IMT-2020, de acordo com os cenários de uso mostrados na Seção 1.2.1. É válido observar que: 1) o cenário de uso relativo a *mMTC* requer capacidades maiores de densidade de conexões e eficiência energética; 2) o cenário relativo a *URLLC* requer baixas latências e alta confiabilidade; 3) o cenário de *eMBB* requer altas taxas de transferência de dados e mobilidade.

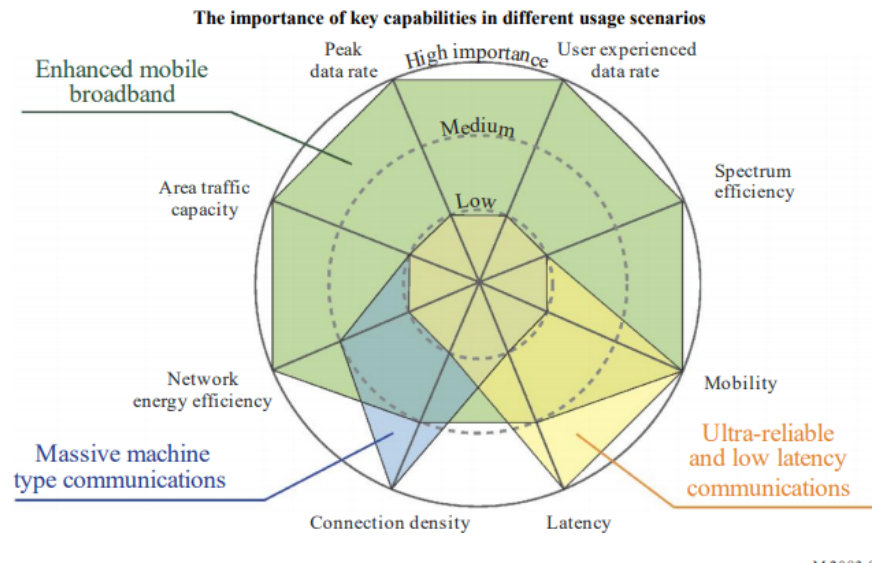


Figura 3 Capacidades-chave para redes 5G para os diferentes cenários de uso (retirado de [1]).

Os requisitos mínimos citados no documento de recomendações ITU-R M.2083 [1] foram criados como contribuição para o IMT-2020. O ITU-R é o setor de rádio do ITU, portanto, é uma organização de padronização que visa criar especificações voltadas para a camada de rádio dentro da arquitetura das redes 5G. Por outro lado, o 3GPP [7,8] colabora com especificações gerais da rede 5G, não focando no rádio. Existem diferenças entre requisitos mínimos definidos pelo ITU-R e pelo 3GPP, como, por exemplo, a definição do requisito de latência e confiabilidade.

1.2.3 Requisitos técnicos mínimos das redes 5G

A partir das capacidades-chave citadas na Seção 1.2.2, o ITU-R e o 3GPP criaram especificações para os requisitos mínimos das rede 5G. Ainda mais, conforme abordado durante a Seção 1.2.2, o ITU-R e o 3GPP divergem quanto a definição dos valores dos requisitos mínimos para cada atributo, portanto, a Tabela 1 mostra os requisitos mínimos para redes 5G a partir da perspectiva do ITU-R e do 3GPP, quando aplicável. A Tabela 1 é utilizada para verificar se as NSTs propostas na Seção 4.3 e na Tabela 4 estão de acordo com os requisitos do IMT-2020 e 3GPP, quando aplicável.

Nota 1: Baseados no tipo de aplicação e cenário de uso, os valores de latência fim-a-fim em redes 5G variam entre 5 e 500 milissegundos [24], segundo o 3GPP. Ver especificação técnica 3GPP ETSI TS 23.501 [7] para mais detalhes e exemplos de latências

Tabela 1 Requisitos mínimos relacionados ao desempenho técnico das redes 5G [1, 7, 8]

Requisitos Técnicos Mínimos			Valor	Observações
Taxa de Transferência de dados do usuário	Pela definição ITU-R	Downlink	100 Mbit/s	Refere-se ao valor mínimo para tais atributos (downlink e uplink). Este requisito é definido para fins de avaliação apenas no cenário de uso eMBB.
		Uplink	50 Mbit/s	
	Pela definição 3GPP	Downlink	15 Mbps até 1+ Gbps	3GPP define diferentes taxas baseado em cenários de uso e no 5QI, sendo definida apenas para avaliação do cenário de uso eMBB. Ver 3GPP TS 22.261.
		Uplink	7,5 Mbps até 500+ Mbps	
Latência do Plano de Usuário	Pela definição ITU-R	eMBB	4 ms	Latência apenas na camada de rádio, assumindo condições sem carga (usuário único) para pequenos pacotes IP (ex.: 0 byte de payload + cabeçalho IP), para downlink e uplink.
		URLLC	1 ms	
	Pela definição 3GPP	eMBB/URLLC	de 5 ms até 500 ms	Baseado em cada cenário de uso e no 5QI. Latência fim-a-fim que considera rede de acesso, transporte e núcleo. Ver especificação técnica 3GPP TS 23.501 (ver Nota 1, Nota 2 e Nota 3).
Densidade de Conexões	Pela definição ITU-R	URLLC	1000000 /km ²	ITU-R considera apenas cenários mMTC.
	Pela definição 3GPP	Diferentes Cenários	Múltiplos Valores	3GPP considera múltiplos cenários de uso e valores. Ver 3GPP TS 22.261.
Eficiência Energética			Eficiência na transmissão de dados e baixo consumo de energia quando não há transmissão	Este requisito é definido para fins de avaliação apenas no cenário de uso eMBB
Confiabilidade	Pela definição ITU-R	URLLC	99.99999% na entrega dos dados	Requisito mínimo de confiabilidade é a probabilidade de 10^{-5} em se obter sucesso na transmissão de um pacote de 32 bytes em 1ms na camada 2 em um ambiente urbano URLLC.
	Pela definição 3GPP	Baseado em cada cenário de uso e no 5QI	de 10^{-2} até 10^{-8} (99.99% até 99.99999999%) na entrega de dados	Ver especificação técnica 3GPP TS 23.501 (ver Nota 4)
Mobilidade	estacionário		0 km/h	Este requisito é definido para fins de avaliação apenas no cenário de uso eMBB
	pedestres		0 km/h a 10 km/h	
	veículos		10 km/h a 120 km/h	
	veículos em alta velocidade		120 km/h a 500 km/h	
	tempo de interrupção da mobilidade		0 ms	

fim-a-fim para diferentes casos de uso da rede 5G.

Nota 2: A latência fim-a-fim definida pelo 3GPP [7] leva em consideração as latências na camada de acesso via rádio, transporte e rede de núcleo, correspondendo ao atributo NST de atraso de pacote (PDB - *Packet Delay Budget*), conforme mostra a Seção 4.1.4.2, sendo portanto, a latência considerada nesta dissertação de mestrado.

Nota 3: Ver Tabela 5.7.4-1 da especificação técnica do 3GPP ETSI TS 123 501 [7] para valores padronizados de latência fim-a-fim, ou PDB, baseado em cada cenário de uso e para cada 5QI (*5G QoS identifier*) escolhido.

Nota 4: O requisito de disponibilidade para o 3GPP pode variar de acordo com o cenário de uso do serviço. Ver Tabela 5.7.4-1 da especificação técnica do 3GPP ETSI TS 123 501 [7] para valores padronizados de disponibilidade baseados em cada cenário de uso e para cada 5QI (*5G QoS identifier*) escolhido. Ver Seção 1.2.1 para mais informações sobre diferenças entre as definições de disponibilidade. A disponibilidade corresponde ao atributo NST de taxa de erro de pacote (*Packet Error Rate - PER*), abordado na Seção 4.1.4.2.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo aborda alguns trabalhos relacionados ao tema desta dissertação. Primeiramente, abordamos o fatiamento de redes (*Network Slicing Templates*) em redes 5G. A seguir, discutem-se cenários de uso dessas redes que podem ser obtidos via fatiamento. Por último, discorremos sobre algumas ferramentas de simulação de redes 5G.

2.1 Redes 5G e Network Slicing Templates

Diversos trabalhos apresentam conceitos sobre redes 5G e o uso da técnica de fatiamento nessas redes, fornecendo o referencial teórico necessário para esta dissertação. Alguns exemplos são [11, 12, 20, 25], que descrevem aspectos gerais sobre redes 5G e seu fatiamento. Apesar desses trabalhos não conectarem tecnicamente os conceitos de arquitetura de redes 5G aos cenários de uso dessas rede e seu fatiamento, eles apontam interdependência entre esses temas e a necessidade da investigação dos cenários de uso da rede para a criação das fatias de rede, como abordamos nos capítulos iniciais desta dissertação.

Por outro lado, [6], da *GSM Association* (GSMA), tem o propósito de discutir a padronização de atributos para caracterizar fatias de rede que permitam a criação de NSTs. Esse trabalho define os atributos genéricos para a criação de NSTs, mas não define nenhum NST a partir destes atributos. Esta dissertação cria NSTs a partir do preenchimento dos atributos genéricos, evoluindo sobre [6].

2.2 Cenários de Uso da Rede

Em [22], a ITU aborda os cenários de uso genéricos eMBB, URLLC e mMTC previstos para redes 5G a partir das especificações criadas pelas organizações 3GPP e ITU-R para IMT-2020. Porém, esse trabalho não destrincha o mapeamento de tais cenários em perfis de uso das fatias da rede e suas especificações NST. Em [9], aborda-se os principais cenários de uso para redes 5G e seus respectivos perfis de tráfego. Ele indica as diferenças entre as definições dos cenários de uso de redes 5G entre organizações, fornecendo uma visão geral das diferentes definições dos cenários de uso de 3GPP, ITU-R e outras organizações. Ambos os trabalhos foram fundamentais durante a pesquisa sobre os perfis de uso de

redes 5G e a posterior definição de quais cenários de uso seriam utilizados para a criação das propostas de NSTs contidas nesta dissertação. Complementarmente, salientamos que esses trabalhos não propõem NSTs nem simulam redes 5G a partir destes cenários. Por outro lado, esta dissertação apresenta NSTs para os cenários urbanos macro eMBB, URLLC e mMTC; e simula uma fatia de rede eMBB usando a NST proposta.

Por fim, após a escolha dos cenários de uso urbanos macro eMBB, URLLC e mMTC, foi necessário atribuir valores aos modelos genéricos de fatias de rede (GSTs), para cada cenário de uso, a fim de gerar NSTs. Para tal, os documentos de referência técnica [7,8], do ETSI, e o artigo [24], do IEEE, serviram como base teórica para auxiliar na proposição dos valores para cada atributo NST contido nesta dissertação.

2.3 Simulação de Redes 5G

Diferentes tecnologias e softwares disponíveis para simulação de redes 5G são discutidas em [10,17]. Embora o artigo mencione softwares de simulação de rede, não há um estudo aprofundado sobre nenhum deles e, além disso, o artigo não se propõe a testar nenhum deles a fim de compará-los, listando suas vantagens e desvantagens. Isto posto, para realizar esta dissertação, esse artigo do IEEE auxiliou a direcionar a pesquisa para escolher o simulador, de modo que se pudessemos focar em investigar e testar poucos simuladores, como o free5GC, OPENAIRINTERFACE e Open5GCore. Após alguns testes iniciais, escolhemos o Free5GC como simulador de rede de núcleo; exploramos seu funcionamento no Capítulo 5 com detalhes técnicos e o apontamento de prós e contras sobre seu uso. Ainda mais, a partir dos testes realizados com o Free5GC, foi possível avaliar e adotar o UERANSIM como simulador de RAN.

Em [13], realiza-se uma pesquisa com o objetivo de simular e explorar diferentes configurações dos recursos do núcleo de uma rede 5G fatiada, a fim de comparar o desempenho da fatia de rede diante de configurações diversas. Essa pesquisa parte da hipótese de que redes 5G são flexíveis e existem diversas possibilidades para configuração e alocação de seus recursos; portanto, algumas dessas possibilidades são testadas, com a finalidade de avaliar quais, dentre elas, obtêm melhor desempenho do ponto de vista do núcleo da rede. Esse trabalho permite um melhor entendimento da arquitetura de simulação das redes 5G. Além disso, ele influencia algumas das configurações de rede simuladas nesta dissertação, como, por exemplo, a utilização da configuração de funções da rede dedica-

das, pois [13] conclui que assim obtém-se melhor desempenho interno. Esta dissertação segue ainda outro caminho ao avaliar a rede 5G do ponto de vista de qualidade do serviço (e.g. latência e taxas de transferências de dados), diferentemente dos trabalhos que são de nosso conhecimento.

Uma previsão de demanda da redes entre 2025 e 2030 é apresentada em [26]. O trabalho estima que o fator de atividade de usuários de redes 5G urbanas macro eMBB deve estar entre 10%-25% do total de UEs conectados; ou seja, pelo menos 10% dos UEs estarão ativamente utilizando a rede para realizar download ou upload de dados. Assim, nesta dissertação implementa-se o fator de atividade de 10% para UEs eMBB.

Por último, [27] aponta para possíveis trabalhos futuros relacionados à simulação e avaliação das diferentes fatias de rede para prover diferentes serviços (eMBB, URLLC e mMTC) paralelamente.

3 REDES 5G: ARQUITETURA E NETWORK SLICING

Este capítulo aborda a arquitetura definida para as redes 5G, pelas principais organizações de padronizações citadas no Capítulo 1 e apresenta as tecnologias empregadas na implementação de redes 5G, tais como: SDN (*Software Defined Networks*), NFV (*Network Functions Virtualization*), fatiamento de redes (*Network Slicing*) e computação de borda (*Edge Computing*). Estas tecnologias funcionam como base para que o 5G atinja seus objetivos de entregar banda larga móvel aprimorada (eMBB), latências extremamente baixas (URLLC) e capacidade de lidar com a comunicação massiva entre dispositivos (mMTC).

Ainda mais, este capítulo apresenta os conceitos sobre as técnicas de fatiamento da rede, para os os casos de uso propostos na Seção 1.2.1.

3.1 Arquitetura 5G fim-a-fim

O 3GPP, junto ao ITU-R, e IMT-2020, forneceram as especificações, padronizações, conceitos e tecnologias para a arquitetura das redes 5G. No geral, a arquitetura de redes 5G foi pensada, desenvolvida e construída para oferecer capacidades aprimoradas aos serviços prestados. Em outras palavras, o 5G é uma tecnologia direcionada a prestar serviços aprimorados para casos de usos específicos.

Para tornar as redes 5G uma tecnologia aprimorada e orientada aos serviços, deve-se empregar uma variedade de técnicas e tecnologias como NFV, SDN, MEC (*Multiple-Access Edge Computing*) e fatiamento das redes, a fim de aprimorar as funções da rede, aumentando a qualidade do serviço e, com isso, garantindo que os casos de uso (ver Seção 1.2.1.1), ou serviços propostos para as redes 5G, tenham seus requisitos mínimos alcançados. Portanto, as tecnologias de softwarização e controle da rede, que têm o objetivo de aprimorar as capacidades das redes, são vitais.

A Figura 4 mostra uma arquitetura simplificada fim-a-fim de uma rede 5G e os principais elementos da rede, descritos logo a seguir. Os principais elementos de redes 5G são:

1. **UE (*User Equipment*)**: equipamentos dos usuários são os dispositivos, por exemplo smartphones ou sensores IoT, conectados à rede de dados (*DN - Data Network*) através da rede de acesso rádio à rede de núcleo 5G;

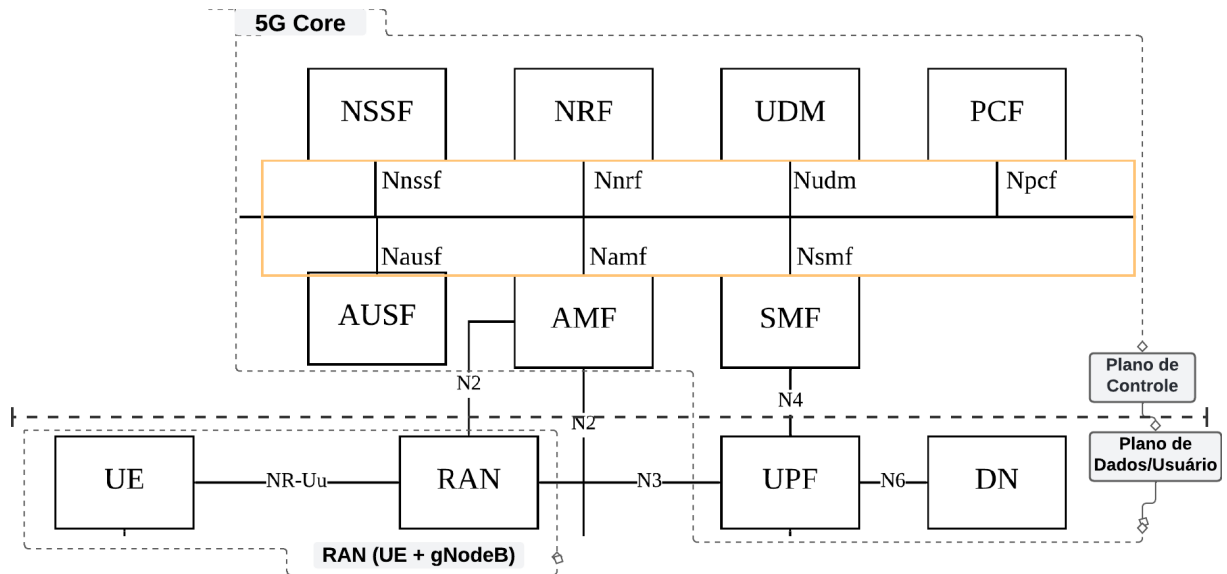


Figura 4 Arquitetura fim-a-fim de uma rede 5G e as NFs - RAN conectada ao Core (baseada em [3]).

2. **RAN (*Radio Access Network*)**: no contexto do 5G também é chamada de **NG-RAN (*New Generation Radio Access Network*)**. É a rede composta por todos os elementos e funções da rede com a finalidade de implementar a tecnologia de acesso via rádio no sistema de comunicação móvel. No escopo das redes 5G, a implementação da RAN deve ser baseada em células pequenas (*small cells*), que têm capacidade de entregar maior cobertura do sinal, baixa latência, maiores larguras de banda e maior capacidade para densidade de conexões [22], visando assim, obedecer aos requisitos de eMBB, mMTC e URLLC para redes 5G, citados na Seção 1.2.3. As estações rádio base das redes de acesso 5G são chamadas gNodeBs, ao invés das eNodeBs das redes 4G;
3. **5G Core Network**: o núcleo da rede, também conhecido como *backbone*, é composto por todos os elementos e funções da rede que têm a finalidade de interconectar as várias partes da rede, fornecendo diversos caminhos para a troca de informações entre diferentes redes ou sub-redes. É o núcleo da rede que possibilita a comunicação entre as diversas RANs (gNodeBs) existentes em uma cidade, estado, ou país. No contexto do 5G, o núcleo da rede deve oferecer uma maior flexibilidade fim-a-fim, resultando na softwarerização da rede, que é feita através da virtualização das funções da rede (NFV - *Network Functions Virtualization*), redes definidas por software (SDN) e fatiamento da rede (*Network Slicing*). A utilização dessas tecno-

logias visa aumentar a capacidade de transformação da rede, a velocidade na qual melhorias podem ser implementadas e, por fim, resultar na otimização da rede [22]:

- **NFV**: os elementos e funções da rede tais como roteadores, balanceadores de tráfego e bancos de dados são criados por software;
- **SDN**: permite a reconfiguração dinâmica da rede em tempo real por software, aumentando a resiliência, desempenho e a qualidade da rede;
- **Fatiamento de redes (NS)**: permite que uma rede física seja dividida em múltiplas redes virtuais, possibilitando que a rede 5G suporte múltiplos e diferentes tipos de serviços. Cada serviço possui seus requisitos (eMBB, mMTC, URLLC), por isso, o fatiamento é uma técnica em permite a divisão da rede em fatias dedicadas à serviços específicos a serem oferecidos para o usuário;

4. **Rede de Transporte**: a rede de transporte é composta por todos os elementos e funções da rede que possuem a finalidade de conectar os segmentos da rede, como por exemplo conectar a RAN ao núcleo da rede, sendo representada na Figura 4 através das conexões N2, N3, N4 e N6, entre elementos. É chamada também de rede de transporte xHAUL, pois é composta por fronthaul, backhaul, midhaul e sidehaul [28]:

Fronthaul: Um caminho da rede, ou conexão, entre controladoras de rádio centralizadas e as unidades remotas de rádio de uma estação rádio base;

Backhaul: Um caminho da rede, ou conexão, entre estações rádio base e núcleo da rede ou internet;

Midhaul: Como o 5G implementa o conceito de múltiplas pequenas células de rádio (*small cells*), muitos links fronthaul são usados para conectar as pequenas células às estações rádio base maiores, e com isso, a conexão entre essas estações rádio base e as controladoras poderá ser feita por um novo caminho chamado midhaul. Portanto, o midhaul é um caminho da rede, ou conexão, entre estações rádio base e o núcleo da rede em algumas arquiteturas de rede 5G;

Sidehaul: caminho, ou conexão lateral, entre as estações rádio base. As estações gNodeB devem se comunicar e trocar informações dos usuários através das interfaces sidehaul. Na arquitetura 5G, tem funcionalidades de suportar requisitos tais como mobilidade e latência;

5. **MEC (*Multiple-Access Edge Computing*)**: a computação em borda para acesso múltiplo é de extrema importância para aplicações de tempo real e com requisitos de ultra baixa latência confiável (URLLC). O MEC, ou apenas *Edge Computing*, tem o objetivo de levar algumas funções do núcleo da rede para próximo do usuário final de forma que múltiplos usuários que necessitem, por exemplo, de latência menor, possam acessar este elemento mais próximo da borda da rede. Desta forma, o MEC traz a capacidade computacional e de acesso aos dados próximo do usuário final com o objetivo de diminuir a latência, aumentar a velocidade do tráfego de dados. Apesar da arquitetura simplificada de redes 5G da Figura 4 não retratar a camada MEC, é importante ressaltar o contexto e importância desta tecnologia para as redes 5G.

