

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO ESTADO DO PARÁ
ESCOLA DE NEGÓCIOS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**FLÁVIO DA COSTA FERREIRA
PEDRO LUCAS ARAÚJO DE CARVALHO**

A TECNOLOGIA SDN EM REDES MÓVEIS 5G

Belém

2018

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO ESTADO DO PARÁ
ESCOLA DE NEGÓCIOS, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

FLÁVIO DA COSTA FERREIRA
PEDRO LUCAS ARAÚJO DE CARVALHO

A TECNOLOGIA SDN EM REDES MÓVEIS 5G

Trabalho de Curso na modalidade Monografia, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia de Computação do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA, sob orientação da Professora MSc. Michelle Bitar Lelis dos Santos.

Belém

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
Biblioteca do Cesupa, Belém - PA

Ferreira, Flávio da Costa.

A tecnologia SDN em redes móveis 5G / Flávio da Costa Ferreira, Pedro Lucas Araújo de Carvalho; orientação de Michelle Bitar Lelis dos Santos, 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Centro Universitário do Pará, Belém, 2018.

1. Tecnologia de redes sem fio. 2. Inovação tecnológica. I. Carvalho, Pedro Lucas Araújo de. II. Santos, Michelle Bitar Lelis dos (orient.). III. Título.

CDD. 23º ed. 004.6

FLÁVIO DA COSTA FERREIRA
PEDRO LUCAS ARAÚJO DE CARVALHO

A TECNOLOGIA SDN EM REDES MÓVEIS 5G

Trabalho de Curso na modalidade Monografia apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia de Computação do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA.

Data da Defesa: 15/06/2018

Banca Examinadora:

Prof. Orientadora MSc. Michelle Bitar Lelis dos Santos - CESUPA

Prof. MSc. Marcos Venícios Conceição de Araújo - CESUPA

Prof. MSc. Paulo Tadeu Resque de Souza - UFPA

Belém

2018

Para você, querido amigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço admiravelmente à senhora Iraciléia Ferreira, ao senhor Carlos Ferreira e a querida Letícia Ferreira por serem a base que me sustenta e a todos os esforços realizados para que hoje eu pudesse estar onde estou.

Agradeço aos que me ajudaram em todo o trajeto até minha chegada em Belém, aos que me estimularam a discordar de uma realidade estagnada.

Meus sinceros agradecimentos a vocês, meus amigos, que aceitaram quem eu sou e me fizeram gozar da vida como jamais imaginaria. A você, Thiago, autor da minha segunda chance. A você, Cindy, pela confiança e motivação. A você, Mateus, por ter aceitado fazer parte da minha vida.

A você, Pedro, minha gratidão por estar presente nos momentos mais ilógicos dos quais vivi e por todo o estímulo doado.

Agradeço aos professores agentes dessa realização pessoal, que em inúmeros momentos me direcionaram de volta para a trilha. A você, Michelle, por ser admirável e ter deixado esse caminho mais fácil.

Ao CESUPA, meus eternos agradecimentos por me conceder o privilégio de recomeçar.

Ao universo, agradeço a oportunidade.

Flávio Ferreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Rosilene e Pedro, por sempre me apoiarem e se dedicarem a me proporcionar a melhor educação possível. Sem vocês nada disso seria possível, muito obrigado.

Aos meus amigos do colégio, que se fizeram presentes desde o início nessa jornada da vida sempre ao meu lado, em especial ao Davi, por se fazer tão presente sempre me ajudando e apoiando no que fosse.

Aos amigos que a faculdade me deu, que estão comigo desde o início dessa jornada acadêmica, me ensinaram muita coisa e sempre me apoiaram, em especial ao Tiago, que trilhou essa jornada junto comigo.

Ao Flávio, que além de companheiro de trabalho, se tornou um grande amigo e uma pessoa que eu sei que posso contar, obrigado.

A Adyne, que se fez tão presente no que posso dizer ter sido a pior época dessa jornada, sempre me apoiando e motivando em tudo. E que até hoje se faz tão presente na minha vida.

E por último, gostaria de agradecer aos professores e coordenadores do curso. Obrigado pelos ensinamentos e compreensão. Em especial a professora Michelle, por nos orientar e ajudar no que fosse possível para realização desse trabalho.

Pedro Lucas.

“Meu objetivo é simples. É a compreensão completa do Universo, por que ele é assim e por que existe de uma maneira geral. ”

Stephen Hawking

RESUMO

A chegada de novas tecnologias que alavacarão o desenvolvimento das cidades inteligentes, dos carros autônomos e da internet das coisas irá aumentar significativamente as taxas de dados das redes. Uma diversa gama de novos dispositivos surgirá e com eles a necessidade de atender uma série de requisitos, além das exigências por uma latência extremamente baixa e um *throughput* extremamente alto. O 5G entra nesse cenário como solução para essa nova era que requer uma grande densidade de conexão. Nesse primeiro instante, a nova rede está sendo implementada a partir da infraestrutura do núcleo da rede 4G já existente, porém, um novo núcleo está sendo padronizado e irá utilizar as tecnologias SDN e NFV, buscando trazer simplicidade e flexibilidade, transformando o atual modelo em um paradigma totalmente novo e com grandes benefícios. Este trabalho busca compreender através de um estudo técnico a aplicação da SDN nessa nova arquitetura desenvolvida para o 5G, detalhando seu funcionamento e destacando vantagens e desvantagens, ressaltando ainda, que essa tecnologia trará dinamismo nos serviços de rede e é apresentada como chave para que sejam alcançados diversos desafios exigidos nessa nova geração de redes móveis.

Palavras-chave: 5G. Flexibilidade. SDN. NFV.

ABSTRACT

The new technologies that will boost the development of smart cities, autonomous cars and the internet of things will significantly increase the data rates of networks. A diverse range of new devices will emerge and with them the need to attend a series of requirements, in addition to the demands for extremely low latency and extremely high throughput. 5G joins this scenario as a solution to this new era that requires a high number of connection at the same time. In this first moment, the new network is being implemented using the core infrastructure of the existing 4G network, however, a new core is being standardized and will use SDN and NFV technologies, seeking to bring simplicity and flexibility, transforming the current model into a totally new paradigm with great benefits. This work aims to understand, through a technical study, the application of SDN in this new architecture developed for 5G, detailing its operation and highlighting advantages and disadvantages, emphasizing that it will bring dynamism for the network services and it is presented as a key technology for achieving several challenges required in this new generation of mobile networks.

Keywords: 5G. Flexibility. SDN. NFV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arquitetura de Rede Definida por Software.....	25
Figura 2 - Modo de funcionamento de uma SDN	26
Figura 3 – Arquitetura de rede com protocolo OpenFlow	27
Figura 4 – Separação dos planos de dados e controle no OpenFlow	28
Figura 5– Campos de cabeçalho de um fluxo de um switch OpenFlow	29
Figura 6 – Visão geral do SD-Access.....	30
Figura 7 – Operação básica de uma SD-WAN.....	31
Figura 8 – Cenários de uso do 5G	34
Figura 9 – Principais recursos do 5G	35
Figura 10 – Arquitetura NFV.....	38
Figura 11 – Virtualização do EPC	38
Figura 12 – Arquitetura 5G	39
Figura 13 – Diferença entre RAN distribuída e centralizada	41
Figura 14 – RAN virtualizada.....	42
Figura 15 – Beamforming tradicional.....	43
Figura 16 – Transformação de Rede.....	44
Figura 17 – Utilização do EPC pelo 4G e 5G e evolução para o 5G Core	45
Figura 18 – Arquitetura EPC	46
Figura 19 – Estrutura básica do HSS	47
Figura 20 – MME em rede EPC	47
Figura 21 – PGW e SGW em rede EPC.....	48
Figura 22 – Arquitetura baseada em serviço para o núcleo 5G	50
Figura 23 – Variedade de dispositivos no 5G.....	52
Figura 24 – Fatiamento de rede	52
Figura 25 – Fatiamento de rede de acordo com 3GPP	53
Figura 26 – Arquitetura de rede descentralizada.....	54
Figura 27– Arquitetura de rede centralizada	55
Figura 28 – Camadas da arquitetura SDN	57
Figura 29 – Visualizações de recursos por um controlador SDN	58
Figura 30 – Arquitetura SDN para 5G	59
Figura 31 – Processo detalhado do protocolo OpenFlow.....	60
Figura 32 - Resultados da simulação de Frankfurt.....	66

Figura 33 - Huawei realizando testes de 5G no distrito de Huairou	67
Figura 34 - Parceria 5G: Samsung e Verizon.....	68
Figura 35 - Carro autônomo nas ruas de Seul	71
Figura 36 - Apresentação do 5G em Santa Rita do Sapucaí.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos do 5G em comparação com o 4G	35
Tabela 2 - Diferenças entre uma rede SDN e uma convencional	61

LISTA DE SIGLAS

1G	Primeira Geração de Redes Móveis
2G	Segunda Geração de Redes Móveis
3G	Terceira Geração de Redes Móveis
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração de Redes Móveis
4K	<i>Ultra HD</i>
5G	Quinta Geração de Redes Móveis
5GC	<i>5G Core</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
APIs	<i>Application Program Interfaces</i>
ASIC	<i>Application Specific Circuits</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
CPE	<i>Customer Premise Equipment</i>
C-RAN	<i>Centralised RAN</i>
DL	<i>Downlink</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
eNodeB	<i>Evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
Gbps	<i>Gigabit por segundo</i>
GHz	<i>Giga-Hertz</i>
GSMA	<i>Global System for Mobile Communications Association</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>

LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
Mbps	<i>Megabit por segundo</i>
MDU	<i>Multi-Dwelling Unity</i>
MHz	<i>Mega-Hertz</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MmWave	<i>Millimeter Wave</i>
Ms	<i>milissegundo</i>
NCC	<i>Núcleo de Computação Científica</i>
NEF	<i>Network Exposure Function</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
NGMN	<i>Next Generation Mobile Networks</i>
NR	<i>New Radio</i>
NRF	<i>Network Repository Function</i>
NSA	<i>Non-Stand Alone</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Resource Function</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PGW	<i>Packed Data Network Gateway</i>
QCT	<i>Quanta Cloud Technology</i>
QoE	<i>Quality of Experience</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RFIC	<i>Radio Frequency Integrated Circuits</i>
RRH	<i>Remote Radio Head</i>
SBA	<i>Service-Based Architecture</i>
SD-Access	<i>Software Defined Access</i>
SD-Campus	<i>Software Defined Campus</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
SD-WAN	<i>Software Defined Wide Area Network</i>
SGSN	<i>Short for Service GPRS Support Node</i>
SGW	<i>Serving Gateway</i>

SMF	<i>Session Management Function</i>
TEC	<i>Telecommunication Engineering Center</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TI	<i>Tecnologia da Informação</i>
UDM	<i>Unified Data Management</i>
UE	<i>User Equipament</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UL	<i>Uplink</i>
Unesp	Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho
UPF	<i>User Plane Function</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low Latency Communication</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 Objetivo geral	21
1.1.2 Objetivos específicos	21
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 METODOLOGIA	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2 A TECNOLOGIA SDN	24
2.1 PROTOCOLO OPENFLOW	26
2.2 SOLUÇÕES SDN	29
2.2.1 Cisco Software-Defined Access	29
2.2.2 SD-WAN	31
2.2.3 Soluções de SDN Campus	32
2.2.4 Plataforma Kytos de SDN	32
3 A 5ª GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS	34
3.1 ARQUITETURA 5G	37
3.2 RADIO ACCESS NETWORK (RAN)	40
3.2.1 A Transmissão da Rede 5G	43
3.3 ARQUITETURA DO NÚCLEO DA REDE 5G	44
3.3.1 O 5G Core	49
4 A TECNOLOGIA SDN EM REDES 5G: VANTAGENS E DESVANTAGENS	54
5 TESTES 5G EM ANDAMENTO NO MERCADO MUNDIAL	65
5.1 SIMULAÇÕES DE 5G DA QUALCOMM NAS CIDADES DE FRANKFURT E SÃO FRANCISCO	65
5.2 TESTES DA HUAWEI DE 5G NO DISTRITO DE HUIROU, EM PEQUIM	66
5.3 SAMSUNG E VERIZON REALIZAM PRIMEIROS TESTES DA TECNOLOGIA 5G PARA USUÁRIOS	68
5.4 TESTE DE 5G REALIZADO PELA NOKIA EM PARCERIA COM A OPERADORA NTT DOCOMO NO JAPÃO	70
5.5 TESTE DE CARRO AUTÔNOMO COM 5G REALIZADO NA COREIA	71
5.6 5G NO BRASIL	71
5.6.1 Testes do 5G no Brasil	73

6 CONCLUSÃO	75
7.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS	75
7.2 TRABALHOS FUTUROS	76

1 INTRODUÇÃO

Com a finalidade de facilitar e tornar a vida das pessoas mais proveitosa, a tecnologia surgiu com a humanidade e desde então, numerosos avanços manifestaram-se. No âmbito da comunicação, um bom exemplo foi a transição de uma rede cabeada para uma rede sem fio. Depois de gerações de pesquisas e desenvolvimento, as redes móveis evoluíram da primeira geração (1G) que tinha o foco na transmissão de voz, para a atual quarta geração (4G), que tem por base a transmissão de dados (HSIN-HUNG et al., 2014).

A primeira geração de redes móveis de comunicação foi adentrada no mercado no início da década de 1980, estabelecendo uma conectividade sem interrupções, introduzindo serviços de voz móveis de acesso analógico. Dez anos depois, chegou a segunda geração (2G) aumentando a capacidade de voz e proporcionando mobilidade aos usuários, agora com tecnologias de acesso múltiplo digital que aumentaram a qualidade dos serviços de voz e iniciaram os serviços de mensagens curtas e multimídia. Posteriormente surge a terceira geração (3G), otimizando a mobilidade para dados que permitem serviços de banda larga móvel. A quarta geração integra o 3G com internet fixa para suportar internet móvel sem fio, uma evolução que supera as limitações do 3G, aumentando a largura de banda e reduzindo o custo dos recursos (GIOTOPOULOU, 2015).

As redes de comunicação sem fio se disseminaram muito além do que estava sendo esperado quando o conceito de celular foi instituído e, com isso, a indústria de comunicação móvel tem crescido intensamente desde a década de 1990. A repercussão do celular produziu o surgimento de novos sistemas e padrões para tipos de tráfego além de chamadas de voz para redes sem fio e, esse crescimento acelerado de assinantes da telefonia móvel demonstra que as comunicações sem fio foram uma evolução decisiva para o modelo de vida atual (MIR; KUMAR, 2015).

A presente quarta geração, em conjunto com os dispositivos da telefonia móvel, tornou-se indispensável na rotina de cada indivíduo, o que representa um enorme avanço para o setor de comunicações, pois possui uma capacidade de suportar altas taxas de dados. Conforme a quarta geração começa a se consolidar, a atenção passa a mudar de direção e transfere-se para a futura quinta geração (5G) (WOON; ZHONG; HAINES, 2014).

Com a chegada da quinta geração de redes móveis, no tempo em que consumidores e empresas buscam identificar processos e canais que aumentem o

proveito de suas vidas e de seus negócios, manifestam-se novos casos de uso para a tecnologia, prevê-se o surgimento de novos serviços e o fornecimento de uma plataforma para o crescimento de várias áreas. A presença de uma transformação digital já é constatada em quase todos os setores, protagonizada pela mobilidade, nuvem e banda larga, ocasionando uma mudança na forma de se comunicar (ERICSSON, 2017).

Empresas que já participam da cadeia de valor das redes móveis de comunicação que é a tecnologia central dessa revolução tecnológica, como as operadoras de telecomunicações e aquelas recém-chegadas de outras indústrias, se beneficiam com o aparecimento de novas oportunidades de negócios. O objetivo de evoluir para a quinta geração da tecnologia móvel é propiciar melhores recursos para consumidores e demais setores da sociedade (ERICSSON, 2017).

No decorrer do tempo e mediante o avanço das comunicações móveis, em cada geração das redes, a velocidade de dados progrediu e espera-se um avanço ainda maior no 5G. Essa tecnologia é vista como uma futura evolução na comunicação de dados sem fio, representando um melhor desempenho com uma rede operante em todo o mundo, garantindo uma banda larga superior e uma taxa de transmissão de dados com uma redução expressiva no atraso. Diferentes aplicações serão permitidas com o 5G, como carros autônomos, robôs humanoides e a *Internet of Things* (IoT), que traz consigo uma gama de dispositivos conectados e repletos de sensores embutidos (PRETZ, 2017).

Mesmo com a ascensão das novas redes de dados móveis, somente atualizar o *hardware* e o *software* para essas novas tecnologias, não será o bastante para um bom funcionamento. Com o 5G, o número de dispositivos vai aumentar significativamente, considerando o que está sendo esperado de IoT e ainda, as conexões devem ser 100 vezes mais rápidas que a velocidade atual da rede. Dispondo dessas informações, é introduzida uma tecnologia capaz de propiciar maior flexibilidade e simplicidade na rede, chamada *Software Defined Networking* (SDN) (PRETZ, 2017).

Kim e Feamster (2013) conceituam a SDN como um paradigma em que há um controlador gerenciando o comportamento geral da rede. Afirmam ainda que esse controlador apresenta vantagens de uma abordagem centralizada na configuração da rede, podendo então tomar decisões de encaminhamento de tráfego

de toda a rede em um único local, não havendo mais a necessidade de configurar cada dispositivo individualmente para alterar o comportamento da rede.

Segundo Gielsen e Oliveira (2017), a tecnologia SDN tem se mostrado de grande importância nos níveis experimentais e comerciais para a indústria, isso por apresentar um modelo atual de arquitetura de redes preparado para trabalhar com as dificuldades e desafios existentes no modelo vigente. Essa arquitetura tem como proposta diminuir as restrições de *hardware* e gerenciar o desempenho da rede através de *Application Program Interfaces* (APIs). Ainda que tenham componentes de *hardware* conectados, os administradores de rede conseguem conceder serviços por meio da rede mediante a um plano de controle centralizado baseado em *software* (CRANFORD, 2017).

O uso da SDN no 5G pode ser enxergado como uma transformação que vai influenciar os setores de telecomunicações e impactar também outras áreas, reduzindo custos, automatizando processos, otimizando o uso de recursos e gerando novos modelos de competições nas cadeias de valor. Algumas causas dessa mudança, são a disponibilidade de soluções de *software* e o grande aumento de banda larga. A SDN é vista como uma solução por ser segura e confiável, porém, há uma expectativa para saber se será sustentável no ponto de vista do negócio, se será capaz de permitir o surgimento de novos modelos de negócios, ao tempo em que os vigentes cenários de serviços de telecomunicações recém-projetados estarão buscando soluções e tecnologias melhores e capazes de tornar o negócio significativo para a realidade (IEEE, 2017).

A SDN é capaz de fornecer para o 5G uma estrutura que permite que se opere toda a rede em um único plano de controle, proporcionando melhores fluxos de dados, além de permitir uma forma de gerenciar e automatizar a redundância de rede apoiada na centralização. Essa associação possibilita uma flexibilidade maior nas redes 5G, permitindo aos provedores atualizar suas operações e serviços, aprimorando sua eficiência (CRANFORD, 2017).

A aplicação da SDN no 5G trará uma arquitetura altamente gerenciável pronta para atender a alta largura de banda e a estrutura dinâmica dos casos de uso do 5G. Atendendo a essa exigência de um melhor gerenciamento nas redes móveis, esta pesquisa expõe uma análise da utilização da tecnologia SDN no 5G, apresentando conceitos básicos de redes definidas por *software* e da quinta geração de redes móveis, para em seguida explorar as vantagens e desvantagens da utilização da

SDN na arquitetura 5G e relatos de teste do 5G executados por operadoras de redes móveis e fornecedores de rede.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste estudo são divididos em geral e específicos, de acordo com os tópicos abaixo.

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo descrever a aplicação de Redes Definidas por Software (SDN) na arquitetura da Quinta Geração de Redes Móveis (5G), analisando vantagens e desvantagens.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compreender a arquitetura da Rede Definida por Software (SDN).
- Compreender fim-a-fim a arquitetura da Quinta Geração de Redes Móveis (5G), com ênfase no núcleo de rede.
- Analisar o uso da SDN implementado no 5G, seus benefícios e dificuldades.
- Relatar testes do 5G em andamento no mercado mundial.

1.2 JUSTIFICATIVA

Ângelo (2015) afirma que no decorrer da palestra “*Mobile: plataforma para o progresso e inovação*” na *Futurecom 2015*, o vice-presidente executivo da *Qualcomm Technologies* e co-presidente mundial da *Quanta Cloud Technology* (QCT), Cristiano Amon, pronunciou-se sobre o futuro dos *smartphones*, das redes 4G e da demanda por uma capacidade ainda maior de uso da rede. Segundo o autor, Amon disse que o que a companhia prevê inicialmente, é que as redes móveis precisam ter capacidade para suportar 1000 vezes mais aparelhos até 2020.

Seguindo a evolução das redes móveis 4G, por todo o mundo grandes indústrias de telecomunicações já estão definindo padrões para o 5G. Enquanto o 4G é caracterizado por velocidade e uma infraestrutura inteiramente IP, o 5G tem como propósito a criação de novas oportunidades de negócios para operadoras móveis e gradativamente garantir um serviço mais personalizado aos usuários (JUNIPER, 2015).

De acordo com Paiva (2018), o CEO da *Ericsson* Börje Ekholm, falou em uma entrevista que o 5G deixou de ser um simples rumor e tornou-se uma realidade comercial. Ekholm também citou que na América do Norte as aplicações primeiramente serão direcionadas para o acesso fixo à internet sem fio com uma velocidade com qualidade surpreendente, enquanto que em países como a China, o 5G será logo direcionado para aplicações na indústria que exigem o mínimo de latência (PAIVA, 2018).

A *Qualcomm* (2018) sinaliza que o 5G não virá apenas com a intenção de interconectar as pessoas, mas interconectar e controlar máquinas, objetos e dispositivos. Afirma também que o alto nível de desempenho permitirá novas experiências ao usuário e irá conectar novas indústrias, fornecendo taxas de pico de vários Gbps (*Gigabits* por segundo), uma grande redução da latência e uma experiência de usuário mais uniforme.

Com o objetivo de implementar a arquitetura 5G e conectar uma enorme variação de componentes, será necessário a modelagem de novos níveis de flexibilidade, agilidade e automação. A arquitetura dependerá essencialmente de uma infraestrutura SDN, garantindo assim a flexibilidade necessária para a execução de funções de rede sob demanda e o suporte a diversas novas aplicações móveis (JUNIPER, 2015).

