

Inatel

Instituto Nacional de Telecomunicações

Arquitetura Híbrida Terrestre/Satélite
para Distribuição de Conteúdos em
Áreas Remotas com 5G

Tibério Tavares Rezende

Dezembro de 2020



ARQUITETURA HÍBRIDA TERRESTRE/SATÉLITE PARA DISTRIBUIÇÃO DE CONTEÚDOS EM ÁREAS REMOTAS COM 5G

TIBÉRIO TAVARES REZENDE

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti.

Rezende, Tibério Tavares

R467a

Arquitetura Híbrida Terrestre/Satélite para Distribuição de Conteúdos em Áreas Remotas com 5G. / Tibério Tavares Rezende. – Santa Rita do Sapucaí, 2020.

174 p.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti.

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui anexo e bibliografia.

1. 5G 2. Satélite 3. Órbita GEO 4. CDN. 5. redes de distribuição de conteúdo 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Alberti, Antônio Marcos. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em _____ / _____ / _____,
pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Antônio Marcos Alberti
INATEL

Prof. Dr. Fábio Luciano Verdi
UFSCar

Prof. Dr. Carlos Nazareth Motta Marins
INATEL

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

”O ser humano é um animal filosofante: só pode renunciar à filosofia renunciando a uma parte da sua humanidade. É preciso filosofar, portanto: pensar tão longe quanto pudermos, e mais longe do que sabemos. Com que finalidade? Uma vida mais humana, mais lúcida, mais serena, mais razoável, mais feliz, mais livre...”

André Comte-Sponville

Dedico esse trabalho aos meus pais Orlando e Dinéia, pelos valores ensinados, pela paciência e pelo apoio incondicional durante os longos anos de estudo. À minha noiva querida e futura esposa Isabela, por todo amor, amizade e companheirismo; sou muito grato a ela por estar sempre ao meu lado. À minha irmã pela paciência e apoio. Ao professor Antonio Marcos Alberti, meu orientador, pela confiança, amizade e apoio imprescindível durante a realização dos trabalhos em campo e no laboratório. Sem sua ajuda nada seria possível. Aos amigos do curso de Mestrado em Telecomunicações, especialmente ao Élcio, Rodrigo e ao Victor.

Tibério Tavares Rezende

Agradecimentos

Sou muito grato aos meus pais, Orlando Ferreira de Rezende e Dinéia de Oliveira Tavares Rezende, por todo apoio e dedicação, de maneira direta e indireta, durante os anos de estudo. Por todo carinho e incentivo em minhas atividades acadêmicas, só posso dizer que os amo muito. Gostaria de agradecer-los pelos valores ensinados e por mostrar o caminho. Gostaria de agradecer a Deus pela vida de meus pais e pela força desde o começo dessa jornada. Agradeço à minha noiva querida e futura esposa Isabela Almeida Costa, por todo amor, amizade e companheirismo; sou muito grato a ela por estar sempre ao meu lado. Sou grato a Deus por caminharmos juntos.

Agradeço ao Professor Dr., orientador de mestrado e de vida, Antônio Marcos Alberti, pelos anos de trabalho, amizade e de aprendizado juntos. Por todos os ensinamentos e pela confiança em mim. Agradeço por sua serenidade, compreensão e por seus conselhos.

Agradeço a todos os amigos e colegas de laboratório (ICT Lab.). Sou muito grato por fazer parte dessa equipe, é muito gratificante e valoroso poder trabalhar nesse ambiente rico em aprendizagem, com muitos desafios, companheirismo e união. Em especial, eu gostaria de agradecer ao Élcio, Rodrigo e ao Victor, amigos e parceiros em todas as lutas desde o começo dessa jornada.

Agradeço a ajuda da Gisele, secretária do curso de Mestrado em Telecomunicações pelo Inatel por todo esclarecimento e dedicação a todos os alunos. Muito obrigado. Agradeço também ao Professor Dr. Carlos Nazareth Motta Marins pela oportunidade de fazer parte da equipe SINDISAT e por todo apoio durante as etapas do projeto. Agradeço a todos os colegas de trabalho e colaboradores do Inatel por sempre propiciar um ambiente adequado para os estudos e por auxiliar a instituição a proporcionar ensinamentos de altíssima qualidade.

Sou grato ao SINDISAT pela parceria com o Inatel, sendo representado por Luís Correia, Gerson Souto e Sergio Maia, que contribuíram e sempre incentivaram a realização desse trabalho. Eles sempre foram compreensivos e críticos construtivos desde o início do projeto. Este trabalho foi financiado pelo Sindicato Nacional das Empresas de Telecomunicações por Satélite (SINDISAT). Também foi parcialmente financiado pela Finep, com recursos do Funttel, contrato No 01.14.0231.00, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil.

Tibério Tavares Rezende

Sumário

| | |
|--|--------------|
| Sumário | ix |
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | xv |
| Lista de Símbolos | xxi |
| Publicações | xxiii |
| Resumo | 1 |
| Abstract | 2 |
| 1 Introdução | 3 |
| 1.1 Questão de Pesquisa | 7 |
| 1.2 Objetivos | 8 |
| 1.3 Organização do Texto | 9 |
| 2 Fundamentação Teórica | 10 |
| 2.1 Redes de Distribuição de Conteúdo | 10 |
| 2.2 Redes Centradas em Informação | 14 |
| 2.3 Sistema de Comunicação Via Satélite e 5G | 16 |
| 2.4 Considerações Parciais | 19 |
| 3 Trabalhos Relacionados | 20 |
| 3.1 Metodologia de Pesquisa e Escolha dos Trabalhos Relacionados | 20 |
| 3.2 Tecnologias Emergentes e a Relação com 5G Híbrido Terrestre/Satélite | 21 |
| 3.2.1 Redes de Distribuição de Conteúdo | 21 |
| 3.2.2 Sistema de Comunicação Móvel 5G | 26 |
| 3.2.3 Padronização do Sistema 5G | 31 |
| 3.2.4 Conexão via Satélite para Distribuição de Conteúdos em Redes 5G | 49 |
| 3.3 Análise e Oportunidade de Pesquisa | 56 |
| 3.3.1 Análise Qualitativa | 56 |
| 3.3.2 Revisão e Resumo da Análise Bibliográfica | 56 |
| 3.3.3 Oportunidade de Convergência das Redes Satelitais e das Redes 5G | 59 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4 | Considerações Parciais | 64 |
| 4 | Integração de Componentes para Arquitetura Híbrida de Distribuição de Conteúdos com 5G | 66 |
| 4.1 | Cenário de Testes de Distribuição de Conteúdo via Conexão 5G | 67 |
| 4.2 | Ferramentas e Plataformas Seleccionadas | 68 |
| 4.3 | Arquitetura de Rede Híbrida para Distribuição de Conteúdo em 5G | 71 |
| 4.3.1 | Programação e Configuração do Nó de Borda | 74 |
| 4.3.2 | Programação e Configuração do Nó Central | 76 |
| 4.3.3 | Configuração Completa da Rede e Instalação dos Componentes | 77 |
| 4.4 | Considerações Parciais | 78 |
| 5 | Resultado Obtidos | 79 |
| 5.1 | Testes de Transferência de Conteúdo | 79 |
| 5.2 | Análise Comparativa entre as Taxas de Transferência da Arquitetura de Testes | 83 |
| 5.3 | Considerações Parciais | 90 |
| 6 | Considerações Finais | 91 |
| 6.1 | Contribuições | 91 |
| 6.2 | Lições Aprendidas | 95 |
| 6.3 | Trabalhos Futuros | 96 |
| | Bibliografia | 97 |
| A | Apêndice - Revisão e Resumo da Análise Bibliográfica | 1 |
| A.1 | Relação entre as Tecnologias do Estado da Arte | 1 |
| B | Apêndice - Fotos dos Trabalhos Efetuados no Laboratório e em Campo | 15 |
| B.1 | Ferramentas e hardwares utilizados para a execução dos testes | 15 |
| C | Apêndice - Programação e Configuração dos Nós da Arquitetura | 23 |
| C.1 | Nó de Borda | 23 |
| C.2 | Nó Central | 30 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Principais cenários do 5G no mundo e no Brasil (adaptado de [9]). | 6 |
| 2.1 | Exemplo da distribuição geográfica em uma CDN [42]. | 12 |
| 2.2 | Funcionamento de uma Rede Centrada em Informação (ICN) [47]. | 15 |
| 3.1 | Infraestrutura de rede do alto nível na Internet atualmente [95]. | 27 |
| 3.2 | Projetos do 5G PPP estudados durante a análise da literatura [153]. | 35 |
| 3.3 | Evolução entre as tecnologias de comunicação móvel de 1G até o 5G [24, 143, 180]. | 43 |
| 4.1 | Representação da estrutura de fornecimento de conteúdo utilizando <i>cache</i> [72]. | 67 |
| 4.2 | Cenário do sistema híbrido terrestre-satélite para fornecimento de conteúdo [72]. | 68 |
| 4.3 | <i>Layout</i> lógico da CDN com as ferramentas de armazenamento e gerenciamento de conteúdo [237]. | 70 |
| 4.4 | Configuração e estado de operação do gerenciador do transceptor TX-RX-MIMO-GFDM (Modem 5G). | 72 |
| 4.5 | Configuração de testes de distribuição de conteúdo via conexão 5G híbrida entre o ICT Lab. (Inatel) Sta. Rita Sapucaí/MG e a estação de Hortolândia/SP. | 73 |
| 4.6 | Teste da instalação do servidor <i>Web Nginx</i> no <i>ICT_SAT_5G_edgcdn-node</i> da rede CDN. | 74 |
| 4.7 | Testes iniciais de configuração do <i>ICT_SAT_5G_edgcdn-node</i> para o serviço CDN com <i>Varnish cache</i> | 75 |
| 4.8 | Teste da instalação do servidor <i>Web Nginx</i> no <i>ICT_SAT_5G_centralcdn-node</i> da rede CDN. | 76 |
| 4.9 | Arquitetura de rede completa para os testes de distribuição de conteúdo via rede 5G híbrida. Detalhes da configuração IP. | 78 |
| 5.1 | Configuração de testes de distribuição de conteúdo via conexão 5G híbrida entre o ICT Lab. (Inatel) Sta. Rita Sapucaí/MG e a estação de Hortolândia/SP. | 80 |
| 5.2 | Taxa de Transferência pelo Número de Ensaios para o Arquivo .PNG | 85 |
| 5.3 | Taxa de Transferência pelo Número de Ensaios para o Arquivo .JPG | 86 |
| 5.4 | Taxa de Transferência pelo Número de Ensaios para o Arquivo .ISO. | 87 |
| 5.5 | Taxa de Transferência pelo Número de Ensaios para o Arquivo .MP4. | 88 |
| B.1 | <i>Hardware</i> do rádio do transceptor TX-RX-MIMO-GFDM (Modem 5G). | 16 |
| B.2 | Analisador de espectro com a forma de onda obtida durante os testes de transferência de conteúdo com modem 5G. | 17 |
| B.3 | Foto do Servidor 1 utilizado na arquitetura de rede. | 18 |
| B.4 | Foto do Servidor 2 localizado na cidade de Hortolândia/SP. | 19 |

| | | |
|-----|--|----|
| B.5 | Foto do local de instalação do BUC do satélite SES-14. | 20 |
| B.6 | Foto do Servidor 2 funcionando após configuração do modem CDM-760 e do acelerador TCP. | 21 |
| B.7 | Foto dos trabalhos realizados em laboratório no ICT Lab. | 22 |
| C.1 | Teste da instalação do servidor <i>Web Nginx</i> no <i>ICT_SAT_5G_edgedn-node</i> da rede CDN. | 26 |
| C.2 | Testes iniciais de configuração do <i>ICT_SAT_5G_edgedn-node</i> para o serviço CDN com <i>Varnish cache</i> | 30 |
| C.3 | Teste da instalação do servidor <i>Web Nginx</i> no <i>ICT_SAT_5G_centralcdn-node</i> da rede CDN. | 32 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Comparação entre as Tecnologias das Gerações 4G e 5G [24]. | 17 |
| 3.1 | Relação entre as tecnologias estudadas. | 62 |
| 4.1 | Características dos recursos de <i>software</i> da arquitetura proposta. | 70 |
| 4.2 | Características dos recursos de <i>hardware</i> da arquitetura proposta. | 71 |
| 4.3 | Capacidade do enlace satélite e do Modem 5G durante a execução dos testes. | 72 |
| 4.4 | Características da máquina virtual <i>ICT_SAT_5G_centralcdn-node</i> | 73 |
| 4.5 | Características da máquina virtual <i>ICT_SAT_5G_edgcdn-node</i> | 74 |
| 5.1 | Transferência de Conteúdo: Imagem .PNG sem CDN <i>cache</i> | 81 |
| 5.2 | Transferência de Conteúdo: Imagem .PNG via CDN <i>cache</i> | 81 |
| 5.3 | Transferência de Conteúdo: Imagem .JPG sem CDN <i>cache</i> | 81 |
| 5.4 | Transferência de Conteúdo: Imagem .JPG via CDN <i>cache</i> | 82 |
| 5.5 | Transferência de Conteúdo: Misto .ISO sem CDN <i>cache</i> | 82 |
| 5.6 | Transferência de Conteúdo: Misto .ISO via CDN <i>cache</i> | 82 |
| 5.7 | Transferência de Conteúdo: Misto .MP4 sem CDN <i>cache</i> | 83 |
| 5.8 | Transferência de Conteúdo: Misto .MP4 via CDN <i>cache</i> | 83 |
| 5.9 | Capacidade do enlace satélite e do Modem 5G durante a execução dos testes. | 89 |
| A.1 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 1. | 2 |
| A.2 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 2. | 6 |
| A.3 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 3. | 7 |
| A.4 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 4. | 8 |
| A.5 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 5. | 9 |
| A.6 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 6. | 10 |
| A.7 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 7. | 11 |
| A.8 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 8. | 12 |
| A.9 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 9. | 13 |
| A.10 | Tecnologias em cada proposta <i>versus</i> estado da arte: Parte 10. | 14 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|-------------------|--|
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |
| 5G AKA | 5G Authentication and Key Agreement |
| 5G NextGen | 5G Next Generation Core |
| 5G MEDIA | Programable Edge-to-Cloud Virtualization Fabric for the 5G Media Industry |
| 5G NORMA | 5G Novel Radio Multiservice adaptive network Architecture |
| 5G PPP | 5G Infrastructure Public Private Partnership |
| ANIC | Accelerated Network Interface Card |
| API | Application Programming Interface |
| ARPU | Average Revenue per User |
| ARTES | Advanced Research in Telecommunications Systems |
| B2B | Business-to-Business |
| BGP | Border Gateway Protocol |
| CAL | Converged Aggregation Level |
| CAPEX | Capital Expenditure |
| CDN | Content Distribution Network |
| CDN-I | Content Delivery Network-Interconnection |
| CESC | Cloud-Enabled Small Cell |
| CHARISMA | Converged Heterogeneous Advanced 5G Cloud-RAN Architecture for Intelligent and Secure Media Access |
| CoAP | Constrained Application Protocol |
| CPRI | Common Public Radio Interface |
| CR | Cognitive Radio |
| CRAN | Cloud Radio Access Network |
| D2D | Device-to-Device |
| DASH | Dynamic Adaptive Streaming over HTTP |
| DCTCP | Data Center TCP |
| DMRS | Demodulation Reference Signal |