A descrição dos elementos de rede mostrados na Figura 4 são abordados na Seção 3.2.6, que detalha as funções de cada elemento da rede 5G.

3.2 Fatiamento de Redes (*Network Slicing*)

3.2.1 Visão geral

O fatiamento da rede visa obter redes independentes usando infraestrutura virtualizada para servir aos requisitos dos diferentes serviços, ou casos de uso [2, 12]. Em outras palavras, o fatiamento tem a finalidade de criar instâncias virtuais de rede (NSIs - *Network Slice Instances*) dedicadas aos diferentes casos de uso da rede e assim fornecer à rede a capacidade de moldar-se aos serviços prestados [2].

O fatiamento é uma técnica que permite a otimização e flexibilização da rede de acordo com o serviço 5G oferecido, com os objetivos: [2, 11, 12]: a) Simplificar o uso da rede, transformando um problema maior (QoS, disputa entre os serviços da rede pelos recursos únicos oferecidos pela rede) em problemas menores (fatias menores, recursos de rede dedicados a cada serviço); b) Fazer com que o serviço, ou caso de uso da rede, atinja seus requisitos mínimos a um custo menor, de forma mais rápida e eficiente; c) Otimizar a rede, implementando na rede características-chave como flexibilidade, programabilidade, confiabilidade, resiliência, fácil gerenciamento de rede e isolamento lógico dos elementos das fatias de rede.

3.2.2 Termos e definições

O documento de recomendações ITU-T Y.3112 [2], que aborda o *Network Slicing* para as redes 5G, define:

- **Network Function (NF)**: é uma função da rede com capacidade de processamento, tal que:
 - Funções da rede não são consideradas como recursos de rede, mas sim como qualquer função que pode ser instanciada usando os recursos da rede;
 - Incluem as funcionalidades dos nós da rede: gerenciamento de sessão, gerenciamento de mobilidade e funções de transporte;
 - Podem ser implementadas em hardware dedicados ou como funções virtualizadas por software;
- **Network Slice (NS)**: rede lógica que provê capacidades de rede específicas. É composta por um conjunto de funções da rede necessárias para criar a fatia de rede e suportar os requisitos mínimos para cada cenário de uso do serviço, com as seguintes características:
 - São redes customizadas com finalidade de prover soluções flexíveis para diferentes cenários de uso do serviço 5G, que têm requisitos específicos quanto à funcionalidade, desempenho e alocação de recursos;
 - Uma fatia de rede deve ter a habilidade de expor suas funcionalidades e recursos;
 - O comportamento de uma fatia da rede é definido por meio de instâncias de fatia de rede (*network slice instances*);
- **Network Slice Template (NST)**: um modelo de fatia de rede contém uma descrição completa da estrutura, configuração e fluxos de trabalho sobre como criar e controlar uma instância de fatia de rede durante seu ciclo de vida. Também pode ser chamado de *network slice blueprint*. Um NST possibilita instanciar uma fatia de rede, que fornece certas características de rede (ex. baixa latência, confiabilidade etc). Portanto, se refere aos SLAs (*Service Level Agreements*) que uma NSI deve prover aos usuários [25];

- **Network Slice Instance (NSI):** instância de fatia de rede criada baseada em um NST. É composta por um conjunto de funções da rede e recursos físicos, lógicos e/ou virtuais que executam essas funções da rede, formando uma rede lógica completa, que é instanciada com o intuito de prover as características de rede requeridas pelo serviço. Uma instância de fatia de rede pode ser compartilhada entre múltiplos serviços providos pelo operador da rede. Uma instância de fatia de rede pode ser composta de nenhuma, uma ou mais subinstâncias, que podem ser compartilhadas com outra instância de fatia de rede;
- **Recursos Físicos:** Um conjunto físico de ativos com capacidade computacional, de armazenamento e de transporte, incluindo acesso a rádio [25];
- **Recursos Lógicos:** Partição de um recurso físico ou um grupo de recursos físicos para criação de funções de rede lógicas virtuais [25];
- **Instância de serviço:** uma instância fim-a-fim do serviço ou apenas um serviço que é executado dentro de uma fatia de rede ou é suportado por uma fatia de rede [25].

Deste modo, já que uma instância de fatia de rede é a realização da técnica de fatiamento da rede, que é criada baseada em um NST, múltiplas instâncias de fatias de rede podem ser criadas baseadas em múltiplas NSTs para os mais diversos cenários de uso do serviço (eMBB, URLLC e mMTC) [2].

Outros termos importantes para o conceito de fatiamento de redes são [4]:

- **Network Virtualization:** a virtualização de redes é a tecnologia que permite a criação de instâncias lógicas e isoladas de rede sobre recursos físicos de rede compartilhados. Deste modo, múltiplas instâncias de rede virtuais podem coexistir, sem interferência, sobre uma rede física compartilhada. A rede física inclui um conjunto de recursos computacionais, armazenamento e transporte. Relacionados a esse conceito, tem-se:

Network Functions Virtualization (NFV): virtualização das funções de rede usa das técnicas de virtualização de redes para criar elementos de rede, ou funções de rede, totalmente virtuais;

Virtualized Network Function (VNF): uma função da rede virtualizada é uma instância de função da rede criada a partir da técnica de virtualização. São

os elementos da rede, e suas funções, criados a partir de software, de forma lógica e para serem máquinas virtuais, ao invés do clássico modelo de implantação das máquinas físicas como um elemento da rede;

- **Software-Defined Networking (SDN)** [4]: redes definidas por software correspondem a um conjunto de técnicas que possibilita o controle, programação, orquestração e gerenciamento dos recursos da rede. Essa técnica facilita a operação e implementação dos serviços da rede de forma mais dinâmica e escalável;
- **Control Plane**: o plano de controle da rede é o conjunto de funções da rede que controla a operação de todas as entidades, ou elementos da rede, da camada (fatia de rede) abaixo deste plano, conforme exemplifica a Figura 5. O plano de controle está diretamente ligado às redes definidas por software (SDN) e à virtualização das funções de rede, sendo possível o controle da fatia de rede através destas tecnologias unidas através de um orquestrador. Um orquestrador é uma camada de controle que está acima de toda a rede, com o objetivo de permitir que múltiplos planos de controle das fatias de redes operem sobre o plano de dados (*data plane*);
- **Data Plane** ou **User Plane**: o plano de dados/usuário é o conjunto de funções da rede utilizadas para transportar os dados, ou seja, conectar o UE à internet, conforme ilustra a Figura 5.

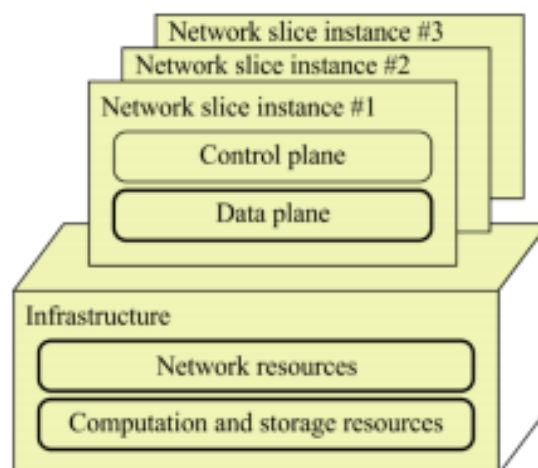


Figura 5 Conceito de plano de controle e plano de dados em uma fatia de rede (retirado de [4]).

3.2.3 Aspectos Funcionais

Uma NSI é definida dentro dos limites de uma rede PLMN (*Public Land Mobile Network*), que é a combinação de serviços de comunicação oferecidos por uma operadora em um país específico e deve incluir pelo menos: 1) o plano de controle e o plano de usuário/dados e 2) uma rede de acesso NG-RAN [7].

Para cada fatia da rede, recursos dedicados (VNFs, largura de banda, QoS) são alocados e qualquer falha ou erro que ocorre em uma fatia da rede, não pode afetar as outras fatias. Todas as gerações anteriores de redes móveis (3G e 4G) foram criadas e otimizadas para serviços de voz e internet e sua arquitetura desenvolvida de forma centralizada. Porém, as redes IMT-2020 (5G) tem que servir a uma vasta quantidade de dispositivos e serviços com diferentes requisitos e necessidades, uma vez que nas redes IMT-2020, as aplicações e serviços do 5G podem ter uma grande variedade de requisitos quanto a: 1) funcionalidade (ex.: prioridade, controle de políticas, segurança e mobilidade); 2) desempenho (ex.: latência, mobilidade, disponibilidade e taxas de transferência); 3) tipos de usuários (ex.: usuários públicos ou clientes corporativos) [2].

Uma fatia de rede deve abranger todos os segmentos da rede 5G, incluindo rede de acesso (*RAN*), rede de transporte (*xHAUL*) e rede de núcleo (*Core Network*) e pode servir a casos de uso (tipos de serviços) específicos [2]. As redes IMT-2020 podem identificar e associar corretamente o equipamento do usuário com a fatia de rede, baseado em parâmetros como: assinatura do usuário, contexto, regras e políticas de acesso através da correta seleção e indicação da fatia, como mostra a Seção 3.2.4. Por outro lado, caso o usuário tenha que acessar as múltiplas fatias da rede ao mesmo tempo, é recomendado que o equipamento do usuário forneça informação para a rede de modo a auxiliá-la no processo de seleção da fatia durante a conexão [2].

A partir da perspectiva da fatia da rede, as funções da rede podem ser divididas em dois tipos [2]:

1. **Funções do plano de usuário:** As funções do plano de equipamento do usuário são funções que suportam o acesso do usuário final às redes IMT-2020. Funções como AMF (*Access and Management Function*) são exemplos de funções dessa camada e devem estar disponíveis em todas as áreas para o registro do usuário. O AMF é um elemento da rede, ou função da rede, responsável por prover registro na rede e

mobilidade para cada sessão dos usuários, portanto, uma instância lógica de AMF deve residir em uma ou múltiplas instâncias de fatia da rede e interagir com as outras funções da rede dentro da fatia;

2. **Funções do plano de serviço da rede:** As funções da camada de serviço da rede, tais como o SMF (*Session Management Function*), pertencem ao plano de serviço da rede, e não ao plano de usuário. Estes elementos, ou funções da rede, podem existir dentro de diferentes fatias da rede com o objetivo de prover os requisitos básicos da instância fatia da rede. O SMF, por exemplo, é responsável por fornecer gerenciamento de sessão e controle do caminho dos dados em uma rede IMT-2020. Quando um usuário solicita uma sessão para um serviço com capacidades e requisitos específicos, uma instância apropriada de SMF deve ser selecionada para suportar tais requisitos.

As principais funções da rede, além do AMF e SMF, que são empregadas nas redes IMT-2020 e fazem parte do escopo do *Network Slicing*, são abordadas na Seção 3.2.6.

A partir da perspectiva do usuário, diferentes sessões do serviço podem ser inicializadas ao mesmo tempo, onde cada uma destas sessões deve ser unicamente atendida pela instância apropriada de fatia de rede. Além disso, cada instância de fatia de rede deve possuir as corretas e apropriadas funções da rede que satisfaçam os requisitos desejáveis da fatia. Portanto, funções da rede como o AMF e SMF devem ser selecionadas de forma a garantir as demandas e requisitos do serviço solicitado pelo usuário.

A partir da perspectiva da rede, as sessões dos diferentes tipos de usuários podem ser estabelecidas através de uma única função da rede AMF centralizada; porém, quando as sessões atingem a camada de serviço da rede, múltiplas fatias da rede segregadas irão servir as diferentes sessões do usuário através de elementos como o SMF. Isso significa que pode haver um só AMF para todas as fatias da rede, mas deve haver um SMF para cada NSI, por exemplo. A Figura 6 exemplifica mais claramente este conceito.

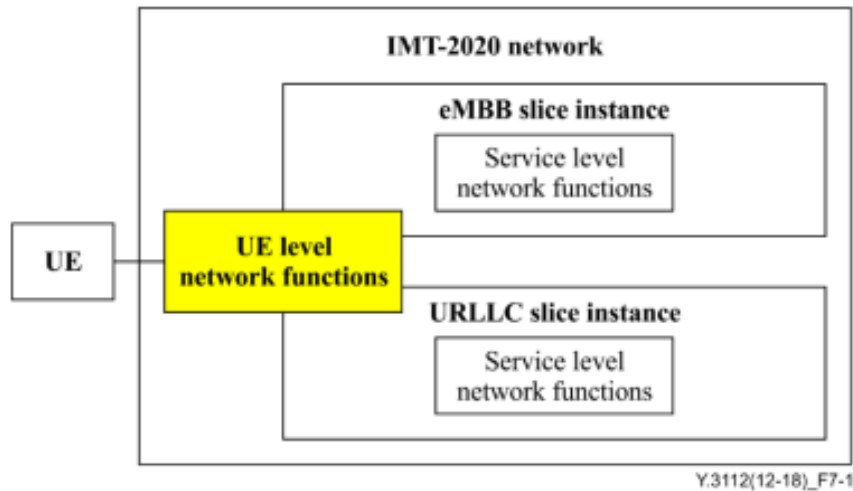


Figura 6 Comunicação entre diferentes camadas da rede a partir da perspectiva do usuário (retirado de [2]).

Ainda mais, existe também uma terceira perspectiva, a perspectiva de implantação da fatia da rede. Nessa perspectiva as funções da rede, ou NFs, podem ser classificadas em dois tipos [2]:

1. **NFs sensíveis a KPIs:** funções de rede sensíveis a KPIs (*Key Performance Indicators*), ou indicadores de desempenho, devem ser alocadas mais próximo ao usuário final. Tais funções da rede, no geral, são aquelas que dependem da localização do usuário (ex.: AMF). Essas funções da rede devem ser implantadas de forma distribuída, para chegarem mais próximo ao usuário;
2. **NFs não sensíveis a KPIs:** funções da rede não sensíveis a KPIs podem ser alocadas de maneira centralizada. Alguns exemplos são: *Network Slice Selection Function* (NSSF) e *Unified Data Management Function* (UDM), que serão descritos na Seção 3.2.6.

3.2.4 Indicação e seleção da fatia de rede

De acordo com a especificação técnica ETSI TS 123 501 [7], para suportar diferentes casos de uso ou tipos de serviço, podem existir diversas fatias de rede em uma mesma rede 5G. Ainda mais, um operador da rede 5G pode implementar múltiplas fatias de rede

com as mesmas características, porém destinadas a diferentes grupos de usuários, pois um mesmo serviço pode ter que servir dois grupos de usuários diferentes, como por exemplo, um serviço eMBB para usuários públicos e o mesmo serviço eMBB porém destinado a usuários privados. Estas fatias de rede são distinguidas pelo indicador do tipo de fatia de rede conhecido como S-NSSAI (*Single Network Slice Selection Assistance Information*) ou NSTI (*Network Slice Type Indicator*). Um NSTI/S-NSSAI é composto por:

1. **SST (*Slice Service Type*)**: também conhecido como categoria do serviço da fatia de rede (*Slice Service Category*), se refere aos tipos de serviços que possuem requisitos diferentes com relação a aspectos de funcionalidade e desempenho das funções da rede. Os SSTs básicos são URLLC, eMBB e mMTC. STTs adicionais podem ser definidos de acordo com as necessidades do serviço ou do operador da rede, como por exemplo, eMBB junto com URLLC;
2. **SD (*Slice Differentiator*)** ou **SUG (*Slice User Group*)**: se refere a aspectos de tipos de usuário, ou seja, fornece informação opcional para auxiliar a distinguir os diferentes grupos de usuários de uma NSI dentre as múltiplas NSIs de um mesmo SST.

O 3GPPP padroniza os valores para SST, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 SSTs padronizados pelo 3GPP [7].

SST (<i>Slice/Service Type</i>)	Valor Padrão do SST	Características
eMBB	1	Slice adequado para lidar com ambientes de banda larga móvel primorada para redes 5G
URLLC	2	Slice adequado para lidar com ambientes de redes ultra confiáveis e de baixa latência
mMTC	3	Slice adequado para lidar com ambientes de uso massivo da rede com dispositivos IoT
V2X	4	Slice adequado para lidar com ambientes que suportem comunicação V2X

3.2.4.1 Indicação da fatia de rede

Como apresentado na Seção 3.2.4, um NSTI/S-NSSAI pode ser composto por dois tipos de informação [2], um SST e um SD/SUG. Tais informações são necessárias para fornecer ao usuário todos os tipos de serviços que podem ser requisitados nas rede IMT-2020 quando o usuário se registra na rede. Ao receber a informação NSTI/S-NSSAI do usuário, a rede tem que verificar qual fatia de rede correspondente ao serviço desejado está disponível. O equipamento do usuário (UE) pode fornecer um único NSTI/S-NSSAI

ao requisitar o estabelecimento de sessão para um serviço em particular nas redes IMT-2020 [2].

3.2.4.2 Seleção da fatia de rede

É necessário que um NSTI/S-NSSAI inclua o tipo do serviço da fatia (SST) quando o UE requisita um serviço específico da rede IMT-2020. O SST deve indicar tanto o cenário de uso (eMBB, URLLC ou mMTC) ou a combinação destes cenários. Além disso, o NSTI pode, de forma opcional, incluir o grupo de usuários da fatia (SUG) junto com a SST para indicar com precisão a fatia de rede específica a ser utilizada pelo usuário, uma vez que o SUG inclui informações detalhadas sobre requisitos de desempenho para os diferentes grupos de usuários [2]. Exemplos de diferentes grupos podem ser: 1) URLLC com latência máxima de 5 ms; 2) URLLC com latência máxima de 100 ms; 3) eMBB com velocidades de no mínimo 100 Mbps para download em áreas urbanas; 4) eMBB com velocidades de no mínimo 25 Mbps para download em áreas rurais.

A rede tem a função de determinar e selecionar a instância de fatia de rede (NSI) baseada no NSTI fornecido pelo usuário, onde, o NSTI pode ser definido também pelo tipo de inscrição do usuário e por políticas do operador [2]. A partir do NSTI fornecido pelo usuário ao iniciar a sessão, a rede pode escolher a NSI que irá servir aquele usuário. Se o NSTI do usuário não combinar com nenhuma NSI, a rede pode rejeitar a tentativa de conexão do usuário [2].

Uma NSI pode ser instanciada de maneira estática ou dinâmica durante a criação e instanciação de uma fatia de rede. Na instanciação estática, os NSIs são instanciados e provisionados durante sua configuração, com a descrição e inclusão de todas as funções da rede. Deste modo, o AMF escolhe um NSI dentre os disponíveis e, após isso, escolhe o SMF dentro da rede de núcleo, não sendo permitido utilizar funções de rede de outras fatias de rede. O AMF consegue adquirir as informações necessárias dos NSIs disponíveis através do NSSF (*Network Slice Selection Function*) [2].

Já na instanciação dinâmica, o AMF, por exemplo, inicia um processo de seleção das NF disponíveis na rede IMT-2020, para então criar a NSI, baseada em um modelo predefinido, também conhecido como *network slice blueprint*. Nesse modelo é possível também que o NSSF auxilie o AMF no processo de criação da NSI, uma vez que o NSSF está associado à camada de gerenciamento e orquestração (MANO - *Management and*

Orchestration). Ainda mais, uma NF pode ser adicionada dinamicamente a uma NSI se a rede permitir, aumentando assim a eficiência do uso dos recursos [2].

3.2.4.3 Estabelecimento da Sessão em uma fatia de rede

O UE deve estabelecer uma sessão com a rede 5G, que pode utilizar sessões, para que haja conectividade e acesso à rede de dados (DN - *Data Network*) através do UPF (*User Plane Functions*), permitindo assim que o usuário tenha acesso à transmissão de dados e/ou acesso à internet [7]. Uma sessão é um bloco de informações transferidas pela rede, que pode suportar um ou mais fluxos QoS, fluxo estes chamados 5QI (*de 5G Quality of Service Identifier*) e que será abordado na Seção 4.1.4.

Quando um UE é associado a um S-NSSAI específico e requisita o envio de dados sobre a rede 5G [7]: 1) se a sessão tiver sido estabelecida, o UE roteia o tráfego de dados do usuário na sessão estabelecida; 2) se a sessão não tiver sido estabelecida, o UE requisita uma nova sessão correspondente ao S-NSSAI desejado e a rede estabelece a sessão. Para esta última opção, o AMF deve ser capaz de consultar o S-NSSAI fornecido pelo UE no NRF e caso haja falha na consulta, o AMF deve consultar o NSSF.

3.2.5 Papéis em uma Fatia de Rede

Do ponto de vista de negócio e gestão dos serviços de fatiamento por uma organização, os seguintes papéis são importantes dentro de uma rede 5G:

- *Communication Service Customer* (CSC): é o usuário de um serviço de comunicação (ex.: UE);
- *Communication Service Provider* (CSP): provê os serviços de comunicação, além de projetar, construir e operar tais serviços. O CSP pode construir as redes sem ou com a tecnologia de fatiamento;
- *Network Operator* (NOP): o operador de rede fornece serviços de rede, além de projetar, construir e operar as redes a fim de oferecer seus serviços;
- *Network Slice Customer* (NSC): é um CSP ou CSC que usa o fatiamento de redes como um serviço;

- *Network Slice Provider* (NSP): um CSP ou CSC que fornece o fatiamento de redes como um serviço.