No cenário atual, é notado que o tempo, custo e complexidade para fazer implementações de novos serviços e expansões no 4G são muito altos, então é preciso um novo paradigma preparado para lidar com as problemáticas existentes no momento, pois com o aumento do número de dispositivos, aumenta também a exigência por uma arquitetura que favoreça uma maior velocidade e menor latência. A SDN é empregada com o fim de facilitar a gerência da rede e tornar possível essas condições. Isto posto, o motivo da elaboração deste trabalho é apresentar através de um estudo técnico que os atuais problemas vividos no 4G serão resolvidos com o uso da arquitetura SDN no 5G, explorando as técnicas de gerenciamento e os benefícios de sua aplicação na futura geração de redes móveis.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de uma pesquisa bibliográfica descritivo-explicativa referente a tecnologia SDN em redes móveis 5G. Os procedimentos metodológicos têm por base a visão de órgãos padonizadores de tecnologia e telecomunicações,

como o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), complementado com buscas em artigos científicos, monografias e sites de notícias de institutos e empresas de tecnologia ligados à área.

Com base no entendimento do estudo feito a respeito da arquitetura de redes definidas por *software*, assim como o funcionamento da quinta geração de redes móveis, estará sendo mostrado a aplicação da SDN no 5G, com suas referentes vantagens para esse novo padrão.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do capítulo introdutório citado, o trabalho é organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 – capítulo centrado na tecnologia SDN, explicando sua arquitetura, protocolos utilizados e sua atual situação no mercado.
- Capítulo 3 – capítulo centrado na quinta geração de redes móveis, detalhando a arquitetura e o funcionamento do seu núcleo.
- Capítulo 4 – explora a utilização da tecnologia SDN no 5G, detalhando seu funcionamento, arquitetura e gerenciamento, analisando vantagens e desvantagens.
- Capítulo 5 – neste capítulo são relatados os testes e aplicações do 5G que estão ocorrendo atualmente no mercado mundial.
- Capítulo 6 – neste capítulo são apresentadas as considerações finais da pesquisa, dificuldades encontradas e trabalhos futuros.

2 A TECNOLOGIA SDN

As tradicionais redes IP (*Internet Protocol*) por mais que sejam utilizadas em larga escala, possuem uma complexidade que dificulta o seu gerenciamento. Para que as operadoras consigam expressar as políticas de rede de alto nível, é necessário efetuar a configuração de cada dispositivo de rede individualmente usando comandos de baixo nível habitualmente específicos de fornecedor e, os ambientes de rede ainda precisam lidar com a dinâmica das falhas e se adaptarem às mudanças de carga. Sendo assim, quase não há métodos de reconfiguração e respostas automáticas nas redes IP do momento, o que torna desafiadora a tarefa de empregar políticas necessárias em um ambiente dinâmico (KREUTZ et al., 2015).

A implantação de novos protocolos é fortemente prejudicada em consequência do uso de *softwares* proprietários e do desenvolvimento fechado em dispositivos de rede de muitos fornecedores, posto que atualizações incrementais para métodos e comandos de configuração são frequentemente ditadas pelos fornecedores ao mesmo tempo em que as exigências das operadoras por mais funcionalidade e políticas de rede mais complexas continuam aumentando. Com esse contexto, os operadores de rede precisam encontrar maneiras de configurar e gerenciar melhor suas redes, dado que a inovação no gerenciamento de redes se limitou a providências temporárias, como o uso de ferramentas que examinam as configurações de baixo nível para encontrar erros ou reportar a eventos de rede (KIM; FEAMSTER, 2013).

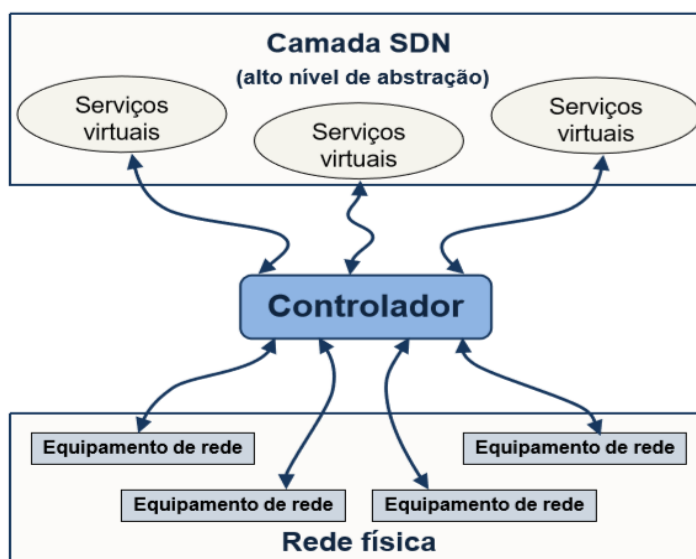
Kim e Feamster (2013) propõem como um meio de resolver esse problema de gerenciamento de rede o uso de SDN, um termo que foi utilizado a primeira vez em 2009, embora já houvessem variadas tentativas de elaborar arquiteturas onde há uma facilidade de programação das redes. Esse modelo dispõe de um controlador, um programa de *software* central que determina o comportamento geral da rede. Com SDN, os dispositivos de rede equivalem a dispositivos simples de encaminhamento de pacotes e a lógica de controle é implementada no controlador.

Os benefícios dessa mudança de paradigma são inúmeros comparados ao modelo de rede atual, já que se torna mais fácil a inserção de novas ideias na rede por meio de um programa de *software*, que é mais simples de se manipular do que usar um conjunto fixo de comandos em dispositivos de rede proprietários. A SDN também apresenta vantagens de uma abordagem centralizada à configuração da rede em contradição ao gerenciamento distribuído, logo os operadores não têm

necessidade de configurar individualmente todos os dispositivos para fazer alterações no comportamento da rede e podem a partir do controlador, tomar decisões de encaminhamento de tráfego tendo informações de todo o estado da rede (KIM; FEAMSTER, 2013).

As SDNs possibilitam o gerenciamento dos serviços de redes por meio da abstração das funcionalidades de nível inferior, que é permitido a partir da separação do plano de dados, o nível mais baixo constituído pelos dispositivos físicos incumbidos de rotear o tráfego de dados, do plano de controle, onde são tomadas as decisões referentes ao roteamento. Nesse modelo de gerenciamento de rede, o plano de controle é deslocado para o controlador SDN, responsável pela configuração do plano de dados dos dispositivos de rede por intermédio de protocolo padrão aberto e que também possibilita a criação de uma camada de alto nível de abstração, a chamada camada SDN, que torna possível a programação dos serviços que serão configurados na rede. A Figura 1 apresenta uma melhor visão dessa arquitetura (RODRIGUEZ, 2014).

Figura 1 – Arquitetura de Rede Definida por Software

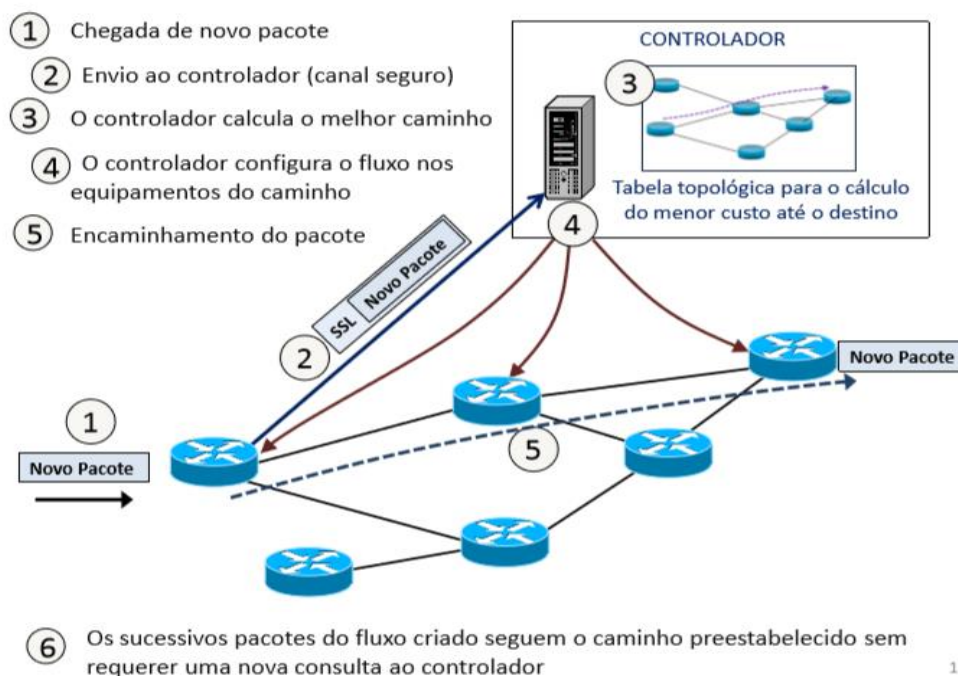


Fonte: Rodriguez (2014, online)

A Figura 2 evidencia com mais clareza o funcionamento de uma SDN. Na situação representada, quando o primeiro pacote de um novo fluxo chega a um dispositivo de rede, até aquele momento ele ainda não tem um fluxo em seu plano de dados que tenha sido pré configurado para lhe direcionar ao encaminhamento do pacote. Por isso, o dispositivo de rede consulta o controlador SDN, que analisa qual o melhor caminho para o fluxo específico e com essa informação, por meio de um

protocolo de comunicação adequado, o controlador SDN então configura o fluxo específico do plano de dados dos equipamentos integrantes do tráfego, garantindo então o roteamento do pacote. Como agora os próximos pacotes do mesmo fluxo já estão pré configurados com o fluxo específico no plano de dados, estes não necessitarão consultar novamente o controlador SDN (RODRIGUEZ, 2014).

Figura 2 – Modo de funcionamento de uma SDN



Fonte: Rodriguez (2014, online)

O funcionamento de uma SDN só é possível com a presença de um protocolo de comunicação entre os diversos elementos de rede e o controlador SDN, para que este último consiga manipular as tabelas de fluxos dos elementos de rede. O protocolo mais conhecido para esse fim é o protocolo aberto *OpenFlow*, que fornece uma interface aberta padrão para possibilitar a comunicação (RODRIGUEZ, 2014).

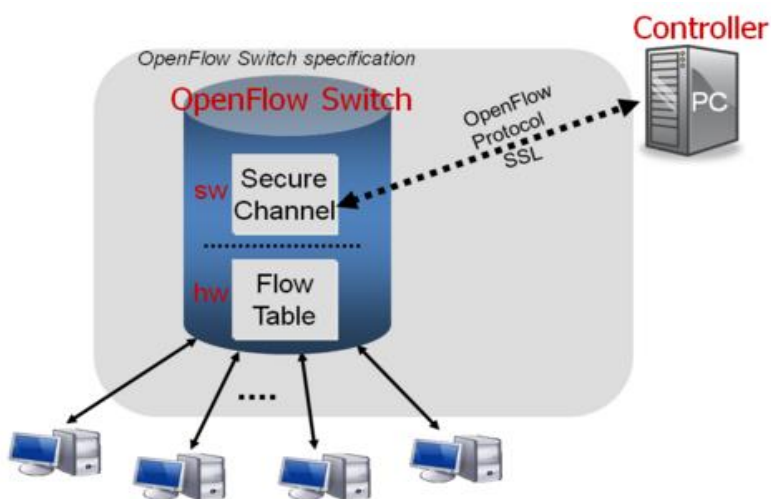
2.1 PROTOCOLO OPENFLOW

O protocolo *OpenFlow* foi proposto pela universidade de *Stanford* para atender a necessidade de validação de novas arquiteturas e protocolos de rede sobre equipamentos comerciais. Foi criado com o objetivo de permitir que os administradores consigam executar na rede real de sua própria universidade ou indústria, mecanismos que permitem a divisão do tráfego em fluxo de produção (fluxo real) e fluxo de pesquisa (CONTERATO et al., 2013).

A maioria dos equipamentos de redes modernos dispõem de uma tabela de fluxo que viabilizam a implementação de funcionalidades como *firewalls*, QoS e a coleta de estatísticas. Dependendo da marca do equipamento, as tabelas de fluxo se diferem, contudo, existe um conjunto de funções comuns à maioria dos equipamentos de rede. A ideia básica do *OpenFlow* é explorar esse conjunto de funções comuns de manipulação de tabelas de fluxo, tornando-se compatível com um maior número de equipamentos (AOYAGI, 2014).

Uma rede *OpenFlow* além de conter *switches* e roteadores, conta com um elemento externo, o controlador. O controlador é quem adiciona e remove as entradas de fluxo em uma tabela de fluxo. Por exemplo, um controlador estático é uma aplicação sendo executada em um computador que determina quais fluxos pertencem ou não a um conjunto de computadores, como pode ser observado na Figura 3. Para que a rede não sofra ataques de elementos mal-intencionados, um canal seguro de comunicação garante a confiabilidade na troca de informações (AOYAGI, 2014).

Figura 3 – Arquitetura de rede com protocolo OpenFlow

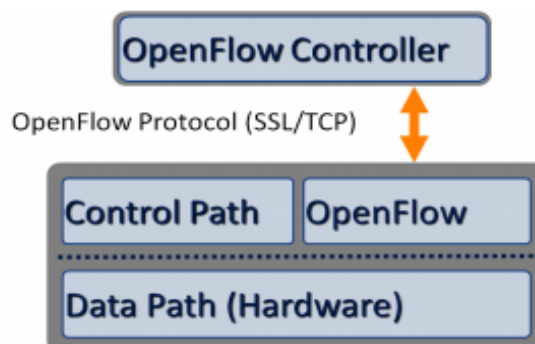


Fonte: Stanford (2010, online)

Em equipamentos de rede como roteadores e *switches* clássicos, o rápido encaminhamento de pacotes (plano de dados) e as decisões de encaminhamento (plano de controle) ocorrem em um mesmo dispositivo. Um *switch OpenFlow* tem a finalidade de separar estas duas funções (Figura 4). A função de encaminhamento dos dados permanece sendo função do *switch*, enquanto que, as decisões de encaminhamento de alto nível são funções agora de um controlador remoto, normalmente localizado em uma máquina servidora. O controlador e o *switch*

OpenFlow realizam a comunicação através do protocolo *OpenFlow*, que define as mensagens tais como: pacotes recebidos, encaminhamento dos pacotes de saída e modificação da tabela de encaminhamento (CONTERATO et al., 2013).

Figura 4 – Separação dos planos de dados e controle no OpenFlow



Fonte: Salsano (2015, online)

Conforme Rodriguez (2014), um elemento de rede onde há a implementação do protocolo *OpenFlow*, tem que atender a três características fundamentais:

- Possuir uma tabela de fluxos e uma ação a ser tomada para cada um deles;
- Ter um canal seguro para toda a comunicação entre os elementos de rede e o controlador *OpenFlow*;
- Usar o protocolo *OpenFlow* para toda a comunicação previamente mencionada, o que garante uma interface padrão que possibilita a comunicação entre os elementos de rede de qualquer fabricante que o implemente e o controlador.

Rodriguez (2014) ainda fala, que para cada fluxo que chega, os *switches OpenFlow* devem realizar ao menos operações básicas:

- Encapsular e reenviar o pacote ao controlador por meio de um canal seguro. Sendo que esta ação vai ser feita para todos os pacotes que ainda não têm uma regra específica na tabela de fluxos;
- Encaminhar o pacote mediante uma regra predeterminada na tabela de fluxos;
- Descartar pacotes, que pode ser feito para impedir o roteamento de alguns fluxos na rede.

A principal abstração utilizada na especificação *OpenFlow* é o conceito de fluxo. Um fluxo é constituído pela combinação de campos do cabeçalho do pacote a ser processado pelo dispositivo, conforme a Figura 5. As sequências de elementos

podem ser formadas por campos das camadas de enlace, de rede ou de transporte, segundo o modelo TCP/IP. A tabela de fluxos ainda está sujeita a refinamentos, com o objetivo de oferecer uma melhor exposição dos recursos do hardware e, nesse caso, permitir a união de várias tabelas já disponíveis (ROTHENBERG et al., 2011).

Figura 5 – Campos de cabeçalho de um fluxo de um switch OpenFlow

inport	Ethernet			VLAN		IP				TCP/UDP	
	src	dst	type	id	pri	src	dst	proto	ToS	src	dst

Fonte: McKeown (2008, online)

Cada entrada na tabela de fluxos do hardware de rede consiste em regra, ações e contadores. A regra é formada com base na definição do valor de um ou mais campos do cabeçalho do pacote. Associa-se a ela um conjunto de ações que definem o modo como os pacotes devem ser processados e para onde devem ser encaminhados (ROTHENBERG et al., 2011).

Atualmente, o crescente mercado do *OpenFlow* já possui roteadores, *switches*, *switches* virtuais e pontos de acesso de uma série de fornecedores. Visto que o *OpenFlow* é um protocolo aberto, o mesmo proporciona inúmeras aplicações para as redes o qual é adotado, liberando os administradores para configurar a rede a sua necessidade.

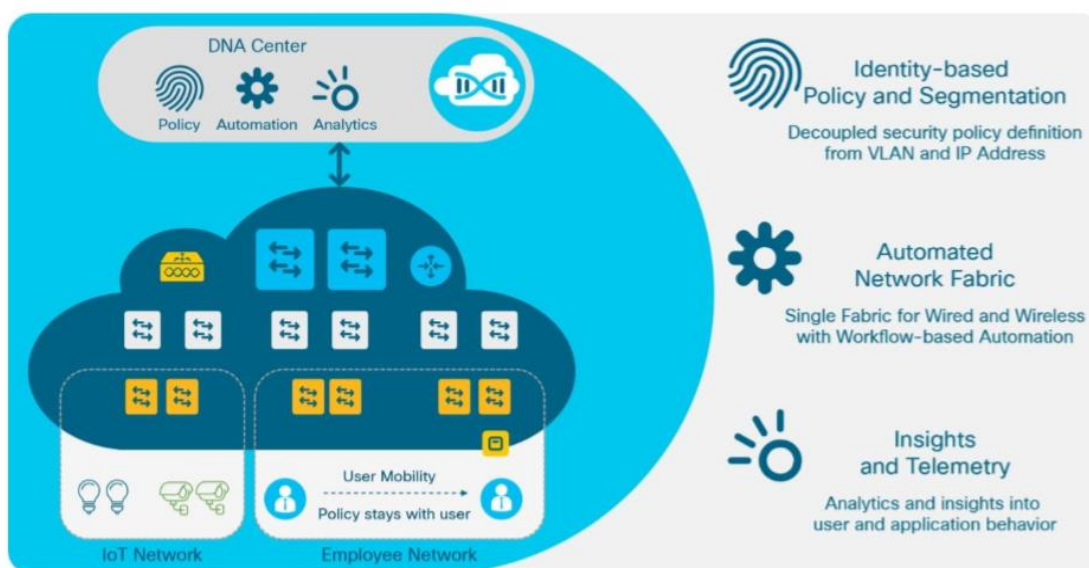
2.2 SOLUÇÕES SDN

Adiante serão mostrados casos do que está acontecendo neste momento no mercado em soluções SDN, como essa tecnologia está transformando a forma de gerenciar os serviços de redes, respondendo as limitações existentes no modelo de rede tradicional.

2.2.1 Cisco Software-Defined Access

O *Software-Define Access* (SD-Access) fornece segmentação de ponta a ponta automatizada, o que separa o tráfego de usuários, dispositivos e aplicativos sem ter que projetar a rede mais uma vez. A política de acesso ao usuário é automatizada para que as organizações assegurem que as políticas corretas sejam estabelecidas para qualquer usuário ou dispositivo em qualquer aplicativo na rede, isso feito com apenas uma malha de rede em *Local Area Network* (LAN) e *Wireless Local Area Network* (WLAN), criando uma experiência de usuário consistente em qualquer lugar sem comprometer a segurança (CISCO, 2018).

Figura 6 – Visão geral do SD-Access



Fonte: Cisco (2018, online)

A figura acima mostra uma visão geral do SD-Access. De acordo com a Cisco (2018), ele viabiliza uma mudança da Tecnologia da Informação (TI), pois melhora a eficiência operacional, aprimora a experiência da força de trabalho e aumenta a segurança. Para essa solução, foram envolvidos os seguintes elementos primordiais de base:

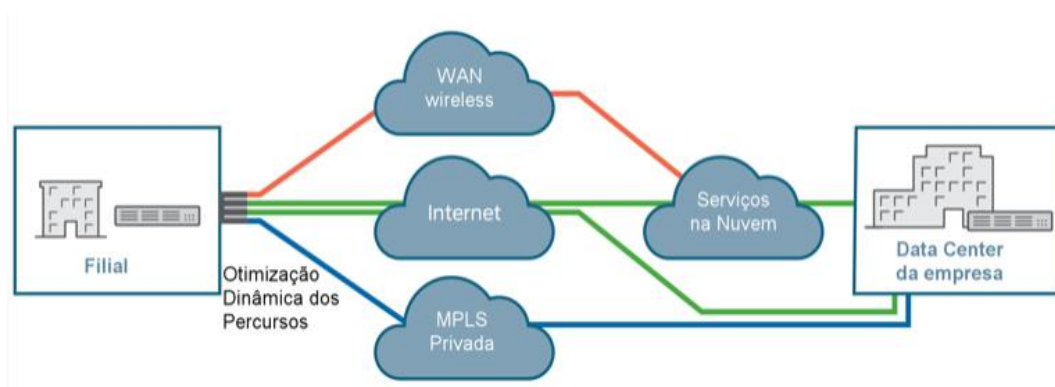
- Rede baseada em controlador: o SD-Access usa uma arquitetura de controlador para direcionar a intenção de negócios para a operação de dispositivos de rede. O controlador fornece uma camada de abstração de rede para decidir as especificações de vários elementos de rede.
- Malha de rede: com o controlador, é coerente considerar a construção da rede em blocos lógicos, nomeados *fabrics*. O SD-Access Fabric utiliza as sobreposições de rede virtual para possibilitar suporte à mobilidade, segmentação e programabilidade em grande escala. Ele permite diversos recursos importantes, como serviços inteligentes para reconhecimento de aplicativos, análise de tráfego, priorização de tráfego e direcionamento para um desempenho otimizado.
- Pilha de *software* de dispositivo moderno: com a intenção de criar uma infraestrutura moderna, a Cisco está equipando os *switches* que já existem e os que estão por vir com recursos avançados para obter-se um gerenciamento completo do ciclo de vida.

2.2.2 SD-WAN

A SD-WAN (*Software Defined Wide Area Network*) é uma abordagem automatizada que visa gerenciar os custos de conectividade e dos circuitos de uma rede empresarial. Ela permite à SDN ser uma aplicação que as empresas podem usar para criar rapidamente uma *Wide Area Network* (WAN) híbrida inteligente. Isto é, uma WAN que integra uma *Virtual Private Network* (VPN) IP destinada a empresas, internet banda larga e serviços *wireless*. A SD-WAN permite o envio automático do tráfego pelo caminho mais adequado da WAN, tendo por base as condições de segurança e as exigências da qualidade de serviços. Quanto às políticas de roteamento, as suas definições podem ser realizadas diretamente pelo usuário empresarial (JUNIPER, 2016).