| | |
|----------------|--|
| D-RAN | Distributed Architectures RAN |
| EAP | Extensible Authentication Protocol |
| EDA | Event-driven Architecture |
| eMBB | Enhanced Mobile Broadband |
| eMTC | enhanced Machine-Type Communication |
| EN-DC | E-UTRA-NR Dual Connectivity |
| EPS | Evolved Packet System |
| eRAC | enhanced Remote Area Communications |
| ESA | European Space Agency |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| E-UTRAN | Evolved Universal Mobile Telecommunication System Terrestrial Radio Access Network |
| FCAN | Flash Crowds Alleviation Network |
| FI | Future Internet |
| FN | Flexible Numerology |
| Gbps | Giga Bit por Segundo |
| GEO | Geoestacionária |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| H2020 | Horizon 2020 |
| HAP | High Altitude Platforms |
| HARQ | Hybrid-ARQ |
| HD | High-definition |
| HDR | High-Dynamic Range |
| HFR | High Frame Rates |
| HLS | HTTP Live Streaming |
| HTS | High Throughput Satellite |
| IaaS | Infrastructure-as-a-Service |
| IAM | Identity and Access Management |
| ICN | Information-Centric Networking |
| ICT Lab | Information and Communications Technologies Laboratory |
| IDN | Integrated Delivery Network |
| IETF | Internet Engineering Task Force |
| IMAP | Internet Message Access Protocol |
| IMI | Intelligent Management Init |
| IMS | IP-Multimedia Subsystem |
| IMSI | International Mobile Subscriber Identity |

| | |
|---------------------|--|
| IMT | International Mobile Telecommunications |
| IMT-2000 | International Mobile Telecommunications-2000 |
| Inatel | Instituto Nacional de Telecomunicações |
| IoT | Internet of Things |
| IP | Internet Protocol |
| ISP | Internet Services Providers |
| ITU-R | International Telecommunication Union - Radiocommunication |
| ITS | Intelligent Transport Systems |
| LAN | Local Area Network |
| LMR | Land Mobile Radio |
| LTE-Advanced | Long Term Evolution-Advanced |
| LTE-M | Long Term Evolution-Machine |
| M2M | Machine-to-Machine |
| MaaS | Mobility-as-a-Service |
| MAC | Media Access Control |
| MaEC | Multi-Access Edge Computing |
| MANO | Management and Orchestration |
| MBB | Mobile Broad-Band |
| Mbps | Mega Bit por Segundo |
| MC | Mission Critical |
| MCPTT | Mission Critical Push-To-Talk |
| MEC | Mobile Edge Computing |
| MeNB | Master eNB |
| MHz | Mega Hertz |
| MIMO | Multiple-Input and Multiple-Output |
| mMTC | Massive Machine-Type Communications |
| mmWave | Millimeter-Wave |
| MNO | Mobile Network Operator |
| MOS | Mean Option Score |
| MPEG | Moving Picture Experts Group |
| MPTCP | Multipath TCP |
| MQTT | Message Queue Telemetry Transport |
| ms | Mili Segundos |
| MSS | Microsoft Smooth Streaming |
| MTC | Machine-type Communications |

| | |
|-------------------|--|
| mWT | Millimetre Wave Transmission |
| NAC | Network Control Access |
| NB-IoT | Narrow Band-IoT |
| NDN | Named Data Network |
| NetInf | Network of Information |
| NF | Network Functions |
| NFV | Network Function Virtualization |
| NFVI | Network Function Virtualization Infrastructure |
| NGEO | Não-Geoestacionária |
| NGM | Next Generation Mobile |
| NGP | Next Generation Protocols |
| NG-PON2 | Next-Generation Passive Optical Network 2 |
| NG-RAN | New Generation-Radio Access Network |
| NR | New Radio |
| NSA | Non-Standalone |
| NTN | Non-Terrestrial Networks |
| OFDM/OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access |
| OFDM-PON | Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Passive Optical Network |
| OMA | Orthogonal Multiple Access |
| OTT | Over-the-Top |
| P2P | Peer-to-Peer |
| PMR | Private Mobile Radio |
| PoC | Proof of Concept |
| PoP | Points-of-Presence |
| POP3 | Post Office Protocol |
| PSI | Public Subscription Information |
| P-SI | Publish-Subscribe Internetworking |
| PTRS | Phase Tracking Reference Signal |
| QCI | Quality Class Indicator |
| QoE | Quality of Experience |
| QoS | Quality of Service |
| RACH | Random Access Channel |
| RBS | Radio Base Station |
| RENE | Rendezvous Network |
| RF | Rádio Frequência |

| | |
|-----------------|--|
| RN | Rendezvous Nodes |
| RNIS | Radio Network Information Service |
| RRC | Radio Resource Control |
| RRH | Remote Radios Head |
| SBA | Service Based Architecture |
| SDN | Software Defined Network |
| SDK | Software Development Kit |
| SHINE | Secure Hybrid in the Network Cache Environment |
| SINDISAT | Sindicato Nacional das Empresas de Telecomunicações por Satélite |
| SgNB | Secondary gNB |
| TCP/IP | Transmission Control Protocol/Internet Protocol |
| TS | Technical Specification |
| TR | Technical Report |
| UAS | Unmanned Aircraft Systems |
| UE | User Equipment |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UHDT | Ultra-High-Definition Television |
| UICC | Universal Integrated Circuit Card |
| UP | User Plane |
| URLLC | Ultra Reliable Low Latency Communications |
| VIM | Virtualized Infrastructure Manager |
| VLAN | Virtual Local Area Network |
| VNF | Virtual Network Functions |
| VNO | Virtual Network Operators |
| VPN | Virtual Private Network |
| VPS | Virtual Private Server |
| WAN | Wireless Area Network |
| WebRTC | Web Real-Time Communications |
| WIM | WAN Infrastructure Manager |
| WP | Work Package |
| WSN | Wireless Sensor Network |
| WRAN | Wireless Rural Area Network |
| WRC | World Radiocommunication Conference |

Lista de Símbolos

Publicações

REZENDE, T.T.; D'AVILA, V.H.D.; COSTA, K.A.; ALBERTI, A.M.. Distribuição de Conteúdo via Conexão 5G Híbrida Terrestre Satélite. In: **CSBC 2020, 12º SBCUP – Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva**. Cuiabá, MT. 2020, SBC p.151-160.. Sociedade Brasileira de Computação. Cuiabá, MT. 2020, SBC p.151-160..

SANTOS, J.R.; REZENDE, T.T.; SILVA, T.B.; ROSÁRIO, E.C.; ALBERTI, A.M.. Proposta de Arquitetura para Distribuição de Conteúdos Nomeados em NovaGenesis com P4. In: **WPFEI 2020 - Workshop de Pesquisa Experimental da Internet do Futuro (SBRC 2020 - WPEIF)**. Rio de Janeiro, RJ. 2020, SBC p.32-37.. Sociedade Brasileira de Computação. Rio de Janeiro, RJ. 2020, SBC p.32-37..

COSTA, K.A.; REZENDE, T.T.; ALBERTI, A.M.. Virtualização em Redes Terrestres-Satélites 5G. In: **SBRC 2019 - Workshop de Teoria, Tecnologias e Aplicações de Slicing para Infraestruturas Softwarizadas (SBRC 2019 - WSlice)**. Gramado, RS. 2019, SBC p.6-9.. Sociedade Brasileira de Computação. Gramado, RS. 2019, SBC p.6-9..

Resumo

REZENDE, T. T. Arquitetura Híbrida Terrestre/Satélite para Distribuição de Conteúdos em Áreas Remotas com 5G [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2020.

Considerando o avanço das tecnologias exponenciais e seus efeitos nos cenários atuais de geração, controle e transmissão de informação, o ambiente 5G demandará a tecnologia de satélite para a implantação de redes de acesso sem fio, em áreas remotas ou pouco atendidas, desempenhando um papel importante ao lado das tecnologias terrestres existentes. O uso de comunicação via satélite por tecnologias Geoestacionárias (GEO) e Não-Geoestacionárias (NGEO) para estabelecer comunicação entre as redes de acesso, núcleo e de dados é tema a ser desenvolvido. Esse estudo visa explorar essas demandas, criando cenários de arquitetura híbrida terrestre/satélite para o ecossistema 5G, representativos dos desafios enfrentados e de possíveis caminhos para o desenvolvimento tecnológico no Brasil. Esse trabalho parte da revisão e análise da conexão via satélite para atendimento das redes 5G dentro do contexto de tecnologias emergentes de suporte e gerência de redes, como: *Content Distribution Network* (CDN), *Identity Driven Network* (IDN), *Information-Centric Networking* (ICN) e *Future Internet* (FI), até a integração de componentes de uma arquitetura híbrida terrestre-satélite para a distribuição de conteúdos com uso de *cache* de rede. O trabalho pretende apresentar uma arquitetura de conexão via enlace satélite real SES-14 para distribuição de conteúdos em redes 5G operando com o modem 5G *Long Range*. Nesse contexto, são apresentadas as tecnologias selecionadas para a integração, suas configurações em ambiente real, a análise de desempenho e as lições aprendidas. Para o ambiente experimental, foram utilizados modems 5G *Long Range* desenvolvidos no Inatel e equipamentos de conexão por satélite da SES com modem COMTECH CDM-760. Os resultados mostram que o uso de *cache* traz grande benefício a distribuição de conteúdos em rede híbrida terrestre-satélite para 5G.

Palavras-Chave: 5G, satélite, órbita GEO, CDN, Redes Distribuição de Conteúdo, ICN, Técnicas *Cache*.

Abstract

REZENDE, T. T. *Hybrid Terrestrial / Satellite Architecture for Content Distribution in Remote Areas with 5G* [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2020.

Considering the advancement of exponential technologies and their effects on the current scenarios of generation, control and transmission of information, the 5G environment will require satellite technology for the deployment of wireless access networks in remote or underserved areas, playing an important role alongside existing terrestrial technologies. The use of satellite communication by Geostationary (GEO) and Non-Geostationary (NGEO) technologies to establish communication between the access, core and data networks is a topic to be developed. This study aims to explore these demands, creating scenarios of hybrid terrestrial / satellite architecture for the 5G ecosystem, representative of the challenges faced and possible paths for technological development in Brazil. This work starts from the review and analysis of the satellite connection to serve 5G networks within the context of emerging technologies of support and network management, such as: Content Distribution Network (CDN), Identity Driven Network (IDN), Information-Centric Networking (ICN) and Future Internet (FI), up to the integration of components of a terrestrial-satellite hybrid architecture for the distribution of content using cache network. The work intends to present a connection architecture via real SES-14 satellite link for content distribution in 5G networks operating with the 5G Long Range modem. In this context, the technologies selected for integration, their configurations in a real environment, performance analysis and lessons learned are presented. For the experimental environment, 5G Long Range modems developed at Inatel and SES satellite connection equipment with COMTECH CDM-760 modem were used. The results show that the use of cache brings great benefit to the distribution of contents in a terrestrial-satellite hybrid network for 5G.

Palavras-Chave: 5G, satellite, GEO, CDN, Content Distribution Networks, ICN, Caching techniques.

Capítulo 1

Introdução

O futuro das redes de transmissão sem fio se consolidará por meio de uma arquitetura na qual os dados possam ser compartilhados e acessados em qualquer local, a qualquer momento, de maneira transparente sem interrupções e sem falhas [1], [2]. Este conceito é a pedra angular para a realização da nova revolução da comunicação mundial de informação [3], [4], [5]. Um dos principais diferenciais da Internet Móvel, ou sem-fio de quinta geração, chamado 5G, é sua ótima capacidade de suportar as tecnologias necessárias para a implantação de uma rede de computação, de gerência e distribuição de dados ubíqua e pervasiva [6]. As redes *Machine to Machine* (M2M), *Internet of Things* (IoT), *Content Distribution Networks* (CDN), *Software Defined Networks* (SDN), *Information-Centric Networks* (ICN), Redes Virtualizadas e 5ª Geração de Comunicação Sem Fio Móvel (5G) estarão presentes em todas as áreas tecnológicas e de negócios em um futuro próximo. Para o desenvolvimento das redes do futuro, é necessária uma nova arquitetura de rede sem fio, segura e eficiente.

Os sistemas de comunicação móvel evoluíram através de uma série de gerações. De sistemas analógicos (1G), passando pelo *Global System for Mobile Communications* (GSM) (2G), pelo *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000) (3G), para os sistemas *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-Advanced) (4G). De acordo com B. G. Evans [7], os sistemas de comunicações móveis via satélite se desenvolveram de forma independente dos sistemas terrestres por um longo período. No entanto, em vários parâmetros, tais como, área de cobertura e taxas de dados, os sistemas de comunicação móvel via satélite e terrestres se mostram complementares [8]. Ao oferecer recursos necessários para atingir a conectividade ubíqua, a comunicação via satélite torna-se um elemento chave neste cenário. Considerando que o avanço tecnológico exponencial gera vários efeitos sobre os atuais cenários de informação e tecnologia, neste contexto, a comunicação via satélite deve ser exposta sempre como uma possibilidade chave, visando atender os mais diversos casos de uso no 5G [9], [10], [11].

Esse tipo de tecnologia desempenhará um papel importante ao lado das tecnologias terrestres existentes. O uso da comunicação via satélite em conjunto com tecnologias de fornecimento de informação e distribuição de conteúdos através das CDN, visando estabelecer comunicação entre as redes de acesso, núcleo e de dados no 5G, é uma oportunidade única da atual conjuntura de convergência tecnológica exponencial. Isto se deve ao fato das particularidades únicas apresentadas pela comunicação via satélite em frente aos desafios de conectividade, como por exemplo, limitações de cobertura presentes nas redes móveis atuais, principalmente quando se trata de áreas mais afastadas. Neste contexto, órgãos padronizadores dos sistemas de telecomunicações móveis e via satélite têm unido esforços para oferecer serviços de alta qualidade e disponibilidade no cenário de tecnologias emergentes como as exploradas

neste trabalho [12], [13], [14], [15]. A tecnologia de comunicação via satélite desempenhará um papel importante ao lado das tecnologias terrestres existentes.

Os requisitos digitais de mídia sob demanda para *streaming* de vídeo e jogos estão afetando negativamente o tempo de carregamento das páginas na Internet [16]. Os sites que utilizam páginas *Web* dinâmicas usam lógica complexa que envolvem várias regras de programação e estruturação de código HTML para exibir a renderização (processo pelo qual se obtém o produto final de um processamento digital) final até o usuário, e os dispositivos móveis geralmente estão mais distantes dos servidores de origem que solicitam conteúdo que não foi otimizado para uso. O aumento de usuários de *streaming* de vídeo e os requisitos de serviço estão impulsionando a evolução dos serviços de mídia pela Internet [17]. Entender os conceitos e processos que os navegadores utilizam para renderizar uma página *Web* é de fundamental importância para a performance do aplicativo e para a experiência do usuário. As melhorias de mobilidade e qualidade são os principais catalisadores da evolução que está por vir [17]. O desempenho da entrega da rede tem um grande impacto na *Quality of Experience* (QoE) percebida pelo usuário final dos serviços de mídia. No entanto, os serviços de *streaming* de vídeo funcionam sobre redes não gerenciadas, nas quais o tráfego é encaminhado com base no melhor esforço [16].

Considerando o aumento da demanda de conteúdos específicos multimídia por parte dos usuários, percebe-se que o consumo maciço de conteúdos de mídia precisa de aceleradores de rede, que melhorem a entrega de mídia e otimizem o volume de tráfego que atravessa a rede dos servidores para os *players*. A CDN é caracterizada pela função na rede de distribuir o conteúdo, por meio de *caches*, armazenamentos em *Cloud* e até processamentos em *Edge Computing* visando melhorar a disponibilidade de mídia e o desempenho do fornecimento do conteúdo até o usuário [16]. A arquitetura 5G *Multi-Acess Edge Computing* (MEC) prevê um sistema com reconhecimento de QoE na borda da rede que executa análises para aprimorar a experiência do usuário nos serviços de mídia [18].