3.2.6 Principais funções da rede 5G

Os itens a seguir têm como fonte de informação as recomendações ITU-T Y.3102 [29], ITU-T Y.3112 [2] e o documento de especificação técnica ETSI TS 123 501 [7], que abordam a arquitetura das redes 5G, técnica de fatiamento das redes 5G e as funções da rede. Para um entendimento melhor desta dissertação de mestrado, é importante ressaltar o funcionamento de algumas das funções de rede 5G presentes na arquitetura da Figura 4:

1. As informações sobre o **UE** (*User Equipment*) e **RAN** (*Radio Access Network*) foram descritas na Seção 3.1;
2. **AMF** (*Access and Mobility Management Function*), também conhecido como **NACF** (*Network access and control function*) [5]: a função de gerenciamento de acesso e mobilidade tem funcionalidades de gerenciamento do registro do usuário, da conexão do usuário e da sessão do usuário;
3. **UPF** (*User Plane Function*): a função de controle de plano do usuário fornece funcionalidades para roteamento e encaminhamento do tráfego para a rede de dados (DN - *Data Network*), além de gerenciamento de QoS. O estabelecimento das sessões normalmente existe entre a RAN e o UPF;
4. **DN** (*Data Network function*): refere-se a serviços do operador da rede, acesso à internet e serviços de terceiros.
5. Demais funções de rede (NFs) pode ser encontradas no Anexo F.

A Figura 4 mostra um exemplo de arquitetura fim-a-fim de uma rede 5G com todas as funções de rede descritas nesta seção e no Anexo F.

4 PROPOSTA DE NETWORK SLICE TEMPLATES

Este capítulo especifica a criação e configuração de NSIs através de NSTs em redes 5G. Além disso, o capítulo foca nos atributos e especificações de um NST além de apresentar o processo de criação de um NST através de um GST (*Generic Slice Template*), abordando assim alguns conceitos-chave para o fatiamento das redes. Este capítulo tem como referências principais a recomendação ITU-T Y.3157 [5], a Seção 5.15 da especificação técnica ETSI TS 123 501 [7] e o documento oficial de referência GSMA NG.116 [6].

Ao final deste capítulo são propostos três NSTs para três diferentes cenários de uso da rede 5G.

4.1 Aspectos Gerais de NSTs

4.1.1 Termos e Definições - NST, GST, NEST e NSTI

O modelo de fatia de rede, NST, contém os atributos e valores necessários para gerar uma instância da NSI alvo. Um NSI é gerado e gerenciado pela orquestração e gerenciamento da rede para alcançar os requisitos definidos pelo NST, que expressa o acordo (SLA) entre as necessidades dos consumidores da fatia de rede e a capacidade de atender a tais necessidades por parte dos provedores do serviço de fatiamento para cada tipo de cenário de uso. Em outras palavras, os requisitos do serviço de rede para cada fatia NSI são traduzidos para um NST. Ainda mais, cada NSI gerado a partir de um NST é composto por um identificador da fatia de rede chamado S-NSSAI (*Single Network Slice Selection Assistance Information*) [7], que é usado para diferenciar os NSIs em cenários onde existem múltiplas fatias de rede, conforme abordado na Seção 3.2.4.

Um GST (*Generic Slice Template*) é o modelo genérico de fatiamento de rede, ou seja, um modelo universal que foi criado para servir como molde para NSTs e será abordado na Seção 4.1.3. Já um NEST (*NEtwork Slice Type*) é um GST preenchido com os valores dos atributos necessários para a criação de uma nova NSI.

4.1.2 Configuração, Gerenciamento e Orquestração para Fatiamento

Esta seção é baseada na recomendação ITU-T Y.3157 [5], que especifica a configuração de rede e orquestração necessária para criar NSIs dentro das redes IMT-2020.

Apenas os principais tópicos relacionados a NSTs serão abordados.

A arquitetura de gerenciamento e orquestração do fatiamento da rede, abordada sucintamente na Figura 7, consiste em três camadas: 1) consumidor da fatia de rede, chamado de NSC (*Network Slice Customer*) (ver Seção 3.2.5); 2) gerenciamento e orquestração do fatiamento da rede; 3) gerenciamento dos recursos físicos/virtuais e NFs.

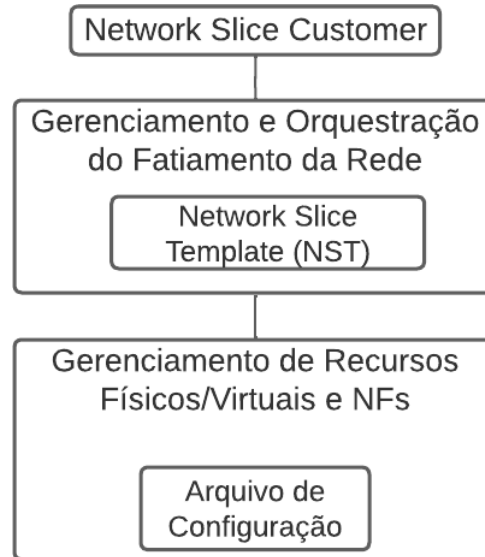


Figura 7 Arquitetura de gerenciamento e orquestração para o fatiamento das redes (baseada em [5]).

A camada NSC é composta por usuários finais (UEs) ou grupo de usuários. A camada de gerenciamento e orquestração da fatia é composta pelos NSTs, que podem ser gerados pela própria orquestração e gerenciamento da rede. A camada de gerenciamento dos recursos é responsável por gerenciar o ciclo de vida, topologia e alocação dos NFs requeridos pelos diferentes NSTs e cenários de uso do serviço.

A camada de gerenciamento de recursos da rede gera o arquivo de configuração que deve ser usado para configurar os recursos (NFs) da rede e expor os NFs para a camada acima consumir. Uma NSI é instanciada pela camada intermediária de gerenciamento e orquestração das fatias da rede, que utiliza os serviços prestados pela camada mais baixa a fim de criar tais NSIs baseadas em um NST. Em outras palavras, a camada de gerenciamento dos recursos atribui os NFs necessários para a NSI, baseada nos requisitos do serviço descritos no NST.

Para exemplificar o que mostra a Figura 8, se um NST especifica atributos necessários para criar uma NSI do tipo URLLC, a camada inferior de gerenciamento dos

recursos deve prover, alocar e configurar as funções da rede (NFs) de forma a alcançar os requisitos dos cenários de uso de baixa latência (ex.: alocar recursos como o AMF mais para a borda da rede, organizar a topologia da rede de forma que o QoS seja respeitado). Deste modo, a camada de gerenciamento e orquestração do fatiamento da rede é responsável por criar as NSIs a partir de NSTs devidamente preenchidas com os valores dos requisitos para cada atributo, conforme mostra a Figura 8. Já o arquivo de configuração da camada de Gerenciamento de Recursos inclui informação de provisionamento dos NFs necessários para instanciar uma NSI e está fora do escopo desta dissertação, uma vez que esta dissertação foca na criação de NSTs a serem utilizadas pela camada de orquestração da rede.

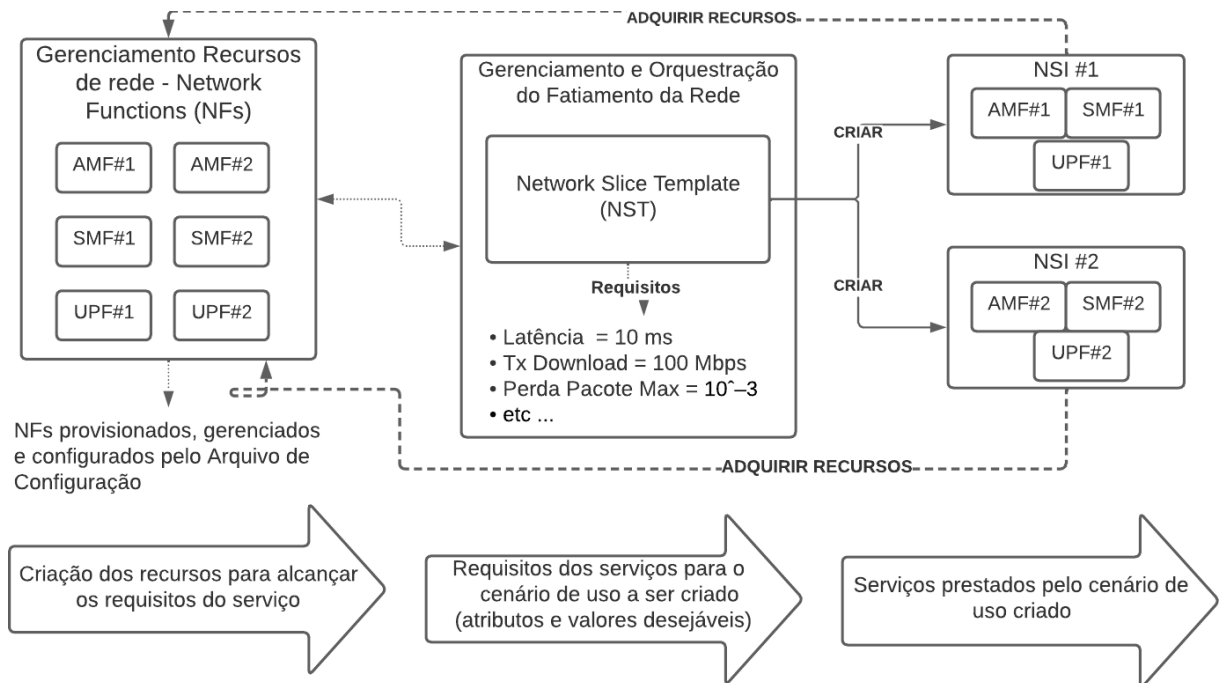


Figura 8 Processo de configuração e criação de uma NSI através de um NST e dos recursos de rede NFs (baseada em [5]).

Em resumo, enquanto que o NST na camada intermediária é responsável por preservar os requisitos do serviço prestado pela NSI (latências, QoS ou taxas de transferência), o arquivo de configuração da camada mais baixa é responsável por provisionar, configurar, alocar e gerenciar as funções da rede (NFs).

4.1.3 Generic Network Slice Template (GST)

Um NST pode ser formado a partir do preenchimento de um GST (*Generic Network Slice Template*). Um GST provê uma lista padronizada de atributos que caracterizam um tipo de fatia de rede. A última versão do GST (GSMA NG.116 v5.0) [6] contém quarenta atributos opcionais ou mandatórios necessários para criar uma NSI.

De acordo com o GSMA [6], um NEST (*Network Slice Type*) é um GST preenchido com valores. Os valores dos atributos são preenchidos de modo a refletir os desejos do NSC para cada caso de uso do serviço. O NEST funciona como entrada (*input*) para a preparação e criação de uma nova fatia de rede NSI, como mostra a Figura 9. Uma vez que um NEST pode ser traduzido como um GST preenchido com valores, considera-se que um NEST reflete um NST, conforme ilustra a Figura 9. Portanto, para esta dissertação de mestrado, NEST e NST são tratados como sendo iguais.

O fluxo da Figura 9 ilustra a criação de uma nova NSI, que suportará um novo caso de uso do serviço, através da perspectiva da necessidade do usuário e separação dessa necessidade em grupos, ou casos de uso. A rede deve conhecer as necessidades dos consumidores da fatia de rede (NSC) e a partir daí enviar essa informação para a camada de gerenciamento e orquestração do fatiamento de redes. Após essa etapa, um NST deve estar preenchido e pronto para ser utilizado pela camada de gerenciamento de orquestração da rede, a fim de criar uma NSI dedicada a um ou mais grupos, ou casos de uso da rede.

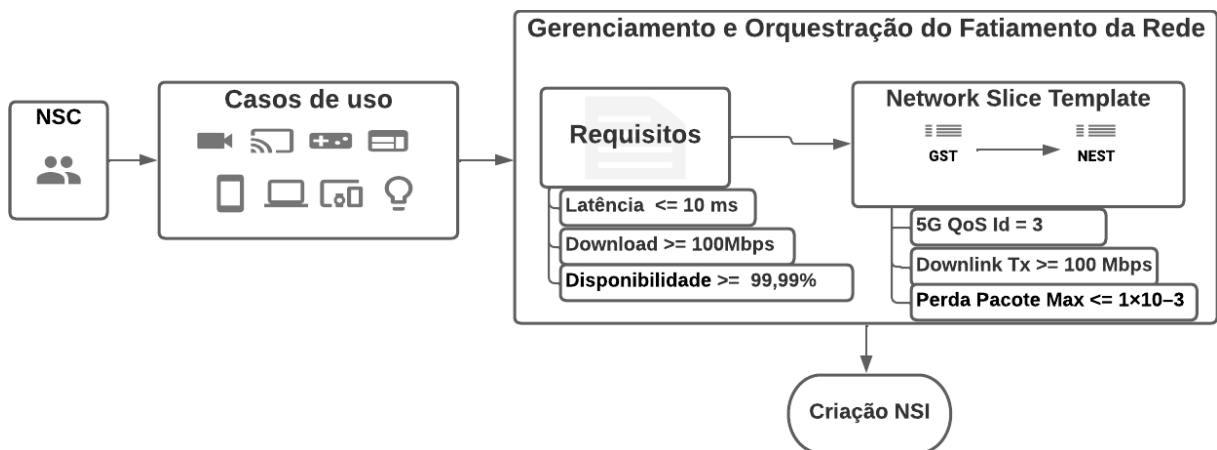


Figura 9 Arquitetura da criação de uma NSI a partir de um NST para casos de uso específicos (baseado em [6]).

Já que múltiplos NSIs podem co-existir em uma rede 5G, servindo múltiplos cenários de uso, múltiplos NSTs servem como modelos caso seja necessário criar novas instâncias de fatias de rede.

4.1.4 Principais Atributos GST

4.1.4.1 Descrição dos Atributos

Um GST é composto por diversos atributos e ao se preencher estes atributos com valores, é criado um NEST. Cada atributo é caracterizado por:

1. **Presença:** obrigatório, condicional ou opcional;
2. **Categoria e Etiqueta:** no geral atributos podem ser categorizados em características ou escalabilidade:
 - **Atributos de Características:** caracterizam uma NSI (ex.: taxa de transferência, latência) e independem do NSC e do NSP;
 - **Atributos de Escalabilidade:** provê informação sobre escalabilidade da fatia (ex.: número máximo de UEs) e são específicos para o NSC e o NSP.

Tais atributos podem ainda conter uma etiqueta para marcação (*tag*). A etiquetagem, ou marcação, provê informações adicionais sobre a natureza de cada atributo e pode ser:

- **Etiquetas relacionadas ao desempenho:** especificam os indicadores de desempenho (KPIs - *Key Performance Indicators*) suportados pela fatia (ex.: taxas de transferência, latência);
- **Etiquetas relacionadas à função:** especificam as funcionalidades que a fatia provê (ex.: posicionamento, predição de desempenho);
- **Etiquetas relacionadas ao controle e gerenciamento:** especificam quais são os métodos fornecidos para o NSC para controle e gerenciamento da NSI. Este atributo é relevante após a instanciação da fatia.

Esta dissertação não abordará todos os quarenta atributos GST, de forma que serão abordados apenas aqueles atributos que fazem parte das NESTs que serão propostas nesta

dissertação. Ainda mais, a dissertação pretende propor uma NEST do tipo eMBB para uso de dispositivos móveis genéricos (*smartphones*), uma NEST do tipo uRLLC para veículos com comunicação V2X e uma NEST do tipo mMTC para sensores IoT genéricos; portanto, apenas os atributos referentes a tais casos de uso e serviços serão descritos nesta seção.

4.1.4.2 Atributos de um GST

Os atributos e valores permitidos contidos nesta seção constam do documento GST (GSMA NG.116 v5.0 [6]) e da especificação técnica 3GPP ETSI TS 123 501 [7]; portanto, trata-se dos atributos criados pelo 3GPP para o IMT-2020. Esta seção se destina a descrever quais são os atributos presentes nos NSTs (NESTs) considerados nesta dissertação. A Tabela 3 mostra em detalhes os parâmetros aceitos para preenchimento de cada atributo, tais como: unidade de medida e valores permitidos. Os seguintes atributos são considerados nesta dissertação:

1. **Disponibilidade** (*Availability*): valor percentual para a quantidade de tempo que a comunicação fim-a-fim da rede é oferecida, obedecendo o QoS acordado, dividido pela quantidade de tempo total que o serviço deve ficar disponível e oferecer serviços fim-a-fim para o usuário (geralmente 24 horas por dia durante os 7 dias da semana). Valores típicos são: 1) Baixo: $< 90\%$; 2) Médio: $90-95\%$; 3) Alto: $> 95-99,999\%$; 4) Muito alto: $> 99,999\%$.
2. **Qualidade do serviço da fatia** (*Slice quality of service*): define os parâmetros de QoS relevantes suportados pela fatia de rede. Para alguns destes parâmetros existe um valor padrão definido pelo 3GPP [6]. Ao selecionar um valor para 5QI (*5G QoS Identifier*), os parâmetros atrelados ao 5QI, abordados a seguir, serão preenchidos com valores de QoS padrões definidos na Tabela 5.7.4-1 da especificação ETSI TS 123 501 [7].
 - **3GPP 5QI** (*5G QoS identifier*): é a referência para QoS das redes 5G. São ao todo 27 perfis de QoS diferentes e os valores de 5QIs são padronizados pela especificação técnica ETSI TS 123 501 [7]. Ao selecionar um valor para 5QI, automaticamente os valores referentes aos parâmetros de QoS são preenchidos de acordo com a tabela de valores padronizados para 5QIs (Tabela 5.7.4-1) da

especificação ETSI TS 123 501 [7]. Alguns exemplos de valores são: 1, 2, 3, 9, 85;

- **Tipo de Recurso** (*Resource Type*): determina se recursos dedicados da rede relacionados ao fluxo QoS GBR (*Guaranteed Flow Bit Rate*) são alocados permanentemente, como por exemplo uma função de controle de admissão de pacotes na RAN (ver Seção 5.7.3.2 da especificação 3GPP TS 23.501 [7]). Valores podem ser: 1) **GBR** (*Guaranteed Bit Rate*), ou fluxo de bits garantido (ex.: serviços críticos de transmissão vídeo); 2) **Delay critical GBR**, ou GBR para serviços críticos em relação ao atraso (ex.: transporte inteligente e/ou autônomo); 3) **Non-GBR**, ou sem GBR (ex.: comunicação por voz);
- **Latência máxima fim-a-fim**, ou **Limite para Atraso de Pacote - PDB** (*Packet Delay Budget*): PDB define um limite de atraso entre o UE e o UPF, terminando na interface N6 antes de chegar ao DN (ver Figura 4); ou seja, termina antes da camada de aplicação destino e não leva em consideração atrasos nesta camada. Em outras palavras, é a latência fim-a-fim do plano de usuário (*user plane latency*) definida pelo 3GPP (ver Seção 1.2.2 e Tabela 1), ou latência do plano de dados (*data plane latency*), que engloba o tempo que o pacote demora para trafegar desde a fonte até o destino, considerando atrasos na RAN, núcleo da rede (*Core Network*) e rede de transporte. Para cada valor de 5QI escolhido existe um PDB pré-definido. Alguns exemplos de valores são: $20 * 10^{-2}$ s (direção cooperativa) ou $30 * 10^{-3}$ s (realidade aumentada);
- **Taxa de Erro dos Pacotes - PER** (*Packet Error Rate*): representa o requisito de confiabilidade (*reliability*) definido pelo 3GPP e abordado na Seção 1.2.3. O PER está relacionado a PDUs (ex.: pacotes IP) que foram processados pelo remetente mas não foram entregues ao destino com sucesso, ou seja, à taxa de falha na entrega dos pacotes, onde **Confiabilidade = 100% - PER**. O PER para downlink e uplink é o mesmo para todos os 5QIs disponíveis. Para QoS do tipo GBR crítico, um pacote com atraso maior do que o PDB é tido como perdido. Alguns exemplos de valores são: $1 * 10^{-6}$ ou 0,0001% (dados de missão crítica) e $1 * 10^{-2}$ ou 1% (conversas por voz);
- **Taxa Máxima de Perda de Pacotes** (*Maximum Packet Loss Rate*): se refere à máxima taxa permitida para a perda de pacote de acordo com o QoS

tolerado para downlink e uplink. Este valor é fornecido pela tabela 5QI apenas para fluxo QoS do tipo GBR para serviços de mídia de voz especificamente. Por se tratar de um atributo dedicado a 5QIs específicos e não utilizados nesta dissertação, não será avaliado durante a fase de simulação e avaliação de desempenho nos Capítulos 5 e 6;

- **Nível de Prioridade** (*Priority level*): indica a prioridade sobre o agendamento de recursos entre os fluxos QoS. O nível de prioridade pode ser usado para diferenciar todos os fluxos QoS de um mesmo UE, assim como para diferenciar os fluxos QoS para diferentes UEs. O nível de prioridade pode ser usado também para distribuir recursos dentre os fluxos QoS GBR. O nível mais baixo, como por exemplo 1 (um), corresponde à maior prioridade dentro da rede. O valor é fornecido para cada 5QI disponível, como por exemplo: 10 (sinalização IMS) ou 30 (jogos em tempo real);

3. **Continuidade de Sessão e Serviço - SSC** (*Session and Service Continuity support*): este atributo define a continuidade de uma sessão. Pode haver três modos SSC:

- **SSC modo 1** - a rede preserva a conectividade do serviço fornecido ao UE (o IP é preservado);
- **SSC modo 2** - a rede pode liberar a conectividade fornecida ao UE e assim liberar a sessão (o IP alocado para o UE pode ser liberado);
- **SSC modo 3** - mudanças no plano de usuário podem ser visíveis ao UE, porém a rede garante que o UE não sofra perda de conectividade (o IP alocado para o UE não é preservado em caso de mudança da sessão).