Tradicionalmente, gerenciar uma WAN é caro e inflexível na operação de uma rede empresarial. A SD-WAN facilita esse gerenciamento com recursos de dispositivos de rede programáveis em que podem ser feitas alterações de forma remota, e também a escolha do melhor caminho para o roteamento. Ela pode monitorar as condições de todos os serviços de linhas públicas e privadas e definir o melhor roteamento de cada aplicação, assim como viabilizar o gerenciamento do congestionamento da rede para alcançar um desempenho superior e minimizar o custo do roteamento. A figura 7 mostra a operação básica de uma SD-WAN (JUNIPER, 2016).

Figura 7 – Operação básica de uma SD-WAN



Fonte: Juniper (2016, online)

De acordo com a Juniper, o suporte a diversos tipos de conexões, o apoio ao fornecimento automático de serviços de rede como *firewalls*, otimização da WAN e controle de envio de aplicações, estão entre as principais características de uma SD-WAN.

A *Huawei* tem sua solução SD-WAN que fornece interconexão sob demanda entre filiais, entre filiais e data centers, e entre as filiais e a nuvem. Oferecendo uma ótima experiência em interconexão empresarial através de direção e aceleração de tráfego inteligente baseada em aplicativos. Essa solução é capaz de identificar mais de seis mil aplicativos conhecidos e definidos pelo usuário (HUAWEI, 2018).

A SD-WAN da *Huawei* é capaz de suportar *plug-and-play* de dispositivo e implantação rápida. Ela facilita o gerenciamento de aplicativos e *links* que podem ser gerenciados visualmente, acelerando a localização da falha para que possa ser resolvida (HUAWEI, 2018).

2.2.3 Soluções de SDN Campus

A *Huawei* tem uma solução de Rede Definida por Software para Campus que se origina de sua solução de Rede *Agile* Campus e usa uma arquitetura de Campus Definido por *Software* (SD-Campus). A arquitetura SDN foi introduzida em redes de campus de maneira completa, ela suporta a estratégia de campus em nuvem da *Huawei* e serve para inúmeros cenários, como prédios corporativos, governamentais e campus corporativo (HUAWEI, 2018).

Segundo a *Huawei* (2018), se a arquitetura SD-Campus for comparada a arquitetura de rede de campus tradicional, ela oferece alguns benefícios, como:

- *Design* de rede baseado em padrões e entrega de serviços automatizada reduzindo os custos de operação.
- A percepção da qualidade da rede garante dados quantitativos para a tomada de decisões.
- A mobilidade livre e a migração de recursos sob demanda certificam uma experiência de usuário consistente.

2.2.4 Plataforma Kytos de SDN

O Núcleo de Computação Científica (NCC) da Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (Unesp) desenvolveu uma plataforma de SDN, chamada *Kytos*. Ela tem por objetivo oferecer uma solução inovadora para o controle de redes SDN. É uma plataforma *open source* que pode se comunicar com qualquer *switch* com suporte ao protocolo *OpenFlow*, independente do fabricante e ainda pode ser usado para criação e compartilhamento de novas aplicações de rede. Os desenvolvedores enumeraram diversas aplicações que podem ser executadas com a plataforma e,

pretendem criar uma comunidade de usuários do *Kytos* para que os membros dessa comunidade criem novas aplicações no futuro e as adicionem as existentes (NCC/UNESP, 2017).

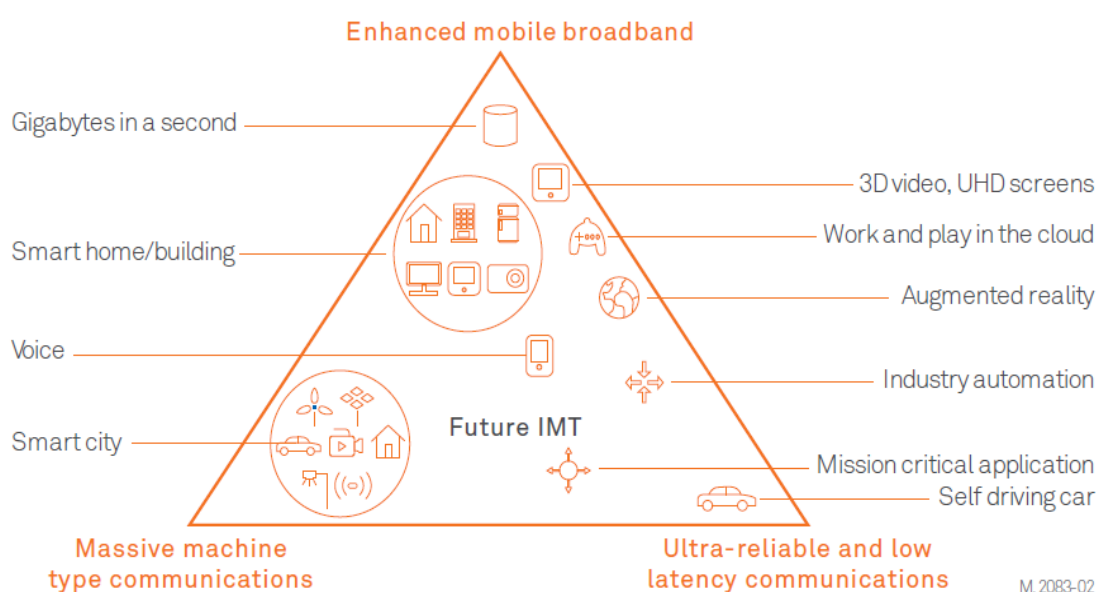
Segundo pesquisas feitas em SDN, essa nova tecnologia tem potencial para gerar inovações e explorar oportunidades em pesquisa e desenvolvimento, com base nos problemas na área de redes atuais. Já que cada fornecedor normalmente cria versões proprietárias dos protocolos de comunicação e os protegem em seu *hardware*, *switches* e roteadores acabam se tornando complexos e difíceis de serem configurados. A SDN tira a inteligência dos dispositivos de redes e então reduz a dependência dos usuários em relação aos fornecedores, assim como permite o desenvolvimento de novos protocolos de redes que podem gerar melhorias nas redes e maiores velocidades de transmissão de dados com melhor segurança, confiabilidade e controle (NCC/UNESP, 2017).

3 A 5ª GERAÇÃO DE REDES MÓVEIS

O 5G traz novos requisitos de comunicação que criam desafios ligados a tecnologia e modelos de negócios para as redes existentes, ele deverá atender a uma variedade de demandas. De acordo com a ITU (*International Telecommunication Union*), agência especializada das Nações Unidas para as tecnologias de informação e comunicação, a banda larga móvel proporcionada pela nova geração objetiva atender uma demanda de pessoas que busca um estilo de vida ainda mais digital e é direcionada para serviços que requerem uma alta largura de banda, como realidade virtual e realidade aumentada (HUAWEI, 2016).

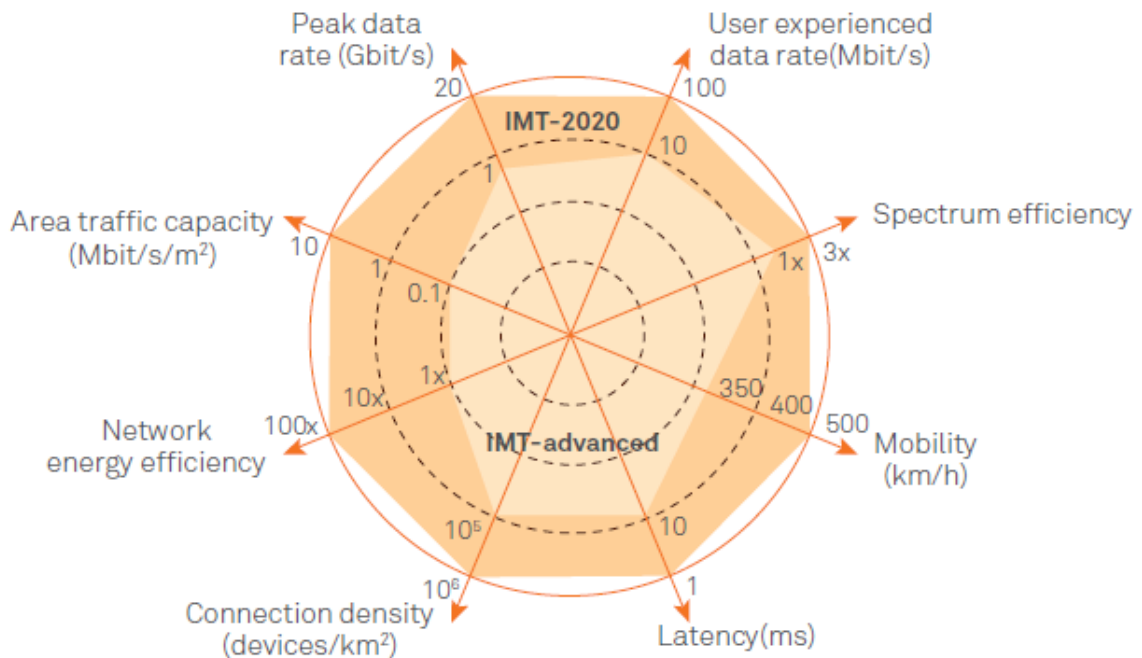
Para a ITU, as comunicações altamente confiáveis e de baixa latência estão focadas na indústria digital, buscando atender as perspectivas que esse mercado exige, concentrando-se em serviços como gerenciamento remoto, enquanto que as comunicações massivas olham para as demandas que tem por prioridade uma sociedade digital mais avançada, focando em serviços que exigem uma alta densidade de conexão, como as *smart city* e *smart agriculture*. A ITU é responsável pela especificação das principais capacidades do 5G, que como pode ser visto nas Figuras 8 e 9, contêm grandes melhorias em comparação com a geração anterior (HUAWEI, 2016).

Figura 8 – Cenários de uso do 5G



Fonte: ITU (2017, online)

Figura 9 – Principais recursos do 5G



Fonte: ITU (2017, online)

Se comparados os padrões definidos pela ITU, IMT-Advanced (4G) e IMT-2020 (5G), é observada uma grande diferença entre os requisitos de cada rede. A Tabela 1 mostra essa diferença entre as duas gerações.

Tabela 1 – Requisitos do 5G em comparação com o 4G

	IMT-Advanced	IMT-2020
Taxa de pico de dados	DL: 1 Gbps UL: 0,05 Gbps	DL: 20 Gbps UL: 10 Gbps
Taxa de dados da experiência do usuário	10 Mbps	100 Mbps
Eficiência espectral de pico	DL: 15 bps/Hz UL: 6,75 bps/Hz	DL: 30 bps/Hz UL: 15 bps/Hz
Eficiência espectral média		DL eMBB interno: 9 bps/Hz DL eMBB urbano: 7.8 bps/Hz DL eMBB rural: 3.3 bps/Hz UL eMBB interno: 6.75 bps/Hz UL eMBB urbano: 5.4 bps/Hz UL eMBB rural: 1,6 bps/Hz

Mobilidade	350 km/h	500 km/h
Latência	10 ms	1 ms
Densidade de conexão	100 mil dispositivos/km ² .	1 milhão de dispositivos/km ² .
Network Energy Efficiency	1 (normalizado)	100X sobre IMT-Advanced
Capacidade de tráfego de área	0,1 Mbps/m ² .	10 Mbps/m ² .
Largura de banda	Até 20 MHz/canal de rádio (até 100 MHz agregado)	Até 1 GHz (portadoras RF simples ou multipolar)

Fonte: 5G Americas (2017, online)

De acordo com a tabela acima, no 4G a latência era de 10 ms, o que já era visto como um bom resultado, mas ainda não alcançava as necessidades de tecnologias que exigem um tempo de resposta mínimo. Com o 5G, a ITU requisita uma latência que pode chegar a 1 ms, o que impressiona pela gama de possibilidades que essa redução vai atender, como exemplo de carros autônomos que exigem esse tempo mínimo para que possam operar.

Outro dado importante da Tabela 1, é a taxa de transferência de dados ou *throughput*, que no 5G pode chegar a 20 Gbps de *downlink* (DL) e 10 Gbps de *Uplink* (UL), enquanto que no 4G esses números eram de 1 Gbps e 0,05 Gbps, respectivamente. O *throughput* relacionado a experiência do usuário que era de 10 Mbps, agora chega a 100 Mbps, revelando melhorias que afetam positivamente a qualidade da experiência de usuário.

Enquanto a ITU especifica essa série de requisitos que o 5G precisa atender, o 3GPP é um órgão responsável pelo desenvolvimento de padrões de telecomunicação e é ele que padroniza todo o funcionamento lógico das redes móveis, desde a primeira geração até o 5G. O 3GPP cobre as tecnologias de redes de telecomunicações celulares, incluindo o acesso via rádio, a rede de transporte central e as capacidades de serviço (incluindo segurança e qualidade de serviço) e, portanto, fornece especificações completas do sistema e a partir dessa padronização, os fornecedores implementam seus equipamentos cada um da maneira que achar mais viável.

3.1 ARQUITETURA 5G

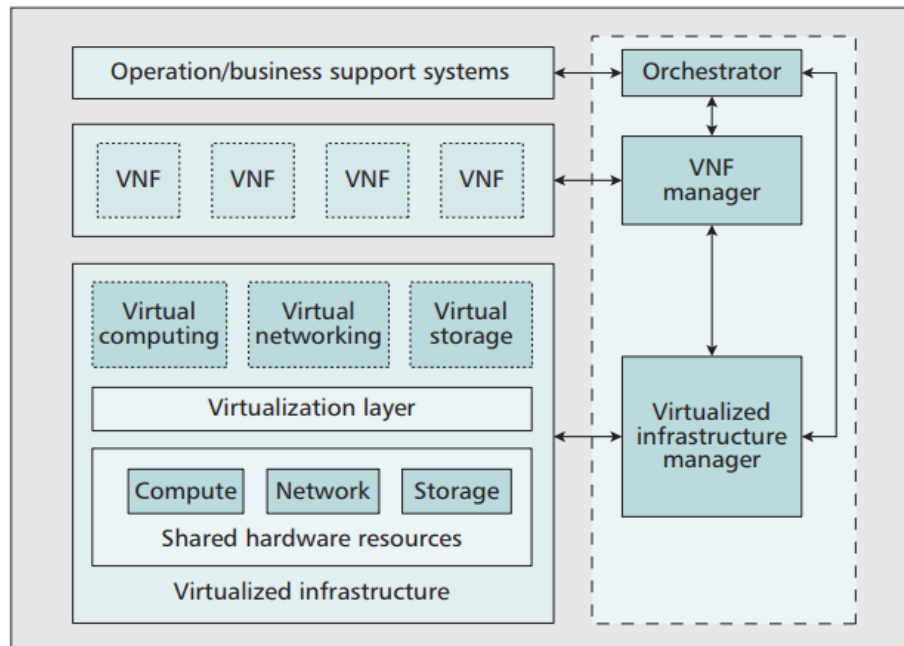
A arquitetura 5G permite novas oportunidades de negócios, atendendo aos diversos requisitos de implementações de novas tecnologias e serviços, permitindo assim, testes de maneira econômica que abordam tanto o usuário final quanto os serviços operacionais, integrando comunicação e computação, além de tecnologias heterogêneas. Em decorrência dessas características, o 5G tem várias vantagens a serem exploradas (5G-PPP, 2014).

A *Network Functions Virtualization* (NFV) surgiu para resolver alguns dos principais desafios que os operadores de rede enfrentam hoje para realizar a implementação de novos serviços. O tempo excessivo para o desenvolvimento e implantação desses novos serviços, o aumento de custos de energia, os desafios de investimento de capital e a complexidade em planejar e desenvolver esses serviços, são problemas que a NFV visa abordar aproveitando as tecnologias padrões de virtualização, consolidando inúmeros dispositivos de rede (5G-PPP, 2017).

Segundo Han (2015), se comparada com o modelo atual, a arquitetura NFV (Figura 10), apresenta três principais diferenças:

- Separação entre *software* e *hardware*: permitindo que ambos evoluam independentemente um do outro.
- Flexibilidade na implementação de funções de rede: NFV pode automaticamente executar funções de rede em diferentes equipamentos ao mesmo tempo. De acordo com os recursos do equipamento, podem executar diferentes funções em diferentes momentos e em diferentes *data centers*.
- Distribuição dinâmica de serviços: operadores de rede podem dimensionar o desempenho do NFV dinamicamente com base nas condições da rede.

Figura 10 – Arquitetura NFV

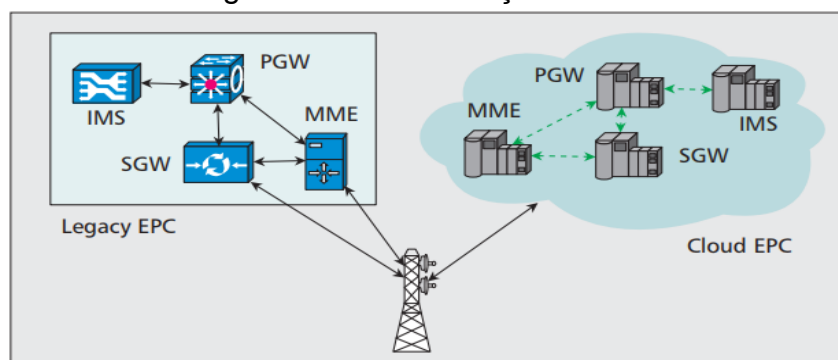


Fonte: ETSI (2013, online)

As principais empresas de telefonia móvel atualmente sofrem com a enorme variedade de equipamentos caros e proprietários, bem como a sinalização e inflexibilidade dos protocolos utilizados. Quando uma função específica não é disponível em determinado dispositivo, as operadoras precisam substituir os equipamentos existentes, mesmo que sejam suficientes para a maioria dos propósitos, revelando a dificuldade em ofertar um serviço completo (HAN, 2015).

A rede núcleo aproveita o mecanismo de tunelamento sobre protocolos de transporte e de alguns *gateways* centralizados para o tráfego de dados do usuário. Estes túneis tem um custo muito elevado para serem mantidos. O EPC (*Evolved Packet Core*) em nuvem (Figura 11), pode resolver esses problemas virtualizando a rede principal para atender aos requisitos de mercado em constante mudança (HAN, 2015).

Figura 11 – Virtualização do EPC

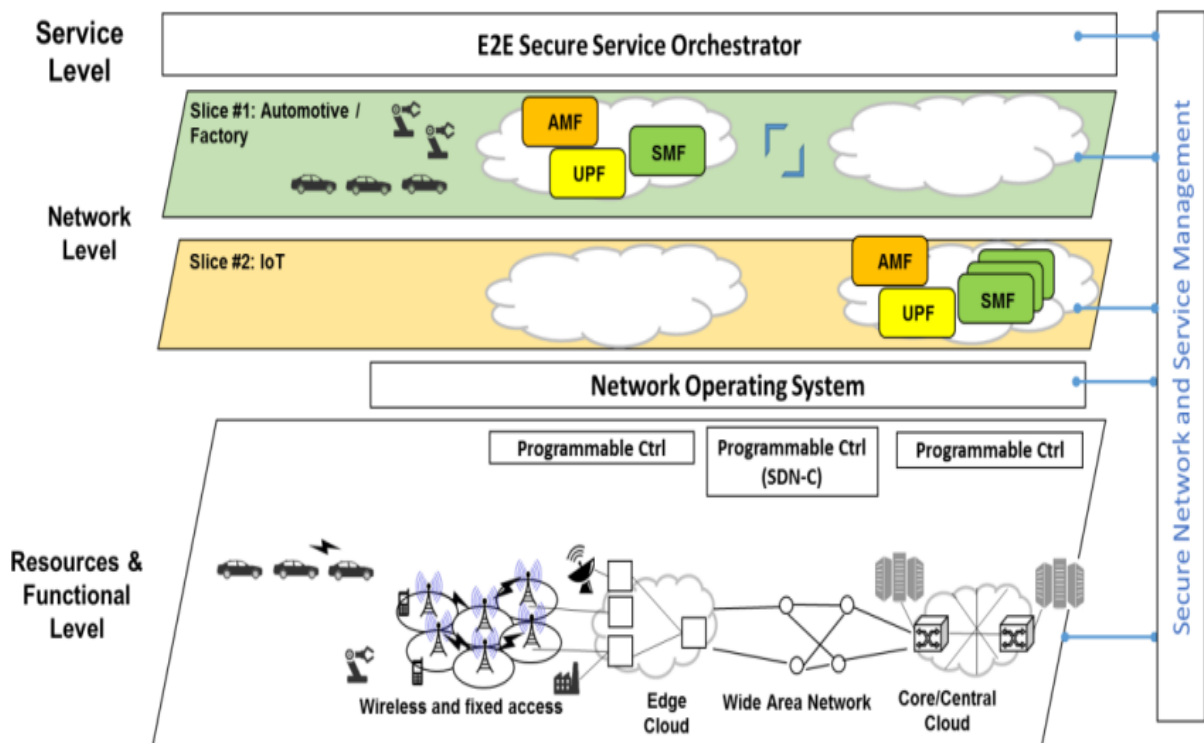


Fonte: Han (2015, online)

Seguindo os princípios de *design*, a *Next Generation Mobile Networks* (NGMN) (2015) visa uma arquitetura futura, que se utiliza da separação de *hardware* e *software*, do mesmo modo que aproveita a programação oferecida pela SDN e NFV. A tecnologia SDN, como foi visto no capítulo anterior, fornece um controlador central capaz de fazer o gerenciamento geral da rede, facilitando a sua programação e com isso, sendo essencial para o funcionamento da nova geração. Essa implementação da SDN no 5G será melhor comentada no próximo capítulo.

Ambas as tecnologias, NFV e SDN, são fundamentais para permitir as ferramentas necessárias para que operadoras de telefonia móvel lidem com o enorme volume de dados de clientes nos casos de usos do 5G. A união do NFV e SDN vai possibilitar que as operadoras sejam mais receptivas às exigências dos clientes de maneira dinâmica, assim como em casos de serviços realizados sob demandas (5G-PPP, 2017).

Figura 12 – Arquitetura 5G



Fonte: 5G-PPP (2017, online)

A arquitetura das redes móveis 5G (Figura 12), é uma arquitetura SDN/NFV nativa, atendendo aos requisitos de diversos equipamentos de rede, infraestrutura (móvel/fixo) e funções de rede, permitindo aos administradores a capacidade de gerenciar todas as funções que constituem o sistema 5G (NGMN, 2015).