De acordo com documentos do *International Telecommunication Union - Radiocommunication* (ITU-R) e do *International Mobile Telecommunications* (IMT), o objetivo do 5G é viabilizar uma sociedade conectada de forma integrada a partir de 2020, possibilitando reunir pessoas, objetos, dados, aplicações, sistemas de transporte e cidades em um ambiente de comunicações inteligente [19], [20], [21] e [22]. Além das funções de rede atuais para escalar e aprimorar a entrega de tráfego, a capacidade e o desempenho prometidos pelas redes 5G darão um salto significativo em direção a taxas de dados mais altas, densidades maiores de utilização de serviços pelos usuários e comunicações ultra confiáveis, de baixa latência. O desenvolvimento do 5G terrestre tem sido o principal agente para revolucionar as comunicações móveis via satélite [9]. O sistema de comunicação híbrido satélite-terrestre, e em especial, a integração de comunicações 5G ao sistema, é considerada uma tendência de desenvolvimento futuro [23]. Para que isso seja possível, além do 4G, alguns dos objetivos ou demandas importantes que precisam ser atendidos são aumento da capacidade, taxa de dados, latência reduzida e segurança aprimorada dos dados durante a transmissão [1].

Para avançar para o próximo nível de qualidade e experiência de rede com a largura de banda proposta para o 5G, será necessário repensar, reestruturar e redesenhar abordagens em relação às arquiteturas de rede. O 5G é uma oportunidade para fornecer uma estrutura de tecnologias combinadas [10]. No sistema 4G os dados são acessados pelo método *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access* (OFDM/OFDMA). Os aplicativos de comunicação M2M e de IoT, por exemplo, não podem operar com a tecnologia OFDMA e garantir parâmetros como aumento da capacidade, taxa de dados aprimorada, latência reduzida e segurança. A rede terá muitos dispositivos conectados e operando ao mesmo tempo, sendo preciso alocar intervalos de tempo dedicados a cada um deles. O número de intervalos de tempo

disponíveis e os recursos de largura de banda serão insuficientes para a grande quantidade de dispositivos esperada nos próximos anos. É por isso que o acesso ortogonal múltiplo não funciona para o 5G. Em comparação com os sistemas 4G, as redes 5G deverão utilizar frequências mais altas, onde é mais fácil obter larguras de banda maiores [10].

O documento do *3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 22.822*, apresenta estudos técnicos focados na descrição de casos de uso e no entendimento de quais problemas técnicos devem ser resolvidos sobre 5G e cenários que envolvem satélites [24]. Uma rede híbrida pode ser construída com uma constelação de um ou de vários satélites. Os satélites permitem a conectividade de *User Equipments (UEs)*, com recursos limitados de Rádio Frequência (RF) e energia. A constelação de satélites pode oferecer um serviço contínuo, através da cobertura de qualquer UE com uma cobertura global. O sistema de comunicação via satélite pode oferecer um serviço contínuo em termos de atendimento, mas com diferentes parâmetros e desempenhos. Um satélite GEO pode oferecer operação *fulltime*, dentro de seu *footprint*, já, constelações LEO ou MEO, também podem oferecer operação *full-time*, mas exigindo para isso uma constelação que atenda uma determinada área geográfica, podendo esta área ser o globo terrestre, se trabalharmos com vários planos orbitais e vários satélites. Um provedor de serviços de conteúdo pode fornecer conectividade para seus clientes em uma determinada área, devido ao acesso ao sistema 5G e várias redes móveis associadas podendo garantir a extensão da cobertura geográfica [24]. O componente de satélite pode operar como: (i) Rede de acesso via satélite 5G para permitir uma extensão de cobertura de rádio para as redes terrestres; (ii) Como rede de satélites 5G fornecendo extensão para outras redes terrestres 5G através de um contrato de *roaming* [24].

É possível perceber mudanças nos meios de comunicação para construção de redes mais eficazes e econômicas. Pode-se visualizar a necessidade de novas arquiteturas de redes para suprir a necessidade de transferência de informação [25]. Padrões e tecnologias relevantes para o contexto da arquitetura de rede híbrida entre a via terrestre e satélite estão sendo atualizados pelos órgãos responsáveis, atualmente. A convergência da arquitetura satélite 5G representa grande oportunidade para melhores serviços de suporte, como aumentar a capacidade geral, alcance de usuários e introduzir características específicas do satélite em área rural, fazendas, estradas, etc., como as transmissões *broadcast* e *multicast* nativas [26]. Os órgãos de padronização 3GPP, ITU, *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* e *5G Infrastructure Public Private Partnership (5GPPP)*, especificamente nas *Releases 15* e *16* com lançamento final em dezembro de 2019, buscam a consolidação de um padrão para a arquitetura que utiliza o Core 5G com suporte via satélite para atender demandas como: conexão visando mobilidade, distribuição de vídeos e *backhaul* de celular.

A Figura 1.1 mostra os cenários que fazem parte do ecossistema 5G. O ambiente 5G é formado por cenários importantes para o Brasil e o mundo no desenvolvimento das redes híbridas, como por exemplo: (i) *broadband* móvel extremo, também conhecido como *bitpipe* ou *Enhanced Mobile Broadband (eMBB)*; (ii) serviços de missão crítica de alta confiabilidade e de baixa latência, a *Tactile Internet* ou *Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC)*, conexão acessível e robusta de bilhões de dispositivos, sem sobrecarregar a rede com a *Massive Machine-Type Communications (mMTC)*; e (iii) atendimento a áreas remotas, também chamado de *Wireless Rural Area Network (WRAN)* [27]. As comunicações via satélite evoluíram para fornecer conectividade contínua e alta taxa de dados com ampla cobertura e alta confiabilidade. Sua capacidade inerente de transmissões como *broadcast* e *multicast* e o longo alcance preenche o cenário de distribuição de conteúdo oferecendo suporte as redes 5G. As comunicações via satélite também podem ser usadas para ampliar a cobertura de redes terrestres e fornecer *backhaul* para redes 5G.

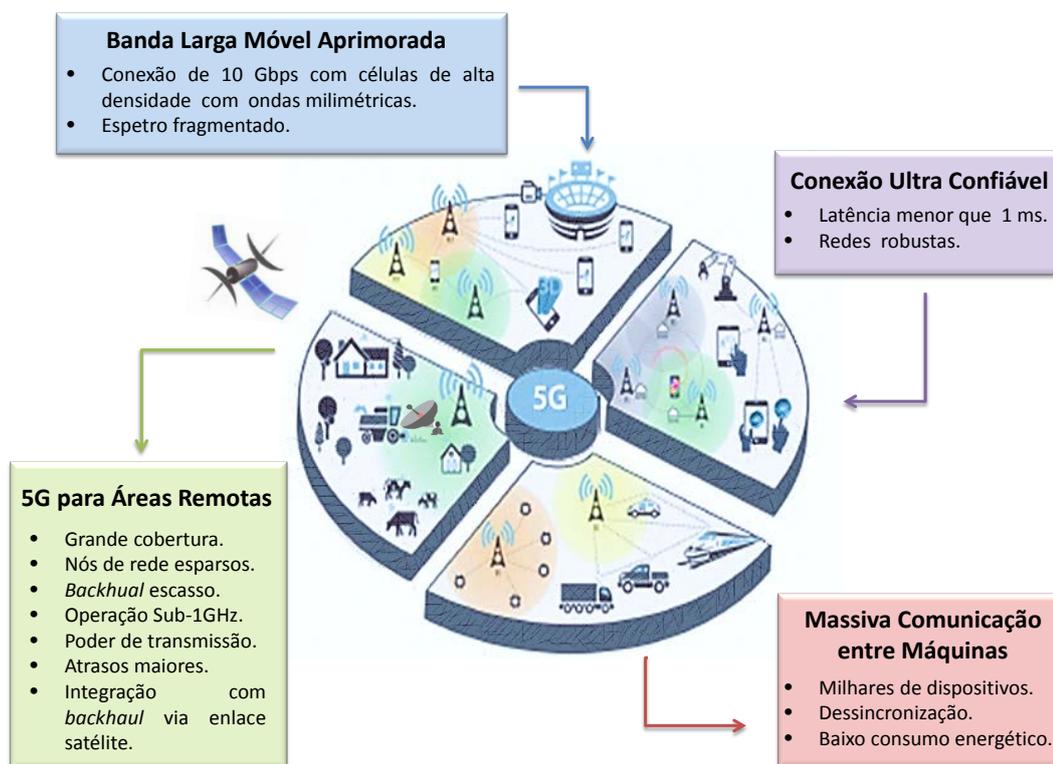


Figura 1.1: Principais cenários do 5G no mundo e no Brasil (adaptado de [9]).

A utilização da *Web* na Internet nos dias atuais tornou-se mais relativa a conteúdo do que a comunicação de mensagens [28]. Os usuários de maneira geral, usam os serviços *Web* para buscar informações e compartilhar conteúdo. Existe uma vasta quantidade de usuários que utilizam o modo de compartilhamento de arquivos *Peer-to-Peer* (P2P), para acesso e entrega de fotos, imagens, músicas, vídeos e programas [29] [30]. A Internet está tão relacionada com conteúdo que a maior parte da largura de banda é utilizada para entregar dados em formatos multimídias armazenados [31] [32]. Os provedores de vídeo confiam fortemente nas redes de distribuição de conteúdo geograficamente distribuídas, CDN, para colocar o conteúdo requisitado o mais próximo possível dos usuários, com o objetivo de melhorar a qualidade do vídeo e evitar falhas no servidores.

A tarefa de entregar e fornecer conteúdo é diferente da simples comunicação de mensagens, e impõe diferentes requisitos para a construção da arquitetura de rede. Na Internet atual, diversos sites de fornecimento de conteúdo multimídia se tornaram muito populares [33]. Do ponto de vista do usuário, a localização só importa em alguns serviços de comunicação. Mas, ao solicitar um *streaming* de vídeo, música ou *Game*, qualquer nó conectado a rede que possa oferecer o serviço requisitado, com qualidade e menor tempo é bem-vindo [29]. A localização dos dados está intimamente ligada com os aspectos de desempenho e segurança da rede. Servidores isolados não são confiáveis e não suportam o nível de demanda exigido pelo público esperado para as redes 5G e de próxima geração. Em resposta à demanda dos usuários interconectados atualmente, altas quantidades de largura de banda são providas no núcleo das redes que compõem a Internet. E a conectividade dinâmica de banda larga mais rápida foi implantada nas bordas das redes [34]. Para reduzir os atrasos, é necessário utilizar arquiteturas de redes, com técnicas e tecnologias conjuntas de núcleo e borda, que utilizam a largura de banda para distribuir

conteúdo [35].

A CDN foi inicialmente desenvolvida para fornecer conteúdo com maior disponibilidade e desempenho [36]. Usando servidores especializados e geograficamente dispersos, este tipo de configuração de rede acelera a entrega armazenando conteúdo em vários locais, atendendo pedidos de dados com o servidor mais próximo. Isso permite maior agilidade no acesso aos serviços. Com uma configuração de rede bem supervisionada é possível conseguir maior segurança para os provedores de acesso, uma vez que, as informações serão divididas em várias partes para serem armazenadas em locais diferentes. À medida que o conteúdo se tornou mais sofisticado, as CDNs enfrentam novos desafios. Os requisitos digitais, a transmissão de mídia sob demanda por vídeo e jogos em *streaming* (forma de transmissão de som e imagem, áudio e vídeo, através de uma rede qualquer de computadores com o *download* automático do que está se vendo e ouvindo) estão afetando negativamente os tempos de carregamento das páginas na Internet. Já, os *sites* dinâmicos utilizam uma lógica complexa para exibir renderização que não pode ser armazenada em *cache*, e os dispositivos móveis geralmente estão mais distantes dos servidores de origem solicitando conteúdo que não tenha sido otimizado para o seu uso.

As CDN são utilizadas de forma generalizada para servir o trânsito em escala de conteúdos e se tornaram infraestruturas críticas da Internet atual [37]. De acordo com as pesquisas realizadas para este trabalho, as redes CDN globais usam um grande conjunto de servidores amplamente distribuídos, muitas vezes localizados em *Internet Services Providers* (ISPs), ou em pontos de troca críticos, a fim de oferecer um ótimo desempenho na transmissão e disponibilidade da rede [36]. O desenvolvimento de arquiteturas híbridas satélite-terrestre 5G, representa grande oportunidade para melhores serviços, tais como aumentar a capacidade geral, cobertura para os usuários, e introdução de características específicas do satélite, como as transmissões *broadcast* e *multicast* nativas. Assim sendo, as plataformas de comunicação da rede híbrida podem desempenhar um papel fundamental no suporte a aplicativos *Business-to-Business* (B2B), forma de transação direta entre empresas, como também o *cache* local assistido por satélite, que por sua vez tira proveito da futura funcionalidade de computação de borda de acesso 5G móvel MEC [38].

A entrega de conteúdo através de CDN, envolvendo satélites e troncos terrestres, aproveita tecnologias de ponta na rede principal, considerando que o componente de borda é alimentado por um canal de difusão, *multicast* de satélite para um *cache local* eficiente em redes locais [39]. Um exemplo desta arquitetura satélite-terrestre híbrida é o projeto europeu da *European Space Agency* (ESA) *Advanced Research in Telecommunications Systems* (ARTES), *Secure Hybrid in the Network Cache Environment* (SHINE), que aborda gerenciamento de conteúdo em satélite assistido para sistemas de *cache* de rede. O objetivo do projeto SHINE é apresentar uma rede eficiente e segura de conteúdos multimídia entregáveis de ponta a ponta por codificação de tempo e técnicas de *streaming*. Estes conceitos foram levados em conta na implantação de uma rede híbrida 5G para testes em laboratório/campo neste trabalho.

1.1 Questão de Pesquisa

O presente trabalho se iniciou com a revisão do estado da arte sobre os componentes envolvidos na arquitetura da rede 5G híbrida terrestre-satélite. Para isso foram avaliados documentos dos órgãos padronizadores, artigos técnicos e científicos e projetos que fazem parte do programa Europeu H2020. O objetivo inicial foi investigar o estado da arte do uso de redes de satélite no contexto 5G, estudar a interoperabilidade terrestre-satélite, modelar e analisar o desempenho do meio satelital nas concepções GEO para entrega de conteúdo multimídia. Uma alta taxa de transferência não se traduz necessariamente em

uma boa qualidade de experiência para os usuários, especialmente em um contexto de comunicações por satélite. O tempo de transmissão apresenta um grande impacto para as aplicações e conseqüentemente para a QoE obtida na rede. As redes de entrega de conteúdo são usadas massivamente para serviços na rede terrestre, por reduzir o atraso e a carga de tráfego na rede, à medida que aproximam o conteúdo do usuário final. Em um sistema de transmissão de dados por satélite, a rede de entrega de conteúdo apresenta uma boa oportunidade para aprimorar a QoE dos usuários finais e pode alterar o uso convencional de *caches* e *proxies* visando um desempenho melhor. O desempenho de CDN em 5G híbrido é uma lacuna importante não explorada na literatura. Assim sendo, integrar componentes tecnológicos para avaliar a distribuição de conteúdos com rede 5G híbrida terrestre-satélite é uma demanda de grande interesse na comunidade científica, bem como no mercado.