4. **Velocidade Suportada pelo Dispositivo** (*device velocity*): reflete o requisito de mobilidade do IMT-2020, apresentado na Seção 1.2.3. É a velocidade máxima suportada pela rede no qual a rede ainda alcança o QoS definido e consegue realizar a transferência entre diferentes gNodeBs/RANs sem perder a conectividade. Exemplos de valores são: 0 km/h (estacionário), 10 km/h (pedestres), 120 km/h (veicular) e 500 km/h (veicular com alta velocidade). É um atributo presente na *release 17* 3GPP do tipo para estudo posterior (*for further study*), ou seja, um atributo ainda em aberto;

5. **Suporte a Aplicações de Missão Crítica** (*Mission critical support*): aplicações de missão crítica levam à priorização da NSI sobre outras fatias, tanto no plano de controle (*control plane*) quanto no plano de usuário (*user plane*);
6. **Nível de Isolamento**: é um dos atributos esperados do fatiamento de redes. Uma NSI pode ser logicamente e/ou fisicamente isolada de outras NSIs, em sua totalidade ou parcialmente. Portanto, este atributo descreve os diferentes tipos de isolamento. É um atributo presente na *release 17* 3GPP do tipo para estudo posterior, ou seja, um atributo ainda com estudos em andamento e em aberto. Pode ser dos seguintes tipos:
 - **Isolamento Físico** - fatias de rede são fisicamente isoladas, utilizando, por exemplo, diferentes hardwares e localização dos servidores. O isolamento físico pode ser de: 1) processos/threads; 2) memória; 3) armazenamento ou rede;
 - **Isolamento Lógico** - fatias de rede são logicamente isoladas. O isolamento lógico pode ser de: 1) recursos virtuais (máquinas virtuais - VMs); 2) funções de rede (NFs); 3) serviço (dados de NSC são isolados de outros NSCs, mas NFs são compartilhados);
7. **Monitoramento de desempenho**: este atributo fornece a capacidade para o NSC monitorar indicadores de desempenho-chave (KPIs) da rede. Tais KPIs refletem o desempenho fim-a-fim da rede e qualidade do serviço. Para este atributo, deve-se monitorar a disponibilidade da rede (*availability*) e deve ser informada a frequência no qual tal KPI deve ser monitorado;
8. **Densidade de UE (por km^2)**: este atributo descreve o número máximo de dispositivos conectados à rede por área em quilômetro quadrado (km^2) que a NSI suporta. Exemplos de valores são: 10000 UEs por km^2 (indústria) e 1000000 UEs por km^2 (IoT);
9. **Taxa de Transferência de Dados por UE para Downlink** (*Downlink throughput per UE*): atributo descreve a taxa mínima de transferência de dados por UE (download) suportada pela NSI. Este atributo deve ser acompanhado do atributo SSC. Exemplos de valores são: 50 000 kbps (SSC 1), 400 000 kbps (SSC 2) e 1 000 000 kbps (SSC 3);

10. **Taxa de Transferência de Dados por UE para Uplink** (*Uplink throughput per UE*): atributo descreve a taxa mínima de transferência de dados por UE (upload) suportada pela NSI. Este atributo deve ser acompanhado do atributo SSC. Exemplos são: 10 000 kbps (SSC 1), 100 000 kbps (SSC 2) e 250 000 kbps (SSC 3);
11. **Tamanho Máximo de Pacote Suportado** (*packet maximum size per UE*): este atributo descreve o tamanho máximo dos pacotes (em bytes) suportado pela NSI e pode ser um importante atributo para URLLC e mMTC, pois indica a MTU (*Maximum Transfer Unit*) suportada pela fatia. Não incluir este atributo significa configurar a MTU igual a 1500 Bytes. Exemplos são: 40 Bytes para IoT, 160 Bytes para URLLC com latência de 5 ms, 1500 Bytes para eMBB.

A Tabela 3 mostra todos os atributos abordados com as respectivas unidades de medida, valores permitidos e etiquetas.

Tabela 3 Atributos GST e seus respectivos valores (baseado em [6]).

Atributo		Unidade de Medida	Valores Permitidos	Etiquetas	Presença
Disponibilidade		percentual	Qualquer valor desejado	Atributo de Característica / Função	Opcional
Qualidade do serviço da fatia	3GPP 5QI - 5G QoS identifier	NA	ver tabela 5QI (tabela 5.7.4-1) da especificação técnica 3GPP TS 23.501	Atributo de Característica / Função	Opcional
	Limite para Atraso de Pacote PDB	Segundos			Condicional
	Taxa de Erro dos Pacotes PER	NA			Condicional
	Taxa Máxima de perda de Pacotes	NA			Opcional
	Nível de Prioridade	NA			Opcional
	Tipo de Recurso	NA	GBR / Delay critical / GBR Non-GBR		Conditional
Continuidade de Sessão e Serviço - SSC		NA	SSC modo 1 / SSC modo 2 / SSC modo 3	Atributo de Característica / Função	Opcional
Suporte MMTel		NA	Suportado / Não Suportado	Atributo de Característica / Função	
Velocidade Suportada pelo Dispositivo		km/h	Qualquer valor desejado	Atributo de Característica / Desempenho	
Suporte à aplicações de missão crítica		NA	Não-Missão Crítica / Missão Crítica	Atributo de Característica / Função	
Nível de Isolamento		NA	Sem Isolamento / Isolamento Físico / Isolamento Lógico	Atributo de Característica / Função	
Monitoramento de desempenho		NA	Taxa de Sucesso das Requisições	Atributo de Característica / Função	
Densidade de UEs		UEs/km2	Qualquer valor desejado	Atributo de Escalabilidade	
Taxa de Transferência de dados por UE para Downlink		kbps	Qualquer valor desejado	Atributo de Característica / Desempenho	
Taxa de Transferência de dados por UE para Uplink		kbps	Qualquer valor desejado		
Tamanho máximo de pacote		Bytes	Qualquer valor desejado		
Modo de comunicação V2X		NA	Não suportado / Sim - EUTRA / Sim - NR / Sim - NR e E-UTRA	Atributo de Característica / Função	

4.2 Cenários de Uso da Rede 5G Propostos para Criação das NSTs

Conforme apresentado na Seção 1.2.1.1, a recomendação ITU-R M.2083 [1] aborda os principais cenários de uso para a tecnologia 5G. Tais cenários são agrupados em três categorias de casos de uso básicos: 1) **eMBB**; 2) **URLLC**; 3) **mMTC**.

Para esta dissertação, estes cenários base são convertidos em cenários de uso macro, baseados nos ambientes de teste (*test environments*) e implantação (*deployment scenarios*) do IMT-2020 e 3GPP [9], respectivamente. Os ambientes de teste do IMT-2020 e os cenários de implementação do 3GPP são definidos como uma combinação de um dos três cenários de uso base mais o tipo de ambiente e/ou geografia, transformando os três cenários de uso base em uma vasta ramificação de cenários que levam em consideração a geografia (ex.: urbano ou rural) ou o ambiente (ex.: interior ou exterior).

Para esta dissertação, serão utilizados cenários de uso urbanos macro, que de acordo com o 3GPP são cenários de uso gerais da rede para áreas amplas e urbanas [8] tanto em locais abertos quanto fechados. Cenários macro tem foco em cobertura contínua para prover seus serviços, utilizando-se de macro-células [16]. Os cenários são:

1. Cenário eMBB Urbano Macro [9] [16] [8]: caso de uso dedicado ao serviço de banda larga móvel aprimorada para ambientes urbanos macro (*Urban macro eMBB*). Trata-se de um cenário geral de uso do serviço para ampla cobertura contínua dentro de região urbana (cidades), sendo os usuários pedestres ou veículos, onde as células RAN são mais espaçadas e possuem maior cobertura em toda a área urbana, através da implementação de antenas TRxPs (*Transmission Reception Points*) nos telhados de prédios ou locais altos. Alguns dos serviços prestados por esse cenários são descritos na Seção 1.2.1.1, como por exemplo: realidade aumentada (*AR - Augmented Reality*) e vídeo sob demanda (VoD). Este cenário é baseado no cenário de implementação urbano macro para eMBB do 3GPP, presente na Tabela 7.1-1 em [8];
2. Cenário URLLC Urbano Macro [9] [14] [16]: caso de uso dedicado a serviços gerais que requerem comunicações com baixa latência, com cobertura contínua e ampla nas cidades. Exemplos de serviços são mostrados na Seção 1.2.1.1, entre estes: controle remoto de máquinas e dispositivos (*Remote control*) e jogos em tempo real (*real time gaming*). Este cenário é baseado no cenário de teste urbano macro URLLC do IMT-2020 [9] [14];

3. Cenário mMTC Urbano Macro [9] [16] [14]: caso de uso dedicado ao serviço de comunicações massivas para ambientes urbanos (*Urban coverage for massive connections*), com foco em cobertura contínua e suporte a dispositivos mMTC (ex.: IoT) para alta densidade de conexões. Este cenário é baseado no ambiente de teste urbano macro mMTC do IMT-2020 e no cenário de implementação urbano para mMTC do 3GPP [9] [14].

4.3 Propostas de NSTs

Esta dissertação objetiva propor três NSTs, cada um dedicado a atender um dos três cenários de uso do serviço 5G discutidos na Seção 4.2, conforme mostra a Tabela 4. Para especificar os requisitos do serviço, foi realizada uma pesquisa detalhada em fontes diversas dentre artigos, especificações e relatórios técnicos [6–8, 14–16, 30], a fim de propor valores para os atributos a serem preenchidos em cada NST.

Cada cenário de uso presta diferentes serviços e demanda diferentes requisitos, portanto, os valores de um mesmo atributo podem diferir entre as três propostas de NST. Dentre as recomendações e requisitos que serviram como fonte de dados de pesquisa para esta dissertação de mestrado, estes [2, 7, 9, 15, 16] indicam quais os SLAs a serem seguidos para cada tipo de uso do serviço, além de dar exemplos de serviços prestados para cada cenário de uso. Deste modo, a partir da pesquisa realizada, é possível atribuir valores aos atributos dos NSTs propostos nesta dissertação, onde, os NSTs terão a função de servir como documento base de requisitos a serem seguidos para o processo de instanciação de fatias de rede (NSIs), mostrado na Seção 4.1.2.

Em sequência, através da simulação de uma rede 5G, abordada no Capítulo 5, podemos coletar métricas de desempenho dos atributos mensuráveis e analisá-las no Capítulo 6, para avaliar se a rede alcança os requisitos estabelecidos pelas NSTs.

Os NSTs desta dissertação foram criados baseando-se nos requisitos das redes 5G definidos pelo IMT-2020 e 3GPP, na Tabela 1, levando em consideração os diversos cenários de uso da rede. Deste modo, afirmar que a rede simulada alcança os requisitos estabelecidos pelas NSTs propostos nesta dissertação na Tabela 4 significa afirmar que a rede simulada alcança os requisitos mínimos definidos pelo IMT-2020 e 3GPP.

Dos diversos atributos de um GST/NST, Seção 4.1.4.2, quinze foram considerados na proposição das NSTs dentre os principais atributos de um GST [6, 7]: i) 3GPP 5QI

(*5G QoS Indicator*); ii) Tipo do recurso - GBR (*Guaranteed Bit Rate*), Delay Critico GBR e Non-GBR; iii) Taxa de Error de Pacote, PER (*Packet Error Rate*); iv) Limite de Atraso de Pacote, PDB (*Packet Delay Budget*); v) Taxas de Transferências de dados para Download; entre outros. A Tabela 4 apresenta os três NSTs propostos, com os valores dos atributos detalhados. É proposta uma NST para cada caso de uso discutido na Seção 4.2.

Tabela 4 Proposta de NSTs.

Atributos do GST		Cenários de Uso			Referências
		eMBB Urbano Macro	URLLC Urbano Macro	mMTC Urbano Macro	
SST		1	2	3	[8]
Disponibilidade		Alta: >95-99.999%	Muito alta: >99.999%	Média: 90-95%	[7], [21]
Qualidade do serviço da fatia	3GPP 5QI	3	85	9	[7], [8], [19], [20], [21], [27], [28]
	Tipo de Recurso	GBR	Atraso Crítico GBR	Não-GBR	
	Limite para Atraso de Pacote (PDB)	$50 \cdot 10^{-3}$ segundos	$5 \cdot 10^{-3}$ segundos	x	
	Taxa de Erro dos Pacotes (PER)	$1 \cdot 10^{-3}$ (0.1%)	$1 \cdot 10^{-5}$ (0.001%)	$1 \cdot 10^{-6}$ (0.0001%)	
	Nível de Prioridade	30	18	90	[8]
Continuidade de Sessão e Serviço (SSC mode)		1	1	2	[8]
Velocidade do Dispositivo Suportada (mobilidade)		120 km/h - veicular	120 km/h - veicular	0 km/h - Estacionário	[7], [8], [19], [20], [21], [27]
Suporte a Aplicações de Missão Crítica		Serviços de missão não-crítica			[8]
Nível de Isolamento		Lógico	Lógico	Lógico	[7]
Densidade de UEs		25 000 dispositivos por km ²	4 000 dispositivos por km ²	1 000 000 dispositivos por km ²	[21]
Taxa de Transferência de Dados por UE para Downlink		50 000 kbps	x	x	[19], [20], [21]
Taxa de Transferência de Dados por UE para Uplink		25 000 kbps	x	x	
Comprimento Máximo de Pacote		1 500 Bytes	160 Bytes	160 Bytes	[8]

5 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE REDE 5G

O objetivo deste capítulo é apresentar os softwares e metodologia utilizados para a simulação de redes 5G fatiadas. Ainda mais, o capítulo apresenta as ferramentas de coleta, medição e análise dos dados empregadas durante as simulações.

Simulamos uma rede 5G fatiada para testar se uma fatia de rede é capaz de alcançar os requisitos estabelecidos pelas propostas de NSTs especificados no Capítulo 4; ou seja, queremos testar a hipótese de que a NSI é capaz de atender aos requisitos estabelecidos nas NSTs propostas. Para simular a rede 5G usamos os softwares Free5gc [3,17] e UERANSIM [31]. Esses simuladores usam os protocolos de comunicação em conformidade com as padronizações de redes 5G definidas pelo 3GPP [3,7,17,31], o que torna possível integrá-los. Em conjunto, os softwares utilizados simulam o núcleo da rede 5G e a rede de acesso 5G, formando assim uma rede 5G completa de acordo com a arquitetura de redes 5G referência do 3GPP [7].

5.1 Recursos Computacionais

Nas simulações, empregamos uma máquina com 14 GB de memória RAM e 12 CPUs AMD Ryzen 5 PRO com o sistema operacional Ubuntu 20.04 versão de kernel 5.0.0-23-generic. Usando o KVM (*Kernel-based Virtual Machine*), foram criadas duas máquinas virtuais (VMs) conectadas entre si por uma ponte (*network bridge*), seguindo [3], sendo a VM#1 o Core da rede 5G e a VM#2 a RAN (gNodeB e UEs), conforme retrata a Figura 10.

Os softwares de simulação apresentados na Seção 5.3.1 têm como requisitos mínimos de hardware e software [3,31]: a) CPU com processador Intel i5, AMD Ryzen 5 ou superior; b) memória RAM de 4 GB e armazenamento de 160 GB; c) interface de rede de 1Gbps ou superior; d) sistema operacional Linux Ubuntu 18.04 ou mais recentes com kernel 5.0.0-23-generic ou 5.4.x; e) linguagem de programação go (golang) versão 1.12.9, compilador gcc 9.0.0 ou mais recente, compilador cMake 3.17 ou mais recente e emulador QEMU 2.1.1.

Os recursos computacionais escassos limitaram a simulação a apenas uma rede de núcleo e seus elementos, uma gNodeB na rede RAN e no máximo 500 UEs. Mais detalhes sobre as limitações são abordados na Seção 5.4.

5.2 Arquitetura da Simulação

A Figura 10 mostra a arquitetura da simulação, retratando as conexões entre elementos de rede Core e RAN, além de mostrar uma representação de UEs conectados às diversas fatias de rede simbolizadas por diferentes S-NSSAIs (SSTs).

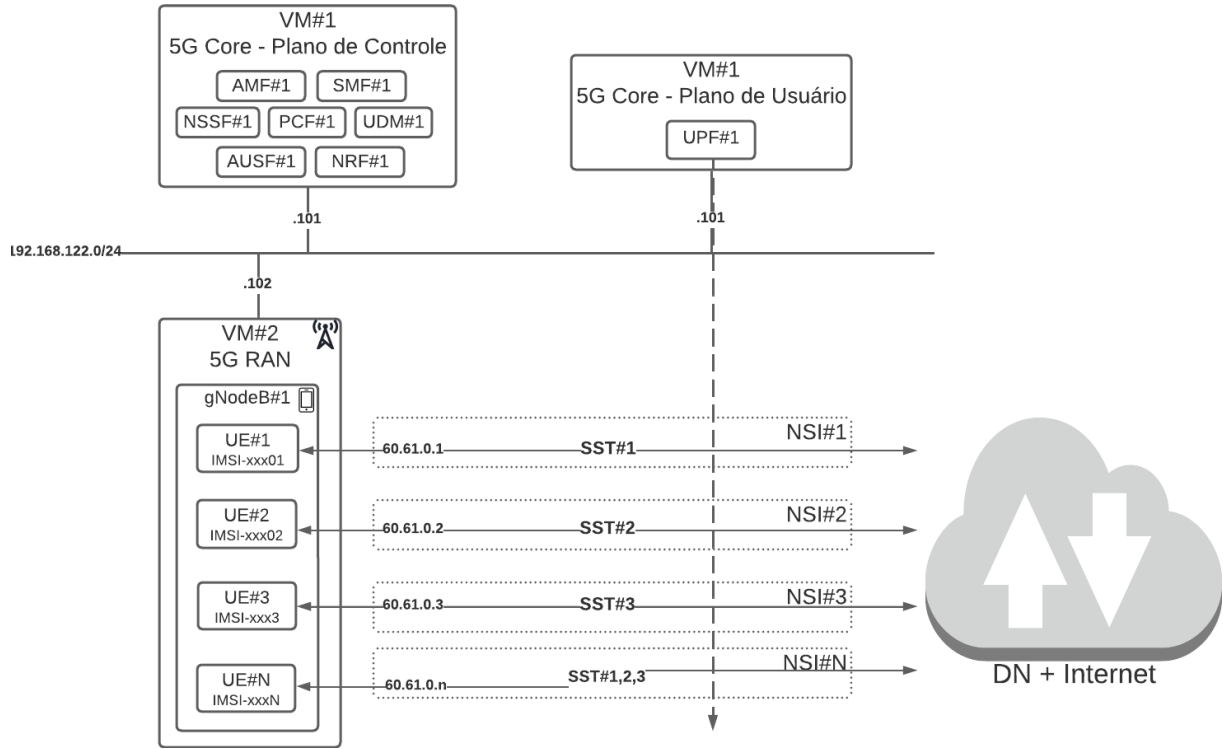


Figura 10 Arquitetura da simulação fim-a-fim da rede 5G.

Os elementos do plano de controle da rede de núcleo e os elementos da plano de usuário são representadas separadamente na arquitetura; entretanto, ambos os planos e seus respectivos elementos estão rodando sobre a VM#1. Isso acontece pois do ponto de vista de simulação do núcleo da rede, essa é a abordagem mais viável, dada a limitação de recursos computacionais. Por outro lado, os elementos de RAN, sendo estes gNodeB e UEs, rodam sobre a VM#2; portanto, a VM#2 suporta todos os até 500 UEs ativos e trafegando dados na rede durante as simulações.

Para exemplificar o uso do fatiamento da rede, a arquitetura retrata os UEs conectando-se em diferentes fatias da rede através dos diferentes SSTs.

5.3 Softwares e Ferramentas de Simulação

5.3.1 Softwares de simulação da rede RAN e Núcleo 5G

Free5gc e UERANSIM são os dois softwares mais importantes e simulam a rede 5G fim-a-fim. Tais softwares foram criados pela comunidade e/ou por entidades ligadas às áreas de tecnologia e comunicação, sendo disponibilizados para o público no formato de software de código aberto (*open source*), o que dá a liberdade de estudar e modificar o software para qualquer finalidade.