Como o conceito de rede em camadas está em um estado inicial, a arquitetura proposta pode servir como um ponto de referência e aliviar uma série de importantes questões de *design* relacionadas ao ciclo de vida do fatiamento da rede e ao gerenciamento. De acordo com Katsalis (2017), essa arquitetura é composta por três componentes:

- Camada de Serviço (*Service Layer*): Essa camada suporta todas as funções usadas para o gerenciamento do ciclo de vida de cada fatia de rede, relacionadas à implementação, instanciação, gerenciamento, controle, dimensionamento e encerramento das fatias da rede. É também a camada em que ocorre a transformação de modelos de fatia de rede em um pacote operacional de recursos e serviços, adaptada a um caso de uso específico.
- Camada de Negócios (*Business Layer*): As redes 5G devem lidar com uma ampla gama de aplicações e precisam ser capazes de satisfazer os requisitos rigorosos de desempenho. Esses casos de uso abrangem desde segurança pública, alta mobilidade e aplicativos essenciais aos negócios, até IoT e acesso veicular de banda larga de alta velocidade.
- Camada de Infraestrutura (*Infrastructure Layer*): Essa camada deve suportar um ecossistema de nuvem reconfigurável em tempo real e virtualização para serviços rápidos e ultra-rápidos. Além disso, ele oferece suporte à conectividade e fornecer o conjunto de serviços de rede. Essa camada inclui a infraestrutura física e a camada de virtualização, que é responsável pela abstração de recursos físicos.

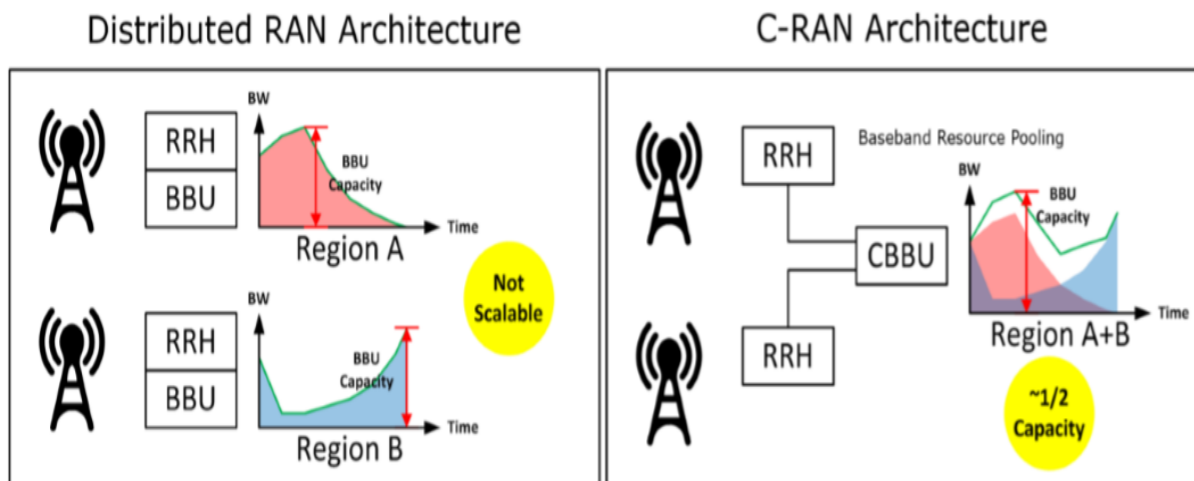
3.2 RADIO ACCESS NETWORK (RAN)

Com a chegada do 4G, uma alta taxa de dados foi fornecida para os dispositivos móveis e embora essa expansão seja um grande ganho para a telefonia móvel, põe uma enorme pressão na RAN. No momento, os operadores precisam aumentar a largura de banda para usuários móveis, ao mesmo tempo em que reduzem o uso de dispositivos fixos. A RAN distribuída é a arquitetura atual, mas quando surge o 5G, onde as taxas de dados irão atingir 1 Gbit/s, foi concluído por muitas operadoras que essa arquitetura não será suficiente (PERRIN, 2017).

Em vista disso, foi proposta a arquitetura C-RAN (*centralised RAN*) para lidar melhor com as demandas de aplicações que irão exigir alta largura de banda. Ela

une dois aspectos que se relacionam, a centralização e *cloud*. O C-RAN tem como alvo inicial a centralização dos elementos da rede física da *Baseband Unit* (BBU), porém, em seguida a ideia é mirar em *cloud*, que seria a virtualização da rede de rádio. Os benefícios trazidos pela centralização de BBUs são muitos, como a redução do custo de operação, um melhor desempenho devido uma maior coordenação entre células e uma economia de escala, já que a C-RAN permite que várias BBUs compartilhem o mesmo espaço físico. De maneira geral, a centralização assegura que toda a infra-estrutura de um *data center* por exemplo, e os recursos de roteamento possam ser utilizados com uma eficiência maior. A Figura 13 mostra a arquitetura RAN distribuída que posiciona o *Remote Radio Head* (RRH) e a BBU na torre de celular, enquanto que a C-RAN põe apenas o RRH e centraliza as funções da BBU (PERRIN, 2017).

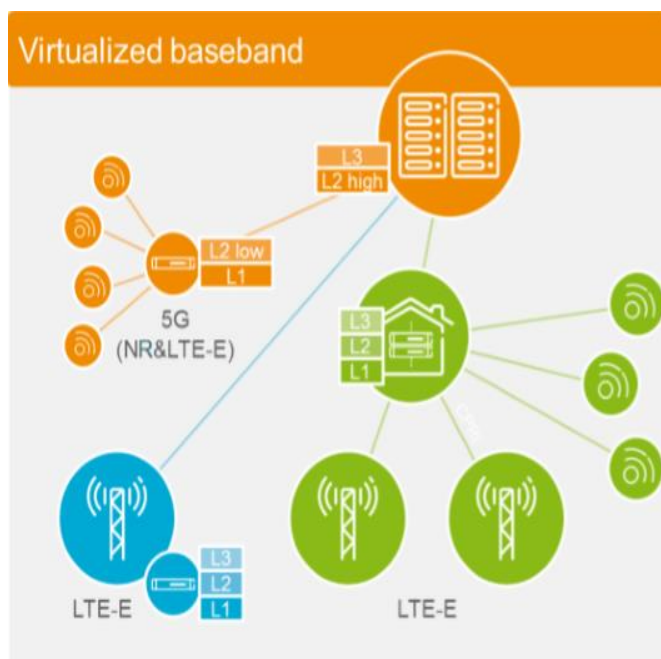
Figura 13 – Diferença entre RAN distribuída e centralizada



Fonte: Perrin (2017, online)

A virtualização na RAN (Figura 14) também traz vantagens atraentes, mas para que seja alcançada, no lugar de interfaces proprietárias que existem hoje, será necessário que existam interfaces abertas. Hoje em uma RAN, o *software* de rede é vinculado ao *hardware* proprietário no qual ele está. Uma interface RAN aberta permitirá que operadores possam escolher vários fornecedores, eliminando essa dependência de um único fornecedor e aumentando a concorrência no RAN, o que causará a redução de custos e poderá acelerar a inovação na indústria (PERRIN, 2017).

Figura 14 – RAN virtualizada



Fonte: Telefonica (2018, online)

Em meio a essas propostas de arquitetura de RAN, o 5G NR (*New Radio*) chega como uma interface que busca propiciar serviços avançados de 5G, sendo que o rádio é um componente crítico para essa nova geração e é essencial para definir quais os serviços que poderão ser realizados. Se objetiva a criação de uma interface aérea escalonável que consiga suportar a grande variação de aplicações 5G, bem como a criação de um *design* flexível que prepare o 5G NR para executar novos tipos de serviços que virão a surgir (BROWN, 2016).

O 5G NR utiliza recursos que conseguem lidar com diversos requisitos de desempenho com um custo operacional reduzido. O seu propósito é a implantação de uma banda larga móvel precisa que torne a experiência do usuário no uso das redes sem fio indiferentes da banda larga com fio, além de recursos de NR que farão surgir serviços inovadores e irão levar o 5G a adentrar em novas cadeias de valor industriais (BROWN, 2016).

Para Kavanagh (2017), a implantação do 5G NR é vista como uma maneira de usufruir ao máximo do espectro disponível e aumentar o desempenho das redes vigentes, assim como deixá-las mais flexíveis e eficientes. Ela diz ainda que o funcionamento dessa interface envolverá formas de onda otimizadas baseadas em OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), tecnologias sem fio avançadas que fornecerão maiores níveis de desempenho e uma estrutura flexível que permitirá uma multiplexação eficiente de variados e novos serviços 5G.

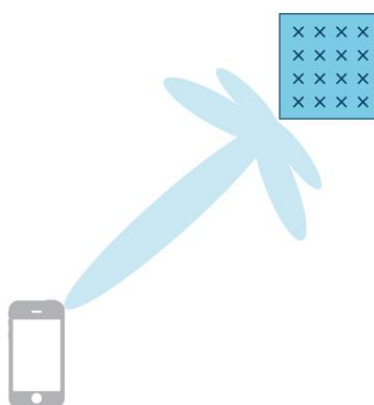
3.2.1 A Transmissão da Rede 5G

Dada a exigência de obtenção de avanços na comunicação móvel atual, o 5G foi projetado com o objetivo de proporcionar maior capacidade e velocidade, usando altas faixas de frequência. Em vista disso, a NTT DOCOMO adotou o conceito da arquitetura de *Phantom Cell*, que é a associação de uma célula pequena que usa uma banda de frequência mais alta e largura de banda mais ampla, com uma célula macro com uma banda de frequência convencional mais baixa (NTT DOCOMO, 2016).

Muitas tecnologias e modelos de comunicação móvel ainda têm de ser testados para que possa haver a implantação de serviços 5G, como métodos de transmissão de baixa latência que atendam às necessidades do M2M (*Machine-to-Machine*) e de diversas outras aplicações. A NTT DOCOMO, por exemplo, está direcionando suas pesquisas para tecnologias como *beamforming*, que possibilita uma transmissão eficiente em bandas de frequência mais altas, viabilizando inúmeros elementos de antena (NTT DOCOMO, 2016).

Ao se tratar de comunicação móvel, *beamforming* é visto como uma forma de direcionar um lobo de energia numa direção específica para um usuário. A cada elemento de antena são aplicadas amplitudes relativas e mudanças de fases para possibilitar que os sinais de saída do conjunto de antenas se juntem em um determinado ângulo de transmissão ou recepção e, conseqüentemente, cancelem um ao outro para outros sinais, como mostrado na Figura 15 (MASTERSON, 2017).

Figura 15 – Beamforming tradicional



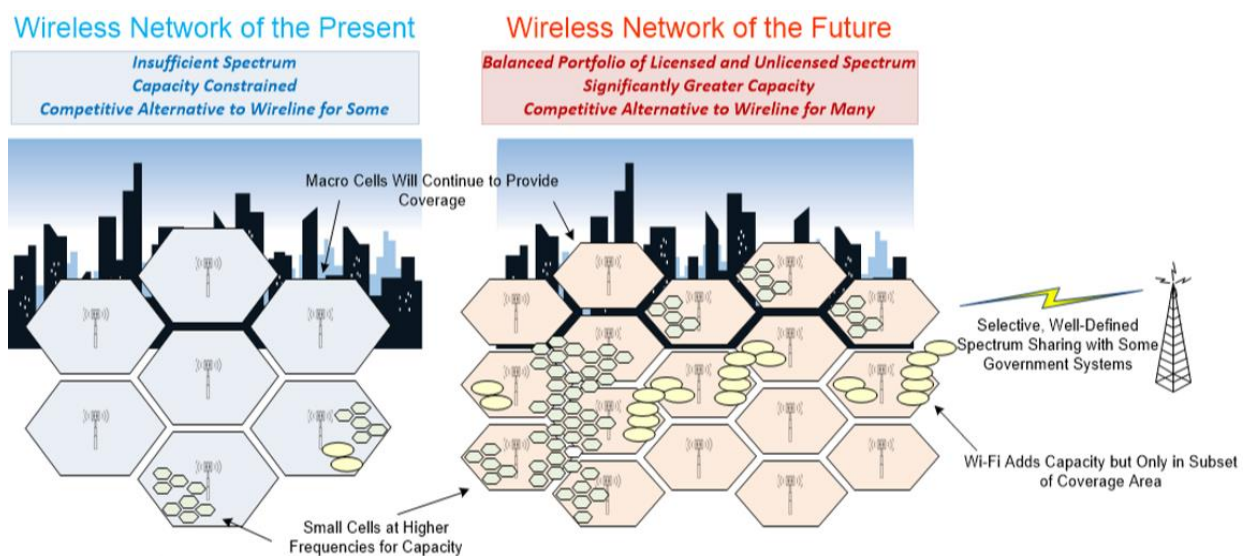
Fonte: Masterson (2017, online)

Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) pode ser descrito como uma forma de *beamforming* e refere-se a estações base compostas de várias antenas

que se comunicam de forma simultânea com inúmeros terminais de usuário separados sobre o mesmo recurso de tempo e frequência (MASTERSON, 2017).

Tendo em vista o modelo de rede atual, percebe-se uma grande diferença em relação ao 5G. No momento a rede é composta em média por células maiores e por algumas células pequenas. Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) e celular operam de forma independente e, para que haja uma mudança do uso de dados móveis para o Wi-Fi, o processo que está em andamento necessita de uma pausa. Ainda na rede 4G, compartilhamento do espectro com o governo é limitado, as faixas de frequência vão de 600 MHz (*Mega-Hertz*) a 2,5 GHz (*Giga-Hertz*) e o espectro total usado é de aproximadamente 1 GHz. A Figura 16 mostra que o 5G já é composto em média por muitas células menores e com métodos de rádio avançados, a mudança de uso de dados móveis para Wi-Fi é instantânea e, tecnologias de espectro não licenciados e licenciados trabalhando juntas em rede integrada (5G AMERICAS, 2017).

Figura 16 – Transformação de Rede



Fonte: 5G Americas (2017, online)

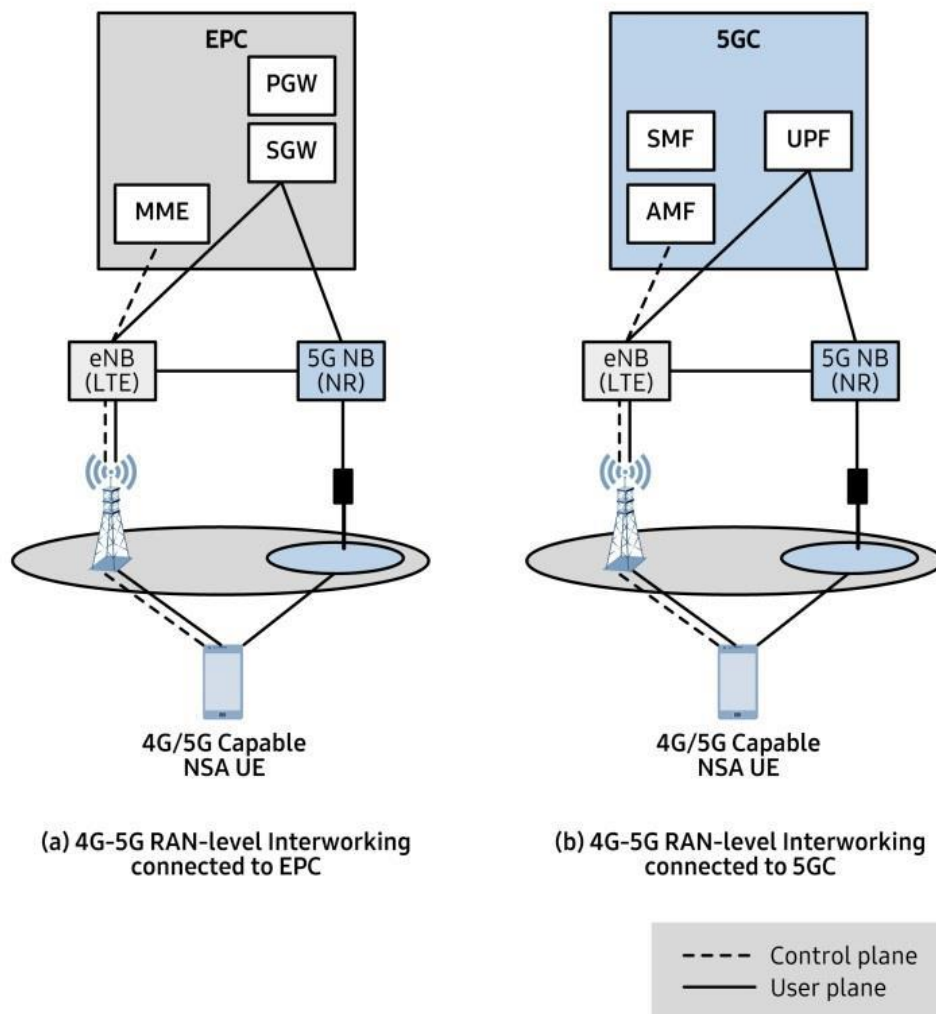
3.3 ARQUITETURA DO NÚCLEO DA REDE 5G

O 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) tem buscado padronizar as arquiteturas do núcleo do 5G aperfeiçoando o *Evolved Packet Core* (EPC) e com o novo *5G Core* (5GC). Existe uma oposição entre operadores para definir qual o primeiro passo para a introdução do 5G, enquanto que uns defendem o caminho evolutivo a partir do EPC, outros consideram um novo 5GC independente. Como mostrado na Figura 17, o EPC é considerado uma opção eficiente e econômica de

inserir o NR rapidamente quando suas funcionalidades são melhoradas para dar suporte ao 5G NR (ERICSSON, 2017).

Assim, a rede de rádio 5G pode inicialmente ser implementada utilizando o atual EPC e, posteriormente migrar para o 5GC (Figura 17). Esse passo é importante na fase de testes e primeiros serviços oferecidos pelas operadoras de redes móveis no 5G, não havendo a necessidade de um alto investimento na rede núcleo em um primeiro momento. Porém, é importante ressaltar que a utilização do núcleo EPC para o 5G não irá proporcionar todos os benefícios do 5GC, como utilização das tecnologias NFV e SDN.

Figura 17 – Utilização do EPC pelo 4G e 5G e evolução para o 5G Core

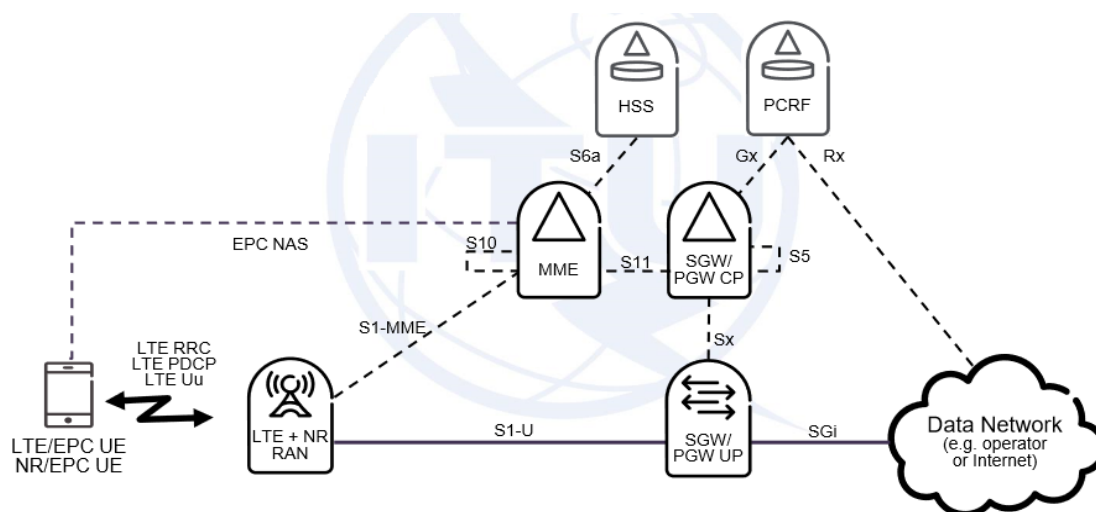


Fonte: Samsung (2017, online)

A arquitetura EPC é baseada em IP com uma divisão entre o plano de controle e o plano de dados, ela é composta de um núcleo EPC que tem como componentes o MME (*Mobility Management Entity*), SGW (*Serving Gateway*), PGW

(PDN Gateway), HSS (Home Subscriber Server) e o PCRF (Policy and Charging Resource Function) como pode ser observado na Figura 18 (FIRMIN, 2018).

Figura 18 – Arquitetura EPC



Fonte: Wilke (2017, online)

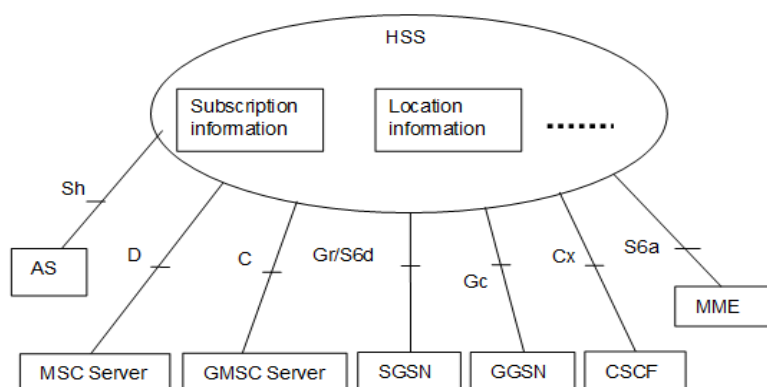
O HSS é o banco de dados dos usuários. Outras entidades do núcleo utilizam-se das informações armazenadas no HSS para processar e lidar com sessões e chamadas. Além de banco de dados, o HSS fornece suporte aos servidores de controle de chamadas para concluir os procedimentos de roteamento, autenticação, autorização, resolução de nomes/endereços e dependências de localização (3GPP, 2017).

É de responsabilidade do HSS o armazenamento das seguintes informações relacionadas ao usuário:

- Identificação do usuário, numeração e endereçamento de informações;
- Informações de segurança do usuário;
- Informações de localização do usuário;
- Informações do perfil do usuário.

O HSS gera informações de segurança do usuário para autenticação mútua, verificação de integridade de comunicação e codificação. Assim como fornece suporte a funções de controle do subsistema de mensagens instantâneas e também é responsável por suportar as entidades de controle de chamadas e gerenciamento de sessões dos diferentes domínios e subsistemas conforme mostrado na Figura 19 (3GPP, 2017).