Com a análise e revisão do estado da arte foi possível desenvolver um modelo de arquitetura de rede para explorar conceitos de 5G híbrido terrestre-satélite considerando virtualização, controle, gerência e fornecimento de conteúdo. A arquitetura construída e apresentada nessa dissertação visa responder a questão sobre o desempenho de uma rede de distribuição de conteúdo operando via enlace satélite, terrestre e 5G. Sendo assim, busca-se responder a seguinte questão de pesquisa: como a arquitetura híbrida 5G pode beneficiar o usuário consumidor de conteúdos digitais e quais demandas podem ser exploradas com os cenários de arquitetura híbrida para o ecossistema 5G, representativos dos desafios e caminhos possíveis para o Brasil?

1.2 Objetivos

O presente trabalho propõe a integração de componentes para uma arquitetura híbrida terrestre-satélite para infraestrutura da rede 5G e aplica a solução obtida na distribuição de conteúdo com *cache* de rede. Ou seja, 5G híbrido com armazenamento temporário na própria rede. A proposta se baseia nos principais projetos do programa *Horizon 2020* (H2020) e nos órgãos padronizadores, tais como 3GPP, ETSI, ITU e 5GPPP. Conceitos como controle de rede, segurança, redes centradas em informação, virtualização, distribuição de conteúdo e novos meios de comunicação são explorados e correlacionados. Para isso, uma rede CDN privada foi integrada em laboratório/campo para operar via enlace 5G em configuração *Long Range* usando *software Open Source*, prontamente disponível. Configuramos e testamos essa rede com equipamentos reais das empresas de equipamentos e soluções para satélite, SES e COMTECH, ambas parceiras do Projeto B: Arquitetura Híbrida Terrestre-Satélite para Infraestrutura da Rede 5G, financiado pelo Sindicato Nacional das Empresas de Telecomunicações por Satélite (SINDISAT) em parceria com o Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel). Os trabalhos foram realizados no *Information and Communications Technologies Laboratory* (ICT Lab) do Inatel. Os resultados obtidos mostram claramente a vantagem do uso de *cache* de rede para distribuir conteúdos em 5G híbrido.

Este projeto tem como objetivo geral, explorar os benefícios que os sistemas de comunicação via satélite trazem ao 5G, sendo possível buscar responder a algumas questões relacionadas ao tema: (i) Como os sistemas via satélite podem tirar proveito dos paradigmas/tecnologias presentes no 5G?; (ii) Quais são os possíveis ajustes em funcionalidades propostas para o 5G de forma a promover a interoperabilidade com os sistemas satelitais evitando possíveis dificuldades em redes convergentes? (iii) Como configurar os diversos componentes do 5G e satelitais de forma a permitir a interoperabilidade dos dois sistemas?

1.3 Organização do Texto

A dissertação está organizada em sete capítulos como segue. A Introdução é desenvolvida no Capítulo 1. O Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica com uma breve descrição dos principais conceitos abordados neste trabalho. Os documentos, trabalhos e projetos revisados sobre as redes de distribuição de conteúdo, a evolução da comunicação via satélite em sistemas de comunicações móveis 5G e a evolução das tecnologias para consolidação da rede 5G híbrida terrestre-satélite são abordados no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta uma proposta de arquitetura de rede 5G híbrida terrestre-satélite centrada na distribuição de conteúdo e construída no ambiente de testes do ICT Lab. do Inatel. Com a pretensão de contribuir para a evolução do 5G no Brasil, no Capítulo 5 são disponibilizados os principais resultados obtidos com os testes e a análise dos dados obtidos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre os trabalhos efetuados.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Esse trabalho busca a investigação do estado da arte do uso de redes de satélite no contexto 5G, visando estudar a interoperabilidade terrestre-satélite, modelar e analisar o desempenho do meio satelital na concepção GEO e avaliar a camada de transporte na solução integrada. Os estudos são apresentados no contexto das tecnologias de distribuição, armazenamento e fornecimento de conteúdo, tais como, *Content Distribution Network* (CDN), *Information-Centric Networking* (ICN) e *Future Internet* (FI), levando em consideração o *backhaul* por satélite, transmissões *unicast*, *multicast* e *broadcast*. A CDN cobre as diversas técnicas e tecnologias para distribuição de conteúdos em redes. Espera-se com os estudos realizados apresentar uma revisão atualizada do tema. São apresentados conceitos sobre as tecnologias emergentes para 5G, relacionadas com a distribuição de conteúdo, identificação dos objetos na rede, controle, segurança da arquitetura e geolocalização.

2.1 Redes de Distribuição de Conteúdo

As *Content Distribution Network* (CDN) foram inicialmente desenvolvidas para fornecer conteúdo com maior disponibilidade e desempenho, usando servidores especializados e geograficamente dispersos [36]. Este tipo de configuração de rede acelera a entrega armazenando conteúdo em vários locais, atendendo pedidos de dados com o servidor mais próximo. Isso permite maior agilidade no acesso aos serviços. Com uma configuração de rede bem supervisionada é possível conseguir maior segurança para os provedores de acesso, uma vez que, as informações serão divididas em várias partes para serem armazenadas em locais diferentes. À medida que o conteúdo se tornou mais sofisticado, as CDNs enfrentam novos desafios. Os requisitos digitais, a transmissão de mídia sob demanda por vídeo e *Games* em *streaming*¹ estão afetando negativamente os tempos de carregamento das páginas na Internet [37]. Já, os sites dinâmicos utilizam uma lógica complexa para exibir renderização que não pode ser armazenada em *cache*, e os dispositivos móveis geralmente estão mais distantes dos servidores de origem solicitando conteúdo que não tenha sido otimizado para o seu uso [40].

A CDN é uma camada intermediária de infraestrutura que ajuda a fornecer com eficiência o conteúdo multimídia cada vez maior dos provedores de conteúdo para uma grande comunidade de clientes distribuídos geograficamente. O roteamento de conteúdo é um componente essencial da arquitetura CDN. A distribuição de conteúdo pode ser realizada através de uma arquitetura hierárquica de roteamento

¹Formato para transmitir músicas, imagens, áudio e vídeo em qualquer rede de computadores com *download* automático e contínuo do que está sendo visto e ouvido

de conteúdo para CDN de grande escala, na qual os servidores CDN realizam roteamento de conteúdo *intra-clusters* e em *inter-clusters* com base em uma rede de sobreposição hierárquica de dois níveis. Determinados conteúdos da rede, como *sites* e outros serviços são acessados milhares de vezes por dia por usuários únicos de vários locais, o que causa um congestionamento severo na rede em torno dos pontos de acesso. Uma solução prática seria simplesmente copiar o conteúdo ou serviço dos pontos de acesso e armazená-los em *cache* em vários outros locais na rede, direcionando os usuários para os novos locais de armazenamento [40]. No entanto, com a grande diversidade de serviços disponibilizados e o crescente número de acessos aos *sites*, o consumo se tornou muito dinâmico por parte dos usuários. Se mostra preciso um esquema para monitorar e atualizar eficientemente todas as cópias dos disponibilizadores de conteúdo dinamicamente.

As CDN são utilizadas de forma generalizada para servir o trânsito em escala de conteúdos e se tornaram infraestruturas críticas da Internet atual [37]. De acordo com as pesquisas realizadas para este trabalho, as redes CDN globais usam um grande conjunto de servidores amplamente distribuídos, muitas vezes localizados em *Internet Services Providers* (ISP), ou em pontos de troca críticos, a fim de oferecer um ótimo desempenho na transmissão e disponibilidade da rede [36]. Essas redes realizam um equilíbrio otimizado de recursos para fornecer desempenho e disponibilidade suficientes, sujeitos às restrições de custo e políticas impostas pelas rotas em que são implantadas. Os custos são determinados por fatores como consumo de energia e taxas de transmissão, enquanto as políticas incluem os caminhos do protocolo entre sistemas autônomos, o *Border Gateway Protocol* (BGP) [41].

Como é apresentado na Figura 2.1, construída com base nos conceitos apresentados por Gang Peng [42], uma rede operando com CDN funciona com o uso de várias tecnologias trabalhando em conjunto, interligadas e supervisionadas visando obter maior controle dos dados que trafegam por ela. Assim, é possível criar uma rede que encontre os pontos mais acessíveis e próximos com a utilização de *proxies*, *caches*, *fog computing*, *cloud computing*, *hosts*, servidores e sistemas de comunicação mais abrangentes como o satélite. Se um servidor trabalhar sozinho se torna impossível distribuir conteúdo com qualidade para muitos usuários. E, com o advento do 5G, este cenário fica ainda mais complexo e precisa de técnicas, tecnologias e soluções descentralizadas [43]. A principal dúvida é como colocar um servidor que entregue conteúdo de qualidade a todo momento mais perto dos usuários finais. A convergência da arquitetura satélite 5G representa grande oportunidade para melhores serviços, tais como aumentar a capacidade geral, cobertura para os usuários, e introdução de características específicas do satélite, como as transmissões *broadcast* e *multicast* nativas. Assim sendo, as plataformas de comunicação da rede híbrida podem desempenhar um papel fundamental no suporte a aplicativos *Business-to-Business* (B2B), que é a forma de transação direta entre empresas, como também o *cache* local assistido por satélite, que por sua vez tira proveito da futura funcionalidade de computação de borda de acesso 5G móvel *Mobile Edge Computing* [38].

A Figura 2.1 mostra que a CDN não opera apenas em um único servidor, mas em vários, através de redes privadas e do tipo padrão Ethernet *Wide Area Network* (WAN) ou *Local Area Network* (LAN), visando oferecer conteúdos de modo estável e ágil, independente de onde o acesso é realizado [36]. Isso significa que, quem acessa a rede a partir de um determinado país recebe as informações de um servidor localizado o mais próximo possível do destino final. Com o uso da CDN, o conteúdo é distribuído de forma mais eficaz, diminuindo a latência do processo de transferência e aproveitando melhor a largura de banda. Todo conteúdo sai de um servidor original e fica armazenado em *cache* em diferentes lugares ao redor do planeta consoante a demanda. Desse modo, a CDN otimiza a rota, encontrando a que é mais curta entre a origem e o destino dos pacotes. O resultado da redução da distância é a diminuição

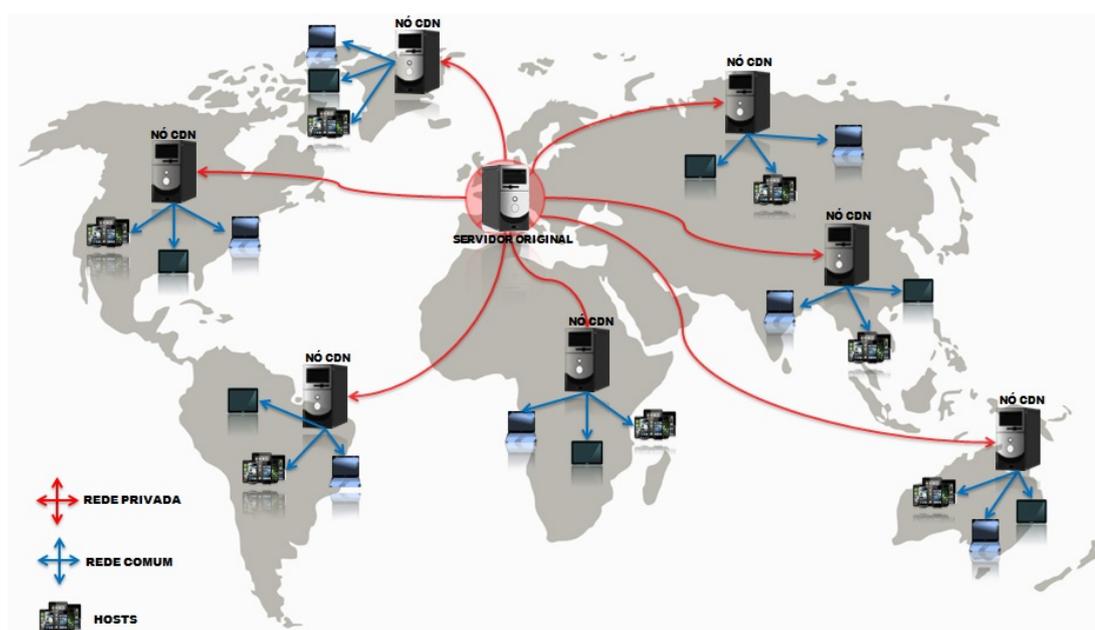


Figura 2.1: Exemplo da distribuição geográfica em uma CDN [42].

do tempo para completar as transferências. De acordo com [37], sem CDN é completamente inviável a existência de serviços de distribuição digital de conteúdos, tais como: *Amazon Prime Video*, *Netflix*, *HBO Go*, *Google Play*, *Youtube*, *Twitter*, entre outras redes sociais, armazenamento em nuvem para *Games* ou para serviços de *streaming*.

A tarefa de entregar e fornecer conteúdo é diferente da simples comunicação de dados, e impõe diferentes requisitos para a construção da arquitetura de rede. Na Internet atual, diversos *sites* de fornecimento de conteúdo multimídia se tornaram muito populares [33]. Do ponto de vista do usuário, a localização só importa em alguns serviços de comunicação. Mas, ao solicitar um *streaming* de vídeo, música ou *Game*, qualquer nó conectado a rede que possa oferecer o serviço requisitado, com qualidade e menor tempo é bem-vindo [29]. A localização dos dados está intimamente ligada com os aspectos de desempenho e segurança da rede. Servidores isolados não são confiáveis e não suportam o nível de demanda exigido pelo público esperado para as redes 5G e de próxima geração. Em resposta à demanda dos usuários interconectados atualmente, altas quantidades de largura de banda são providas no núcleo das redes que compõem a Internet. E a conectividade dinâmica de banda larga mais rápida foi implantada nas bordas das redes [34]. Para reduzir os atrasos, é necessário utilizar arquiteturas de redes, com técnicas e tecnologias conjuntas de núcleo e borda, que utilizam a largura de banda para distribuir conteúdo [35].

O termo servidor utilizado nesse trabalho diz respeito ao servidor *Web*, isto é, o computador onde os arquivos e dados estarão armazenados. Já o termo virtual indica que se trata de um sistema com um servidor virtualizado, ou gerado por um *software*, ao invés de uma máquina física real. A rede trata-se de uma CDN privada com acesso limitado, que é restrito aos usuários que possuem permissão para tal. Nos sistemas que atendem a um grande número de clientes, a carga nos componentes é maior do que em sistemas com menos solicitações. Na hospedagem compartilhada, o *site*, ou aplicação fica armazenado em um servidor que divide espaço e recursos com centenas de outros sites. Por outro lado, em um servidor dedicado, a máquina física (o servidor) hospeda apenas um único *site*.

O servidor *Virtual Private Server* (VPS) é um servidor de acesso privado virtual [44]. Nesse cenário, a hospedagem compartilhada tem limites de recursos muito menores do que os de um servidor dedicado. Um servidor dedicado é bem mais caro do que uma hospedagem de *sites* compartilhada, porque em uma hospedagem compartilhada um único servidor é repartido e custeado por vários clientes, enquanto em um dedicado o custo é exclusivo de um cliente. O VPS é uma opção intermediária, com mais recursos do que um compartilhado, e com menos gastos. Um servidor VPS é um servidor dedicado virtualizado, de modo que ele possui recursos e capacidades semelhantes aos de um dedicado, mas com um limite menor do que se teria em um dedicado. O servidor que hospeda um VPS também compartilha seus recursos com outros clientes, como ocorre em uma hospedagem compartilhada [44].