O Free5gc implementa o núcleo da rede 5G com todos seus elementos e apresenta suporte ao fatiamento das redes [3, 13]. Apesar de ter sido disponibilizado recentemente, já há alguns trabalhos que o empregam em pesquisas para avaliar o desempenho de redes 5G [3, 13, 17]. Por sua vez, o UERANSIM é um dos simuladores de RAN indicados pelo Free5gc para criar redes 5G fim-a-fim simuladas por software. A seguir são apresentadas outras características desses simuladores:

1. **Free5gc**: software de código aberto sob licença Apache disponível em [3], criado com o intuito de simular o comportamento do núcleo, ou core, das redes móveis de 5^a geração. O objetivo final do projeto é implementar um núcleo 5G completo, assim como definido pelo 3GPP it Release 15 em diante [32]. Algumas das principais características do Free5gc [3, 17] são:
 - possui importantes entidades que apoiam o projeto, tais como Fujitsu e ONF (Open Networking Foundation). Atualmente, tem como principal contribuidor uma das maiores universidades de Taiwan, a National Chiao Tung University (NCTU);
 - segue as padronizações para redes de núcleo 5G definidas pelo 3GPP *Releases* 15 (R15), 16 (R16) e 17 (R17) [32];
 - oferece capacidade de implementação via software e simulação completa da rede de núcleo (*Core*) 5G, com a simulação das principais NFs (AMF, SMF e PCF) descritas na Seção 3.2.6;
 - possui suporte ao fatiamento das redes, através da divisão da rede 5G em fatias de redes lógicas ao configurar diferentes SSTs para os elementos de rede de núcleo AMF, SMF e NSSF;

- simulações com até 500 UEs mostram ser um software estável para o ambiente simulado, além de já ter sido utilizado pela academia para simulações de redes 5G e estudos sobre fatiamento das redes, possuindo maturidade e adoção na comunidade científica [3, 17];
- possui um webconsole para gerenciamento da configuração dos UEs nos bancos de dados da rede;

2. **UERANSIM**: software de código aberto sob licença GPL disponível em [31], criado com o intuito de simular o comportamento da rede de acesso (RAN) para as redes 5G com as características [31]:

- oferece capacidade de simulação completa para redes 5G de acesso RAN, contendo simulador de estações rádio base (eNodeB para 4G e gNodeB para 5G) e simulador de equipamentos dos usuários (UE). O UERANSIM não especifica qual o tipo ou modelo de UE é implementado, porém, cita que o UE do simulador é considerado como sendo um telefone móvel genérico;
- simulações com até 500 UEs mostram ser um software estável para o ambiente simulado e implementa uma rede 5G modo *standalone* seguindo as padronizações para redes de acesso 5G definidas pelo 3GPP *Releases* 15 (R15), 16 (R16), 17 (R17) e 18 (R18);
- a RAN implementa protocolo de encapsulamento GTP (*GPRS Tunnelling Protocol*) com suporte IPv4 para sessões;
- A interface de rádio não implementa os protocolos 5G abaixo da camada RRC (*Radio Resource Control*). Portanto, as camadas PHY, MAC, RLC e PDCP não são implementadas no UERANSIM;
- não implementa simulação espacial, portanto, não considera posicionamento dos UEs e grandezas como a distância do UE para gNodeB ou a área de cobertura da RAN;
- não há informação clara sobre como a gNodeB do simulador distribui recursos para os UEs, como por exemplo largura de banda. Portanto, considera-se que as únicas limitações de acesso ao recurso na RAN são os próprios limites de hardware e software da simulação.

- é o simulador de RAN indicado pelos criadores do projeto Free5gc para ser utilizado em conjunto com o simulador de núcleo Free5gc e esta forma, criar uma rede 5G fim-a-fim via software.

Nota: Até o momento escrita desta dissertação, nenhum dos softwares de código aberto pesquisados e disponíveis para a simulação de redes 5G (núcleo e acesso) alcançaram maturidade suficiente para implementar a camada de orquestração e gerenciamento do fatiamento da rede. Isso significa que não é viável criar NSIs utilizando-se das NSTs propostas nesta simulação. Entretanto, para alguns dos requisitos propostos nas NSTs, existe a possibilidade de preencher manualmente os valores dos atributos nos arquivos de configuração dos elementos da rede durante o processo de configuração dos elementos de rede e da conexão dos UEs, descrito na Seção 5.3.1.1. Os parâmetros configuráveis são: SST (S-NSSAI), 3GPP 5QI e taxa máxima de transferência de dados (AMBR - *Aggregate Maximum Bit Rate*) de download/upload para recursos Não-GBR.

5.3.1.1 Instalação, Configuração, Conexão e Uso dos Softwares de simulação da rede 5G

Conforme descrito na seção anterior, os simuladores Free5gc e UERANSIM seguem as padronizações 5G definidas pelo 3GPP para o IMT-2020; portanto, com exceção do rádio que não simula a camada física, os protocolos de comunicação para ambos simuladores estão em conformidade com os protocolos oficiais definidos para o 5G. Embora sejam dois simuladores provenientes de diferentes projetos e organizações, a característica de conformidade com os padrões 3GPP possibilitou a conexão entre os simuladores via interfaces N2 e N3, que são interfaces padrão de comunicação entre as funções RAN e AMF/UPF da rede 5G, conforme retrata a Figura 4.

Instalação dos Simuladores

A instalação do software simulador Free5gc deve ser feita seguindo as recomendações contidas em [3], que vão desde recomendações mínimas de hardware e software, passando por requisitos de versão de kernel do Linux e a necessidade de instalação de um banco de dados (mongoDB), para armazenar dados da rede de núcleo referentes as informações dos UEs, como, por exemplo, IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), que é o identificador de assinante global em redes móveis. Faz-se necessário seguir a documentação oficial do simulador para baixar e compilar o software, realizando a instalação de: a) funções do

plano de controle da rede (AMF, SMF e demais); b) função do plano de usuário (UPF); c) servidor web (*webconsole*) que serve para adicionar, remover e gerenciar os assinantes da rede 5G.

Para instalar o simulador UERANSIM, basta realizar os passos em [31], respeitando os requisitos mínimos de hardware/software e dependências necessárias. É necessário baixar o projeto e compilar o simulador para instalar: a) gNodeB que simula a interface de radio; b) UEs, que simulam os dispositivos genéricos dos usuários.

Configuração e Conexão entre Free5gc e UERANSIM

Para interligar os simuladores devemos: 1) configurar os IPs dos elementos de rede Core (AMF, UPF) e os IPs da RAN (gNodeB) para permitir suas interconexões; 2) configurar os UEs do lado da RAN, atribuindo, por exemplo, os IMSIs e as S-NSSAIs correspondentes a cada fatia da rede (ver Seção 3.2.4); 3) criar os UEs nos bancos de dados de usuários da rede de núcleo (UDM, AUSF e UDR), utilizando-se da ferramenta Free5gc-webconsole para criar UEs manualmente nos bancos da rede ou a ferramenta Free5gc-cli para criar UEs via linha de comando; entre outros passos a serem seguidos contidos na documentação oficial do Free5gc [3]. A Figura 10 retrata as conexões entre elementos da rede core e RAN, além de mostrar uma representação de UEs conectados às diversas fatias da rede simbolizadas por diferentes S-NSSAIs (SSTs).

As principais configurações para o correto funcionamento dos elementos de rede e das fatias da rede encontram-se no Anexo A.

Suporte ao Fatiamento da Rede Durante as Simulações

O Código 2, no Anexo A, mostra um exemplo de configuração do elemento de rede AMF e o Código 6 do mesmo anexo mostra a configuração do UE. São duas configurações importantes para a correta configuração e simulação dos cenários de uso propostos para simulação na Seção 4.2. Cada UE simulado deve se conectar à rede 5G através de uma instância de fatia de rede (NSI) dedicada, portanto, cada UE deve informar à rede qual tipo de serviço deseja usar, passando para a rede sua informação S-NSSAI, conforme descreve a Seção 3.2.4. Deste modo, os parâmetros SST e SD devem ser fornecidos à rede, caso contrário, o UE não consegue se conectar na NSI.

É válido observar que no arquivo de configuração da RAN gNodeB (ver Código 5

do anexo A) e da maioria dos elementos da rede de núcleo, como por exemplo o AMF (ver Código 2), deve-se incluir quais S-NSSAIs são permitidos e suportados pela rede. Só então o UE poderá escolher entre um deles, conforme mostrado no Código 6. Se o UE tentar selecionar um S-NSSAI que não existe, ou seja, uma NSI inexistente na rede, a simulação falha. A criação e/ou a configuração de novos S-NSSAIs é um recurso disponibilizado pelos simuladores.

Executando os Simuladores de RAN e Core

Após configurações básicas e conexão entre simuladores terem sido implementadas, faz-se necessário executar os simuladores a fim de criar a rede 5G fim-a-fim. Para tal, existem alguns requisitos básicos para configuração de rede no Linux e de firewall que precisam ser implementados, conforme constam em [3] e [31]. A partir daí, é possível rodar os simuladores com os seguintes comandos listados no Código 1.

```
# Na VM que contém o núcleo Core da rede 5G
cd ~/Free5gc
./run.sh
...
# Na VM que contém a rede RAN 5G (gNodeB + UE)
## Para interface radio gNodeB
cd ~/UERANSIM
build/nr-gnb -c config/Free5gc-gnb.yaml
## Para equipamento usuário UE
cd ~/UERANSIM
sudo build/nr-ue -c config/Free5gc-uexxx.yaml
# Onde xxx é o número do UE de 001 até 500 UEs
```

Código 1: Comandos para executar simuladores e criar rede 5G fim-a-fim.

As configurações de elementos da rede e UEs mostradas nos códigos do Anexo A, atendem a elementos individualmente dentro de uma rede 5G. Em outras palavras, caso existam elementos duplicados na simulação da rede, como por exemplo duas gNodeBs, deverão existir arquivos yaml duplicados para gNodeBs, cada um com seu respectivo arquivo de configuração, além de ser necessário rodar duas vezes o comando de execução da gNodeB para gerar duas redes de acesso. A lógica é igualmente válida para os UEs, logo, como a simulação desta dissertação utiliza de 1 a 500 UEs em paralelo, faz-se necessários clonar os arquivos de configuração dos UEs no simulador de RAN, de forma que haja 500 arquivos de configuração yaml. Antes de rodar o simulador de RAN com os respectivos

UEs, deve-se certificar de que: 1) os UEs foram criados nos bancos de dados da rede de núcleo e a rede de núcleo esteja rodando; 2) o simulador de RAN gNodeB esteja rodando e tenha se conectado com sucesso ao núcleo da rede 5G; 3) cada um dos 500 UEs seja executado apontando para seu respectivo arquivo de configuração yaml.

Uma rede 5G completa com capacidade de simulação fim-a-fim e suporte padrão básico para fatiamento deverá ser criada, conectando a RAN ao elementos de núcleo da rede, com configuração e suporte a NSI relacionada ao cenário eMBB Urbano Macro (cenário avaliado neste trabalho), sendo um S-NSSAI alocado para esta NSI. Como resultado, tem-se uma simulação capaz de conectar um equipamento de usuário (UE) à DN (internet), através de NSIs dedicadas aos casos de usos propostos, conforme exemplifica a Figura 10.

5.3.2 Ferramentas de auxílio aos testes de desempenho e análise de resultados

Softwares de medição e coleta de dados foram empregados durante a fase de simulação para medir os atributos mensuráveis da simulação, como por exemplo obter taxas de transferência de dados médias entre UEs e a rede Core 5G, medir a taxa de erro de pacotes e a latência da rede. Os softwares que auxiliam na medição de tais atributos são:

1. **iPerf3**: é um software que realiza a injeção de pacotes na rede para medir o desempenho de redes de computadores. É uma ferramenta disponível para sistemas operacionais Linux, que tem a capacidade de medir larguras de banda e taxas de transferências de dados médias em redes IP, taxas de erro de pacotes e latência (*round-trip-time*). Tal ferramenta também possibilita a implementação de ajustes nas características da rede (*tuning*), tais como: tamanho de buffer, ajuste para perda de pacote fixa na rede e outros ajustes referentes aos protocolos TCP, UDP e SCTP com uso de IPv4 ou IPv6. No contexto da simulação proposta por esta dissertação, o iPerf3 foi utilizado para testar as taxas de transferência máximas que um UE consegue alcançar ao se conectar na rede 5G, os tempos entre envio e recebimento dos pacotes na rede, latência e as taxas de erros de pacotes. Na simulação, considera-se sempre o UE sendo a fonte e a rede core o destino da rede, ou mais especificamente, o UPF dentro da rede core, que conecta o usuário à internet via DN (*Data Network*);

2. **Traffic Control com qdisc ou netem:** o tc é uma ferramenta do Linux utilizada para controlar parâmetros relacionados ao tráfego da rede tais como limitar a taxa máxima de transmissão de pacotes e/ou latência da rede.

Os comandos executados para testar e medir o desempenho dos atributos da rede são mostrados na lista de comandos do Código 7 do Anexo B. Ainda no Anexo B, o Código 9 mostra como o tc é utilizado para limitar as taxas máximas de transmissão e latência máxima.

5.4 Passos para execução da simulação de rede 5G e coleta de dados de desempenho

Para o caso de uso eMBB proposto na Seção 4.2, é simulada uma rede 5G de forma que os UEs se conectem à rede através de uma instância de fatia de rede (NSI) dedicada. Ao executar a simulação, é necessário que um UE informe o S-NSSAI desejado, ou seja, a NSI ao qual o UE deseja se conectar, informando um SST e um SD suportado pela rede RAN (gNodeB) e pela rede core, conforme mostra a Seção 5.3.1.1.

De acordo com [26], um fator importante para determinar a demanda do tráfego por km^2 dentro de uma área é a densidade da população. No entanto, nem todos os usuários demandam 100 Mbps ao mesmo tempo. Logo, faz-se necessário criar um modelo que represente o uso concorrente ou simultâneo da rede, que é representado pelo fator de atividade. Em outras palavras, o fator de atividade representa a demanda por uso simultâneo da células de uma rede RAN, para troca de dados (download/upload), pelos dispositivos conectados à rede, tais como smartphones, sensores e veículos.

Incrementamos o número total de UEs simultâneos conectados à rede até 500 UEs. Para valores superiores a 500 UEs, as simulações terminaram prematuramente por falta de memória e/ou capacidade de processamento. Logo, os recursos computacionais, Seção 5.1, limitaram as simulações à redes 5G servindo até 500 UEs simultaneamente conectados a uma única NSI, sem falhas e com um fator de atividade fixo. Fator de atividade (*activity factor*) da rede é o percentual de UEs ativos na rede simultaneamente, do total de UEs conectados à rede, onde UEs ativos significa que os UEs estão trafegando dados dentro da rede [8, 26].

Para implementar o fator de atividade, um script executado em paralelo com a simulação, apresentado no Anexo C, utiliza-se da ferramenta curl para trafegar dados

na rede (pacotes TCP) durante todo o período da simulação, realizando download de arquivos com 10 MB de tamanho do servidor iperf (Core network) na VM#1 para os UEs que trabalham como cliente iperf na VM#2 (RAN); os UEs operam de forma *round-robin* ao realizar download. O fator de atividade de 10% do total de UEs, para a maioria das simulações, foi escolhido a partir da estimativa de uso da rede 5G contida no relatório [26] (ver Código 10 do Anexo C para script de fator de atividade). Para a simulação que avalia o impacto do aumento do fator de atividade na rede, variamos o fator entre 10 e 40% do total de UEs.

A simulação deve ser executada de acordo com os seguintes passos:

1. criação da rede 5G fim-a-fim, de acordo com a Seção 5.3.1.1, a fim de criar uma NSI para o caso de uso eMBB proposto na Seção 4.2;
2. nesse ponto devem haver UEs conectados à rede de núcleo e DN através da rede RAN, cada UE (de 1 a 500) será conectado a uma das três NSIs criadas e seus respectivos cenários de uso (ver Seção 4.2 e Figura 10), sendo a NSI#1 para cenário eMBB urbano macro. A NSI#2 para cenário URLLC urbano macro e NSI#3 para cenário mMTC urbano macro não serão criadas, apesar de estarem retratadas na Figura 10;
3. limitar largura de banda de cada UE na rede, de modo à controlar a taxa máxima de transmissão de pacotes IP para download e upload com o software tc, como aborda a Seção 5.3.2, a fim de evitar flutuações grandes nas medições de tais taxas, como mostrado no Código 9 para limitar a taxa de transferência para cada UE de forma massiva;
4. o simulador está rodando e pronto para os testes. Nesse ponto deve-se executar em paralelo os softwares e comandos necessários para simular e medir o desempenho da rede mostrados na Seção 5.3.2.

O escopo desta dissertação não é analisar o desempenho da rede frente à concorrência entre fatias, portanto, cada rodada de simulação conecta os UEs à apenas uma fatia da rede, segregando a concorrência entre NSIs ao isolar a simulação, com o intuito de testar separadamente o caso de uso eMBB do serviço. Trabalhos futuros podem levar em consideração a análise de desempenho das fatias da rede com concorrência entre fa-

tias, além de simular os cenários URLLC e mMTC a fim de avaliar o desempenhos destes cenários.

Para que a simulação seja bem sucedida, é importante ressaltar que: 1) os requisitos mínimos de hardware e software abordados na Seção 5.3 devem ser respeitados, caso contrário, a simulação pode falhar; 2) para a conexão bem sucedida entre VMs durante a simulação, deve-se verificar se ambas as VMs utilizadas na simulação estão com os firewalls desativados (ex.: iptables) e rotas ou interfaces de rede devidamente funcionando e configuradas - ver Seção 5.3 e documentação oficial dos simuladores para mais detalhes [3] [31]; 3) o hardware e softwares utilizados na simulação, assim como os próprios simuladores, possuem limitações quanto a capacidade de carga no sistema e quantidade de UEs; portanto, tentar adicionar muitos UEs pode sobrecarregar a simulação e derrubar a rede RAN ou o UPF da rede Core. Para a simulação desta dissertação de mestrado, rodar em paralelo mais que 500 UEs na mesma RAN conectado ao mesmo UPF foi suficiente para derrubar o UPF e/ou RAN e falhar a simulação; logo, 500 UEs foi o limite estabelecido para a quantidade de UEs rodando em paralelo.

5.4.1 Coleta e tratamento dos dados de avaliação de desempenho da rede

O resultado dos passos da Seção 5.4 é a simulação das conexões dos UEs à internet (DN), através da NSI criada para atender aos casos de uso avaliado.

Esta seção mostra os passos necessários para coletar os dados de desempenho da rede para os atributos mensuráveis de parte das propostas de NSTs da Tabela 4.

A simulação de tráfego e a coleta dos dados para posterior análise de desempenho da rede deve ser executada da seguinte forma:

1. através das ferramentas de auxílio à simulação apresentadas na Seção 5.3.2, deve-se executar os comandos que permitam medir os atributos mensuráveis citados na Seção 4.1.4 e mostrados na Tabela 3 e na Tabela 4, que são: taxas de transferência de dados de download (*downlink Tx*) e de upload (*uplink Tx*), latência (PDB - *Packet Delay Budget*) e taxa de perda de Pacote (PER - *Packet Error Rate*), sob diferentes quantidades de conexões para os cenários de uso propostos.

Os comandos executados para medir o desempenho dos atributos da rede são abordados na Seção 5.3.2 e mostrados na lista de comandos do Código 7 do Anexo B.

2. após execução dos comandos, deve-se extrair os dados para tratamento e posterior análise. O tratamento dos dados gera pelo menos: as médias dos resultados obtidos, a variância, o desvio padrão e a Função de Distribuição Acumulada (FDA), ou CDF (*Cumulative Distribution Function*), em inglês. A CDF é importante pois indica a probabilidade de uma variável aleatória ter um valor menor ou igual a um valor selecionado. Ainda mais, é possível determinar a probabilidade de uma variável ter um valor maior do que um valor determinado, ou verificar se essa variável está entre dois valores [33]. Para análise dos dados pré-tratados, deve-se verificar se tais atributos medidos e seus valores atendem aos SLAs especificados pelas NSTs. Esta verificação será feita na Seção 6.1.

6 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA REDE 5G E ANÁLISE DE RESULTADOS

Três propostas de NSTs para os cenários de uso urbanos macro eMBB, URLLC e mMTC foram apresentadas na Seção 4.3. Em sequência, através da simulação de uma rede 5G, podemos testar uma das fatias de rede e coletar métricas de desempenho para os atributos mensuráveis, a fim de analisar se a rede alcança os requisitos estabelecidos pela NST proposta para o cenário eMBB urbano macro.

6.1 Avaliação de Desempenho da Rede

Redes 5G apresentam diversas especificações e requisitos técnicos mínimos de desempenho, como mostrado na Seção 1.2.3. A partir das simulações, analisamos o desempenho da fatia de rede 5G referente ao cenário eMBB Urbano Macro utilizando, dos atributos NSTs abordados na Seção 4.1.4, os atributos de taxas de transferência de dados de download (*downlink Tx*) e de upload (*uplink Tx*), latência (PDB - *Packet Delay Budget*) e taxa de perda de pacote (PER - *Packet Error Rate*), sob diferentes quantidades de conexões para um dos cenários de uso propostos na Seção 4.2.

6.1.1 Taxa de Transferência de dados para Download e Upload

6.1.1.1 Download Tx por UE para o Cenário eMBB Urbano Macro

Este atributo é relevante apenas para os cenários de uso eMBB [15].

Em cada rodada de simulação cria-se uma quantidade de UEs que varia entre os valores 100, 250, 500 e 500, conforme mostra a Figura 11. O fator de atividade é fixo em 10% do total de UEs que se conectam a rede 5G e cada UE ativo deste fator de atividade trafega continuamente 10 MB de dados na rede 5G, como mostra a Seção 5.4.

A Figura 11 apresenta a CDF das taxas de transferência de dados médias para download, em Mbps. A ferramenta iperf foi empregada para medir as taxas de transferência de download e de upload entre os UEs e o Core da rede 5G (ver Seção 5.3.2). A taxa de transmissão máxima de dados é limitada em 200 Mbps a fim de evitar flutuações na rede, conforme aborda a Seção 5.4.