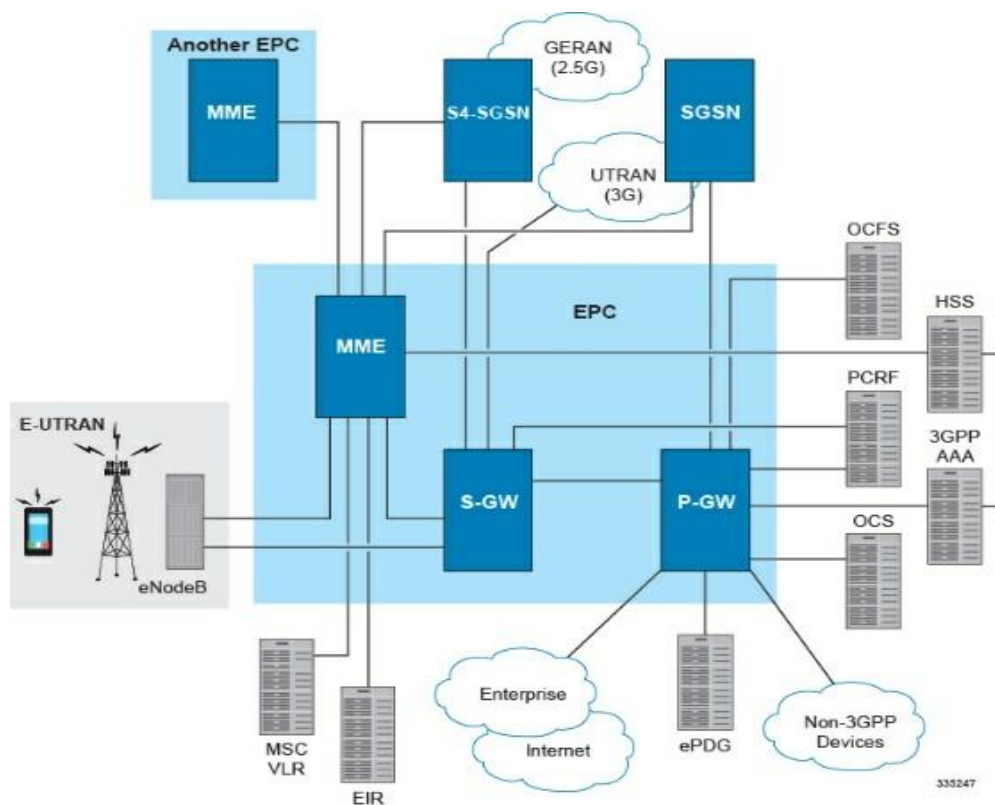
Figura 19 – Estrutura básica do HSS



Fonte: 3GPP (2014, online)

Já o MME fornece a função de plano de controle para mobilidade entre redes de acesso LTE–LTE e LTE–2G/3G, fazendo interface com o SGSN. Ele é o principal nó de controle da rede de acesso LTE (*Long Term Evolution*) e funciona em conjunto com o *Service Gateway* (SGW), conforme mostrado na Figura 20 (CISCO, 2016).

Figura 20 – MME em rede EPC



Fonte: Cisco (2016, online)

Segundo a especificação 3GPP TS 23.002, dentre as diversas funções do MME, algumas das principais são:

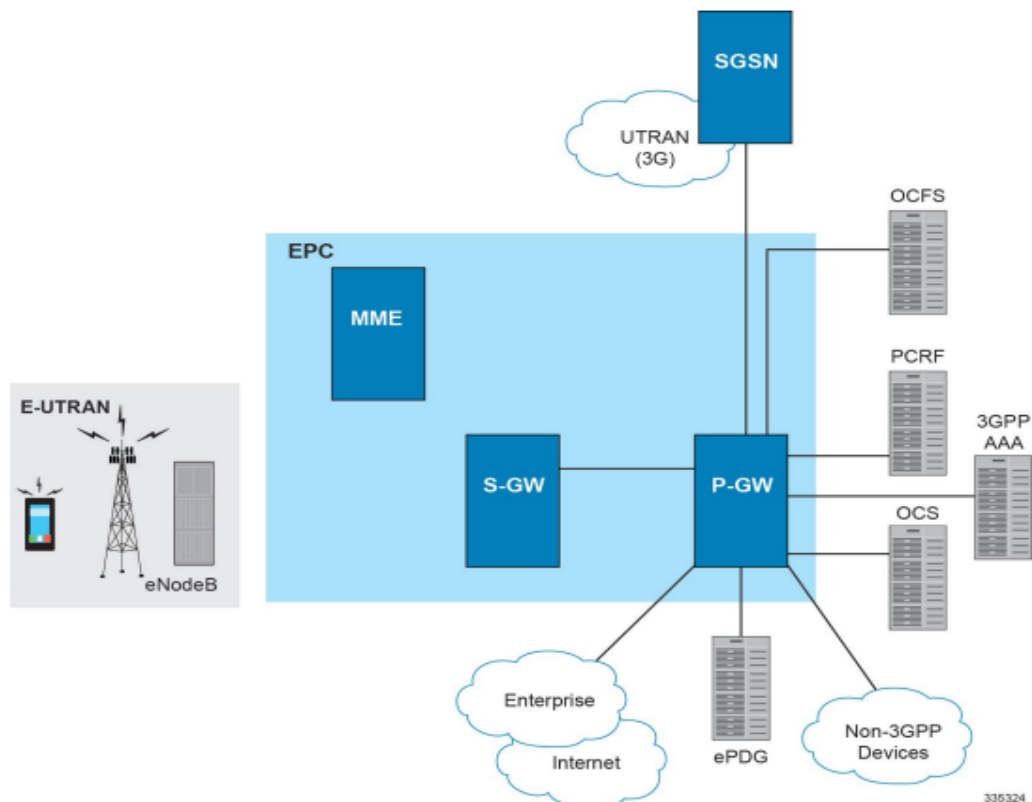
- Mobilidade entre redes de acesso 3GPP;
- *Roaming*;

- Autenticação;
- Interceptação do tráfego de sinalização;
- Seleção de SGSN (*Short for Service GPRS Support Node*) para handovers para redes de acesso 2G ou 3G 3GPP.

Os gateways (SGW e PGW) lidam com o plano do usuário. Eles transportam o tráfego de dados IP entre o equipamento do usuário (UE – *User Equipment*) e as redes externas (Figura 21). O SGW é o ponto de interconexão entre o rádio e o EPC, ele serve o UE, roteando os pacotes IP de entrada e de saída. É o ponto de ancoragem para a mobilidade intra-LTE e entre LTE e outros acessos 3GPP. Está logicamente conectado ao PGW (FIRMIN, 2012).

O PGW é o nó que finaliza a interface do usuário em direção à PDN (*Packet Data Network*), sendo o ponto de saída e entrada de tráfego. O PGW é o elemento do EPC que atribui o endereço IP ao usuário e, pode ainda, executar a imposição de políticas, a filtragem de pacotes para cada usuário, a interceptação legal e a triagem de pacotes (CISCO, 2016).

Figura 21 – PGW e SGW em rede EPC



Fonte: Cisco (2016, online)

Segundo a especificação 3GPP TS 23.002, as funções do SGW incluem:

- Âncora de Mobilidade local para transferência inter-eNodeB;
- Ancoragem para mobilidade inter-3GPP;
- Roteamento e encaminhamento de pacotes;
- Marcação de pacotes em nível de transporte no *uplink* e no *downlink*.

E as funções do PWG incluem:

- Filtragem de pacotes por usuário;
- Alocação de endereço IP ao UE;
- Ligação ao portador UL e DL;
- Verificação do portador no UL.

O PCRF por fim, é um nó que funciona em tempo real para determinar regras de política em uma rede multimídia. Ele desempenha um papel central nas redes LTE. É um componente que opera no núcleo da rede e acessa bancos de dados de assinantes e outras funções especializadas, como um sistema de cobrança, tendo um significado estratégico maior e um papel potencial mais amplo do que os mecanismos de políticas tradicionais, devido ao seu trabalho de forma dinâmica (TEC, 2014).

Esse nó também agrega informações de e para a rede, sistema de suporte operacional e outras fontes em tempo real, suportando a criação de regras e, em seguida, tomando decisões políticas para cada assinante ativo no sistema de rede. Essa rede pode oferecer vários serviços, níveis de qualidade de serviços e regras de cobrança (TEC, 2014).

Segundo o *Telecommunication Engineering Center* (TEC) (2014), dentre as funções do PCRF, estão:

- A capacidade de gerenciar a rede e a política de assinantes em tempo real;
- A capacidade de rotear e priorizar de maneira eficiente e dinâmica o tráfego de rede;
- Visualização unificada do contexto do assinante com base em uma combinação de dispositivo, rede, localização e dados de cobrança.

3.3.1 O 5G Core

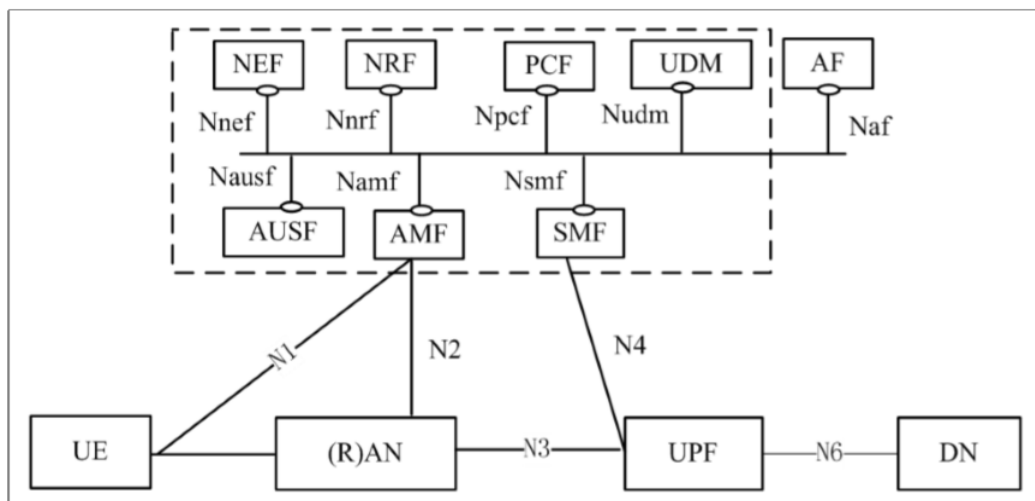
O 3GPP está desenvolvendo e padronizando na TS 23.501 uma nova arquitetura de núcleo que inclui o 5G NR, o 5G Core. Esses elementos da rede núcleo serão essenciais para o sucesso comercial do 5G, pois irão permitir novos

tipos de serviços e benefícios de *cloud*. Está sendo padronizada para o 5GC a chamada *Service-Based Architecture* (SBA), ela utiliza interfaces baseadas em serviços entre as funções do plano de controle, enquanto as funções referentes ao plano de usuário se conectam por *links* ponto a ponto. No núcleo das redes 5G há uma plataforma programável baseada em virtualização que possibilita que diferentes funções sejam configuradas e implantadas na escala exigida em um determinado momento, existindo uma facilidade no desenvolvimento de novas funções. A intenção é que ocorra uma mudança para APIs fundamentadas na *web* e a rede 5G possa ter uma arquitetura baseada em serviços, tornando-se possível uma conexão com outros componentes sem introduzir novas interfaces específicas, permitindo um desenvolvimento de novos serviços de forma mais flexível (ARKKO, 2017).

Com SBA é muito mais simples para um operador modificar cada NFV de um caminho de processamento de rede e criar caminhos de serviço específico sob demanda, em razão dele estar sendo projetado para atuar com o uso de *cloud*, onde diferentes funções podem ser criadas em um serviço ponta a ponta por meio de APIs padronizadas. Essa arquitetura desacopla o serviço do usuário final da infraestrutura de rede, possibilitando maior agilidade funcional (BROWN, 2017).

De acordo com Brown (2017), nessa arquitetura baseada em serviços mostrada na Figura 22, as funções do plano de controle que são vistas dentro da linha pontilhada, se conectam umas às outras através de interfaces baseadas em serviços, enquanto que a função de gerenciamento de acesso e a de sessão se conectam aos nós do plano de usuário para gerenciar assinantes, sessões e mobilidade.

Figura 22 – Arquitetura baseada em serviço para o núcleo 5G



Fonte: 3GPP (2017, online)

Os principais componentes do núcleo 5GC e as suas descrições conforme Brown (2017) são mostrados abaixo:

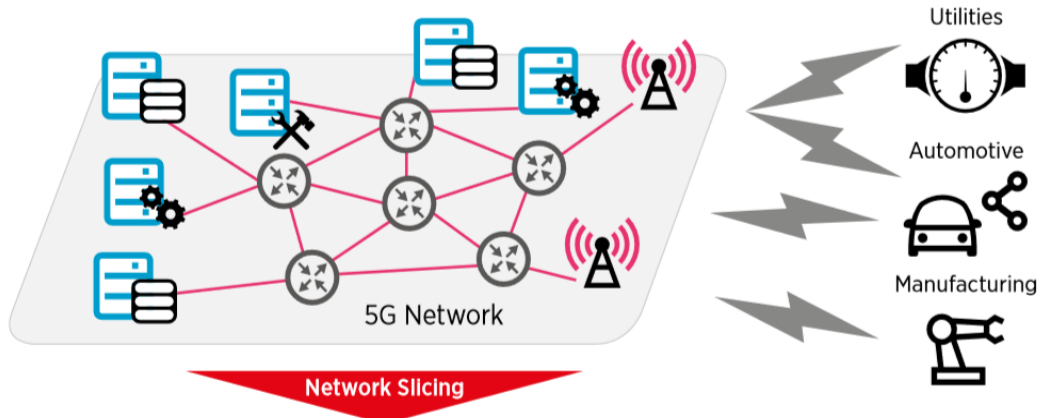
- AMF (*Access and Mobility Management Function*): faz o gerenciamento do controle de acesso e mobilidade, incluindo também a função de seleção de fatia de rede. Parte do MME do EPC.
- SMF (*Session Management Function*): realiza a configuração e o gerenciamento das sessões, de acordo com a política de rede. Parte do MME e do PGW do EPC.
- UPF (*User Plane Function*): suporta recursos e capacidades para facilitar a operação de planejamento do usuário. Parte do SGW e PGW do EPC.
- PCF (*Policy Control Function*): fornece uma estrutura de políticas que incorpora o fatiamento da rede, o gerenciamento de mobilidade e roaming. Parte do PCRF do EPC.
- UDM (*Unified Data Management*): faz o armazenamento de dados e perfis do assinante. Parte do HSS do EPC.
- NRF (*Network Repository Function*): fornece a funcionalidade de registro e descoberta para que as *Network Functions* (NFs) possam se descobrir e se comunicar por meio de APIs.
- NEF (*Network Exposure Function*): um *gateway* de API que permite que usuários externos possam monitorar, provisionar e aplicar políticas de aplicativos para usuários dentro da rede de operadores.
- AUSF (*Authentication Server Function*): servidor de autenticação. Parte do HSS do EPC.

O 5GC deve ser padronizado com uma arquitetura funcional em que tecnologias de implementação rápida possam ser atualizadas quando for necessário. Para esse fim, precisa-se ter uma série de requisitos como, a priorização de interfaces que suportam a integração de vários fornecedores, escalar o plano de controle e o plano de usuário de maneira independente, possibilitar uma implantação flexível desses dois planos separados e permitir configurações diferentes em fatias de rede distintas (WILKE, 2017).

Enquanto a rede 4G foi projetada para atender aos *smartphones*, o 5G precisa ser capaz de suportar com eficiência uma variedade muito grande de

dispositivos, desde os menores aos mais significativos, como é visto na Figura 23. Para isso, é importante que seja possível realizar a configuração do sistema para atender aos requisitos de cada dispositivo e dos aplicativos que rodam neles. O fatiamento de rede é um fator chave que dá suporte para essa necessidade (5G AMERICAS, 2016).

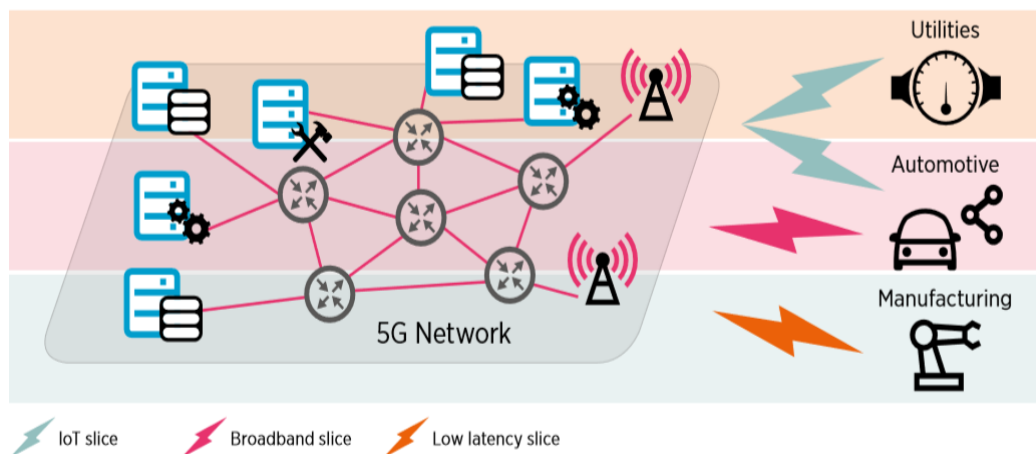
Figura 23 – Variedade de dispositivos no 5G



Fonte: GSMA (2017, online)

Para o GSMA (*Global System for Mobile Communications Association*), a definição de uma fatia de rede é uma rede lógica independente de ponta a ponta usada em uma infraestrutura física compartilhada e, que contém recursos dedicados ou associados a uma outra fatia em termos de processamento, armazenamento e largura de banda, sendo ela isolada das demais fatias. Em conjunto com o fatiamento de rede, o 5G possibilita aos usuários a conectividade e o processamento de dados adaptados aos requisitos específicos de cada aplicação (Figura 24). Esses recursos de rede que podem ser ajustados devem incluir uma grande velocidade de dados, latência mínima, confiabilidade e segurança (GSMA, 2017).

Figura 24 – Fatiamento de rede

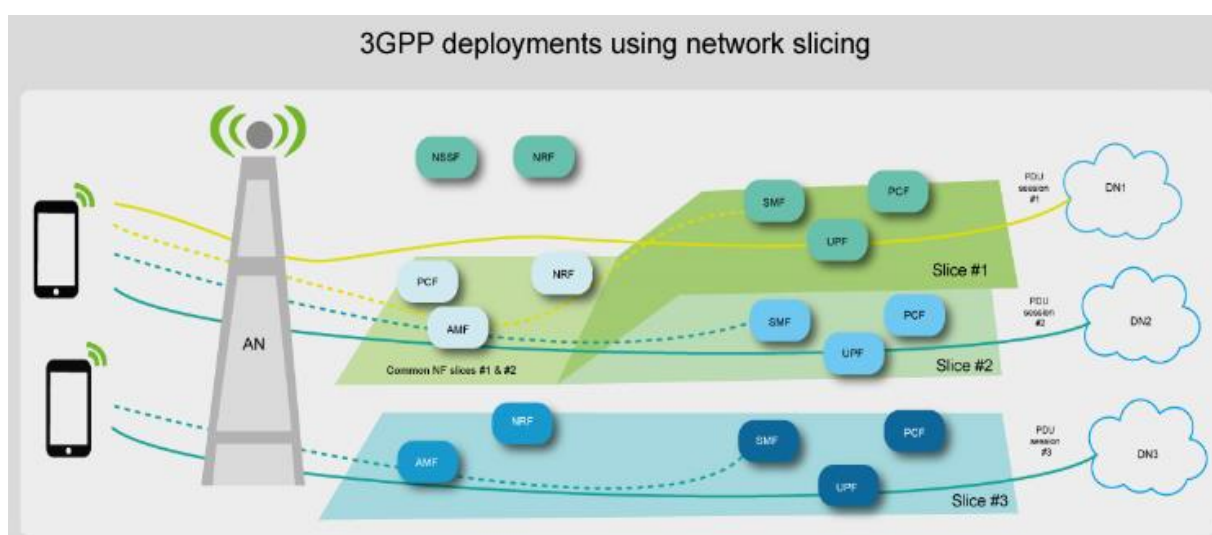


Fonte: GSMA (2017, online)

Entre as vantagens do fatiamento de rede, está a capacidade de os operadores implantarem somente as funções necessárias para aqueles clientes. Todas as funções extras que não são exigidas não precisam ser implementadas, resultando numa economia substancial de infra-estrutura (5G AMERICAS, 2016).

O fatiamento de rede permite que para cada fatia sejam implementadas funções, recursos, disponibilidade e capacidade de maneira independente, de acordo com a necessidade de cada serviço. Na Figura 25 é apresentado com mais detalhes o fatiamento de rede de acordo com o 3GPP, mostrando que um UE pode receber serviço de várias fatias (3GPP, 2017).

Figura 25 – Fatiamento de rede de acordo com 3GPP



Fonte: 3GPP (2017, online)

Já que cada fatia de rede é independente da outra, os serviços de dados também são, o que possibilita a adaptação de diferentes QoS para cada um desses serviços ou funções de aplicativos diferentes. Essas adaptações são determinadas a partir da estrutura de controle de políticas de cada serviço (3GPP, 2017).

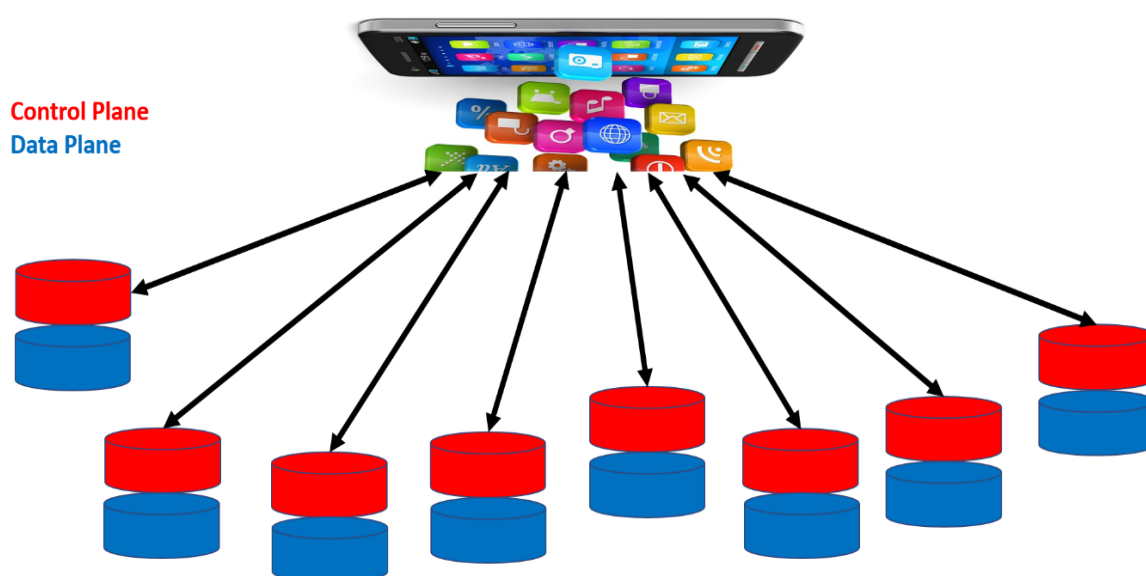
Os serviços de dados são a base para o suporte de aplicativos, oferecendo de forma considerável no 5G a personalização de uma forma mais flexível, comparando com as gerações anteriores. O novo modelo de QoS da arquitetura do sistema 3GPP 5G, permite que os aplicativos utilizem recursos de rádio de maneira eficiente, enquanto os serviços de dados diferenciados suportam diversos requisitos. Também projetado para suportar múltiplas Redes de Acesso, o novo modelo em questão inclui acessos fixos onde o QoS sem sinalização extra pode ser desejável (3GPP, 2017).