Outro conceito explorado durante os estudos de revisão é a Rede Direcionada à Identidade, *Identity Driven Network* (IDN), que visa aplicar controles de rede com base na identidade de um indivíduo ou grupo de indivíduos responsáveis por operar ou utilizar os dispositivos [45], [46]. Este conceito foi considerado inicialmente na construção de uma arquitetura de rede híbrida mais segura. Com a utilização da IDN os usuários são identificados e a rede está sintonizada para responder à sua presença de modo automático. A segurança da Internet é construída em torno da ideia de que a capacidade de solicitar ou responder a pedidos da *web* depende de autenticação, validação, autorização e execução de políticas. A rede orientada à identidade resolve políticas em função do identificador do usuário, gerenciando acessos através desse identificador [45], [46].

Uma vez que a Internet é formada por uma vasta gama de dispositivos e aplicações, existe a necessidade de controlar o acesso dos usuários dentro de certos escopos. Uma rede construída com o conceito IDN deve primeiro definir o que é uma Identidade, como elas serão processadas e, em seguida, usar os controles existentes para encaminhar informação com base nessa identidade. Uma identidade digital representa um relacionamento entre o mundo físico e o virtual (espaço físico e *Cyberspace*), onde são associadas características específicas, como, quem está acessando a informação disponibilizada na rede? quem a está armazenando? como a informação será utilizada? e o que a identidade digital diz sobre o usuário [45]. Sendo assim, pode incorporar referências a dispositivos, bem como recursos e políticas [46]. Em alguns sistemas, as políticas fornecem os direitos que uma identidade pode reivindicar em qualquer ponto específico do espaço e do tempo. Por exemplo, uma pessoa pode ter direito a alguns privilégios durante o trabalho em seu escritório, mas pode ter esses privilégios negados quando acessando o sistema fora do ambiente de trabalho.

O termo, Rede Baseada em Identidade, já é utilizado há alguns anos, referindo-se à ideia de que a identidade de um usuário está de alguma forma vinculada aos serviços de rede que o usuário pode receber [46]. Quando os controladores de redes locais, LAN sem fio, surgiram, estes aplicaram o conceito de rede baseada em identidade, não só autenticando usuários que se juntam à rede sem fio, ademais colocando-os nas LANs virtuais, *Virtual Local Area Network* (VLAN) apropriadas. O gerenciamento de identidade, muitas vezes referido como Gerenciamento de Identidade e Acesso, *Identity and Access Management* (IAM), trata de objetivos semelhantes. Os sistemas IAM consolidam nomes de usuários e direitos de acesso individuais em várias aplicações diferentes. Estes sistemas são usados para estabelecer novas identidades de usuários, conceder esses direitos em todas as aplicações de uma empresa e, em seguida, eliminar essas identidades e direitos de acesso quando os funcionários deixam a empresa. Na relação com a segurança de LAN, o significado fundamental da rede baseada em identidade permanece o mesmo, controlar os direitos de acesso de um usuário na LAN com base na identidade desse usuário [45], [46].

A noção de identidade se ampliou e a gerência de redes agora tem mais opções para controlar

usuários do que simplesmente colocá-los em VLAN. Uma maneira de olhar para as opções de controle em expansão é olhar para os sistemas construídos com o conceito de Controle de Acesso à Rede, *Network Access Control* (NAC), que emergiram como um elemento importante da segurança LAN nos últimos anos. O NAC incorpora tarefas pré e pós-admissão. As tarefas de pré-admissão incluem a autenticação de um usuário e a validação de que a máquina do usuário está em conformidade com a política de segurança corporativa. É um componente importante de uma solução de gerenciamento de segurança abrangente. O NAC protege a rede de acessos não autorizados, intrusões fraudulentas e exposições externas de segurança introduzidas por dispositivos vulneráveis ou corrompidos, que podem infectar e danificar o sistema como um todo. Claramente, a verificação de autenticação e postura são componentes válidos da identidade de um usuário. As tarefas de pós-admissão podem incluir funções como a aprendizagem de uma afiliação ou função de grupo do usuário em uma dada rede, associando essa função aos direitos de acesso e observando o comportamento desse usuário para atividades anômalas. Muitas dessas tarefas pós-admissão também podem contribuir para definir a identidade de um usuário [45]. Certamente, a participação de um usuário ou grupo é um componente vital, mas na aplicação de direitos de acesso a esse usuário, elementos como a aplicação em uso, a localização do usuário e a hora do dia também podem enriquecer a noção de identidade utilizada. A aplicação de IDN em redes convergentes 5G e satélite fornece novos mecanismos para controle de acesso a conteúdos e sistemas, incluindo controle de acesso a dados de M2M via satélite [45].

2.2 Redes Centradas em Informação

A rede centrada na informação, *Information-Centric Networks* (ICN), tal qual ilustrada na Figura 2.2, parte da comunicação ponto-a-ponto para uma abordagem focada na distribuição de conteúdos. A Figura 2.2 se baseia nos conceitos do trabalho de Adhatarao, Arumathurai, Kutscher e Fu [47]. Trata-se de uma proposta para evoluir a infra-estrutura da Internet como é utilizada hoje em dia, deixando para trás o paradigma de projeto centrado no *host*, que é baseado na conectividade perpétua e no princípio de ponta a ponta, para uma arquitetura de rede na qual o ponto focal são informações nomeadas ou conteúdos nomeados [48], [49]. Dados nomeados [47], consistem em nomear de forma persistente objetos de informação independentemente das demais entidades da rede. Neste padrão de distribuição, a conectividade pode ser intermitente, o armazenamento final e o armazenamento na rede podem ser incorporados de forma transparente, pois *bits* na rede ou em dispositivos de armazenamento de dados têm exatamente o mesmo valor. A mobilidade e o acesso múltiplo são a norma e técnicas de transmissão *any-cast* e *multicast* são suportadas nativamente. De acordo com Adhatarao *et al.* [47], os dados tornam-se independentes da localização, aplicação, armazenamento e meios de transporte, permitindo o armazenamento em *cache* e a replicação dentro da rede. Os benefícios esperados são melhor eficiência, melhor escalabilidade em relação à demanda de informação/largura de banda e maior robustez em cenários de comunicação desafiadores [47]. As ICNs podem ser vistas como a nova geração de CDNs.

Distribuir e manipular informações nomeadas é uma aplicação importante na Internet atual [49]. Além da distribuição de conteúdo na *web*, outras tecnologias de distribuição, como *Peer-to-Peer* (P2P) e CDN, emergiram e estão promovendo um modelo de comunicação que visa acessar dados pelo seus nomes, independentemente da localização do servidor de origem. O P2P é uma arquitetura de rede de computadores que apresenta como principal característica a descentralização das funções convencionais de rede, onde cada usuário conectado acaba por realizar funções de servidor e de cliente ao mesmo tempo. Para responder ao aumento do volume de tráfego na Internet atual em aplicações como vídeo

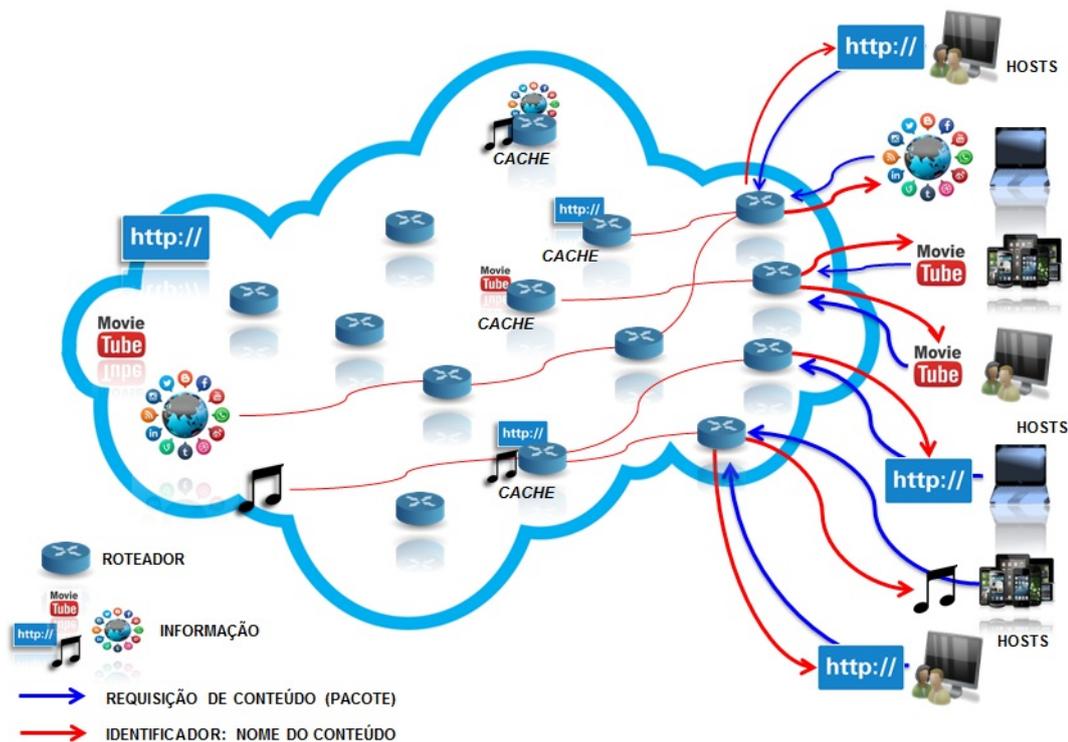


Figura 2.2: Funcionamento de uma Rede Centrada em Informação (ICN) [47].

móvel e computação em nuvem, empregam-se um conjunto de tecnologias e serviços de distribuição diferentes que empregam armazenamento em *cache*, replicação e distribuição de conteúdo de diferentes maneiras específicas. Essas abordagens estão atualmente implantadas em lugares separados, diferentes provedores CDN e aplicações P2P dependem de tecnologias de distribuição proprietárias. Não é possível identificar de forma única e segura informações nomeadas independentemente do canal de distribuição, e as diferentes abordagens de distribuição são tipicamente implementadas como uma sobreposição, levando a ineficiência desnecessária.

As ICN são uma opção para evoluir a infraestrutura da Internet visando suportar diretamente a distribuição eficiente de conteúdos, introduzindo dados de nome exclusivo como um princípio básico da Internet [50], [51]. As informações tornam-se independentes da localização, aplicação, armazenamento e meios de transporte, permitindo o armazenamento em *cache* e a replicação dentro da rede. Os benefícios esperados são melhor eficiência, melhor escalabilidade em relação à demanda de informação / largura de banda e maior robustez em cenários de comunicação desafiadores. Esses conceitos são conhecidos de várias maneiras, como Rede de Informações, *Network of Information* (NetInf), Rede de Dados Nomeados, *Named Data Network* (NDN) e redes que utilizam o modelo de comunicação Pública/Assina ou (*Publish/Subscribe Networks*) [52].

Siris, Thomas e Polyzos [53] abordam em seu trabalho a sobrecarga de dados e de controle quando vários dispositivos conectados trocando informação são suportados através de uma rede satélite terrestre integrada baseada em redes ICN. Os autores consideram um cenário onde as redes de sensores estão conectadas através de satélites LEO e apresentam três modelos de otimização para transferência de dados: *polling* e agregação de dados em um *proxy*, transferência de dados confidenciais usando um único *proxy* e *proxy* individual para cada nó IoT. Os três modelos são implementados em uma ICN integrada

que consiste de um protótipo de informação de subscrição pública *Public Subscription Information* (PSI), e a emulação de satélite com um sistema chamado *OpenSAND*. De acordo com os dados obtidos neste trabalho, os resultados experimentais mostram que os modelos de otimização que utilizam os mecanismos da PSI, podem reduzir significativamente a carga do tráfego de satélites e, ao mesmo tempo, suportar diferentes níveis de segurança [53].

Os conceitos da ICN podem ser aplicados em diferentes camadas da pilha de protocolos, bem como em novas arquiteturas independentes do *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) [48], [49]. Fornecem nomes de recursos, armazenamento em *cache* onipresente e serviços de transporte correspondentes. Dessa maneira, pode ser vista como um tecnologia de *internetworking* de nível de pacote que causaria mudanças fundamentais no roteamento e encaminhamento da Internet. De forma geral, espera-se que a ICN evolua a arquitetura da Internet em diferentes camadas. Na comunicação baseada em endereços (*Internet Protocol* (IP), os usuários efetuam a requisição da informação para um servidor de conteúdo e aguardam o retorno de forma individual e sempre do mesmo local, já que, o identificador para envio das informações é o IP vinculado ao servidor de origem. Na ICN, o identificador é próprio nome do conteúdo solicitado e não importa o local que esteja armazenado, mas quais dados estão sendo acessados. Os roteadores passam a ser roteadores de conteúdo com suporte nativo à mobilidade [48], [49].

2.3 Sistema de Comunicação Via Satélite e 5G

O sistema de comunicação via satélite está passando atualmente por uma nova fase de operação com várias renovações de constelação e configuração. O principal caso de uso não está mais construído apenas em torno da voz, como era com a utilização do 2G. A grande diferença com relação as implantações de comunicação por satélite comerciais anteriores é que estas novas constelações suportam comunicação de maior taxa, bem como de M2M e IoT. Elas apostam em redes futuras, como 5G, distribuição de conteúdo, M2M e IoT como uma grande parte de sua estratégia de geração de receita [54]. A tecnologia de satélite serve como um facilitador chave para esses novos serviços, em todas as indústrias, através de fronteiras geográficas para transformar a conectividade entre dispositivos como hoje é conhecida [54]. Cobrindo aplicações altamente variadas que vão desde setores de transporte, indústria de petróleo e gás, até diversos outros consumidores, os operadores de satélites podem oferecer vantagens estratégicas em relação às implantações terrestres. Há uma oportunidade de acelerar a implantação de redes 5G através de novas aplicações satelitais, além disso, o uso de satélite para IoT tem um enorme potencial para o mercado de consumidores finais [55], [43].

Pode-se afirmar que o ciclo de vida de uma rede de satélite é bastante longo [55]. Espera-se que as constelações de satélite para comunicação sejam compatíveis com tecnologias antigas que já estejam sendo utilizadas com ciclos de vida da tecnologia por mais de vinte anos. O termo técnico é definido como Compatibilidade Reversa ou *Backwards Compatibility*, que significa a capacidade de equipamentos mais antigos funcionarem em satélites novos [55]. Isso pode ser contrastado com a longevidade das tecnologias de comunicação móvel celular, onde se vê a decaída do 2G, 4G substituindo 3G, e 5G já saindo da fase de teste para a de operabilidade [56]. Um dos principais objetivos da arquitetura 5G é um alto grau de flexibilidade para atender melhor às necessidades específicas de campos fora do setor de telecomunicações, como por exemplo, indústria automotiva e operação de organizações de missão crítica. Para este tipo de operação a integração da rede 5G e satélite deverá ser clara e robusta, em particular em relação aos desempenhos de rede e segurança [57]. Requisitos como QoS de ponta a ponta para

esse sistema integrado, segurança e privacidade, como também o uso de vários modelos de confiança, políticas e esquemas de autenticação devem ser explorados visando a rede híbrida. Uma área promissora é a dos sistemas de transporte inteligente, *Intelligent Transport Systems* (ITS), em que a integração de rede 5G e satélite permitirá a implantação em larga escala de ITS, maximizando o desempenho da rede e proporcionando segurança e privacidade aos usuários apesar da grande quantidade de compartilhamento de dados pessoais neste sistema. O projeto 5G CHARISMA [58] pode ser utilizado para aplicações ITS.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre as tecnologias de 4G e 5G em relação as características de utilização de usuário e especificações de lançamento. A tecnologia 4G é também conhecida como *Long Term Evolution-Advanced* (LTE-Advanced). Entre as gerações considera-se um intermediário que se trata da evolução do LTE-Advanced para versão Pro, que trouxe melhorias em relação a Taxa de Utilização e taxas de *downlink* e *uplink*. O *downlink* citado na tabela pode ser definido como dados que trafegam da estação rádio base, *Radio Base Station* (RBS), para o dispositivo móvel e o *uplink* como dados que trafegam do celular para a RBS. A *release* é a entrega de um ou mais incrementos do produto pronto, gerado pelo time de desenvolvimento da tecnologia [24].