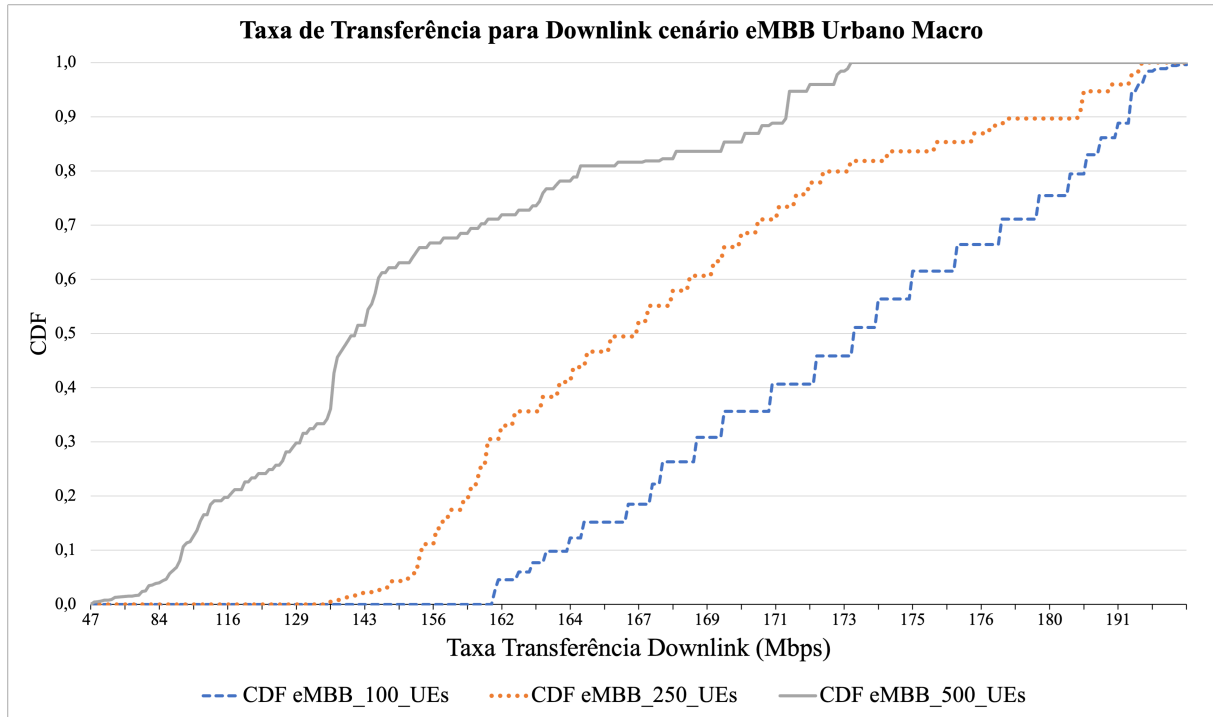


Figura 11 CDF da Taxa de Transferência de dados por UE para download obtida para o cenário eMBB urbano macro.

A Tabela 5 mostra os valores médios, percentis, desvio padrão e intervalo de confiança para o mesmo atributo. O percentil 95 mostra que 95% dos UEs simulados para o cenário eMBB atingiram taxas entre 188 Mbps (500 UEs) e 192 Mbps (100 UEs).

Tabela 5 Médias, desvio padrão, percentis e intervalo de confiança para o atributo de Taxa de Transferência de dados por UE para Downlink.

Taxa de Transferência para Downlink em Mbps para Cenário eMBB Urbano Macro com fator de atividade em 10%			
	100 UEs	250 UEs	500 UEs
Média (Mbps)	173,6532399	159,0735552	145,9686515
Desvio Padrão	12,19629952	26,31879159	41,23431353
Percentil 95 (Mbps)	192	191	188
Percentil 05 (Mbps)	155,5	113,5	74,65
Intervalo de Confiança	1,000364147	2,158718344	3,382118388

Os resultados mostram que a taxa de download média por UE é superior a 50 Mbps, valor mínimo requerido pela NST para o cenário de uso eMBB urbano macro proposta na Tabela 4, para todas as quantidades de UEs simuladas, com exceção de

poucas medições para 500 UEs, que apresentaram taxas iniciando em menos de 50 Mbps, nos piores cenários simulados, representando apenas cerca de 0,5% das medições feitas para este atributo. Portanto, por um lado, a análise dos dados coletados mostra que o desempenho da NSI simulada, para a maioria dos casos e quantidades de UEs, está em conformidade com os padrões IMT-2020 e 3GPP e, consequentemente, com a NST proposta nesta dissertação, pois foi-se alcançado um desempenho de taxa de transferência superior ao mínimo requerido pelo 3GPP, conforme mostra a Tabela 1. Por outro lado, 0,5% das medidas, três medições de um total de 570, apresentaram valores próximos, mas um pouco abaixo, de 50 Mbps, evidenciando que a rede simulada atingiu o limite de UEs transmitindo em paralelo para o fator de atividade de 10%, que são 50 UEs.

Observa-se que a rede 5G simulada possui o tamanho da largura de banda total limitada pelos recursos físicos, e os UEs tem sua banda limitada à 200 Mbps por UE; portanto, é esperado que o aumento da quantidade de UEs conectados à rede cause uma redução das taxas de transferência. Este padrão é observado na Figura 11, onde as taxas de download por UE para 500 UEs são menores que 250 UEs, e assim sucessivamente. Este padrão é uma resposta da rede ao aumento de UEs ativos na mesma, que consomem cada vez mais a limitada banda da rede. A implementação do fator de atividade descrito na Seção 5.4 faz com que 10% de UEs aleatórios gerem tráfego na rede e como resultado, quantos mais UEs na rede, maior o aumento do tráfego e menores são as taxas de download, atingindo o limite sustentável observado de 500 UEs ativos na rede. Para simulações acima de 500 UEs, observou-se que diversas medições apresentaram taxas inferiores a 50 Mbps, representando um percentual considerável de medições fora dos requisitos exigidos, levando-nos a concluir que 500 UEs era o limite.

Nota-se que os valores para os requisitos de taxas de transferência de download e upload divergem entre ITU-R e o 3GPP. A Seção 1.2.3 aborda tais divergências. Para esta dissertação de mestrado foi considerada a definição do 3GPP.

Conclui-se que, a partir da análise dos resultados obtidos das simulações, o atributo de Taxas de Transferência de dados por UE para download (*downlink throughput per UE*), proposto pela NST criada na Tabela 4 para o caso de uso eMBB urbano macro, atende aos requisitos de download definidos para redes 5G pelo IMT-2020 e 3GPP.

6.1.1.2 Uplink Tx por UE para o Cenário eMBB Urbano Macro

Assim como o Downlink, este atributo é relevante apenas para de cenários de uso eMBB [15]. Portanto, nesta avaliação, apenas o cenário eMBB é simulado.

Um procedimento similar de simulação e medição de dados implementado para taxas de transferência de download é implementado para simular e coletar os dados referentes a taxas de transferência de upload para o cenário eMBB Urbano Macro.

A Figura 12 apresenta as taxas médias de transferência de dados de upload por UE, em Mbps, para as amostras coletadas durante a simulação.

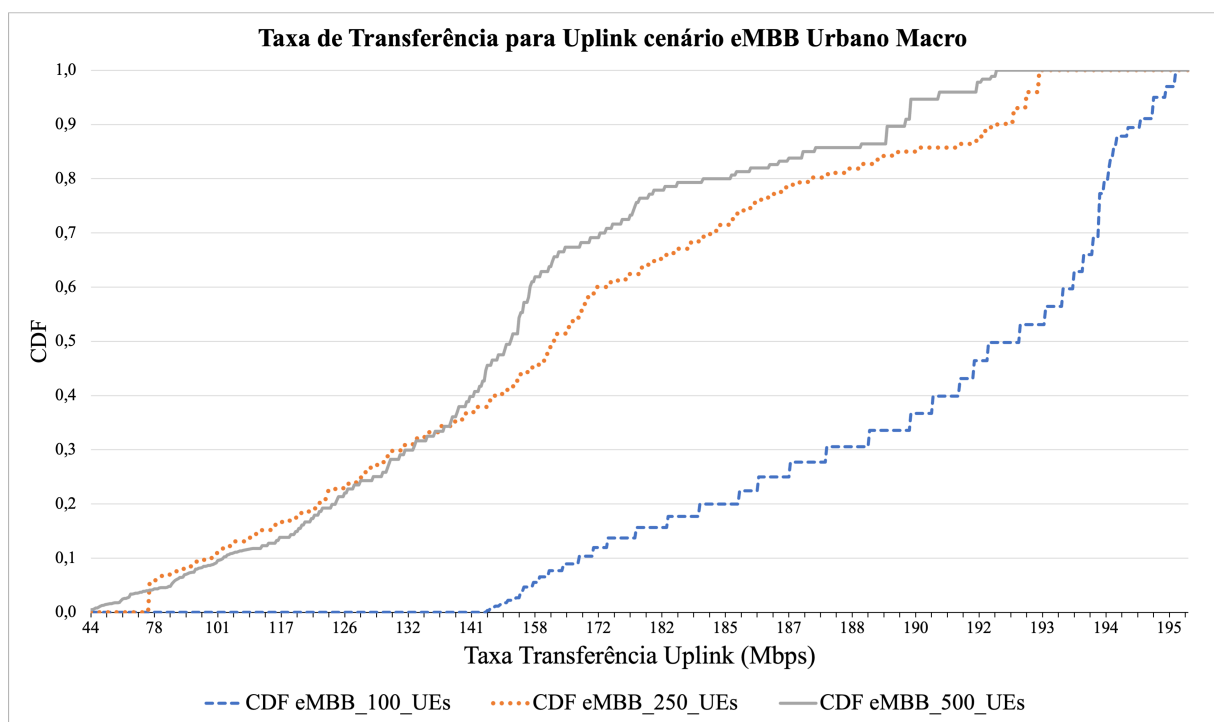


Figura 12 Taxa de transferência de dados média por UE para upload obtida para o cenário eMBB urbano macro.

Embora as curvas sejam levemente diferentes, os resultados obtidos para o atributo de taxa de transferências de dados para upload foram próximos aos de download, mostrados na Seção 6.1.1.1, havendo pouca flutuação ao comparar os atributos de taxas de download e upload, como mostra a Figura 12. Desta forma, os resultados mostram que o atributo de taxa de transferência para upload é superior a 25 Mbps, valor mínimo requerido pela NST proposta na Tabela 4.

A Tabela 6 mostra os valores médios, percentis, desvio padrão e intervalo de con-

fiança para o atributo de taxa de upload. O percentil 95 mostra que 95% dos UEs simulados para o cenário eMBB atingiram taxas entre 190 Mbps (500 UEs) e 193 Mbps (100 UEs).

Tabela 6 Médias, desvio padrão, percentis e intervalo de confiança para o atributo de Taxa de Transferência de dados por UE para Uplink.

Taxa de Transferência para Uplink em Mbps para Cenário eMBB Urbano Macro com fator de atividade em 10%			
	100 UEs	250 UEs	500 UEs
Média (Mbps)	175,0665499	156,8711033	148,5644483
Desvio Padrão	11,95117781	31,95916674	40,95341273
Percentil 95 (Mbps)	193	193	190
Percentil 05 (Mbps)	157,5	97,35	69,4
Intervalo de Confiança	0,980258789	2,621352856	3,359078361

Conclui-se que, a partir da análise dos resultados obtidos das simulações, o atributo de taxas de transferência de dados por UE para upload (*uplink throughput per UE*), proposto pela NST criada na Tabela 4 para o caso de uso eMBB urbano macro, atende aos requisitos mínimos definidos para redes 5G pelo IMT-2020 e 3GPP.

6.1.1.3 Download Tx Variando o Fator de Atividade

Para avaliação do desempenho das taxas de transferência de dados de download por UE em face a alta densidade de conexões baixando dados da rede, avaliamos o atributo de taxas de download variando o aumento do fator de atividade de 10% para 15%, 20%, 30% e 40%. Em outras palavras, objetiva-se avaliar até onde a rede consegue respeitar os requisitos do 3GPP para taxas de transferência considerando o aumento percentual da taxa de UEs trafegando dados na rede, do total de UEs conectados na rede. Esta simulação prevê cenários mais densos em áreas urbanas muito povoadas onde há uso contínuo da rede 5G, considerando que quase metade do total de UEs da rede está baixando dados da rede continuamente.

Esta avaliação é válida para o cenário de uso eMBB Urbano Macro e para o atributo de taxa de transferência de dados para download.

Para esta avaliação, é necessário fixar a quantidade de UEs da rede e variar apenas o fator de atividade através do script para simulação do fator de atividade mostrado na

Seção 5.4. A quantidade fixa de UEs da rede escolhida foram 250 UEs, logo, entre 25 a 100 UEs (10% a 40%) estão trafegando dados na rede, realizando download contínuo de arquivos da rede, utilizando o script e método abordado na Seção 5.4. Tentativas com 500 UEs fixos foram feitas durante simulações mas observou-se que 40% de um total de 500 UEs na rede baixando dados continuamente acarreta na sobrecarga da simulação e posterior falha da mesma.

Como mostra o gráfico da Figura 13, para a simulação do fator de atividade acima de 30% (curvas de distribuição mais próximas do lado esquerdo do gráfico), os resultados mostram que grande parte dos usuários da rede conseguem acessar a rede 5G obtendo valores próximos ou menores que 50 Mbps de taxas de download, não respeitando o valor mínimo requerido pelo 3GPP. Para o pior cenário, com fator de atividade em 40%, entre 40-50% dos usuários da rede tem taxas de download menores do que 50 Mbps, evidenciando que a rede simulada não está preparada para lidar com alta densidade de UEs e alta taxa de uso da rede.

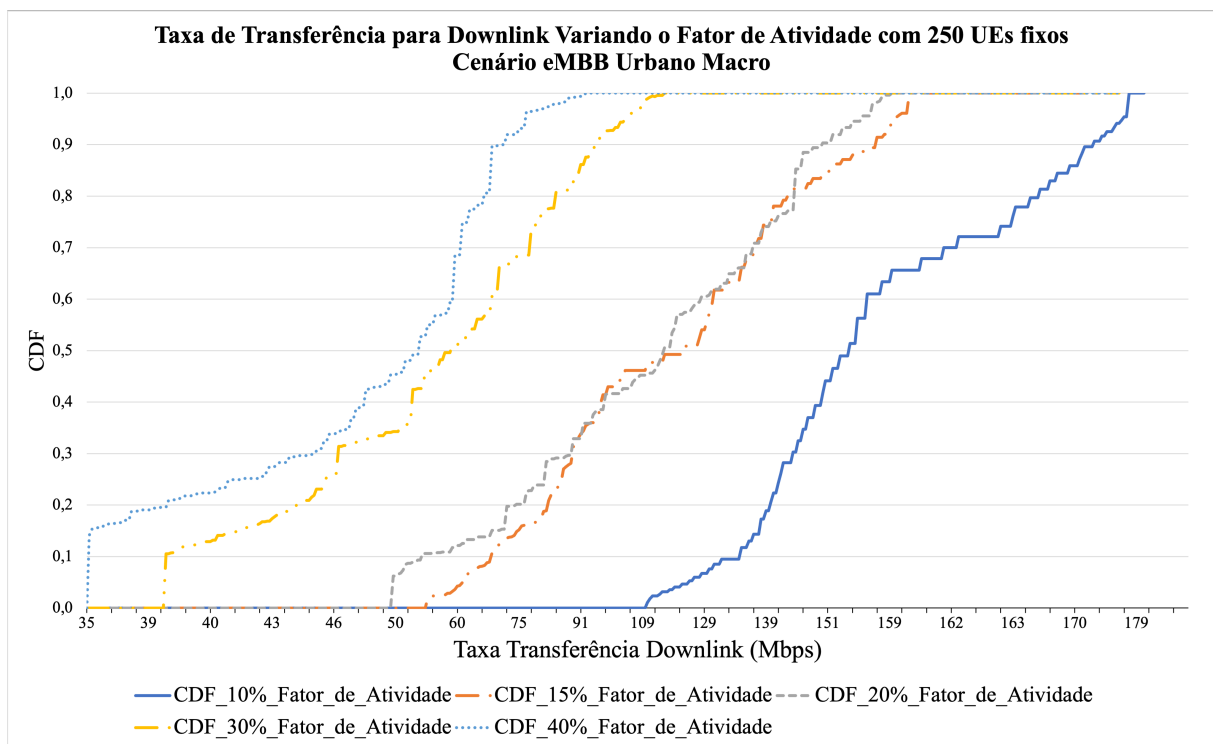


Figura 13 Taxa de transferência de dados média por UE para download obtida para o cenário eMBB urbano macro variando o fator de atividade de 10% até 40%.

Conclui-se que a fatia de rede simulada não está preparada para receber um tráfego

com alta densidade de conexões para um alto fator de atividade, sendo necessário portanto a criação de novas fatias de rede dedicadas a cenários de uso eMBB urbanos com alta densidade de conexões considerando fator de atividade da rede superior a 30%. Tais cenários de uso podem ser estudados e novos NSTs sugeridos para atender a cenários de uso que tenham esse perfil. Trabalhos futuros podem se dedicar a estudar tais cenários.

6.1.2 Latência (Limite para atraso de pacote - PDB)

Este atributo é relevante apenas para os cenários de uso eMBB e URLLC [15]. Porém, nesta dissertação, apenas o cenário eMBB será avaliado.

A Figura 14 apresenta as médias para atrasos de pacote, ou PDB, em milissegundos, para as amostras coletadas durante a simulação. A ferramenta Ping foi empregada para medir o RRT (*Round Trip Time*), ou latência entre UEs e o UPF da rede Core 5G, como especificado na Seção 5.3.

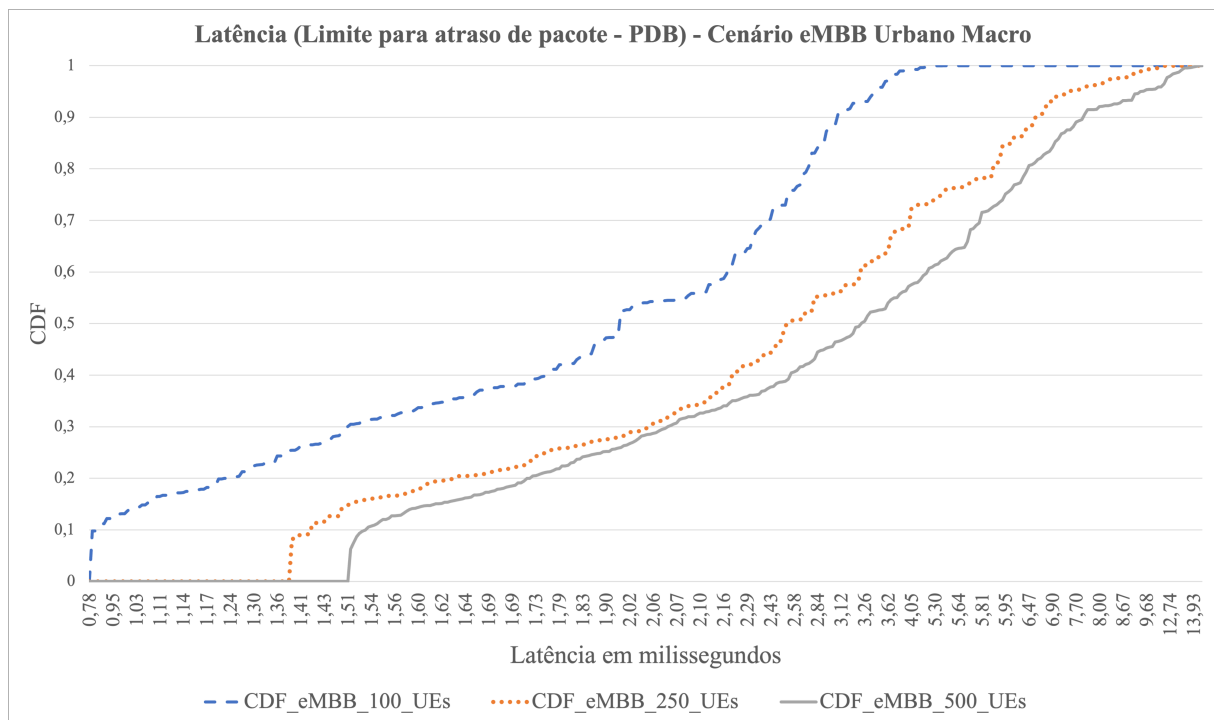


Figura 14 Latência média (*Packet Delay Budget*), em milissegundos, para o cenário de uso eMBB Urbano Macro.

A Tabela 7 mostra os valores médios, percentis, desvio padrão e intervalo de confiança para o mesmo atributo. O percentil 95 mostra que 95% dos UEs simulados atin-

giram latência menor do que $9,554 * 10^{-3}$ segundos para o cenário eMBB urbano macro para o cenário mais denso, com 500 UEs.

Tabela 7 Médias, desvio padrão, percentis e intervalo de confiança para o atributo de latência (*Packet Delay Budget*), em segundos, para os cenário de uso eMBB Urbano Macro.

Latência fim-a-fim (Limite para Atraso de pacote - PDB) (milisegundos) - Cenário eMBB Urbano Macro			
	100 UEs	250 UEs	500 UEs
Média (ms)	1,965	4,176	5,562
Desvio Padrão	0,875	2,273	2,758
Percentil 95 (ms)	3,235	7,735	9,554
Percentil 05 (ms)	1,025	1,580	2,416
Intervalo de Confiança	0,100	0,261	0,317

Os resultados da Figura 14 mostram que as médias de atraso de pacote não são superiores a $50 * 10^{-3}$ segundos para o cenário eMBB Urbano Macro, valor máximo requerido pela NST proposta na Tabela 4, para todas as quantidades de UEs simuladas.