4 A TECNOLOGIA SDN EM REDES 5G: VANTAGENS E DESVANTAGENS

Com o 5G, novas tecnologias mais evoluídas e inovadoras tornam-se uma exigência decisiva. Por meio por exemplo, da internet das coisas, o número de dispositivos conectados vai aumentar significativamente e, com isso, haverá uma sobrecarga de dados, aumentando a demanda de capacidade e a necessidade de uma melhor cobertura. Essa nova geração de redes móveis enfrentará uma série de desafios que devem ser alcançados, como a redução do consumo de energia em dispositivos e estações bases, uma melhor alocação de recursos, aumento de taxas de dados, redução de custos, otimização de políticas de gerenciamento de mobilidade, escalabilidade e agilidade (BOURAS et al., 2016).

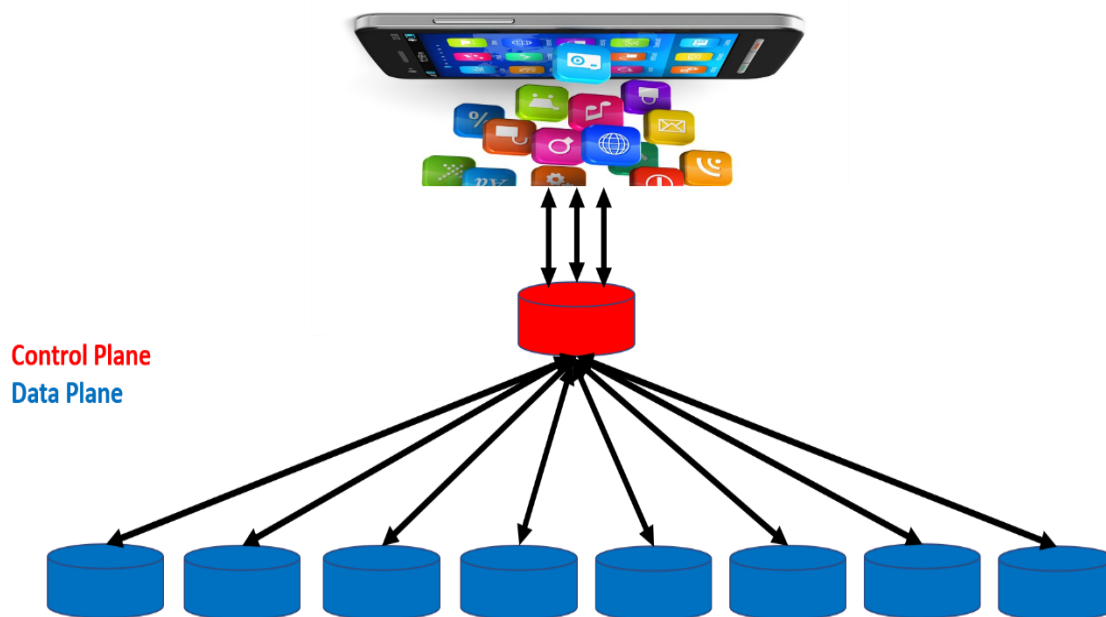
Até pouco tempo, as arquiteturas de rede com controle descentralizadas (Figura 26) eram consideradas seguras e eficientes, o que acabava resultando em modelos cada vez mais descentralizados. Entretanto, o aumento do tráfego solicita a implantação de um modelo centralizado de controle (Figura 27). Uma arquitetura centralizada traz grandes benefícios para a nova rede, como a atribuição de frequência ideal e políticas de gerenciamento de mobilidade eficientes. SDN aparece como uma alternativa não somente para atender as exigências do 5G, mas para solucionar os principais problemas das redes móveis (BOURAS et al., 2016).

Figura 26 – Arquitetura de rede descentralizada



Fonte: Bitar (2018, online)

Figura 27 – Arquitetura de rede centralizada



Fonte: Bitar (2018, online)

A SDN é uma arquitetura emergente que está realizando uma mudança no gerenciamento e na abordagem de controle de redes de comunicação. As vantagens em relação às redes convencionais dizem respeito à flexibilidade, facilidade de programação, interoperabilidade de fornecedores, otimização de recursos e o controle sobre a implantação de política e serviços na rede. Essa tecnologia permite a separação do plano de controle e encaminhamento de dados em uma rede com o uso de interface programável padronizada, sendo possível devido a transição da funcionalidade do plano de controle para o controlador SDN de uma maneira centralizada logicamente. A partir daí as decisões de encaminhamento de dados nos dispositivos são feitas segundo as regras do controlador SDN (JHA; KARANDIKAR, 2018).

Na arquitetura LTE também existe essa distinção entre os planos de controle e de usuário, ambos estão localizados no *firmware* do sistema. Enquanto o plano de usuário trabalha com o encaminhamento de pacote de dados, o plano de controle é responsável pelas mensagens e operações de sinalização e gerenciamento, operando na mesma infraestrutura física. No EPC essa separação de planos é visível de maneira mais clara, porém, na rede de rádio do LTE resume-se ao nó da estação base, o eNodeB, que executa funções de encaminhamento e controle de dados. Quando a rede passa a ser baseada em SDN, o transporte do plano de controle e a lógica de controle necessária para o plano de encaminhamento de

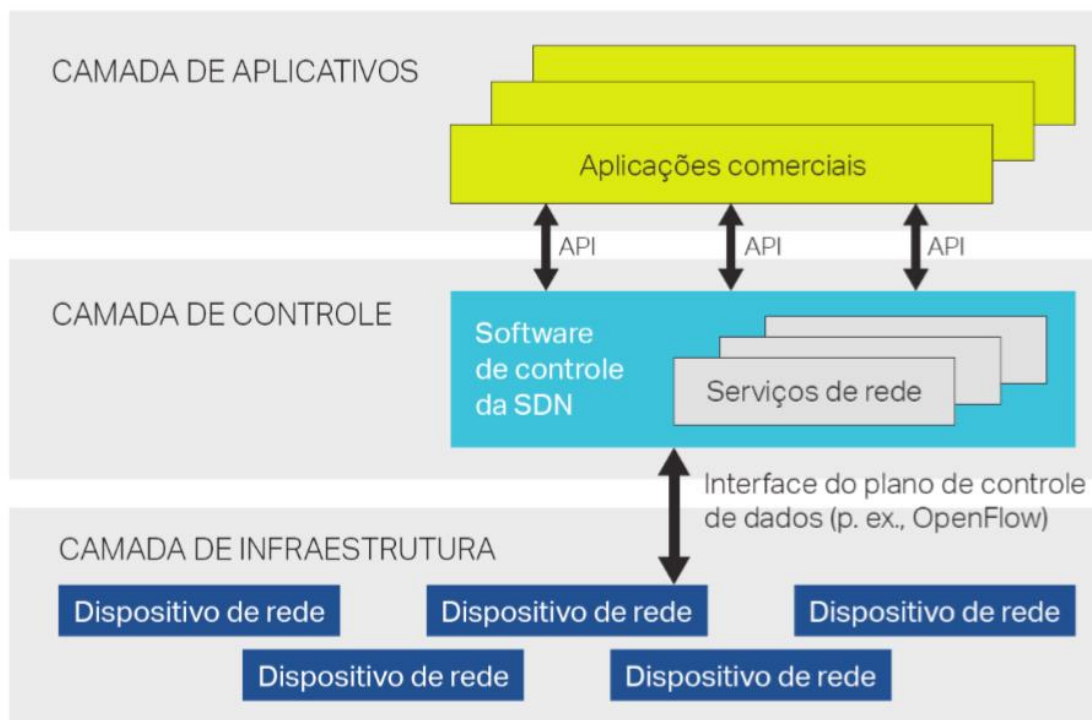
dados, como regras de roteamento e ancoragem de mobilidade, são realizados via *software* (ZAIDI, 2018).

Com essa separação do gerenciamento da rede do *hardware*, todo o comportamento da rede poderá ser programado por aplicativos e serviços com o uso de APIs abertas. Antes, as redes eram fechadas e o seu controle era realizado dependendo totalmente do seu *hardware*, a mudança que ocorreu com essa abertura de redes foi que agora, a SDN possibilita que os provedores de serviços efetuem o controle de redes e dispositivos não dependendo mais do *hardware*. Para Tong e Wade (2017), o uso de APIs abertas facilita a criação, implementação e o gerenciamento de serviços entre vários domínios de rede e esse novo modelo gera padrões para interfaces programáveis, facilitando a criação de novas interfaces sempre que forem necessárias.

A arquitetura SDN no 5G aplica a flexibilidade do *software* à totalidade do espaço de rede, desde a criação e entrega de serviços até a operação e manutenção. Esse modelo não depende de uma única tecnologia, então pode suportar tecnologias fixas, móveis e sem fio, e ao dispensar os recursos físicos, a SDN é capaz de criar partições flexíveis que permitem uma programação mais simples, com capacidade de fornecer garantias de serviços enquanto usa os recursos compartilhados da melhor maneira. Possui ainda uma infraestrutura comum para suportar com eficiência as exigências de rede do cliente, adaptadas e otimizadas para serviços com vários requisitos (ONF, 2016).

O modelo proposto de SDN no 5G pode ser dividido em três camadas, uma de infraestrutura, uma de controle e outra de aplicação, como pode ser visto na Figura 28. A camada de infraestrutura é formada por elementos de encaminhamento que são encarregados por coletar o *status* da rede, os manter guardados temporariamente em dispositivos de rede local e enviar as informações armazenadas aos controladores de rede, assim como também são responsáveis por gerenciar pacotes de regras fornecidas pelos controladores ou administradores de rede (HOSSAIN et al., 2016).

Figura 28 – Camadas da arquitetura SDN

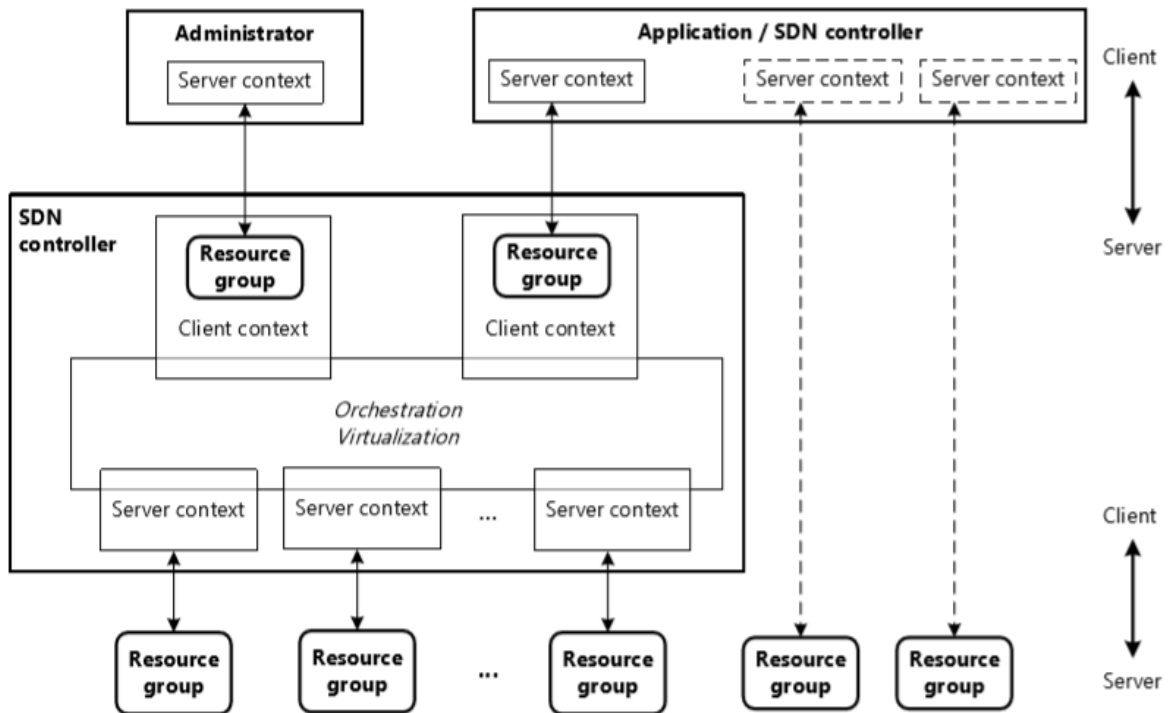


Fonte: ONF (2017, online)

A camada de controle, onde é localizado o controlador, conecta as demais camadas uma a outra por meio de interfaces abertas. A unidade central da SDN é o controlador, elemento que permite a interação com o controle de rede e gerencia os serviços de controle. O controlador usa a virtualização para agregar e abstrair os recursos responsáveis pela gerência e controle. Os recursos virtuais podem ser configurados pelos administradores de rede ou alocados dinamicamente, caso seja necessário conforme os contratos e políticas comerciais (ONF, 2016).

O controlador SDN tem a responsabilidade de remeter recursos de forma que satisfaça as demandas de serviço de todos os clientes, fazendo isso da maneira mais econômica possível, o que é chamado de orquestração. Está incluso na orquestração, o compartilhamento dinâmico de recursos quando necessário, isolando o tráfego de cada cliente dos demais se assim for solicitado, o que caracteriza um ponto importante de conexão da SDN com o fatiamento de rede do 5G. Esse é um processo contínuo em tempo real, ao passo em que os recursos de rede, juntamente com a carga de tráfego e as demandas de serviços mudam (ONF, 2016).

Figura 29 – Visualizações de recursos por um controlador SDN

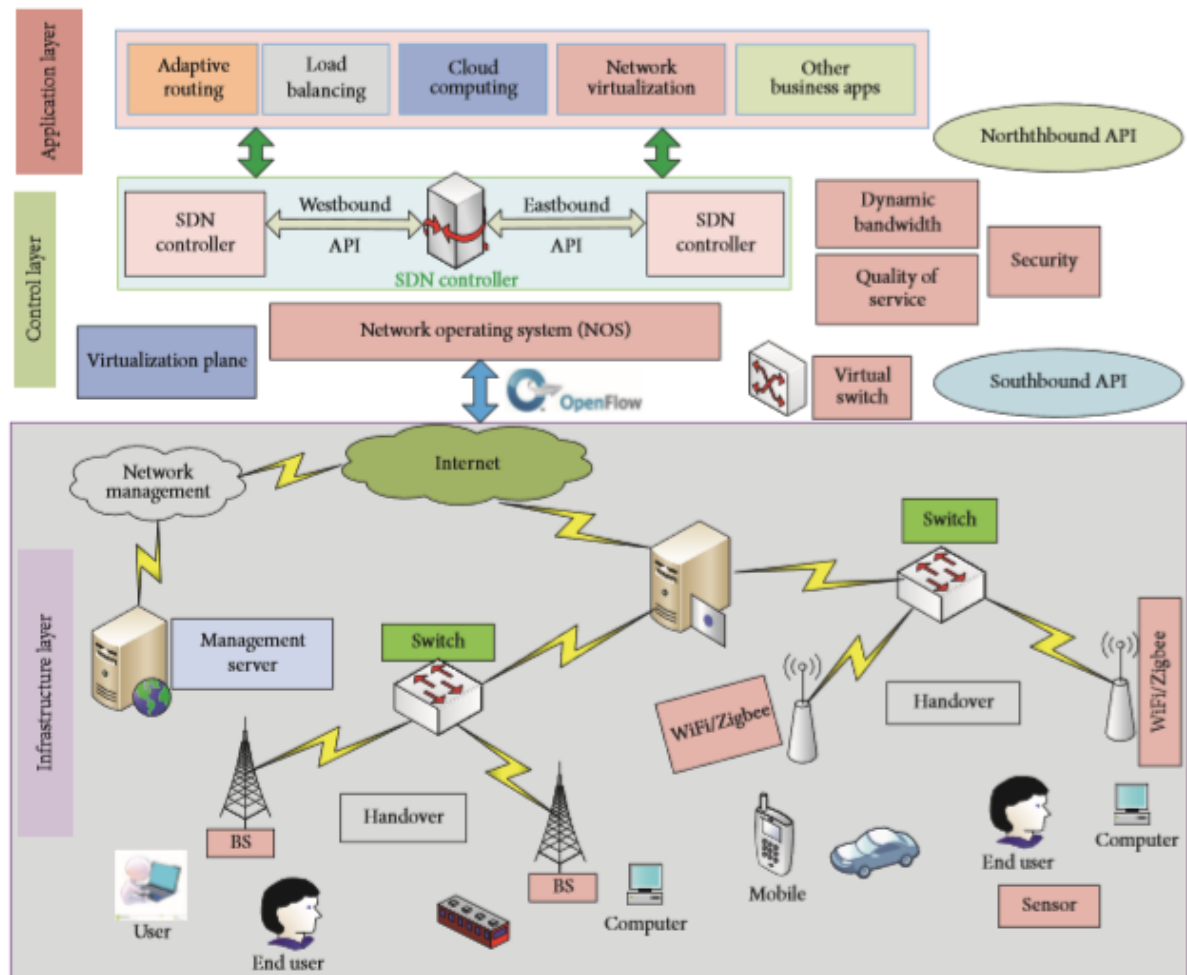


Fonte: ONF (2016, online)

O controlador SDN opera com dois níveis de visualizações de recursos, como é mostrado na Figura 29. No primeiro há uma interação com o cliente (contexto de cliente) e, no segundo há uma interação com seus recursos (contexto de servidor). No contexto de cliente, são incluídos todos os atributos de um serviço, de acordo com a solicitação e, pode haver informações específicas importantes para mapear os atributos para a realização de serviços. Já o contexto de servidor, abrange o que for necessário e suficiente para se relacionar com um grupo de recursos subjacentes (ONF, 2016).

Por fim, a camada de aplicação é responsável pelo atendimento dos requisitos do usuário e, é composta por aplicativos de negócios do usuário final que utilizam serviços de rede. Os aplicativos SDN podem ser acessados e também controlados por meio de interfaces do plano de controle, eles incluem visualização da rede, controle de acesso dinâmico, segurança e mobilidade. A Figura 30 mostra a arquitetura geral de SDN para o 5G (HOSSAIN et al., 2016).

Figura 30 – Arquitetura SDN para 5G

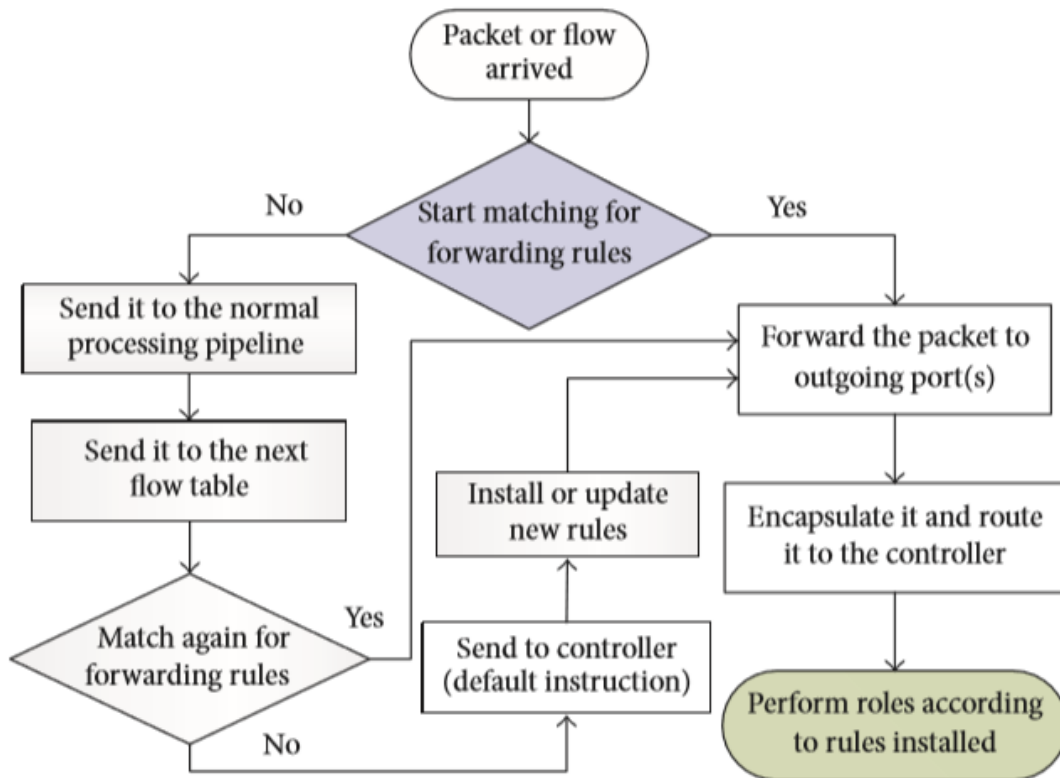


Fonte: Hossain et al. (2016, online)

A camada de infraestrutura desse modelo alterna os dispositivos interconectados para que eles se comuniquem em uma única rede física. Eles mantêm a conexão com o controlador por meio de uma interface aberta. Geralmente nas SDNs o protocolo *OpenFlow* é usado nessa interface aberta, sendo que esse é um protocolo orientado para troca de informações e para o controle de fluxo (HOSSAIN et al., 2016).

O protocolo *OpenFlow* (Figura 31) é um componente essencial para as redes baseadas em SDN e, é a primeira interface de comunicação autorizada que liga as camadas de encaminhamento e controle dessa arquitetura, facilitando a manipulação e o controle do plano de dados dos dispositivos de rede. O *OpenFlow* é o responsável pela adaptação dessa arquitetura a redução da complexidade e o ajuste da rede as diferentes necessidades de negócios (HOSSAIN et al., 2016).

Figura 31 – Processo detalhado do protocolo OpenFlow



Fonte: Hossain et al. (2016, online)

Uma arquitetura baseada em SDN para a rede móvel 5G, permite que os nós de serviços e recursos sejam controlados e, concede ainda, um suporte para o ajuste dinâmico da largura de banda no *backhaul* e *backbone* móvel a partir da carga de tráfego em tempo real. A tecnologia SDN evita que haja um aprisionamento de utilização de fornecedor, pois possibilita que os administradores de rede separem a lógica de controle e permite também separar as funções de rede do *hardware*, implementando os componentes fundamentais da rede 5G em *software* (MARCUS; MOLNAR, 2017).

A criação de novos serviços assentados em recursos virtualizados é uma tarefa permitida por uma rede com *backhaul* e *backbone* baseados em SDN. Com o controle de rede centralizado e baseado em *software*, os administradores de rede podem alocar recursos com base em nuvem sob demanda e podem realizar alterações rápidas nas políticas de rede (MARCUS; MOLNAR, 2017).