Tabela 2.1: Comparação entre as Tecnologias das Gerações 4G e 5G [24].

| Geração da Tecnologia | 4G | 4,5G | 5G |
|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|
| Tipo | LTE-Advanced | LTE-Advanced Pro | New Radio |
| Downlink | 1,0 Gbps | 3,0 Gbps | 20,0 Gbps |
| Uplink | 0,5 Gbps | 1,5 Gbps | 10,0 Gbps |
| Taxa de Utilização | 10 Mbps | 30 Mbps | 100 Mbps |
| Frequência de Canais | 100 MHz | 640 MHz | maior que 1000 MHz |
| Latência | 10 ms | menor que 2 ms | menor que 1 ms |
| Especificação da Release | 10, 11 e 12 | 13 | 15 e 16 |

O 5G atuará com serviços avançados de Banda Larga Móvel *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), que aumentam a cobertura e o dimensionamento de redes em áreas carentes e não atendidas, especialmente em regiões com receita média por usuário, *Average Revenue per User* (ARPU), baixa nos mercados emergentes e em plataformas móveis de aplicações como embarcações e aeronaves [11] [59]. Os sistemas de comunicação por satélite é uma solução econômica para lidar com esses cenários. Para isso é necessário que haja a integração perfeita da futura arquitetura 5G e a eficiência ideal seja obtida por meio de colaborações tecnológicas entre os sistemas 5G móveis e sistemas de comunicação por satélite. O principal projeto que trata de comunicação por satélite para o 5G é o Sat5G [59]. Este projeto define soluções de *backhaul* e de descarregamento de tráfego baseado em satélite. O seu escopo cobre tecnologias 5G para obter o melhor valor dos recursos de satélites. Por exemplo, *multicast* para conteúdo e entrega de função de rede virtualizada e redução do tempo de atraso. O projeto também cobre novos modelos de negócios e colaborações operacionais economicamente viáveis que integram as partes interessadas de satélite e terrestres.

A ampla cobertura oferecida pelas redes formadas por conexão via satélite sempre será o maior atrativo dessa solução [60], mas a utilização cada vez maior dos dispositivos conectados entre si e a procura de serviços sendo entregues de modo cada vez mais dinâmico, fará com que este tipo de conexão de redes se destaque. A disponibilidade do satélite é excelente, fornecendo um nível de serviço que a rede de comunicação móvel não pode garantir, especialmente quando se amplia o âmbito de aplicação para fora de uma zona urbana. A confiabilidade das redes de comunicação móvel é muito boa, mas existem algumas condições que podem comprometer os serviços e que não afetam o serviço por satélite. A alta confiabilidade do satélite pode incentivar soluções e em outros casos fornecer um canal independente, redundante para a conectividade celular primária. Segundo De Sanctis *et al.* [54], pode-se destacar que dentre as principais vantagens da utilização dos satélites nas implantações 5G

estão a possibilidade de redes *multicasting*, com maior cobertura, mais confiabilidade e praticidade. As conexões via satélite para uma rede IoT também podem trazer isolamento, sendo oferecidas como um sistema fechado, proprietário, aumentando a confiabilidade e oferecendo maior segurança [61].

O uso do satélite para redes de comunicação móvel de próxima geração abre novas oportunidades. A tecnologia tem sido um catalisador para a condução de melhorias na entrega de serviço, tornando-a principal opção para diversas aplicações. Os dispositivos de conexão M2M e IoT via satélite tornaram-se menores, mais baratos e mais potentes [62]. Eles também se tornaram mais inteligentes, com a capacidade para calcular o roteamento de menor custo com a conectividade de modo *dual* por satélite e celular, escolhendo automaticamente a opção de mensagem de melhor custo/benefício no momento. Agora, é possível executar a recuperação e filtragem de dados inteligentes na borda, transmitido apenas os dados necessários, quando necessários. Fornecer um terminal de satélite pode simplificar muito as implantações. A inovação também tem levado a melhorias na eficiência, otimização de energia e entrega de mensagens via satélite. Em alguns casos, considerando os dados coletados para esse trabalho, a sobrecarga no tráfego IP pode causar um aumento de mais de vinte vezes nos dados utilizados por satélite [63], [61], [54], [62]. As empresas de telecomunicações e os fornecedores de satélite têm simplificado a integração dos serviços para os usuários, incluindo análise, compressão, expansão e oferecendo vários métodos de acesso nos *gateways* de dados [62].

Uma demanda crescente pelo aumento no tráfego de dados móveis, com dois terços sendo o de vídeo, com redes de experiência *gigabit* por segundo praticamente sem latência e os esperados bilhões de dispositivos conectados à Internet, é clara a necessidade de novas arquiteturas e padrões de sistemas de comunicação [11]. A visão da implantação 5G em conjunto com satélite na oferta de serviços avançados, como virtualização, capacitador de cidades, ambientes, veículos inteligentes e M2M, podem suprir esta demanda [11]. As comunicações por satélite desempenham um papel significativo na implementação do 5G como uma solução complementar às redes terrestres devido às suas características de cobertura onipresente, *broadcast*, *multicast*, *unicast* e recuperação rápida em casos de emergência para cenários críticos. A adoção de tecnologias de virtualização para 5G, como *Software Defined Network* (SDN) e *Network Function Virtualization* (NFV), se mostram como passo necessário na evolução dos sistemas de segmentos terrestres e de satélite, operando por exemplo, em *gateways* e terminais de satélite. Esta virtualização permitirá que os serviços de comunicações por satélite sejam entregues de uma forma mais flexível, ágil e eficaz em termos de custos do que é feito hoje, facilitando grandemente a integração e operação sem descontinuidades de redes híbridas. O projeto *Virtualized Hybrid Satellite-terrestrial Systems for Resilient and Flexible Future Networks* (VITAL) [64] trata exatamente deste contexto através da aplicabilidade de NFV na implementação de *gateway* de satélite e a aplicabilidade de SDN para engenharia de tráfego em satélite como rede de *backhauling* móvel terrestre.

Os papéis e vantagens dos satélites em 5G foram estudados pela organização de padronização *3rd Generation Partnership Project* (3GPP). A cobertura de satélite traz valores agregados em conjunto com as tecnologias de acesso para 5G, especialmente para aplicações onde a cobertura e a disponibilidade onipresentes são cruciais [65]. Os serviços de *backhaul* 5G podem ser ativados usando plataformas terrestres complementado pela comunicação por satélite, para suprir aos requisitos de alta taxa de dados e latência exigidos. Essas plataformas apresentam vantagens exclusivas como implantação rápida de infra-estrutura de banda larga de alta velocidade, cobertura digital em áreas não antes não cobertas para usuários não atendidos. Outro ponto explorado é a densificação e implantação de tecnologias compatíveis com 4G e 5G e a maximização da eficiência espectral que permite a oportunidade de melhorar o compartilhamento de espectro [65].

2.4 Considerações Parciais

O Capítulo 2 apresentou conceitos fundamentais para a compreensão das tecnologias exploradas no trabalho. O que se busca é avaliar cenários e casos de uso com a integração das tecnologias e sistemas explorados nesse capítulo, considerando a padronização disponível e os futuros avanços propostos por tais organizações. A Seção 2.1 apresentou os conceitos essenciais que envolvem as redes de distribuição de conteúdo denominadas CDN. A nova geração de redes que objetivam o armazenamento e replicação de modo inteligente de dados na rede são exploradas na Seção 2.2, apresentando conceitos de ICN. Os conceitos dos sistemas 5G e de comunicação por satélite são apresentados na Seção 2.3. A crescente procura de serviços móveis necessita de novos paradigmas de comunicação em qualquer lugar e a qualquer hora, com base na integração de tecnologias heterogêneas, como satélite, 4G (LTE-A), e a nova geração de redes móveis, ou seja, 5G. Com o levantamento das informações referentes a integração das tecnologias abordadas pretende-se construir uma arquitetura para avaliação de casos de uso utilizando redes de distribuição, armazenamento e fornecimento de conteúdo; comunicação móvel digital; integração de redes terrestres e por satélite para balanceamento do tráfego de dados; exploração de redes de Internet do Futuro; evolução dos sistemas M2M, IoT, 4G para o 5G e integração de tecnologias, ferramentas e plataformas para a construção da arquitetura de rede híbrida 5G. Esse modelo pode ser útil para provedores de serviços terrestres, como um provedor que fornece conteúdo CDN, com o objetivo de aprimorar os serviços oferecidos adicionando recursos providos por rede de comunicação via satélite. Ao explorar a arquitetura de virtualização NFV, o provedor CDN pode ativar e gerenciar uma ou mais funções virtuais de rede nas instalações do operador de satélite como ativadores para o serviço requisitado pelo usuário. A rede CDN baseada em comunicação via satélite é proposta para combater o congestionamento de entrega de arquivos pela rede terrestre e pode ser mais escalável e confiável.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

O objetivo desse capítulo é abordar os trabalhos relacionados com o tema de rede 5G híbrida terrestre/satélite. Para isso, foi realizada uma análise dos trabalhos e projetos que relacionam distribuição de conteúdo, utilização de técnicas de *cache* e *hashing*, comunicação entre máquinas, *edge* e *cloud computing*, virtualização, controle e gerência de rede, aplicações de *streaming* e padronização para 5G e satélite. A Seção 3.1 apresenta os critérios utilizados na seleção dos trabalhos. Os trabalhos selecionados são apresentados nas Seção 3.2. A Seção 3.3 apresenta as análises do conteúdo estudado e as possíveis oportunidades de pesquisa. E por fim, a Seção 3.4 trás as considerações parciais sobre o Capítulo 3.

3.1 Metodologia de Pesquisa e Escolha dos Trabalhos Relacionados

Os principais termos utilizados para realização da pesquisa foram: “*content distribution network*”, “*content delivery network*”, “*cloud cdn*”, “5G”, “*satellite*”, “*content cache*”, “*hashing*”, “*information centric network*”, “*quality of experience*”, “*quality of service*”, “*cloud computing*”, “*edge computing*”. Após a definição dos termos, o trabalho de análise qualitativa foi dividida em três partes, sendo elas: (i) a revisão e análise da literatura encontrada classificando os artigos de acordo com a sua relevância para o texto; (ii) o estudo de tecnologias emergentes e a relação com 5G híbrido terrestre/satélite; e (iii) análise de redes 5G em relação à oportunidade para convergência terrestre/satélite. A pesquisa dos trabalhos relacionados foi realizada utilizando portais e bibliotecas públicas disponíveis na Internet, como o portal IEEE Xplore [66], o portal de pesquisa de artigos técnicos e científicos Google Scholar [67], o portal de periódicos CAPES/MEC [68], ResearchGate [69] e outros repositórios de artigos, como o Elsevier [70] e Springer [71]. Também foram considerados documentos, relatórios técnicos, especificações e publicações de órgãos padronizadores *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, *International Telecommunication Union (ITU)*, *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* e *5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP)*. Os resultados das pesquisas foram analisados com o objetivo de encontrar trabalhos que explorassem a convergência tecnológica entre redes de distribuição de conteúdo, 5G e satélite, visando contribuir para construção de arquiteturas de redes híbridas. Os principais trabalhos utilizados são publicações a partir de 2015, salvos os trabalhos que apresentaram conceitos muito relevantes e essenciais para o contexto. Projetos do programa *Horizon*

2020 (H2020) com temas semelhantes ao proposto neste trabalho também foram considerados durante a pesquisa. Os entregáveis dos projetos foram analisados conforme foi possível.

3.2 Tecnologias Emergentes e a Relação com 5G Híbrido Terrestre/Satélite

A Seção 3.2 e suas sub-seções focam nos temas bibliográficos que apresentam informações relevantes das tecnologias emergentes que se enquadram no contexto do trabalho de dissertação. A Seção 3.3, em seguida, apresenta comentários sobre como cada tecnologia pode se enquadrar e interoperar na arquitetura de rede híbrida através de tabelas de relações.

3.2.1 Redes de Distribuição de Conteúdo

A utilização da *Web* na Internet nos dias atuais tornou-se mais relativa a conteúdo do que comunicação [28]. Os usuários de maneira geral, usam os serviços *Web* para buscar informações e compartilhar conteúdo. Existe uma vasta quantidade de usuários que utilizam o modo de compartilhamento de arquivos *Peer-to-Peer* (P2P), para acesso e entrega de fotos, imagens, músicas, vídeos e programas [29], [30], [72]. A Internet está tão relacionada com conteúdo que a maior parte da largura de banda é utilizada para entregar dados em formatos multimídias armazenados [31] [32]. Os provedores de vídeo confiam fortemente nas redes de distribuição de conteúdo geograficamente distribuídas, CDN, para colocar o conteúdo requisitado o mais próximo possível dos usuários, com o objetivo de melhorar a qualidade do vídeo e evitar falhas no servidores [31] [32]. De acordo com De Cola e Blanco [73], a filosofia de *design* de redes mudou para uma abordagem mais orientada para o conteúdo, a fim de atender com mais eficiência às demandas dos usuários em termos de disponibilidade rápida de conteúdo e continuidade de serviços.

O tráfego de *streaming* está crescendo a um ritmo cada vez maior, e representa uma fração significativa do tráfego geral da Internet. Em particular, o entretenimento em tempo real é claramente a primeira categoria de tráfego, o padrão de rede utilizado atualmente se volta tanto para conteúdo que a maior parte da largura de banda da Internet agora é para entrega de vídeos armazenados [72]. Para abordar com eficiência esse novo paradigma de consumo, vários aprimoramentos de tecnologia são aplicados no cenário de comunicação [73]. Nos serviços entregues aos clientes, tecnologias de *streaming* adaptáveis, como o *streaming* adaptativo dinâmico em HTTP, *Moving Picture Experts Group-Dynamic Adaptive Streaming over HTTP* (MPEG-DASH), o *streaming* HTTP para conteúdo ao vivo da Apple, *Apple HTTP Live Streaming* (HLS), o *Microsoft Smooth Streaming* (MSS), e o *Web Real-Time Communications* (WebRTC) são considerados para atender principalmente aos seguintes requisitos: infraestrutura para reduzir os custos de implantação, ser compatível com NAT e *firewall*, executar uma adaptação de taxa de *bits* para reduzir as interrupções de reprodução, evitar ao máximo a instalação de *plug-ins ad-hoc* nos dispositivos [74].

No lado do servidor de serviços, as CDN são selecionadas como tecnologia chave para superar o congestionamento [75]. Por exemplo, o *Flash Crowds Alleviation Network* (FCAN) se aplica especialmente em cenários envolvendo mobilidade de terminal e capacidade relativamente limitada na rede de borda. A CDN com FCAN permite reduzir os tempos de carregamento, economizar largura de banda e acelerar a capacidade de resposta, seja para desenvolver ou gerenciar sites e aplicativos móveis ou ao codificar e distribuir mídia *streaming*, *software* de *games*, atualizações de *firmware* ou para aplicações

como pontos de comunicação entre dispositivos sendo apropriada para comunicação entre máquinas. O FCAN se trata de uma rede CDN adaptativa que otimiza dinamicamente a estrutura do sistema entre P2P e configurações cliente-servidor como uma maneira possível de aliviar o efeito de inúmeras solicitações de conteúdo em flash. Com a utilização do FCAN é possível configurar a arquitetura P2P com tecnologias de *proxy* e *cache* para distribuir o tráfego de *flash* do servidor *Web*. Através do redirecionamento de DNS configurado por política para rotear as solicitações do cliente em equilíbrio é possível realizar balanceamento de carga para monitorar e reagir a possíveis alterações na rede [75].