Portanto, a análise dos dados coletados mostra que o desempenho da NSI simulada está em conformidade com os padrões IMT-2020 e 3GPP, e consequentemente com a NST proposta nesta dissertação, pois foi alcançado um desempenho de latência menor ou igual o máximo permitido, conforme mostra a Tabela 1. Nota-se que os valores para este requisito divergem entre ITU-R e o 3GPP, pois o ITU-R considera latência apenas da camada de rádio; por outro lado, o 3GPP considera uma rede completa, cobrindo desde o UE e RAN até o núcleo da rede. A Seção 1.2.3 aborda tais divergências. Para esta dissertação de mestrado é utilizado a definição do 3GPP, que considera latência entre UE e UPF da Rede de Núcleo, ou seja, o RTT do comando ping sendo origem o UE e destino o UPF.

Conclui-se que, a partir da análise dos resultados obtidos das simulações, o atributo de Latência (*Packet Delay Budget - PDB*) proposto pela NST criada na Tabela 4 para os casos de uso eMBB urbano macro atende aos requisitos mínimos definidos para as rede 5G pelo IMT-2020 e 3GPP.

6.1.3 Taxa de erros de pacote - PER

Este atributo é relevante para todos os três cenários de uso eMBB, URLLC e mMTC Urbanos Macro [15]. No entanto, apenas o cenário eMBB Urbano Macro será avaliado.

A Figura 15 apresenta os valores médios para a taxa de erros de pacote, PER (*Packet Error Rate*), em percentual, para as amostras coletadas durante a simulação. A ferramenta iperf foi empregada para medir a taxa de pacotes IP que foram processados pelo remetente (UE) mas que não foram entregues com sucesso ao destinatário da rede Core (UPF).

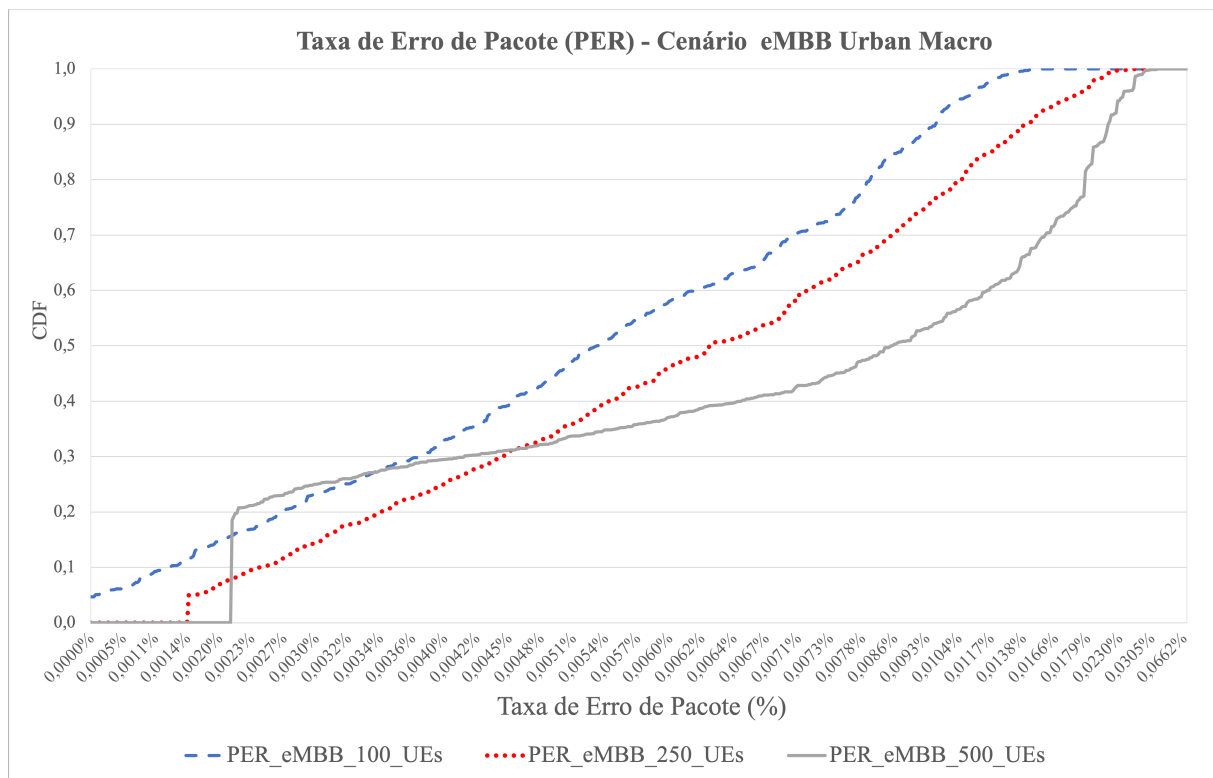


Figura 15 Taxa de Perdas de Pacote (PER) para o cenário Urbano Macro eMBB.

Os resultados da Figura 15 mostram que as taxas de erros de pacote para o cenário eMBB Urbano Macro são inferiores ao valores máximos de perda requeridos pela NST proposta na Tabela 4, para todas as quantidades de UEs simuladas. A taxa de erro permaneceu abaixo de $1 * 10^{-3}$ (ou 0,1%), que é o valor máximo requerido pelo 3GPP para o cenário eMBB.

Portanto, a análise dos dados coletados mostra que o desempenho da NSI simulada

está em conformidade com os padrões IMT-2020 e 3GPP, e consequentemente com a NST proposta nesta dissertação, pois foi alcançado um desempenho para taxa máxima de perda de pacotes (PER) menor ou igual o máximo permitido, conforme mostra a Tabela 1. Nota-se que os valores para este requisito divergem entre ITU-R e o 3GPP, pois o ITU-R considera a taxa de perda de pacotes, ou confiabilidade, apenas na camada de rádio; por outro lado, o 3GPP considera uma rede completa, cobrindo desde o UE e RAN até o núcleo da rede. A Seção 1.2.3 aborda tais divergências. Para esta dissertação de mestrado foi considerada a definição do 3GPP.

Conclui-se que, a partir da análise dos resultados obtidos das simulações, o atributo de taxa de erros de pacote, PER (*Packet Error Rate*), proposto pela NST criada na Tabela 4 para o caso de uso urbano macro eMBB atende aos requisitos mínimos definidos para as redes 5G pelo IMT-2020 e 3GPP.

CONCLUSÃO

Propusemos três modelos para NSTs e avaliamos uma rede 5G para validar se a fatia de rede (NSI) dedicada ao cenário eMBB Urbano Macro atende aos requisitos propostos na respectiva NST. Apresentamos um caso de sucesso de simulação de rede 5G fim-a-fim usando software de código aberto, representando uma solução a ser utilizada em pesquisas futuras. Isso mostra que é viável simular redes 5G fatiadas via software.

Os resultados da simulação mostram que a) os valores dos atributos propostos pela nossa NST eMBB Urbano Macro respeitam todos os requisitos técnicos do 3GPP e IMT-2020 para redes 5G; b) a fatia de redes 5G dedicada aos cenários de uso eMBB Urbano Macro é capaz de atender aos SLAs criados em nossas propostas de NST; c) embora apenas o cenário eMBB tenha sido simulado, representando um dos três cenários de uso propostos pelas NSTs, uma pesquisa detalhada nas mais diversas fontes foram realizadas para sugerir os cenários, portanto, a hipótese defendida por esta dissertação é que as NSTs para os cenários URLLC e mMTC também são capazes de atender aos diferentes requisitos do serviço.

O resultado da simulação da fatia de rede eMBB urbano macro considerando o aumento do fator de atividade mostra que há a necessidade de proposição de novos NSTs que sirvam para a criação de NSIs para cenários eMBB Urbanos dedicados a suprir a alta demanda da rede, ou densidade de conexões, como cenários internos (*indoor*), que reflitam um uso da rede com um fator de atividade superior a 40%.

Como descrito na Seção 4.3, as NSTs desta dissertação foram criados baseando-se nos mais diversos requisitos mínimos das redes 5G, definidos pelo IMT-2020 e 3GPP, na Tabela 1, levando em consideração ainda os diversos cenários de uso da rede. Deste modo, afirmar que as fatias da rede simuladas estão em conformidade com as NSTs propostas na Tabela 4 significa que a rede alcança os requisitos mínimos definidos pelo IMT-2020 e 3GPP.

Como resultado, concluímos que nossas propostas de NST fornecem um referencial técnico-teórico para a criação de NSTs para redes 5G, podendo nortear futuras pesquisas sobre novos modelos para novos cenários de uso do serviço.

Trabalhos Futuros

Dentre os possíveis trabalhos futuros, destacam-se a melhoria da simulação para o cenário eMBB e a simulação dos cenários mMTC e URLLC.

Para a melhoria na simulação eMBB, espera-se rodar a simulação com uma maior quantidade de UEs, a fim de resolver o problema da escassez de recursos computacionais, que limitou a quantidade de UEs simulados. Ainda mais, a introdução da simulação da camada física na RAN é um avanço na simulação a ser considerada. Por fim, a análise de resultados mostrou que a simulação com fator de atividade elevado, acima de 30-40%, causa redução nas taxas de transferências de download para o cenário eMBB urbano, que classifica-se pela extensa cobertura externa (*outdoor*); logo, a proposta de cenários eMBB urbano internos (*indoor*) é relevante para estudos posteriores que resolvam o problema da alta demanda, uma vez que cenários internos consideram alto fator de atividade na rede.

Para as simulações e análise de desempenho dos cenários de uso urbano macro URLLC e mMTC, deve-se avaliar se as fatias correspondentes a cada cenário são capazes de atender aos requisitos definidos pelas respectivas NSTs desta dissertação. Além disso, a simulação das diferentes fatias de rede (eMBB, URLLC e mMTC) sendo executadas em paralelo, a fim de avaliar o quanto a concorrência por recursos afeta negativamente o desempenho da rede, seguindo o trabalho feito em [27], é uma evolução da análise de desempenho da rede a ser considerada. Por último, com o objetivo de propor melhorias nas NSTs criadas nesta dissertação, deve-se estudar a avaliação do desempenho das três fatias para diferentes configurações e alocação dos recursos da rede, seguindo o trabalho relacionado em [13].

REFERÊNCIAS

- [1] International Telecommunications Union - Radiocommunication. Recommendation M.2083 : IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. 2015. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en>>.
- [2] International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector. Framework for the support of network slicing in the IMT-2020 network - Recommendation ITU-T Y.3112. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3112/en>>.
- [3] Free5gc Org, National Chiao Tung University (NCTU). *Free5gc*. Disponível em: <<https://www.Free5gc.org> ; <https://github.com/Free5gc/Free5gc/wiki>>.
- [4] International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector. Advanced data plane programmability for IMT-2020 - Recommendation ITU-T Y.3152. 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3152/en>>.
- [5] International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector. IMT-2020 network slice configuration - Recommendation ITU-T Y.3152. 2022. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3102/en>>.
- [6] GSMA. Generic Network Slice Template. 2022. Disponível em: <<https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads//NG.116-v5.0-8.pdf>>.
- [7] 3GPP, ETSI. System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 16.6.0 Release 16). 2020. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/16.06.00_60/>.
- [8] 3GPP, ETSI. Service requirements for the 5G system (3GPP TS 122.261 version 16.14.0 Release 16). 2022. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122261/16.14.00_60>.
- [9] NAVARRO-ORTIZ, P. R.-D. J. A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 22, n. 2, p. 905–929, Abril 2020.

- [10] LAKE, D. et al. Softwarization of 5g networks– implications to open platforms and standardizations. *IEEE Access*, v. 9, p. 88902–88930, 2022. Disponível em: <10.1109/ACCESS.2022.3071649>.
- [11] VIAVI Solutions Inc. *5G Architecture*. Disponível em: <<https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-architecture>, <https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-network-deployment>>.
- [12] NAPOLITANO, A. et al. Network slicing: an overview. *2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*, p. 1–4, 2018. Disponível em: <10.1109/RTSI.2018.8548449>.
- [13] CHAI, Y.-H. Evaluating dedicated slices of different configurations in 5g core. *Journal of Computer and Communications*, v. 9, n. 7, 2022. Disponível em: <10.4236/jcc.2022.97006>.
- [14] ITU-R. Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-2020 - Report ITU-R M.2411-0. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2411-2017-PDF-E.pdf>.
- [15] International Telecommunications Union - Radiocommunication. Report ITU-R M.2410-0 : Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410>>.
- [16] 3GPP, ETSI. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (3GPP TR 38.913 version 14.3.0 Release 14). 2017. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138913/14.02.00_60/>.
- [17] LAKE, D. et al. Softwarization of 5g networks– implications to open platforms and standardizations. *IEEE Access*, v. 9, p. 88902–88930, 2022. Disponível em: <10.1109/ACCESS.2022.3071649>.
- [18] QUALCOMM. *Everything you need to know about 5G*. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/invention/5g/what-is-5g>>.
- [19] IHS Markit. *The 5G Economy*. 2019. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/ihs-5g-economic-impact-study-2019.pdf>>.

- [20] World Economic Forum. The Impact of 5G: Creating New Value across Industries and Society. 2020. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Impact_of_5G_Report.pdf>.
- [21] European Telecommunications Standards Institute. *Why do we need 5G?* Disponível em: <<https://www.etsi.org/technologies/5g>>.
- [22] International Telecommunications Union. Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges. 2018. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.5G_01-2018-PDF-E.pdf>.
- [23] C. Yeh. Perspectives on 6G wireless communications. 2022. Disponível em: <<https://url.org/10.1016/j.ict.2022.12.017>>.
- [24] PARVEZ, I. et al. A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 20, n. 4, p. 3098–3130, 2018. Disponível em: <10.1109/COMST.2018.2841349>.
- [25] NGMN Alliance. Description of Network Slicing Concept. 2016. Disponível em: <https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2016/161010_NGMN_Network_Slicing_framework_v1.0.8.pdf>.
- [26] Coleago Consulting Ltd. Estimating the mid-bands spectrum needs in the 2025-2030 timeframe. 2020. Disponível em: <<https://www.coleago.com/app/uploads/2022/01/Demand-for-IMT-spectrum-Coleago-14-Dec-2020.pdf>>.
- [27] LIAO, C.-W.; LIN, F. J.; SATO, Y. Evaluating nfv-enabled network slicing for 5g core. In: *2020 21st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (AP-NOMS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 401–404.
- [28] International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector. High-level technical characteristics of network softwarization for IMT-2020 - Recommendation ITU-T Y.3150. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3150/en>>.

- [29] International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector. Framework of the IMT-2020 network - Recommendation ITU-T Y.3102. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3102/en>>.
- [30] ITU-T. Network performance objectives for IP-based services - Recommendation ITU-T Y.1541. 2011. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I>>.
- [31] ALİ GÜNGÖR. *UERANSIM*. Disponível em: <<https://github.com/aligungr/UERANSIM>, <https://github.com/aligungr/UERANSIM/wiki/Development-Guideline>>.
- [32] 3GPP. *3GPP system standards heading into the 5G era*. Disponível em: <https://www.3gpp.org/news-events/1614-sa_5g>.
- [33] PUC-Rio. Conceitos Básicos de Probabilidade e Estatística. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12093/12093_3.PDF>.
- [34] 5G-PPP, Architecture Working Group. View on 5G Architecture. p. 139–147, 2020. Disponível em: <[10.5281/zenodo.3265031](https://zenodo.org/record/105281/files/3265031.pdf)>.

ANEXO A - Configurações dos Elementos para suporte ao Fatiamento da rede

Para o Free5gc, é fornecida uma documentação detalhada para configuração dos elementos da rede de núcleo e conexão com a RAN, na página oficial do Free5gc na internet [3], sob a Seção `Installations>Stage 3: Free5gc>Installing a UE/RAN Simulator`. Cada elemento de rede possui funcionalidades globais e específicas, e por consequência, configurações genéricas e específicas da função, de modo que cada elemento tem seu arquivo de configuração no sob `<diretorio_Free5gc>/config/<funcao_rede>.yaml`, como por exemplo `amfcfg.yaml`.

Dentre todas as possibilidades de configuração disponíveis, é válido destacar algumas das configurações básicas primordiais para correto funcionamento da rede, conforme mostrado nos códigos a seguir:

```
info:
  description: AMF initial local configuration
configuration:
  amfName: AMF # the name of this AMF
  ngapIpList: # the IP list of N2 interfaces on this AMF
    - 192.168.122.101
  ...
  snssaiList: # the S-NSSAI list supported by this AMF
    - sst: 1      # eMBB Slice/Service Type
      sd: 010203  # Slice Differentiator
    - sst: 2      # URLLC Slice/Service Type
      sd: 010203  # Slice Differentiator
    - sst: 3      # mMTC Slice/Service Type
      sd: 010203  # Slice Differentiator
  supportDnnList: #the DNN (Data Network Name) supported by this AMF
- internet
  nrfUri: http://127.0.0.10:8000 # a valid URI of NRF
```

Código 2: Configurações essenciais do AMF.

```

info:
  description: SMF initial local configuration
  ...
  interfaces: # Interface list for this UPF
    - interfaceType: N3 # the type of the interface (N3 or N9)
      endpoints: # the IP address of this N3/N9 interface on this UPF
        - 192.168.122.101
    ...
  # S-NSSAI (Single Network Slice Selection
# Assistance Information) list supported by this SMF
  snssaiInfos:
    - sNssai:
      sst: 1      # eMBB Slice/Service Type (uinteger, range: 0~255)
      sd: 010203 # Slice Differentiator
      sst: 2      # URLLC Slice/Service Type
      sd: 010203 # Slice Differentiator
      sst: 3      # mMTC Slice/Service Type
      sd: 010203 # Slice Differentiator

```

Código 3: Configurações essenciais do SMF.

```

info:
  description: UPF initial local configuration
  ...
  gtpu:
    - addr: 192.168.122.101

```

Código 4: Configurações essenciais do UPF.

```

info:
  description: RAN (gNodeB) initial local configuration
  ...
  ngapIp: 192.168.122.102  # gNB's IP address for N2 Interface
  gtpIp: 192.168.122.102  # gNB's IP address for N3 Interface
  # List of AMF address information
  amfConfigs:
    - address: 192.168.122.101
  ...
  # List of supported S-NSSAIs by this gNB
slices:
  - sst: 0x1      # eMBB Slice/Service Type
    sd: 0x010203  # Slice Differentiator
  - sst: 0x2      # URLLC Slice/Service Type
    sd: 0x010203  # Slice Differentiator
  - sst: 0x3      # mMTC Slice/Service Type
    sd: 0x010203  # Slice Differentiator

```

Código 5: Configurações essenciais do RAN para gNodeB.

```

info:
    description: RAN (UE) initial local configuration
    supi: 'imsi-208930000000003' # IMSI number of the UE.
    mcc: '208' # Mobile Country Code value
    mnc: '93' # Mobile Network Code value (2 or 3 digits)
    key: '8baf473f2f8fd09487cccbd7097c6862' # Permanent subscription key
    op: '8e27b6af0e692e750f32667a3b14605d' # Operator code (OP or OPC)
    ...
# Initial PDU sessions to be established
sessions:
    - type: 'IPv4'
      apn: 'internet'
      slice:
          sst: 0x01
          sd: 0x010203
# List of requested S-NSSAIs by this UE
# Adicionar aqui a fatia de rede (SST) ao qual o UE se conecta
slices:
    - sst: 0x01
      sd: 0x010203

```

Código 6: Configurações essenciais para UEs se conectarem à RAN.

Ao executar o passo de criação dos UEs nos bancos de dados da rede de núcleo, existe a possibilidade de definir as N-SSAIs com o qual cada UE se conecta, possíveis configurações de Qos do 5QI (ver Seção 4.1.4.2) e, o software Free5gc consegue implementar limitação da taxa de downlink AMBR (*Aggregate Maximum Bit Rate*), que é a taxa máxima de transferência de dados para download/upload configurado para o UE acessar a DN (*Data Network*), ou internet. O comportamento da simulação ao testar taxas de transferências com testes de velocidades (*speed test*) na internet, como por exemplo speedtest da ookla, é muito flutuante, tornando o ambiente de simulação fora de controle. Por isso, houve a decisão de não realizar os testes e medições de taxas de transferência de download/upload via testes de velocidade na internet e consequentemente, os UEs

não precisam acessar a internet para realizar os testes de velocidade, tornando a configuração AMBR, anteriormente citada, inutilizada durante simulação. Para o escopo desta dissertação, a configuração de downlink AMBR não influencia nos testes de taxas de transferência realizadas no Capítulo 6 pois tais testes consideram as taxas entre UE e UPF da rede de núcleo, terminando na conexão N6 mostrada na Figura 4, e não levando em consideração o acesso à internet.

ANEXO B - Lista de comandos para testar e medir dados de desempenho da rede

Para esta dissertação, a partir das simulações, analisamos o desempenho das fatias da rede 5G usando os atributos de taxas de transferência de dados de download (*downlink Tx*) e de upload (*uplink Tx*), latência (PDB - *Packet Delay Budget*) e taxa de perda de Pacote (PER - *Packet Error Rate*), sob diferentes quantidades de conexões.

Os comandos executados para medir o desempenho relacionado aos atributos da rede citados anteriormente são mostrados na lista de comandos do Código 7 para disponibilidade e latência. Ver Código 8 para confiabilidade, perda de pacote e taxa transferência por UE para downlink e uplink.