A SDN oferece a flexibilidade de alterar a configuração da rede a nível de *software*, reduzindo assim a necessidade de modificação a nível de *hardware*, tornando mais fácil a introdução e implantação de novos aplicativos e serviços do que as arquiteturas de rede tradicionais operadas por *hardware* (NAM et al., 2016).

Tabela 2 – Diferenças entre uma rede SDN e uma convencional

Rede Definida por <i>Software</i>	Rede convencional baseada em <i>hardware</i>
Plano de dados e controle desacoplados por API ou <i>Openflow</i>	Plano de dados e controle são montados no mesmo plano, novo protocolo para cada serviço
Reconfiguração automática e configuração lógica centralizada	Estática ou configuração manual e reconfiguração leva tempo
SDN pode priorizar ou bloquear um pacote específico	Rede convencional trata todos os pacotes da mesma maneira
Fornecer uma visão global ou abrangente da rede, levando a políticas consistentes e eficazes	Fornecer informações limitadas sobre redes
Fácil de programar de acordo com as necessidades do aplicativo e do usuário e pode ser desenvolvido rapidamente por meio de atualizações de <i>software</i>	Difícil de atualizar o código do programa e funciona de acordo com tabelas de encaminhamento de pacotes

Fonte: Nan et al. (2016, online)

Na Tabela 2, observa-se uma série de vantagens de uma rede SDN comparada a uma rede convencional. Estando entre elas: redução de custos, redução do consumo de energia através da consolidação de equipamentos, redução do processamento minimizando o ciclo de operação do operador de rede, provisionamento de rede centralizado por desacoplamento do plano de dados do plano de controle de rede, extensão de recursos, economia de *hardware*, abstração de nuvem e entrega de conteúdo garantido e gerenciamento de rede virtual.

A agilidade fornecida pela SDN é aprimorada pela NFV e sua capacidade de criar, dimensionar ou realocar recursos virtuais de forma rápida, já que essas funções de rede virtualizadas são recursos para um controlador SDN. NFV possibilita a criação de novas funções de rede sob demanda, adequando cada uma em um local e utilizando somente os recursos necessários, fornecendo ainda gerenciamento para atender os elementos virtualizados. A virtualização provida pela tecnologia NFV é aproveitada pela SDN, ajustando a rede de acordo com o exigido, possibilitando a programação da rede e o sequenciamento de funções, processo chamado de encadeamento NFV com fluxos SDN (5G-PPP, 2017).

Quando usada isoladamente, a NFV pode ser entendida com uma tecnologia de virtualização de forma estática e não apresenta todas as vantagens que pode viabilizar quando é empregada com SDN. Nesse segundo cenário, quando a NFV é usada com a SDN, a rede torna-se dinâmica, apresentando vantagens como flexibilidade e simplicidade de programação, expansão e implementação de serviços.

NFV e SDN utilizadas em conjunto na rede 5G vai permitir que operadoras de telefonia móvel sejam mais receptivas às exigências apresentadas por seus clientes, dinamicamente ou pela prestação de serviços sob demanda através de portais de autoatendimento. Ambas são tecnologias complementares que foram desenvolvidas por diferentes corpos de padronização e, embora sejam independentes, quando utilizadas juntas apresentam um grande valor adicional (5G-PPP, 2017).

Uma grande vantagem em relação ao modelo de rede atual, é que com a NFV os ciclos de vida do *hardware* e *software* podem ser estendidos e, são completamente independentes. Nas redes atuais o *hardware* é acoplado ao *software* e seus ciclos de vida caminham juntos, ou seja, o tempo de vida do *hardware* é limitado ao do *software* e vice-versa. A necessidade de atualização de *software* e/ou *hardware*, ou até mesmo, substituição do *hardware*, são totalmente dependentes. Com NFV isso não acontece, o *hardware* é desacoplado do *software* e, seus ciclos de vida, necessidade de atualização e expansão são independentes.

A arquitetura NFV/SDN aumenta a velocidade de implementação de serviços pelas operadoras, torna as redes mais ágeis e, em consequência, melhora a qualidade de experiência dos usuários. A facilidade de programação dada pela SDN e a utilização de *datacenters* com a NFV permite a implementação de novos serviços ou alteração e expansão de serviços existentes de maneira rápida, possibilitando que cada serviço seja implementado de maneira eficiente e rápida.

A virtualização fornece a oportunidade para o *design* de *software* flexível. Os serviços de rede existentes são suportados por diversas funções de rede que estão conectadas de maneira estática. A NFV permite esquemas dinâmicos adicionais para criar e gerenciar funções de rede. O sistema 5G certamente será construído empregando tecnologias de SDN e NFV. Especificamente, a rede de núcleo móvel 5G irá evoluir das implantações atuais com base em *hardware* dedicado e proprietário para um ambiente totalmente virtualizado (HAN, 2015).

Porém, nem todos estão preparados para essa virtualização. O conceito de NFV é executar funções de rede em servidor padrão da indústria. Isso significa que

os provedores de servidores devem produzir equipamentos sem o conhecimento das características das funções que podem ser executadas nesses equipamentos no futuro. Da mesma forma, os provedores de telecomunicações devem garantir que as funções de rede possam ser executadas em servidores, o que levanta a questão de saber se essas funções executadas em servidores padrões da indústria atingiriam um desempenho comparável àqueles executados em *hardware* especializado e, se essas funções seriam portáveis entre diferentes servidores (MIJUMB et al., 2015).

Uma outra questão com relação ao desempenho de servidores utilizados em *data centers* é que esses *hardwares* não exigem atualmente a mesma performance dos *hardwares* utilizado em equipamentos de redes de núcleo de telecomunicações. Os equipamentos desenvolvidos para as redes de telecomunicações têm uma performance em média de 99,999%, o que proporciona uma disponibilidade e qualidade de serviço excelente. Equipamentos desenvolvidos para a área de Tecnologia da Informação (servidores de *data centers*) não exigem essa mesma performance, o que resulta em qualidade de serviço diferente, podendo estes equipamentos não proporcionarem inicialmente a mesma disponibilidade e desempenho dos atuais *hardwares* proprietários desenvolvidos pelos fornecedores de telecomunicações.

Para alcançar as expectativas esperadas pelo mercado mundial para o NFV, os recursos físicos devem ser usados de forma eficiente. Foi observado e testado por diferentes fornecedores de equipamentos que a implantação padrão de alguns casos de uso atuais de redes móveis podem resultar em alocação e consumo de recursos diferente do ideal e planejado teoricamente. Isso exige algoritmos eficientes para determinar quais recursos físicos (servidores) devem ser alocados para funções de rede específicas e, ainda, mover funções de um servidor para outro com o objetivo de balanceamento de carga, economia de energia e recuperação de falhas (MIJUMB et al., 2015).

O mercado NFV será um ecossistema de funções de rede, *software* de gerenciamento e *software* de plataforma, alguns disponíveis no domínio público. Nesse ecossistema, a configuração de um sistema pode ser realizada de diferentes maneiras, o que pode introduzir problemas de compatibilidade e interoperabilidade que serão críticos para a confiabilidade da rede (GONZALEZ, 2018).

Um desafio a ser superado para que as tecnologias SDN e NFV sejam usadas na arquitetura 5G de forma eficiente, é como as redes de acesso físico serão

transformadas em várias redes virtuais isoladas, mantendo e gerenciando a conectividade contínua. A mobilidade do usuário, o gerenciamento de recursos de rádio, a escassez de recursos no ambiente sem fio, todas são problemáticas que as redes móveis enfrentam para obter um bom funcionamento, além de que alguns aplicativos móveis exigem conectividade confiável para a nuvem, alta capacidade e baixa latência. Quando todos esses requisitos precisam ser atendidos simultaneamente em um dispositivo, a complexidade da conexão aumenta e o desempenho da rede pode ser afetado (MARCUS; MOLNAR, 2017).

Através da análise feita neste capítulo, percebe-se as vantagens que a SDN vai trazer para as redes 5G. Entretanto, alguns desafios ainda existem e, operadoras e fornecedores de equipamentos de redes móveis precisam trabalhar juntos para garantir a qualidade, flexibilidade e a simplicidade prometida pelo 5G.

5 TESTES 5G EM ANDAMENTO NO MERCADO MUNDIAL

A seguir serão apresentados testes de 5G executados por operadoras e fabricantes de equipamento em diferentes países. Esses testes mostram resultados positivos e são um aprendizado para a implementação dessa tecnologia. Esse capítulo é finalizado com a atual situação do Brasil nesse contexto e os desafios que precisam ser superados para a implantação do 5G.

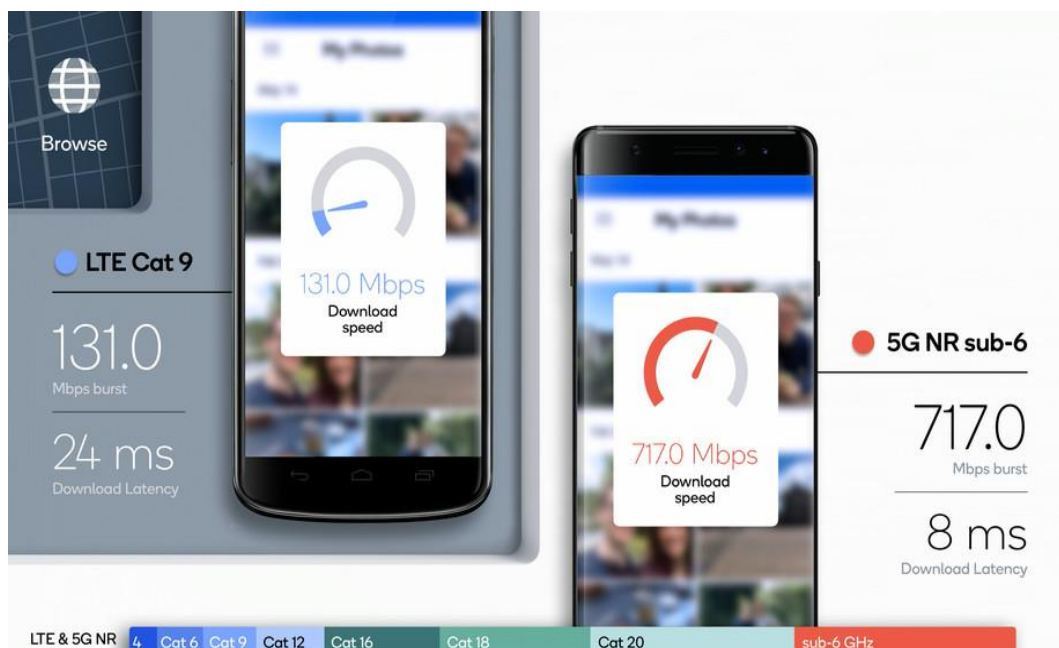
5.1 SIMULAÇÕES DE 5G DA QUALCOMM NAS CIDADES DE FRANKFURT E SÃO FRANCISCO

A Qualcomm realizou testes de simulação 5G para entender até onde essa nova rede pode chegar, quais os limites de velocidade para o seu funcionamento no mundo real, esquecendo as ideias e previsões que são requisitadas em uma rede 5G ideal e apresentando resultados comprovados de fato.

Os testes da Qualcomm foram realizados nas cidades de *Frankfurt* e São Francisco, tiveram vários fatores levados em consideração como as diversas demandas de usuário na rede, um grande espectro de dispositivos com vários níveis de conectividade LTE e 5G para diferentes velocidades e a geografia das cidades. Tudo com a finalidade de encenar com precisão a situação que será encontrada quando essas redes vierem a ser lançadas. De acordo com Gartenberg (2018), essas simulações são redes construídas a partir da infraestrutura do núcleo do 4G LTE, o EPC. Os testes têm o objetivo de demonstrar os tipos de rede 5G NR que estão previstas até 2019.

Na cidade de *Frankfurt* na Alemanha (Figura 32), a simulação foi feita com uma rede mais básica, baseada em 100 MHz, no espectro de 3,5 GHz e construída sobre uma rede *gigabit-LTE* subjacente em 5 bandas de espectro LTE e, ainda assim, os resultados obtidos foram excelentes. A navegação de um usuário foi em média de 56 Mbps do 4G para mais de 490 Mbps no 5G, com uma latência 7 até vezes mais rápida. O *downlink* também foi melhorado, com velocidades de pelo menos 100 Mbps em contrapartida de 8 Mbps do LTE (GARTENBERG, 2018).

Figura 32 - Resultados da simulação de Frankfurt



Fonte: Qualcomm (2018, online)

Já em São Francisco, a simulação foi com uma rede operando em uma faixa de 800 MHz no espectro de 28 GHz *mmWave* (Millimeter Wave), construída sobre uma rede *gigabit-LTE* em quatro bandas LTE licenciadas e, os resultados foram melhores ainda. A navegação de um usuário foi em média de 71 Mbps do 4G para 1,4 Gbps no 5G, com uma latência 23 até vezes mais rápida. Nessa simulação, o *downlink* passou de 10 Mbps para 186 Mbps (GARTENBERG, 2018).

Apesar dos bons resultados, deve-se lembrar que o que a Qualcomm está fazendo ainda são apenas testes e, portanto, se tem um longo caminho até que esse cenário seja uma realidade. Além das operadoras implementarem essa nova geração em grande escala, é necessário também que sejam produzidos pelos fabricantes dispositivos que consigam aproveitar essa alta velocidade e que exista uma infraestrutura de redes que não seja dependente apenas do 5G ou *gigabit-LTE*.

Com base nos resultados obtidos nessas simulações, mesmo que quando implantadas, as redes 5G não alcancem 100% desses números atingidos nos testes, ainda representarão um avanço enorme que vai gerar uma transformação na maneira que os dispositivos móveis são utilizados.

5.2 TESTES DA HUAWEI DE 5G NO DISTRITO DE HUAIROU, EM PEQUIM

A *Huawei* finalizou em março de 2018 testes funcionais de 5G NSA (*Non-Stand Alone*) baseados nas padronizações do 3GPP, no distrito de *Huairou*, em

Pequim (Figura 33). O grupo IMT-2020 foi o responsável pela organização da simulação que de acordo com a *Huawei* (2018), marca o primeiro teste funcional 5G NSA que tem por base a versão oficial do protocolo 5G NR que foi concluído em dezembro de 2017.

Figura 33 - Huawei realizando testes de 5G no distrito de Huairou



Fonte: Huawei (2018, online)

O teste produzido incluiu funções básicas do 5G NR, camada física definida pelo 3GPP, canais físicos, adaptação e programação de *links* e tecnologia de múltiplas antenas. A Huawei (2018) disse que um papel importante da simulação de pesquisa e desenvolvimento de 5G que será primordial nas primeiras implementações da nova rede por algumas das principais operadoras é a validação da funcionalidade da NSA, que são redes não independentes suportadas pela infraestrutura do 4G que já está implantada, assim os dispositivos habilitados para o 5G irão usar as frequências do 5G para uma melhor taxa de transferência de dados, mas o 4G ainda será usado para tarefas como a comunicação com as torres de celular e os servidores.

Na simulação de *Huairou*, a *Huawei* utilizou produtos 5G de ponta a ponta lançados no *Mobile World Congress 2018*. Nesses testes, o 4G é usado como ponto de ancoragem do plano de controle e a conectividade dupla LTE e 5G NR tem o papel de manter a continuidade do serviço no estágio inicial da implantação 5G, até a implantação de um padrão mais estruturado (HUAWEI, 2018).

A execução de testes e pesquisa de desenvolvimento do 5G na China estão sendo realizadas desde 2016 e, a previsão de acordo com a *Huawei* (2018), é de que continuem a ser feitas até o fim de 2018. A *Huawei* ainda diz que existem três fases de testes, a primeira se resume a tecnologias chaves para o funcionamento do 5G, seguida pela verificação da solução de tecnologia 5G e por último a verificação do sistema 5G como um todo (HUAWEI, 2018).

A última fase é a que está em processo de teste no momento e foi nela que a *Huawei* concretizou as provas de funcionalidade do 5G. Essa rede de teste foi lançada oficialmente em fevereiro de 2018 em *Huairou* e, hoje essa rede experimental está crescendo em Pequim e tornando-se um projeto de larga escala para o suporte dos demais testes de campo de NSA nos próximos meses (HUAWEI, 2018).

5.3 SAMSUNG E VERIZON REALIZAM PRIMEIROS TESTES DA TECNOLOGIA 5G PARA USUÁRIOS

Em fevereiro de 2017, a *Samsung* e *Verizon* (Figura 34) anunciaram que concluíram a implantação de sistemas 5G em cinco cidades dos Estados Unidos em preparação para iniciar testes com clientes nessa nova tecnologia. Segundo a *Samsung* (2017), os testes com clientes forneceram acesso sem fio fixo por meio da conectividade 5G para avaliar as experiências do usuário e o desempenho do 5G.

Figura 34 - Parceria 5G: Samsung e Verizon



Fonte: Virgobrasil (2017, online)

Os testes envolvem sistemas de rede inovadores, incluindo o uso de espectro de ondas milimétricas de 28 GHz e a tecnologia avançada de antenas de formação de feixes. As unidades de acesso 5G da *Samsung*, instaladas em bairros comerciais e residenciais, ligam os sinais de rádio a uma rede central virtualizada que é configurada nos *datacenters* da *Verizon*. A solução principal de última geração da *Samsung* é orientada por *software* e projetada em uma plataforma escalonável para atender às necessidades do operador (SAMSUNG, 2017).

Em testes pré-comerciais iniciados no início de dezembro de 2016, o sistema 5G demonstrou *throughputs* muito altos a distâncias de até 500 metros em cada um dos diferentes ambientes selecionados para os testes com clientes. O sistema *Samsung* 5G foi projetado para ser atualizado para suportar os padrões 3GPP para NR e NG Core, uma vez que eles estejam disponíveis (SAMSUNG, 2017).

Os testes de 5G da parceria *Samsung* e *Verizon* começaram em *Nova Jersey*, *Massachusetts*, *Texas* e *Washington*, D.C., e posteriormente foram implementados também no *Michigan* com testes iniciados no segundo trimestre de 2017. Os locais representam terrenos variados, *layouts* de vizinhança e densidade populacional. Os testes conjuntos incorporaram a solução 5G pré-comercial da *Samsung* com um CPE (*Customer Premise Equipment*), bem como suas soluções de rádio e núcleo 5G. A *Verizon* inclui o serviço de rede fixa sem fio que fornece acesso sem fio à Internet e chamadas de *Voice Over Internet Protocol* (VoIP) (SAMSUNG, 2017).

Depois de realizar testes em mercados-chave nos Estados Unidos, a *Samsung* e a *Verizon* coletaram resultados que ajudarão a calibrar um futuro de 5G. Segundo a *Samsung* (2018), as principais descobertas incluem:

- Um único rádio 5G foi capaz de alcançar o 19º andar de uma *Multi-Dwelling Unity* (MDU).
- O serviço de banda larga foi alcançado em conexões de *Line of Sight* (LOS), LOS parciais e não-LOS.
- Fatores ambientais, incluindo chuva e neve, não interromperam os serviços.

A *Samsung* fornecerá à *Verizon* roteadores residenciais comerciais (CPEs), Unidades de Acesso por Rádio 5G (RAN), compostas por uma estação base de rádio compacta e elementos RAN virtualizados, além de serviços de planejamento de frequência de rádio 5G. Para fornecer esses serviços, a *Samsung* alavancou tecnologias e funcionários para desenvolver os primeiros modems comerciais 5G

baseados em ASIC (*Application Specific Circuits*) e os RFICs (*Radio Frequency Integrated Circuits*) *mmWave*. A Verizon e a Samsung continuarão desenvolvendo os casos de uso e aplicativos da tecnologia 5G da Samsung (SAMSUNG, 2018).

5.4 TESTE DE 5G REALIZADO PELA NOKIA EM PARCERIA COM A OPERADORA NTT DOCOMO NO JAPÃO

Em março de 2017, a Nokia desenvolveu um ecossistema 5G com a operadora japonesa NTT Docomo para se preparar para a introdução da próxima geração de redes móveis. De acordo com a Nokia (2017), a colaboração usou a plataforma de avaliação móvel 5G da Intel e começou com os principais testes de interoperabilidade da tecnologia de vários fornecedores usando a banda de frequência de 4,5 GHz. A Nokia e a Docomo conduziram os testes na área metropolitana de Tóquio ao longo de 2017, com foco particular em locais turísticos, comerciais e de negócios movimentados, bem como em eventos públicos importantes organizados pela operadora.

As empresas testaram aplicações ponta-a-ponta pelo ar entre a estação base e o dispositivo na faixa de frequência de 4,5 GHz, que é uma das bandas candidatas ao 5G no Japão. A solução Nokia 5G FIRST é baseada em especificações de rádio de *early-adopters* que definem uma interface comum para permitir que equipamentos de vários fornecedores se conectem em uma rede de rádio 5G (NOKIA, 2017).

Nokia AirScale Active Antenna usa a tecnologia Massive MIMO com *beamforming* digital, que consiste em transmitir um sinal de rádio diretamente para seu alvo em vez de transmitir em área esperando atingir seu alvo, para fornecer maior alcance de células, desempenho maximizado na borda da célula e maior eficiência espectral (NOKIA, 2017).

Em novembro do ano passado, a companhia japonesa anunciou a conclusão do que afirmou ser o primeiro teste de tecnologia móvel 5G para *Ultra-Reliable Low Latency Communication* (URLLC) usando um sistema de 4,5 GHz. A NTT Docomo disse que o teste 5G simulou um ambiente realista envolvendo um terminal móvel estacionário que recebeu sinais a distâncias de 0,8 a 1 km da estação base e que o teste conseguiu uma latência no ar de menos de 1ms com uma taxa de sucesso de transmissão de pacotes de mais de 99,999%, ambos pré-requisitos para o URLLC sob os padrões 3GPP e ITU-R (NOKIA, 2018).

5.5 TESTE DE CARRO AUTÔNOMO COM 5G REALIZADO NA COREIA

Em fevereiro de 2018, a *Ericsson* e a *Korea Telecom*, juntamente com a *Intel*, conduziram um teste 5G conectando um carro a uma rede 5G ativa (Figura 35). O teste aconteceu no centro de *Seul*, uma capital com 25 milhões de habitantes. No denso ambiente urbano, um vídeo em 4K (Ultra HD) foi transmitido do ambiente externo para o ambiente interno do carro e vice-versa, dando uma ideia de como o 5G mudará a experiência para os passageiros dos carros.

A velocidade de *downlink* foi de mais de 900 Mbps e, ao mesmo tempo, mais de 600 Mbps de *uplink* com alta qualidade de transmissão. Usando a banda de 28 GHz, a conexão de rede era estável nas difíceis condições de propagação. A solução usa o sistema de teste de rádio 5G da *Ericsson* em conjunto com a Plataforma de Avaliação Automotiva 5G da *Intel* (ERICSSON, 2018).