A tecnologia DASH, também denominada MPEG-DASH, trata-se de um padrão para a transmissão adaptativa de conteúdo de vídeo, oferecendo benefícios significativos para os desenvolvedores que desejam oferecer saída de *streaming* de vídeo adaptável de alta qualidade [76]. Ao utilizar MPEG-DASH, o fluxo de vídeo se ajusta automaticamente para uma definição inferior quando a rede ficar congestionada. Dessa maneira, é menor a probabilidade de o vídeo ser pausado enquanto o *player* carrega os próximos segundos a serem reproduzidos. Vários prestadores de serviço CDN suportam MPEG-DASH, tais como: Akamai CDN [77], Amazon CloudFront CDN [74], Azure Media Services [78], Google Cloud CDN [79] e Level 3 Communications CDN [80].

A CDN mantém várias rotas de trânsito conectadas, desde os servidores de distribuição de conteúdo às redes dos Provedores de Serviços de Internet ou *Internet Service Providers* (ISP), que por sua vez, fornecem conectividade de Internet aos usuários finais. Devido à dinâmica de desempenho e taxas de serviços variados nas rotas de trânsito, as CDN precisam implementar uma estratégia de seleção de rotas de trânsito para otimizar as compensações de desempenho e custo. O trabalho [81] aborda o problema de roteamento de trânsito para otimizar simultaneamente o desempenho e o custo de ponta a ponta, do provedor de conteúdo até o usuário final. A abordagem sugerida em [81], permite que o conteúdo da CDN seja transferido pela melhor rota relacionando custo e desempenho no roteamento. A abordagem é avaliada usando medições reais de servidores CDN localizados em 19 pontos de troca de Internet distribuídos geograficamente. De acordo com os dados obtidos com esse trabalho, as CDN podem reduzir os custos de transporte em média em 57% sem perda de desempenho.

De acordo com os testes e a análise de dados realizados por [74, 78, 79, 82], a *Quality of Experience* (QoE) do usuário oferecida por redes CDN está e é impactada pela quantidade de demanda dos usuários. Os custos de uso dessas CDNs em *cloud* também dependem de muitos fatores, incluindo a popularidade dos vídeos solicitados, o número total de usuários conectados simultaneamente e a quantidade de tempo de execução do serviço solicitado. Para garantir a QoE para os usuários com alta expectativa, é necessário que os provedores de vídeo monitorem o QoE dos usuários em tempo real nos provedores de serviço CDN em *cloud* [83].

O trabalho de [84] fornece uma arquitetura que opera através de um novo *proxy Multi-Access Edge Computing* (MaEC) para expandir e reforçar as infraestruturas de *cache* para distribuição de conteúdo de forma eficiente e confiável. O *proxy* apresentado no trabalho armazena em *cache* o conteúdo na borda da rede para reduzir as *Capital Expenditure* (CAPEX) da CDN para o provedor de serviços *Over-the-Top* (OTT). Para esse fim, o *proxy* é capaz de identificar solicitações recorrentes e proteger a rede contra maus funcionamentos na operação com a CDN. Segundo os autores, o *proxy* alterna as sessões de *download* para uma CDN alternativa, a fim de garantir taxas de QoE, permitindo uma seleção dinâmica da CDN com base nas estatísticas de conectividade em tempo real, sendo transparente para o usuário [84]. A solução proposta é avaliada fornecendo fluxos de MPEG-DASH em uma célula cliente enquanto aplica diferentes estratégias de armazenamento em *cache* dependendo da demanda na rede.

Considerando que a migração de serviço é um problema para nós de borda com recursos limitados interconectados por *links* de alta latência e baixa largura de banda, em [85] investiga-se uma nova abordagem para oferecer suporte ao provisionamento de serviços em ambientes dinâmicos *Mobile Edge Computing* (MEC) para CDN. Segundo os autores, a rede de distribuição de conteúdo suportada por MEC desempenharão um papel fundamental nas redes móveis de próxima geração para estender a gama de aplicativos sensíveis a atrasos. O fornecimento de serviços centrados no usuário aumenta com a popularização da criação de conteúdo. A rede deve ser projetada para melhor atender aos requisitos restritos de novas aplicações imersivas. Nesse cenário, as soluções MEC precisam lidar de forma eficiente com a mobilidade do usuário, o que requer realocação rápida das instâncias de serviço para garantir a QoE desejada. A avaliação de desempenho da abordagem proposta mostra resultados promissores em relação à migração de serviço reativa clássica [85].

Em Thibaud *et al.* [86], o impacto do armazenamento em *cache* para os pontos de comunicação por enlace satélite, tanto no lado do *Gateway* (GW), como no terminal de satélite, foi analisado considerando os serviços de navegação *web* e *streaming* de vídeo com a técnica MPEG-DASH. A sua principal contribuição é a avaliação do armazenamento em *cache* por meio de uma plataforma de satélite sendo transparente para o usuário. Os autores utilizaram o emulador de sistema de satélite OpenSAND para a construção da plataforma de testes e para confirmar os resultados, algumas experiências reais foram realizadas em um enlace comercial de comunicação por satélite. Outro artigo que apresenta aplicação para testes de QoE visando distribuição de vídeo multicast através da técnica de *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) via satélite e 5G é o [87]. O trabalho introduz uma aplicação de retorno de qualidade de experiência de engenharia de tráfego (QoE), construída em uma rede de transporte *Software Defined Network* (SDN) real para serviços ópticos heterogêneos.

A QoE representa a satisfação do usuário para um serviço específico e os critérios dependem do aplicativo vinculado à QoS. A *International Telecommunication Union* (ITU) recomenda utilizar o tempo de carregamento da página no navegador como uma medida de QoE para aplicativos de navegação na Web [88]. As melhorias recentes na comunicação visam principalmente o aumento da largura de banda. No entanto, a alta taxa de *bits* não se traduz necessariamente em uma boa QoE para os usuários finais. De fato, os critérios de *Quality of Service* (QoS) que afetam a QoE podem diferir de acordo com os aplicativos. Por exemplo, uma alta latência prejudica a QoE dos usuários de navegação na web. As redes de satélites ilustram efetivamente esse princípio. Essas redes oferecem grandes vantagens: elas podem alimentar um número muito grande de usuários, propor uma largura de banda alta e ter baixos custos de implantação. Mas eles também têm uma desvantagem significativa: devido à sua localização, os usuários sofrem uma latência de cerca de 500 ms. A latência tem um impacto prejudicial em termos de QoE. Os usuários finais de satélite podem se decepcionar com a chamada Internet de alta velocidade, quando sentem falta de capacidade de resposta [88].

A competição entre o crescente número de serviços de ponta incentiva a busca à melhor QoE. Para esses serviços, um uso massivo de redes de entrega de conteúdo como CDN é inevitável. As soluções de redes de entrega de conteúdo dependem principalmente do armazenamento em *cache* do conteúdo o mais próximo possível do usuário final e do redirecionamento das solicitações dos usuários [88]. Bouraïa [88] e Akhtar [89] propõem uma relação entre QoE e QoS para essas aplicações de fornecimento multimídia. A solução vincula a denominada *Mean Opinion Score* (MOS) à taxa de perda de pacotes, tempo de carregamento da página e largura de banda da rede. Os autores explicam que um usuário experimenta uma QoE perfeita quando a página é carregada em cerca de 0,1 segundos ou menos, uma QoE aceitável quando o atraso é de cerca de 1,0 segundo e inaceitável quando o atraso é superior a

10,0 segundos. Eles também afirmam que um usuário será mais compreensivo e paciente se esperar um tempo de sessão prolongado antes do início do serviço, por exemplo, com o uso de satélites geoestacionários. Os autores definem uma relação entre MOS e taxa de perda de pacotes para o aplicativo de *streaming* de vídeo em que cada vídeo codificado é dividido em partes menores. A QoE depende da qualidade do parte recebida e do tempo de *download*. Se esse atraso for muito longo, pode fazer com que a reprodução seja interrompida. Esse comportamento é geralmente chamado de paralisação [88], [89].

A entrega de conteúdo através de CDN, envolvendo satélites e troncos terrestres, aproveita tecnologias de ponta na rede principal, considerando que o componente de borda é alimentado por um canal de difusão, *multicast* de satélite para um *cache local* eficiente em redes locais [39]. Um exemplo de arquitetura satélite-terrestre híbrida é o projeto europeu da ESA ARTES, *Secure Hybrid in the Network Cache Environment* (SHINE), que aborda gerenciamento de conteúdo em satélite assistido para sistemas de *cache* de rede. O objetivo do projeto SHINE é apresentar uma rede eficiente e segura de conteúdos multimídia entregáveis de ponta a ponta por codificação de tempo e técnicas de *streaming*. Esses conceitos foram levados em conta na implantação de uma rede híbrida 5G para testes em laboratório para este trabalho de dissertação.

Para garantir altos níveis de QoS e QoE para todos os usuários conectados em rede, será necessário evoluir o plano de rede de uma maneira multidimensional nas arquiteturas de protocolo e tecnologias da camada física, em por exemplo, capacidade oferecida e reutilização de espectro. Essa perspectiva abre a porta para formidáveis desafios científicos, ainda mais no caso específico de ambientes de comunicações móveis que precisam oferecer serviços altamente confiáveis, onde a continuidade dos serviços, bem como o manuseio adequado de diferentes conteúdos, não podem ser garantidos de forma eficiente pelas tecnologias de rede atuais. O trabalho de De Cola e Blanco [73], propõe uma extensão da arquitetura ICN *Publish Subscribe Internet Technology* (PURSUIT) para uso em ambientes móveis de modo a melhorar a qualidade de experiência dos usuários. As simulações apresentadas mostram o ganho de desempenho oferecido pela solução proposta em relação às implementações regulares do PURSUIT e às estratégias de referência baseadas em IP. O conceito proposto também explora uma solução de *backhauling multi-link*, para aproveitar as vantagens dos *links* de acesso 4G e via satélite, que podem oferecer maior capacidade de rede e garantir a continuidade do serviço mesmo na presença de interrupções na rede [73].

A ICN visa o acesso aos conteúdos utilizando os seus nomes, independente de onde estejam localizados (*cache* da borda da rede, núcleo ou Internet). Os dados tornam-se independentes de localização, aplicação, armazenamento e meios de transporte, permitindo o armazenamento em *cache* e a replicação coerente dentro da rede. Os benefícios esperados são melhor eficiência, melhor escalabilidade em relação à demanda de informação ou largura de banda e maior robustez em cenários de comunicação desafiadores (intermitentes). ICN beneficia 5G, especialmente na perspectiva da MEC. O armazenamento temporário por popularidade pode estar localizado na borda da rede, auxiliando várias aplicações sensíveis à latência, tais como: realidade aumentada, realidade virtual e *Ultra-Reliable Low Latency Communication* (URLLC) [90].

Essas aplicações especificam requisitos rigorosos, especialmente em termos de latência e confiabilidade de aplicações, sendo adequados para veículos autônomos. ICN permite a minimização da configuração da rede. Armazenamento de borda permite a replicação de dados independente de localização em pontos estratégicos de armazenamento ou a disseminação de dados através de roteadores ICN. ICN permite mobilidade de sessão: o chamado princípio de desacoplamento identificador/localizador, que torna possível mover entidades sem a perda da identidade. ICN pode coexistir com os serviços de IP de

ponta a ponta que são oferecidos hoje. As tecnologias SDN e *Network Function Virtualization* (NFV) podem ser combinadas para suportar ICN em 5G. O trabalho de Hakiri, Akram, Berthou e Pascal [90] apresenta um *overview* de como as redes definidas por *software* vêm sendo aplicadas para suportar o 5G apresentando diversos cenários de uso, apontando tendências e desafios. Os autores relacionam tecnologias de virtualização e controle com ICN, em síntese os autores mostram como tecnologias SDN, NFV e ICN podem contribuir para o 5G apresentando a integração dos cenários móveis e sem fio.

Em Siris, Thomas e Polyzos [53], investiga-se a sobrecarga das mensagens de controle e dados quando a IoT é suportada por uma rede híbrida formada por partes terrestres e por satélites baseada no conceito de fornecimento de conteúdo e nomeação por ICN. Os autores apresentam um cenário em que as redes de sensores IoT são conectadas via satélites LEO e apresentam três modelos de otimização: pesquisa e agregação de dados com *proxy*, transferência de dados criptografados usando um único *proxy* e *proxy* individual para cada nó da rede IoT. Os três modelos são implementados em uma plataforma de teste ICN integrada que consiste em um protótipo *Publish-Subscribe Internet* (PSI) e através da emulação dos satélites com o OpenSAND. Os resultados experimentais mostram que os modelos de otimização, utilizando os mecanismos da PSI, podem reduzir significativamente a carga de tráfego do satélite, além de oferecer suporte a diferentes níveis de segurança.

Ravindran [91] apresenta uma arquitetura 5G-ICN e os seus benefícios, como serviços inovadores oferecidos pela alavancagem dos recursos do ICN às atuais arquiteturas móveis baseadas em 3GPP. Uma arquitetura 5G-ICN é proposta para comparação dos serviços ICN possíveis com as arquiteturas móveis atuais baseadas em 3GPP. A estrutura geral orientada a aplicativos que enfatiza a flexibilidade da rede para administrar e fornecer conteúdo sobre as quais o 5G-ICN pode ser realizado é apresentada. O foco do trabalho é na mobilidade como serviço ou *Mobility-as-a-Service* (MaaS), que segundo os autores pode ser realizada como uma fatia 5G-ICN. É fornecida uma visão geral detalhada sobre provisionamento de recursos e interdependências e coordenação entre as fatias funcionais 5G-ICN para atender aos objetivos de MaaS. O artigo mostra a flexibilidade de fornecer serviços pelo ICN, em que a virtualização do controle e do plano de dados pode ser usada por aplicativos para atender a execução lógica de serviço complexa, ao mesmo tempo em que cria valor para seus usuários finais.

Na relação com a segurança de uma *Local Area Network* (LAN), o significado fundamental da rede baseada em identidade permanece o mesmo, controlar os direitos de acesso de um usuário na LAN com base na identidade desse usuário [46]. Em Agiwal, Roy e Saxena [83], encontra-se uma revisão da rede 5G explorando oito aspectos: arquitetura, camada física e camada *Media Access Control* (MAC), aplicações, sustentabilidade, novos recursos de QoS e QoE, testes em campo e simulações. Também trás as principais tendências e desafios na rede 5G e descreve todo o cenário destacando como tecnologias emergentes vêm dando suporte ao 5G. Este trabalho relaciona conceitos da nova geração de comunicação móvel com rede baseada em identidade.