Lista de comandos

Latência - PDB (limite de atraso de pacote)

Teste latência com iperf ou ping entre interfaces UE1 e UPF

```
sudo iperf -c 192.168.122.101 --bind 60.60.0.1 --format k -p 5001
--parallel 1 --time 100 --interval 0.5--mss 1472 --print_mss --enhance
sudo ping -c 50 -i 0.2 -I 60.60.0.1 -q -s 1472 192.168.122.101
sudo iperf -c 192.168.122.102 --bind 60.60.0.2--format k -p 5001
# Maximum supported packet size = 1500
```

Código 7: Comandos para testar e coletar dados de desempenho da rede entre UE-RAN-Core.

Lista de comandos

Confiabilidade - Taxa de erros de pacote (PER)

```
timeout -k 10 1 sudo iperf3 -c 192.168.122.101 --bind
60.60.0.1 --parallel 1 --time 10 --set-mss 1500

# iperf3 vai dar como output a quantidade de pacotes totais
# enviados em MBytes e a quantidade de pacotes retransmitidos
# a partir daí basta calcular o percentual que é
# ( $\text{Retr} / \text{Transfer em Mbytes}$ )x100

# Outra forma mais manual é utilizar o tcpdump na interface do UPF
# filtrando por IP da origem

# Após isso analisar no wireshark os pacotes com erro ou retransmissão
# com o filtro tcp.analysis.retransmission
```

#

Taxa Transferência por UE Downlink e Uplink

```
curl --interface 60.60.0.1 -s
https://raw.githubusercontent.com/sivel/speedtest-cli/master/speedtest.py
| python3 - #eMBB

curl --interface 60.60.0.2 -s
https://raw.githubusercontent.com/sivel/speedtest-cli/master/speedtest.py
| python3 - #URLLC

# Teste velocidade UE-RAN-Core-DN utilizando speedTest
# com provedor de internet downlink 200Mbps e uplink 60Mbps
# MTU eMBB 1500 Bytes e URLLC 160 Bytes
```

Código 8: Comandos para testar e coletar dados de desempenho da rede entre UE-RAN-Core.

Ver Código 9 para limitar a taxa de transferência, ou largura de banda, para cada UE, de forma massiva.

```
# Lista de comandos  
## Limitar largura de banda para cada UE  
## Automatizar a limitacao para todos os UEs de uma vez  
for j in `ifconfig| grep uesimtun|awk -F ":" '{print $1}'`  
do  
    sudo tc qdisc add dev $j root tbf rate 200000kbit burst  
    50kbit latency 50ms  
    # onde j é o nome da interface do UE  
done
```

Código 9: Comandos para limitar largura de banda e latência máxima para cada UE.

ANEXO C - Exemplo de Script para Fator de Atividade

Para esta dissertação, utilizamos o fator de atividade fixo em 10% do total de UEs, na maioria das simulações; com exceção da simulação que tem como objetivo avaliar o desempenho da rede perante ao aumento do fator de atividade, entre 10 e 40% do total de UEs, conforme explica a Seção 5.4.

O script implementado para simular o fator de atividade é mostrado na lista de comandos do Código 10.

```

# Script para implementar Fator de Atividade
## Nome do script activity_factor.sh

#!/bin/sh

set -x

##

START=$1
END=$2

## Activity Factor code
while true
do
    for j in $(seq $START $END)
    do
        echo $j
        curl --interface 60.60.0.$j -P - --insecure /
            "ftp://192.168.122.101/%2fhome/caio/test_10MB.txt" /
            --user "user:passw" --output /dev/null &
    done
    sleep 5
    for k in `ps -aux|egrep "curl"| awk -F" " '{print $2}`
    do
        kill -9 $k
    done
done

```

Código 10: Script do Fator de Atividade.

Um exemplo de uso do script que implementa o fator de atividade é mostrado na lista de comandos do Código 11.

```

# Exemplos de modo de Utilização do script
## Ao rodar os comandos iperf ou ping para medir qualquer
## atributo usar os seguintes exemplos:

#Iperf for EMBB
    cd /home/caio/UERANSIM
## Activity Factor deverá ser 10% do total de UEs
## onde "0 10" significa a quantidade de UEs ativos na rede
## Por exemplo, "0 10" significa que 10 UEs estarão ativamente
## realizando download de um arquivo de 10MB na rede e,
## consequentemente, trafegando dados na rede.
## Se a simulacao for para 100 UEs, isso significa que "0 10"
## vai implementar um fator de atividade de 10%
    nohup sh activity_factor.sh 0 10 >/dev/null 2>&1 &
# iperf test
## pegar via grep os IPs dos UEs com estado UP e CONECTADOS à rede
    for i in `ifconfig| grep 60.60|awk -F" " '{print $2}'`
do
    sudo ifconfig $i mtu 1500
    timeout -k 5 1 sudo iperf3 -c 192.168.122.101 --bind $i /
    --parallel 1 --time 5 --set-mss 1500 >> /
    /home/caio/UERANSIM/output_iperf3_embb-100UEs-test.txt
    sleep 6
done
#

```

Código 11: Exemplo de uso do script do Fator de Atividade.

ANEXO D - Mais Capacidades-chave aprimoradas para redes 5G

Como mostrado no Capítulo 1, o IMT-2020 definiu as capacidades-chave aprimoradas (*key capabilities*) e requisitos mínimos para as redes 5G. As capacidades aprimoradas-chave mais importantes para esta dissertação de mestrado foram apresentadas na Seção 1.2.2, porém, o IMT-2020 e 3GPP definem diversas outras capacidades não tão relevantes para a pesquisa desta dissertação, abordadas a seguir:

- **Taxa de transferência de dados de pico:** taxa de transferência de dados máxima, alcançável sobre condições ideais por um usuário ou dispositivo (em Gbits/s). Este requisito é definido para o propósito de avaliação apenas de cenários relacionados a eMBB;
- **Latência:** existem diferentes definições de latência em redes de comunicação, logo, existem diferentes latências. As definições de latência divergem entre os órgãos ITU-R e 3GPP, pois para o ITU-R, a latência se refere apenas à contribuição do rádio (RAN - *Radio Access Network*) para a latência do plano de usuário, enquanto que para o 3GPP, a latência se traduz em latência fim-a-fim (*end-to-end latency*) do plano de usuário na rede [23], portanto:

- **Definição de Latência de plano de usuário pelo ITU-R** [15] [23] [14]: é a latência aérea (*air-latency*) do plano de usuário, ou seja, a contribuição da camada de rádio (RAN) para latência tanto para downlink quanto uplink. É definida como o tempo, em sentido único, que leva para entregar com sucesso um pacote no ponto de ingresso das camadas 2/3 até o ponto de egresso das camadas 2/3 da interface de rádio, assumindo condições de zero carga (ex.:usuário único) e que o UE está em estado ativo;

- **Definição de Latência de plano de usuário pelo 3GPP** [8] [23] [24]: abordada na Seção 1.2.2.

- **Confiabilidade:** refere-se à capacidade de fornecer um serviço com alta probabilidade de sucesso na transmissão dos dados e tem diferentes definições nas visões do ITU-R e 3GPP.

- **Definição de confiabilidade pelo ITU-R** [1] [15]: capacidade de transmitir tráfego dentro de um período pré-determinado com alta probabilidade de sucesso. Confiabilidade é a probabilidade de transmissão de um pacote de camada 2/3 dentro de um período de tempo máximo, que é o tempo que leva pra entregar o pacote no ponto de ingresso da camada de rádio 2/3 até o ponto de egresso da camada de rádio 2/3.

Assim como o requisito de latência, esse requisito de confiabilidade leva em consideração apenas confiabilidade na camada de rádio, além de levar em consideração o tempo que leva para o pacote ser entregue, que é uma definição um pouco diferente do 3GPP.

- **Definição de confiabilidade pelo 3GPP** [7] [8]: abordada na Seção 1.2.2;

- **Mobilidade:** é velocidade máxima do dispositivo móvel no qual a QoS (*Quality of Service*) definida para a rede 5G pode ser alcançada. Também leva em consideração a velocidade máxima na qual pode haver uma transferência perfeita do dispositivo móvel entre nós de rádio, que podem pertencer a múltiplas camadas de tecnologias de acesso a rádio. Essa velocidade máxima alcançável é medida em km/h;

- **Tempo de interrupção da mobilidade:** se refere ao tempo de interrupção da conexão entre o usuário e uma estação base de rádio, ou seja, o tempo que um usuário/dispositivo não consegue trocar pacotes com a rede. É medido em milissegundos (*ms*). Este requisito é definido para o propósito de avaliação apenas de cenários relacionados a eMBB;

- **Densidade de conexão:** é o número total de dispositivos conectados e/ou acessíveis por unidade de área (km^2). Este requisito é definido para o propósito de avaliação apenas de cenários relacionados a mMTC;

- **Eficiência energética:** possui dois aspectos:

- do lado da rede, a eficiência energética se refere a quantidade de informações (bits transmitidos/recebidos) por unidade de energia consumida pela rede de acesso via rádio (*RAN*), em (bit/Joule);

- do lado dos dispositivos, a eficiência energética refere-se a quantidade de informação (bits transmitidos/recebidos) por unidade de energia consumida pelo

módulo de comunicação do dispositivo (em bit/Joule). Este requisito é definido para o propósito de avaliação apenas de cenários relacionados a mMTC;

- **Eficiência do espectro:** média da vazão dos dados por unidade de recurso do espectro de frequência e por célula de rádio (em bit/s/Hz).
 - **Eficiência espectral de pico:** refere-se à taxa máxima de transferência de dados sobre condições ideais normalizada pela largura do canal de banda (bit/s/Hz), onde essa taxa de pico é a taxa máxima de bits recebidos por uma única estação móvel, assumindo não haver erros [15];
- **Capacidade de tráfego por área:** é o total de tráfego da rede atendido por área geográfica (em Mbit/s/m²);
- **Flexibilidade Espectral e de Largura de Banda:** refere a flexibilidade do sistema desenhado para lidar com diferentes cenários, em particular a capacidade de operar a diferentes faixas de frequências, incluindo altas frequências e canais com largura de bandas maiores do que as existentes hoje;
- **Resiliência:** é a habilidade de uma rede em continuar operando corretamente durante e depois de um distúrbio natural ou provocado pelo homem, tal como a queda de energia;
- **Segurança e Privacidade:** refere a diversas áreas como encriptação, integridade dos dados, proteção dos dados dos usuários e sinalização, assim como privacidade do usuário final e prevenção quanto a aplicações de rastreamento não autorizadas. Ainda mais, refere-se também a proteção da rede contra hacking, fraude, ataques na rede etc;
- **Ciclo de Vida Operacional :** refere ao tempo operacional da rede por capacidade de energia armazenada. É importante para dispositivos do tipo máquina, como os dispositivos IoT, que requerem uma bateria de longa vida útil (ex.: mais de 10 anos) e não necessitam de manutenção regular, pois essa manutenção é difícil devido a questões de acesso físico ou razões econômicas.

Estas capacidades aprimoradas das redes 5G são comparadas às redes móveis de quarta geração (4G) no gráfico da Figura 16, que compara as capacidades das redes definidas pelo IMT-2020 (5G) versus IMT Advanced (4G).

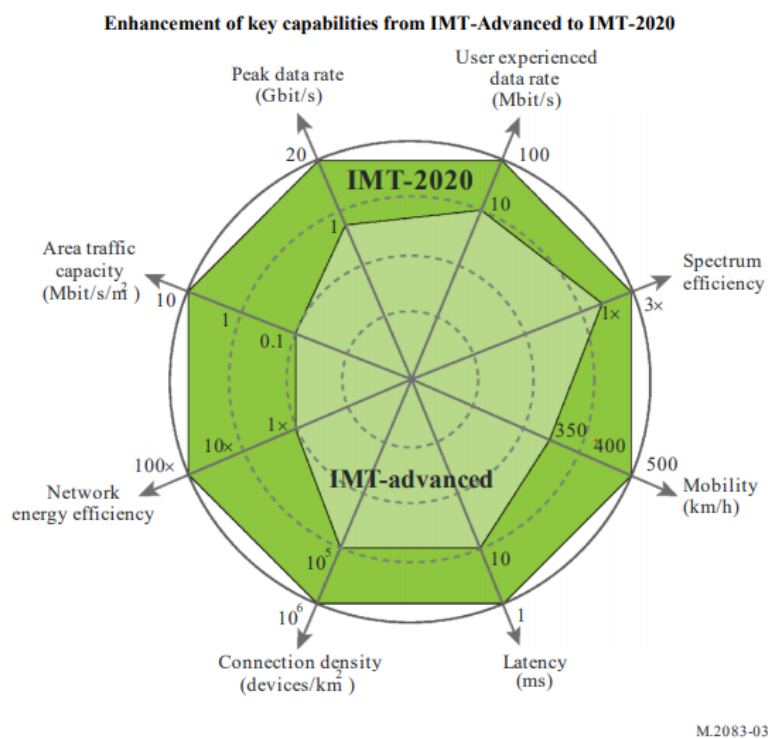


Figura 16 Capacidades-chave aprimoradas para redes 5G. Comparação com IMT-advanced (redes 4G). Retirada de [1].

ANEXO E - Organizações de Desenvolvimento de Padrões 5G e Network Slicing

A arquitetura 5G, assim suas tecnologias, características e casos de uso é descrita, planejada, desenvolvida e padronizada por diversas organizações envolvidas em padronização de tecnologias de computação e telecomunicações. Tais organizações incluem conhecidos organismos de padronização, grupos compostos por empresas da indústria de telecomunicações/tecnologia, fóruns e iniciativas *open source* [34]. Estas organizações têm cooperado de forma a padronizar o uso da tecnologia 5G, que começou a ser comercialmente implementada em larga escala ao redor do mundo a partir de 2020 adiante [21].

As organizações de desenvolvimento de padronizações (*SDOs - Standards Developing Organizations*) que mais contribuem para desenvolver as melhores soluções para 5G, padrões, arquitetura da rede e tecnologias a serem utilizados no 5G são [34]: ITU (*International Telecommunication Union*), ITU-R (*ITU radiocommunication Sector*), 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), IETF (*Internet Engineering Task Force*), 5GPPP (*5G Infrastructure Public Private Partnership*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

A implantação da tecnologia de redes móveis de quinta geração foi planejada para ocorrer em fases e tende a seguir melhorando ao longo do tempo [20]. As diretrizes funcionais da tecnologia 5G são abordadas na Seção 1.2). As fases dessa implementação iniciaram no ano de 2020, com o lançamento das especificações finais para redes 5G chamada de IMT-2020. As especificações do IMT-2020, que são o padrão oficial do 5G ao redor do mundo, são lançadas através da contribuição de todas as organizações anteriormente citadas, tendo como principal desenvolvedor o 3GPP [21].

Nota-se que o ITU-R é o setor de rádio do ITU, portanto, suas especificações são mais voltadas para as tecnologias de radiocomunicações. Em contrapartida, o 3GPP, junto ao ETSI, cobre as especificações em todos os níveis de camada de redes, focando na arquitetura das redes, rede de acesso (RAN) e rede de núcleo, assim como tecnologias-chave como o fatiamento de redes.

ANEXO F - Principais funções da rede (*NF - Network Functions*)

A Seção 3.2.6 aborda os principais elementos de redes 5G mostrados na Figura 4, como UE, RAN, AMF e UPF. Outros elementos de rede que compõe a arquitetura de redes 5G são:

1. **AMF (*Access and Mobility Management Function*)**, também conhecido como **NACF (*Network access and control function*)** [5]: a função de gerenciamento de acesso e mobilidade, tem funcionalidades de gerenciamento do registro do usuário, gerenciamento da conexão do usuário e gerenciamento da sessão do usuário, da seguinte maneira:

- Gerenciamento do registro (*RM - registration management*): quando o usuário acessa a rede, o AMF fornece o registro e o cancelamento deste registro para o usuário na rede, assim, estabelecendo a conexão deste usuário com a rede. Neste procedimento de registro, o AMF executa a autenticação/autorização do usuário ao acesso dos serviços da rede, aplica as políticas de acesso ao usuário e seleciona instâncias de fatia da rede (NSIs) às quais o usuário deve pertencer. É válido observar que um único usuário pode ser servido por múltiplas NSIs e uma única instância de AMF pode ser compartilhada por diversas NS, portanto, uma instância de AMF pode rotear a requisição do usuário para outras instâncias de AMF, caso não consiga lidar com a requisição de NSI adequada ao usuário. Portanto, as instâncias de AMF devem compartilhar informações para melhor gerenciamento do registro e mobilidade do usuário;

- Gerenciamento da conexão (*connection management*): quando um usuário solicita serviços à rede, o AMF fornece as funções de estabelecer a conexão e liberar a conexão/sinalização entre o usuário e o núcleo da rede (*core network*), o que também inclui funções de gerenciamento da mobilidade (*mobility management*);

- Gerenciamento da sessão (*session management*): quando uma mensagem de pedido de estabelecimento de uma conexão de um usuário chega no AMF, este executa uma descoberta e seleção da função de gerenciamento de sessão (SMF).

Exemplos de funcionalidades do AMF foram descritos ao longo da Seções 3.2.3 e

3.2.4. Dependendo da forma de implementação, o AMF e suas funções devem ser implementadas de forma distribuída, utilizando a computação de borda (*MEC - Multiple-access Edge Computing*) para suprir as demandas das fatias de rede (NS), de modo que haja múltiplas instâncias de AMF na rede, a fim de minimizar o atraso quanto a sinalização e transporte de informação.

2. **SMF (*Session Management Function*)**: a função de gerenciamento de sessão fornece funcionalidades de configuração de conectividade IP (ex.: *PDU protocol data unit*) para o usuário, assim como controle para a conexão dentro do plano de usuário, como por exemplo: aplicação de políticas e QoS, seleção das funções de rede do plano de usuário e seleção do caminho do usuário (caminho das mensagens entre fonte e destino dentro da rede). O SMF adquire do PCF (*Policy Control Function*) as informações sobre políticas do usuário para aplicá-las no estabelecimento da sessão. O SMF também provê gerenciamento de endereçamento IP para a alocação de IP do UE. Alguns exemplos de funcionalidades do SMF, em parceria com o AMF, foram descritos ao longo das Seções 3.2.3 e 3.2.4.
3. **NFR (*Network Function Registry*)**: a função de registro na rede fornece funcionalidades para auxiliar na descoberta e seleção das funções da rede requeridas pelo serviço ou pela fatia da rede. Cada função da rede se autoregistra e atualiza seu status quando é criada e instanciada, desta forma o NFR mantém as informações sobre todas as funções da rede disponíveis. Múltiplos serviços ou outras funções da rede podem usar o NFR para descoberta, indicação e seleção de funções da rede, como por exemplo, o AMF pode usar o NFR para selecionar o SMF e PCF apropriados. No caso onde a descoberta das funções disponíveis da rede é requerida para diferentes fatias da rede (NS), instâncias NFR dentro de diferentes NS podem interagir entre si para selecionar as melhores funções de rede disponíveis. No geral, cada NS tem sua própria NFR, porém, as instâncias de NFR também podem ser compartilhadas em diferentes fatias de um mesmo domínio;
4. **NSSF (*Network Slice Selection Function*)**: a função de seleção da fatia de rede fornece funcionalidade para seleção apropriada da instância de fatia de rede (NSI) para o usuário. Quando o usuário requisita um registro e acesso aos serviços da rede ao AMF, este envia uma requisição ao NSSF com informações sobre o

usuário, como foi descrito na Subseção 3.2.4, que por sua vez, responde a mensagem com a NSI apropriada ou com uma lista de NSIs disponíveis para aquele serviço específico que o usuário deseja;

5. **PCF (*Policy Control Function*)**: a função de controle das políticas fornece funcionalidades para o controle e gerenciamento de regras das políticas da rede, o que inclui regras de QoS, cobrança e roteamento do tráfego na rede. o PCF possibilita aplicação do QoS fim-a-fim na rede, ou na fatia de rede, cuidando de parâmetros como: taxa de dados máxima, taxa de dados garantida, nível de prioridade dos pacotes, entre outros;
6. **UPF (*User Plane Function*)**: a função de controle de plano do usuário fornece funcionalidades para roteamento e encaminhamento do tráfego para a rede de dados (DN - *Data Network*), além de gerenciamento de QoS. O tunelamento das sessões normalmente existe entre a RAN e o UPF.
7. **NEF (*Network Exposure Function*)** ou **CEF (*Capability Exposure Function*)**: a função de exposição das capacidades da rede fornece funcionalidades para que as NFs e NSs exponham suas capacidades à terceiros. O NEF armazena as informações referentes as capacidades para então fornecê-las aos terceiros;
8. **UDM (*Unified Data Management function*)**: a função de gerenciamento unificado da assinatura do usuário armazena e gerencia informações referentes ao usuário (UE), o que inclui informações de registro na rede e mobilidade;
9. **UDR (*Unified Repository*)**: função de repositório unificado para armazenamento e recuperação de dados de assinatura dos usuários da rede pelo UDM. Também tem a função de armazenamento e recuperação de dados sobre políticas feito pelo PCF;
10. **AUSF (*Authentication server function*)**: a função de autenticação realiza a autenticação entre o UE e a rede. O AMF inicia a autenticação do usuário através do ASF;
11. **AF (*Application function*)**: a função de aplicação interage com a rede 5G para fornecer serviços de informação ao PCF de forma que o SMF possa usar essa in-

formação para gerenciamento da sessão do usuário, como por exemplo, controle de tráfego e interação com as políticas do usuário;

12. **DN (*Data Network function*)**: refere-se a serviços do operador da rede, acesso à internet ou a serviços de terceiros.