Figura 35 - Carro autônomo nas ruas de Seul



Fonte: Ericsson (2018, online)

A medida que o tempo para as primeiras redes 5G comerciais se aproxima, os testes são levados às ruas para provar as situações da vida real que serão implementadas no futuro próximo e mudarão a vida de muitos usuários de 5G.

5.6 5G NO BRASIL

O contexto do 5G no Brasil ainda está atrasado se comparado com países onde operadoras e fabricantes já estão testando essa nova tecnologia e querem

antecipar o lançamento da quinta geração de redes móveis. Apesar disso, até 2019 a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) tem o objetivo de oficializar a frequência de 3,5 GHz para ser utilizada no Brasil para a implementação do 5G. Mas, para isso, uma problemática ainda precisa ser solucionada, já que essa faixa pertence ao que se conhece como banda C estendida, o que significa que ela é ocupada por receptores de televisão aberta via satélite (AQUINO, 2018).

Em razão disso, uma solução seria a aplicação de filtros nos receptores para bloquear qualquer interferência, bastaria apenas resolver quem compraria e faria a distribuição desses filtros. É presumível que essa tarefa seja alocada para as operadoras de telefonia celular que comprarem o espectro, como já aconteceu na limpeza da faixa de 700 MHz quando o 4G e a digitalização dos sinais de televisão chegaram (AQUINO, 2018).

A posição do Brasil em relação a disponibilidade de espectro é boa se for comparada aos demais países da América Latina, já que é o país com um maior número de frequências licenciadas para as operadoras. Até o final de 2018, mais frequências ainda devem ser leiloadas, e com isso, ele deve ser o país pioneiro no lançamento do 5G na região (BUCCO, 2018).

Bucco (2018) afirma que a destinação da faixa de frequência de 2,3 GHz para o 5G é um ponto defendido pela Qualcomm, que apoia o *refarming* das frequências de 850 MHz, 900 MHz e 1,8 GHz viabilizado pelo fim da segunda geração de redes móveis. Diz ainda que a empresa quer que a Anatel estude sobre a liberação do UHF (*Ultra High Frequency*) de 600 MHz e banda L (950 MHz a 2150 MHz), pois apesar das empresas de satélite fazerem uso dos 28 GHz, vai ser necessário que essa banda seja atribuída para o 5G.

De acordo com Aquino (2018), a frequência *mmWave* (28 GHz) que vai ser vendida para a telefonia móvel pela FCC (*Federal Communications Commission*), que é agência reguladora norte-americana, no Brasil não vai ser utilizada para a mesma finalidade. A autora diz que a Anatel já destinou para os serviços de satélite 500 MHz desse espectro e, que somente os Estados Unidos e a Coreia do Sul identificam essa faixa para o 5G da telefonia móvel até o momento.

A fabricante de chips Qualcomm solicitou à Anatel que disponha para o 5G o espectro que hoje é usado para *uplink* da banda C no Brasil, a banda de 5,9 GHz, por essa faixa ser ideal para veículos autônomos. Francisco Soares, diretor sênior de relações comerciais da Qualcomm, falou durante um *workshop* sobre 5G

realizado em São Paulo sobre essas faixas de espectro no país que serão fundamentais para constituir a nova geração, como os 450 MHz licitados em 2012 que as operadoras ainda não fazem uso (BUCCO, 2018).

5.6.1 Testes do 5G no Brasil

A Huawei prevê que os primeiros testes de 5G comerciais no Brasil comecem a ser realizados em 2019, tendo em vista que as operadoras locais já estão buscando atualizar o *core* de suas redes, começando com a virtualização para depois então passar a utilizar nuvem. Esse processo é fundamental para a implementação do 5G em larga escala e a redução da latência (CAVALCANTI, 2018).

Os testes previstos, de acordo com o especialista em tecnologia *wireless* da Huawei, Rubens Mendonça, não são testes massivos, mas devem começar por municípios de médio porte, onde a frequência de 3,5 GHz não sofre tanta interferência e, a partir daí ampliar essas implantações conforme a frequência estiver limpa e pronta para o 5G (CAVALCANTI, 2018).

O Inatel (Instituto Nacional de Telecomunicações) de acordo com Bucco (2018), obteve sucesso em um teste de 5G realizado na cidade de Santa Rita do Sapucaí, em Minas Gerais. Segundo o autor, o coordenador de pesquisa do Centro de Referência em Radiocomunicações do Inatel, Luciano Mendes, disse que a ideia é verificar a viabilidade do 5G de longa distância, afirmando que o Brasil é o país mais envolvido na criação dessa tecnologia.

Figura 36 – Apresentação do 5G em Santa Rita do Sapucaí



Fonte: Santos (2017, online)

Como o propósito do teste era analisar o alcance e não a velocidade, a especificação dele se difere dos 20 Gbps de velocidade que são esperados do 5G nos centros urbanos. Como resultado, foi comprovado que com o uso de tecnologia compatível com os atuais sistemas, com uma maior potência e capacidade que o padrão LTE, o alcance das redes móveis 5G pode ser aumentado (BUCCO, 2018).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo compreender a tecnologia SDN aplicada a nova geração de telefonia móvel 5G, apresentando seus benefícios, vantagens e desvantagens em comparação com o modelo atual de rede 4G. Para isso, foram estudados os conceitos e funcionamento da SDN e posteriormente foi realizado o estudo da arquitetura 5G, detalhando suas diferenças em relação ao 4G e seu funcionamento, desde a transmissão de rádio até o núcleo de rede.

Tendo realizado este estudo técnico, foi possível verificar que a separação do *hardware* e *software* permitida pela SDN é muito vantajosa no âmbito das operadoras de telefonia móvel. A aplicação desse conceito facilita tanto a programação quanto o gerenciamento da rede, deixando-a dinâmica e assim, assegurando uma melhor qualidade de serviço e ótima experiência para os usuários.

O 5G traz consigo a inovação, um modelo de rede que permite uma alta gama de aplicações, como carros autônomos, cidades inteligentes e uma série de dispositivos que surgirão com IoT. Apesar dos requisitos exigentes, os benefícios do 5G são evidentes: latência extremamente baixa, *throughput* extremamente alto e a capacidade de suportar um alto número de dispositivos conectados, permitindo a implementação das aplicações comentadas a cima em larga escala. Ao ser aplicada a SDN em conjunto com NFV, o desenvolvimento de diversos novos serviços e aplicações são permitidos. A NFV por si só já traz grandes benefícios à rede, mas ainda mantém as configurações estáticas. Com a aplicação da SDN, a rede ganha dinamismo em seus serviços, oferecendo mais flexibilidade, simplicidade e uma implementação rápida de novos serviços.

Apesar da drástica mudança nos paradigmas atuais de rede que o 5G irá causar, esse avanço é inevitável. Após os pontos apresentados ao longo do trabalho, vale dizer que a SDN veio como a solução para garantir os requisitos de flexibilidade e simplicidade do 5G, possibilitando que esta tecnologia alcance os exigentes requisitos especificados pela ITU e garantindo a implementação de um grande número de novas aplicações de forma dinâmica e eficiente.

7.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

As maiores dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho foram relacionadas a disponibilidade de literatura a respeito das tecnologias comentadas, pois como o 5G é uma tecnologia nova que ainda está em

desenvolvimento e sendo padronizada, há muita discussão sobre seus aspectos técnicos e não há uma diversidade de materiais teóricos. A solução encontrada foi a busca de material das grandes empresas de telefonia móvel e de órgãos padronizadores e especificadores.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Com a chegada do 5G, o número de dispositivos em uso vai aumentar significativamente, abrindo margem para uma série de análises e estudos que virão a ser feitos com a intenção de entender melhor essa nova quinta geração de redes móveis e seus desafios. Os trabalhos futuros incluem análises dos requisitos das aplicações que vão surgir no 5G, simulações acadêmicas que poderão ser realizadas objetivando estudar o comportamento da SDN no 5G e estudos relativos ao desempenho dos *data centers* usando NFV e SDN na arquitetura 5G e de segurança já que é uma rede baseada em *software*.

REFERÊNCIAS

3GPP. **3GPP TS 23 002**. 2017. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123000_123099/123002/12.05.00_60/ts_123002v120500p.pdf>. Acesso em: 30 de Abril de 2018.

_____. **System architecture milestone of 5G Phase 1 is achieved**. 2017. Disponível em: <www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1930-sys_architecture>. Acesso em 30 de Abril de 2018.

5G AMERICAS. **Network Slicing for 5G Networks e Services**. 2016. Disponível em: <http://www.5gamericas.org/files/3214/7975/0104/5G_Americas_Network_Slicing_11.21_Final.pdf>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

_____. **LTE to 5G: Cellular and Broadband Innovation**. 2017. Disponível em: <http://www.5gamericas.org/files/6415/0282/1551/2017_5G_Americas_Rysavy_LTE_5G_Innovation_Final_for_Upload.pdf>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

5G-PPP. **View on 5G Architecture**. 2016. Disponível em: <<https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-5G-Architecture-WP-For-public-consultation.pdf>>. Acesso em 21 de Abril de 2018.

_____. **Vision on Software Networks and 5G**. 2017. Disponível em: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP_SoftNets_WG_whitepaper_v20.pdf>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

ÂNGELO, Fernanda. **Desafio para 2020 é aumentar em 1000x a capacidade da rede móvel**. 2015. Disponível em: <<http://convergenciadigital.uol.com.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?UserActiveTemplate=site&inoid=40977&sid=95&tpl=printerview>>. Acesso em 9 de Abril de 2018.

AOYAGI, L. **OpenFlow: abrindo portas para inovações nas redes de nossos campi**. 2014. Disponível em: <<https://dcomp.sor.ufscar.br/verdi/topicosCloud/OpenFlow.pdf>>. Acesso em 15 de Abril de 2018.

AQUINO, Gabriel. **Perspectivas para o 5G**. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Guilherme_Aquino/publication/271838803_Perspectivas_para_o_5G/links/54d391720cf28e069728654f/Perspectivas-para-o-5G.pdf>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

AQUINO, Miriam. **Anatel pensa em licitar frequência de 3,5 GHz em 2019, para acelerar 5G no país**. 2018. Disponível em: <www.telesintese.com.br/anatel-pensa-em-licitar-frequencia-de-35-ghz-em-2019-para-acelerar-5g-no-pais/>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

ARKKO, Jari. **Service-Based Architecture in 5G**. 2017. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/research-blog/service-based-architecture-in-5g/>>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

BOURAS, Christos et al. **SDN & NFV in 5G: Advancements and Challenges**. 2016. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/2e0c/f5bc6793912bdda30a8aa9f9e393360a003d.pdf>>. Acesso em 6 de Maio de 2018.

BROWN, Gabriel. **Exploring 5G New Radio: Use Cases, Capabilities & Timeline**. 2016. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/heavy-reading-whitepaper-exploring-5g-new-radio-use-cases-capabilities-timeline.pdf>>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

_____. **Service-Based Architecture for 5G Core Networks**. 2017. Disponível em: <www.3g4g.co.uk/5G/5Gtech_6004_2017_11_Service-Based-Architecture-for-5G-Core-Networks_HR_Huawei.pdf>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

BUCCO, Rafael. **Brasil será pioneiro em 5G na AL, mas ativação virá só depois de 2020, prevê GSMA**. 2018. Disponível em: <<http://www.telesintese.com.br/brasil-sera-pioneiro-em-5g-na-al-mas-ativacao-vira-so-depois-de-2020-preve-gsma/>>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

_____. **Qualcomm quer espectro usado para uplink da Banda C liberado para a 5G**. 2018. Disponível em: <<http://www.telesintese.com.br/qualcomm-quer-espectro-usado-para-uplink-da-banda-c-liberado-para-5g/>>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

_____. **Inatel testa com sucesso 5G em Santa Rita do Sapucaí**. 2018. Disponível em: <<http://www.telesintese.com.br/inatel-testa-com-sucesso-5g-em-santa-rita-do-sapuca/>>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

CAVALCANTI, Vitor. **Testes comerciais com 5G no Brasil devem começar em 2019**. 2018. Disponível em: <<http://computerworld.com.br/testes-comerciais-com-5g-no-brasil-devem-comecar-em-2019>>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

CISCO. **Cisco Software-Defined Access**. 2018. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/pt_br/solutions/enterprise-networks/software-defined-access/index.html>. Acesso em 15 de Abril de 2018.

_____. **Mobility Management Entity Overview**. 2017. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/asr_5000/20/MME/b_20_MME_Admin/b_20_MME_Admin_chapter_01.pdf>. Acesso em: 30 de Abril de 2018.

_____. **PDN Gateway Overview**. 2017. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/asr_5000/20/P-GW/b_20_PGW_Admin/b_19_PGW_Admin_chapter_01.pdf>. Acesso em: 30 de Abril de 2018.

CRANFORD, Nathan. **The role of NFV and SDN in 5G**. 2017. Disponível em: <<https://www.rcrwireless.com/20171204/fundamentals/the-role-of-nfv-and-sdn-in-5g-tag27-tag99>>. Acesso em 8 de Abril de 2018.

CONTERATO, M. et al. **Avaliação do suporte à simulação de redes OpenFlow no NS-3**. 2013. Disponível em:

<https://www.inf.pucrs.br/ferreto/pubs/2013errc_conterato.pdf>. Acesso 15 de Abril de 2018.

ERICSSON. **5G systems: Enabling the Transformation of industry and Society**. 2017. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g-systems.pdf>>. Acesso em 31 de Março de 2018.

_____. **To be first in 5G, first get to the core**. 2017. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/globalassets/images/DS/Solution-Brief-Packet-Core.pdf>>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

_____. **5G live in Korea**. 2018. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/networks/cases/5g-live-in-korea>>. Acesso em 12 de Maio de 2018.

FIRMIN, Frédéric. **The Evolved Packet Core**. 2018. Disponível em: <www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

GARTENBERG, Chaim. **Qualcomm's simulated 5G tests shows how fast real-world speeds could actually be**. 2018. Disponível em: <<https://www.theverge.com/2018/2/25/17046346/qualcomm-simulated-5g-tests-san-francisco-frankfurt-mwc-2018>>. Acesso em 12 de Maio de 2018.

GIESEN, G. F.; OLIVEIRA, F. C. **Abordagem SDN: uma mudança de paradigma na arquitetura de rede tradicional**. VII SRST – Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunicações – INATEL, 2017.

GIOTOPOULOU, P. D. **The evolution of mobile communications: Moving from 1G to 5G, and from human-to-human to machine-to-machine communications**. 2015. Disponível em: <<https://pergamos.lib.uoa.gr/uoa/dl/frontend/file/lib/default/data/1324030/theFile>>. Acesso em 9 de Abril de 2018.

GONZALEZ, Andres et al. **Dependability of the NFV Orchestrator: State of the Art and Research Challenges**. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8350296/>>. Acesso em: 7 de maio de 2018.

GSMA. **An Introduction to Network Slicing**. 2017. Disponível em: <<https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2017/11/GSMA-An-Introduction-to-Network-Slicing.pdf>>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

HAN, B. et al. **Network Function Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations**. 2015. Disponível em: <<http://www.ttcenter.ir/ArticleFiles/ENARTICLE/3431.pdf>>. Acesso dia 22 de Abril de 2018.

HOSSAIN, M. A. et al. **Survey of Promising Technologies for 5G Networks**. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2s793UK>>. Acesso em 5 de Maio de 2018.

HSIN-HUNG, C. et al. **Special Selection On 5G Wireless Technologies: Perspectives Of The Next Generation Mobile Communications And Networking**. v. 2, p. 1196, 2014.

HUAWEI. **Soluções Flexíveis SDN para Agile Enterprise**. 2018. Disponível em: <<http://e.huawei.com/br/solutions/technical/sdn>>. Acesso em 16 de Abril de 2018.

_____. **5G Network Architecture: A High-Level Perspective**. 2016. Disponível em: <<http://www.huawei.com/minisite/hwmbbf16/insights/5G-Nework-Architecture-Whitepaper-en.pdf>>. Acesso em 20 de Abril de 2018.

_____. **Huawei Takes Leading Role in China's Third Phase 5G Tests**. 2018. Disponível em: <www.huawei.com/en/press-events/news/2018/3/Huawei-5G-NSA-Functional-Test>. Acesso em 12 de Maio de 2018.

IEEE. **Software Defined Networks**. 2017. Disponível em: <<https://sdn.ieee.org/about>>. Acesso em 9 de Abril de 2018.

JHA, P.; KARANDIKAR, A. **SDN based Control and Management of WLANs in the 3GPP 5G Network**. 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1802.01425.pdf>>. Acesso em 5 de Maio de 2018.

JUNIPER. **Para entender uma SD-WAN**. 2016. Disponível em: <<http://www.junipernetworks.com.br/para-entender-uma-sd-wan>>. Acesso em 16 de Abril de 2018.

_____. **As Rede 5G Vêm Aí**. 2015. Disponível em: <<http://www.junipernetworks.com.br/as-redes-5g-vem-ai>>. Acesso em 9 de Abril de 2018.

KATSALIS et al. **Network Slices toward 5G Communications: Slicing the LTE Network**. 2017. Disponível em: <<https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/CS249/%CE%86%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1/NetworkSlicingLTE%20%28Katsalis%29.pdf>>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

KAVANAGH, Sacha. **What is 5G New Radio (5G NR)**. 2017. Disponível em: <<https://5g.co.uk/guides/what-is-5g-new-radio/>>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

KIM, H.; FEAMSTER, N. **Improving Network Management with Software Defined Networking**. 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2K0dv1L>>. Acesso em 9 de Abril de 2018.

KREUTZ, D. et al. **Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey**. Proceedings of the IEEE, Vol. 103, N° 1, 2015.

MARCUS, J. S.; MOLNAR, G. **Network sharing and 5G in Europe: The potential benefits of using SDN or NFV**. 2017. Disponível em: <<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/169482/1/Marcus-Molnar.pdf>>. Acesso em 5 de Maio de 2018.

MASTERSON, Claire. **Massive MIMO and Beamforming: The Signal Processing Behind the 5G Buzzwords.** 2017. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/massive-mimo-and-beamforming-the-signal-processing-behind-the-5g-buzzwords.html>>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

MIJUMBI, Rashid et al. **Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges.** 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8350296/>>. Acesso em 7 de maio de 2018.

MIR, M. M.; KUMAR, S. **Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G.** International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 6, pag. 2545-2551, 2015.

NAM, Tuan Le et al. **Survey of Promising Technologies for 5G Networks.** 2016. Disponível em: <<http://downloads.hindawi.com/journals/misy/2016/2676589.pdf>>. Acesso em 6 de maio de 2018.

NCC; UNESP. **Plataforma Kytos de SDN.** 2017. Disponível em: <<https://wrnp.rnp.br/noticia/plataforma-kytos-de-sdn-sera-destaque-da-unesp-no-wrnp-2017>>. Acesso em 15 de Abril de 2018.

NGMN. **5G White Paper.** 2015. Disponível em: <https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN_5G_White_Paper_V1_0>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

NOKIA. **Nokia begins first key tests on 4.5GHz band with DOCOMO to develop 5G ecosystem in Japan.** 2017. Disponível em: <https://www.nokia.com/en_int/news/releases/2017/05/24/nokia-begins-first-key-tests-on-45ghz-band-with-docomo-to-develop-5g-ecosystem-in-japan>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

NTT DOCOMO. **5G Trials with world-leading vendors.** 2016. Disponível em: <https://www.nttdocomo.co.jp/english/corporate/technology/rd/tech/5g/5g_trial/>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

ONF. **TR-526 Applying SDN Architecture to 5G Slicing.** 2016. Disponível em: <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/Applying_SDN_Architecture_to_5G_Slicing_TR-526.pdf>. Acesso em 5 de Maio de 2018.

PAIVA, Fernando. **Governos precisam entender rede móvel como recurso estratégico nacional, diz Ericsson.** 2018. Disponível em: <<http://www.mobiletime.com.br/26/02/2018/governos-precisam-entender-rede-movel-como-recurso-estrategico-nacional-diz-ericsson/486302/news.aspx>>. Acesso em 9 de Abril de 2018.

PERRIN, Sterling. **Evolving to an Open C-RAN Architecture for 5G A Heavy Reading white paper produced for Fujitsu.** 2017. Disponível em:

<<https://www.fujitsu.com/us/Images/FNC-Fujitsu-Evolving-to-an-Open-C-RAN-Architecture-for-5G-White-Paper.pdf>> Acesso em 22 de Abril de 2018.

PRETZ, Kathy. **5G: The Future of Communications Networks**. 2017. Disponível em: <<http://theinstitute.ieee.org/technology-topics/communications/5g-the-future-of-communications-networks>>. Acesso em 29 de Março de 2018.

QUALCOMM. **Everything You Need to Know About 5G**. 2018. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/invention/5g/what-is-5g>>. Acesso em 8 de Abril de 2018.

RODRIGUEZ, F. L. **Arquitetura e Protótipo de uma Rede SDN-OPENFLOW para Provedor de Serviço**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade da Brasília, Brasília, 2014.

ROTHENBERG, C. et al. **OpenFlow e redes definidas por software: um novo paradigma de controle e inovação em redes de pacotes**. v. 7, p. 66-67. 2011.

SAMSUNG. **Samsung and Verizon Announce First 5G Customer Trials Set to Begin in Q2 2017**. 2017. Disponível em: <<https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/news/samsung-and-verizon-announce-first-5g-customer-trials-set-to-begin-in-q2-2017/>>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

TEC. **Study Paper on Policy and Charging Rule Function**. 2014. Disponível em: <<http://tec.gov.in/pdf/Studypaper/PCRF%20Study%20Paper%20MAR%202014.pdf>>. Acesso em 13 de Maio de 2018.

TELEFONICA. **Cloud RAN Architecture for 5G**. 2016. Disponível em: <http://www.tid.es/sites/526e527928a32d6a7400007f/content_entry5321ef0928a32d08900000ac/578f4eda1146dde411001d0e/files/WhitePaper_C-RAN_for_5G_-_In_collab_with_Ericsson_SC_-_quotes_-_FINAL.PDF>. Acesso em 23 de Abril de 2018.

TONG, A; WADE, K. **Guia de NFV e SDN para operadoras e provedores de serviços**. 2017. Disponível em: <http://media.ciena.com/documents/Blue+Planet+Essentials_NFV+and+SDN+Guide_033017_A5_pt_BR.pdf>. Acesso em 6 de Maio de 2018.

WILKE, Joe. **5G Network Architecture and FMC Joe Wilke**. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201707/Documents/Joe-Wilke-%205G%20Network%20Architecture%20and%20FMC.pdf>>. Acesso em 22 de Abril de 2018.

WOON, H. C.; ZHONG, F.; HAINES, R. **Emerging Technologies and Research Challenges for 5G Wireless Networks**. 2014. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1402/1402.6474.pdf>>. Acesso em 30 de Março de 2018.

ZAIDI, Zainab et al. **Will SDN be part of 5G**, 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1708.05096.pdf>>. Acesso em 6 de Maio de 2018.