O fornecimento de conteúdo multimídia por sistemas de satélite é considerado um serviço promissor em redes emergentes de 5G. Para a entrega de conteúdo, a rede CDN é utilizada como um conjunto colaborativo de elementos de rede distribuídos pela Internet, com o objetivo de apoiar a replicação de conteúdo em vários servidores espelhados através do *cache*. Um aspecto fundamentalmente importante é o uso de plataformas *High Throughput Satellite* (HTS) para suportar serviços de armazenamento em *cache* assistidos por satélite. De acordo com Romano [92], o custo reduzido por *bit* dos sistemas HTS tem impacto positivo na economia da cadeia de valor, que se traduz em maiores oportunidades para o cenário de entrega de conteúdo via satélite. As arquiteturas de rede convergentes à virtualização de componentes de infraestrutura permite uma instanciação dinâmica, implantação e configuração de

funções de rede virtual, NFV e *Virtualized Network Function* (VNF), que podem ser oferecidas como um serviço a vários locatários, permitindo assim arquiteturas de rede 5G [83]. Os sistemas HTS desempenham funções importantes na era 5G, graças às suas características, como a grande cobertura, implantação rápida da infraestrutura terrestre e recursos nativos de banda larga, tais como *broadcast* e *multicast*. A virtualização das funções da rede para *broadcast* faz sentido pela otimização da rede, pela visibilidade da rede em relação ao gerenciamento e pela orquestração de forma eficiente. É possível explorar as ferramentas apresentadas neste artigo na implantação de uma rede terrestre-satélite 5G definida por *software* para distribuição de conteúdo [93].

3.2.2 Sistema de Comunicação Móvel 5G

De acordo com B. G. Evans [7] e Panwar *et al.* [94], o 5G, quando consolidado, se tornará a espinha dorsal da comunicação entre dispositivos, ligando dispositivos fixos e móveis, como serviços digitais de transações financeiras, automóveis conectados por sistemas inteligentes, monitoramento em tempo real de processos fabris e cadeias de suprimentos, entre inúmeros outros tipos de aplicações de comunicação entre máquinas, tornando-se parte de uma nova revolução industrial e econômica. Segundo o trabalho dos autores supracitados, pesquisadores e engenheiros esperam que ele possa lidar com cerca de mil vezes (1.000 vezes) mais tráfego do que os sistemas de comunicação móveis atuais. Isso aumentará o consumo e a demanda de conteúdo. Ingredientes como: nova arquitetura, novas tecnologias de comunicação e novos equipamentos tornarão possível essa transformação.

Espera-se que a rede 5G seja uma rede heterogênea e que torne realidade o conceito de conectividade ubíqua, que significa conectividade aos usuários a qualquer hora e lugar [95]. É possível presenciar um momento de transformação tecnológica no qual há muitos modelos de negócios disruptivos, onde empresas passam a ser plataformas aumentando significativamente a quantidade de dados disponíveis e acessados pelos usuários. O cenário de conexão entre máquinas, maiores provedores de conteúdos pessoais e conectividade ubíqua, em que qualquer dispositivo pode ser conectado e controlado através da Internet, satélite e redes móveis, traz um aumento significativo na quantidade de dados e dispositivos interligados [95]. A maior dificuldade deste cenário é alcançar a heterogeneidade das diversas redes que formam o universo 5G, pois estão surgindo diversas soluções para essa nova geração de conectividade, mas com diferentes protocolos [96]. O 5G não foi projetado para resolver um problema específico, mas sim para ter capacidade de lidar com uma ampla gama de casos de uso [96], que incluem os quatro cenários de aplicação abaixo:

- **Comunicação com Alta Vazão (*High Throughput*):** abrange cenários de consumo de conteúdo como multidões em eventos, ambientes fechados e áreas urbanas densas. Próprio para transmissões *multicast* ou *broadcast* [7], [94].
- **Comunicação *Machine-to-Machine* (M2M):** aplicações que demandam taxas menores e mais tempo de vida da bateria como, IoT, Rede de Sensores, Comunicação Veicular e *Smart Places* [7], [94].
- ***Wireless Regional Area Network* (WRAN):** ambiente que exige taxa e latência média da rede. Este cenário foi incluído visando atender países de grandes extensões geográficas como o Brasil. O equipamento de *5G Long Range* desenvolvido pelo Centro de Referências em Radiocomunicação (CRR) do Inatel é utilizado para testes de transferência de dados nesse cenário.
- **Comunicação com Baixa Latência (*Low Latency*):** cobre aplicações de Internet Tátil que exigem taxas razoáveis de transmissão, baixíssima latência e alta confiabilidade, como área da saúde

para robotização das ações de exame, diagnóstico e cirurgia. [97]. Com o padrão de Internet Tátil, todas aplicações são executadas em nuvem e o usuário utiliza equipamentos que não processam nenhum dado localmente. Trata-se de uma rede ultra-confiável com respostas ultra-rápidas, capaz de entregar experiências táteis remotamente. A abordagem com baixa latência é de grande interesse para a indústria, também por causa dos problemas de segurança de dados [98].

Pensando nos diversos casos de uso mostrados acima, o 5G utilizará a agregação de várias portadoras que permitirá a alocação dinâmica das frequências de transmissão. As frequências utilizadas poderão estar na faixa entre 700 MHz até 2500 MHz. De acordo com [99], a utilização destas frequências foi pré definida em 2019 pelo *International Telecommunication Union (ITU)* [99] e sua forma final de utilização apresentada no *World Radiocommunication Conference (WRC) 2019* [100]. As faixas de frequência entre, 3,5 GHz, 28 GHz, 37 GHz, 39 GHz, 64 GHz, 71 GHz (não licenciadas) e 80 GHz poderão ser adicionadas a lista de operação e as já pré-estabelecidas modificadas.

Diferentes arquiteturas de redes desenvolvidas em conjunto com o 5G podem revolucionar a maneira como a Internet atual está construída [18]. O padrão da Internet atual é formado por ISPs que estão interligados entre si, juntamente com grandes prestadores de serviços que criam redes menores para conectar os usuários finais como mostrado na Figura 3.1. Este padrão se mostra inviável para as realizações esperadas com a ubiquidade e com o advento do 5G [53]. Existem desafios que precisarão ser vencidos, como a alta quantidade de informação que passará a trafegar na rede, uma vez que todo objeto físico terá seu correspondente virtual. Com o aumento cada vez maior do *upload* de dados gerais e conteúdos para a rede, a infraestrutura mostrada na Figura 3.1 não suportará a demanda para quantidade de usuários esperado no 5G [95].

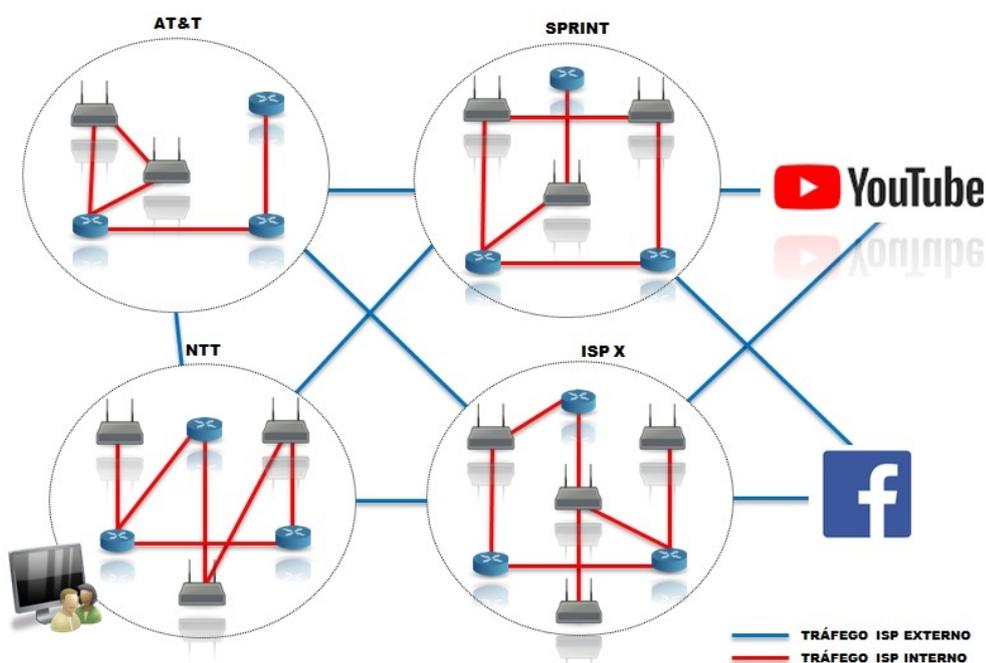


Figura 3.1: Infraestrutura de rede do alto nível na Internet atualmente [95].

O projeto *Programmable Edge-to-Cloud Virtualization Fabric for the 5G MEDIA Industry (5G MEDIA)*, faz parte do programa de investigação e inovação *Horizon 2020* da União Europeia, que tem como objetivo inovar aplicações relacionadas a mídia, investigando como essas aplicações e redes 5G subjacentes devem ser acopladas e interoperadas para o benefício de ambas [101]. O projeto visa garantir que

os aplicativos aloquem os recursos necessários para fornecer melhores QoE e QoS ao usuário, e para que a rede não seja sobrecarregada pelo aumento no tráfego de mídia. O projeto tem como metas capitalizar e estender adequadamente os resultados dos projetos *Infrastructure Public Private Partnership* (5G PPP) em execução para oferecer uma plataforma de programação; verificação e orquestração ágil para serviços, visando desenvolver funções e aplicativos de rede a serem demonstrados em implantações de grande escala [101].

O projeto 5G MEDIA se concentra em cenários e requisitos para implementar CDN virtuais orquestradas em redes 5G usadas para distribuir conteúdos de mídia de altíssima definição. A solução CDN virtual do projeto 5G MEDIA, pode atender adequadamente os usuários conectados à rede 5G, fixos ou móveis, através de serviços de banda larga de acordo com a demanda. A implementação da solução CDN virtual projetada e impulsionada pela plataforma de gerenciamento e orquestração 5G MEDIA, é uma tarefa contínua que, uma vez concluída, permitirá validar os cenários propostos e abordagens de orquestração de serviços através do 5G MEDIA nos bancos de testes do projeto [101]. Em termos da infraestrutura física de suporte (*Physical Layer*), 5G MEDIA considera a proposta de várias *Network Function Virtualization Infrastructure* (NFVI) baseados em nuvem que serão conectados à Plataforma de Virtualização de Serviços através dos componentes de gerenciamento de infraestrutura virtualizada também denominados *Virtualized Infrastructure Manager* (VIM) e *WAN Infrastructure Manager* (WIM) apropriados, permitindo o uso de recursos de computação conforme a demanda dos usuários na rede.

Devido à sua nova arquitetura e *design*, com recursos inerentes capazes de oferecer capacidade aprimorada de rede, latência de comunicação reduzida e modelos flexíveis de serviços com alta agilidade, baixo custo e baixo consumo de energia, o sistema de comunicação móvel 5G aparece como um componente chave na camada de comunicação e conectividade no modelo dinâmico de Internet para acessar e distribuir conteúdos [102], [103]. O 5G visa oferecer confiabilidade, latência, escalabilidade, QoE, QoS, segurança e mobilidade onipresente que serão exigidos em várias aplicações/serviços de missão crítica nos cenários futuros [10], [104]. Sua característica de banda larga móvel aprimorada é vista como uma habilitadora das futuras redes massivas por oferecer capacidade e desempenho de rede em inúmeras aplicações nos mais diversos casos de uso, como: veículos autônomos, sistemas para cidade inteligente, cirurgia remota, transporte e logística, entre outros [104].

Com o foco em aplicações de comunicação M2M de latência crítica, incluindo automação industrial, redes e sistemas de transporte inteligentes, o trabalho de Schulz *et al.* [105] discute os desafios de projeto e propõem soluções para a interface de rádio e a arquitetura de rede, a fim de atender requisitos como latência, confiabilidade, tamanho dos dados trafegados na rede, densidade dos dispositivos conectados e intervalo de comunicação [105–110]. Ainda envolvendo o cenário de missões críticas, Orsino *et al.* [111] estudam o impacto da mobilidade heterogênea nas redes 5G que suportam *Machine-type Communications* (MTC), explorando os cenários de automação industrial, conectividade veicular e comunicações urbanas. Explorando recursos emergentes como *Millimeter-Wave* (mmWave), *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO) massivo e *Cloud-Radio Access Network* (C-RAN) previstos nas redes 5G, Saxena *et al.* [112] desenvolveram um *gateway* de dispositivos finais de troca de informação apto ao 5G para comunicação com os *Remote Radios Head* (RRH) presentes no C-RAN 5G. Providos de esquemas de compressão eficientes, o *gateway* proposto melhora significativamente a utilização dos recursos de *uplink*. Já, o trabalho de Lau, Alabbasi e Shihada [113] apresenta um sistema de entrega de conteúdo para 5G CRAN.

Nota-se durante a análise de trabalhos relacionados que pesquisadores direcionaram o foco na resolução dos problemas a nível de dispositivos e protocolos existentes nas comunicações sem fio. Há

agora uma tendência crescente na integração de sensores e sistemas baseados em sensores com sistemas físicos cibernéticos e comunicações *Device-to-Device* (D2D) [10]. Espera-se que os dispositivos de comunicação M2M componham a maior parte desse paradigma de rede 5G e que as tecnologias IoT complementadas com análises de dados inteligentes, mudem drasticamente o cenário de vários setores. Porém, a evolução das tecnologias atuais não conseguirão atingir cobertura suficiente para o correto desenvolvimento da rede 5G, fazendo necessária a integração com as comunicações via satélite para viabilizar seu completo potencial. As tecnologias não precisarão ter abrangência total, visto que as redes satélites cobrem locais remotos com menor custo e com possibilidade de integração. A integração da comunicação por satélite no cenário IoT-5G introduz importantes contribuições no que diz respeito à conectividade onipresente, na capacidade de *broadcast*, na mitigação das deficiências das infraestruturas terrestres e na infraestrutura das futuras redes de telecomunicações.

Tecnologias conjuntas de comunicação celular móvel *Long Term Evolution* (LTE) e de grandes quantidades de dispositivos interconectados, como M2M e IoT, que envolvem a comunicação aprimorada do tipo máquina, *enhanced Machine-Type Communication* (eMTC), o *Long Term Evolution-Machine* (LTE-M) e o *Narrow Band-IoT* (NB-IoT), foram desenvolvidas para atender as crescentes necessidades das comunicações sem fio [114]. Porém, à medida que a rede se expande para novas demandas, o 5G precisa lidar com a implantação massiva de comunicação tipo máquina, *massive Machine-Type Communication* (mMTC) [10], [114]. Para atender essa demanda, o 3GPP definiu as especificações para eMTC e NB-IoT como parte da *Release 13 LTE* e a mMTC como parte do *5G-New Radio* (5G-NR) [115]. O 3GPP agora está padronizando o uso de redes não-terrestres, *Non-Terrestrial Networks* (NTN), para satélites e outros equipamentos aéreos, incluindo veículos não tripulados, de tal forma que redes de acesso múltiplo podem ser usadas para suportar redes 5G. O NTN estuda entre outros casos a modelagem de canais para operação das tecnologias. Além da modelagem de canal, as discussões sobre o impacto de NTN do 5G-NR [40] são realizadas para uma variedade de tópicos, como: *Random Access Channel* (RACH), *Hybrid-ARQ* (HARQ), *Phase Tracking Reference Signal* (PTRS), *Demodulation Reference Signal* (DMRS), *Initial Access* e *Timing Advance*. De acordo com o trabalho e os documentos analisados, cargas úteis comumente usadas em satélites podem ser reaproveitadas em plataformas próximas à terra [40], [115].

Outro ponto chave e importante à ser considerado é a segurança. Uma arquitetura que não possui mecanismos eficientes de defesa contra ciberataques é alvo de grande preocupação, uma vez que a cada dia existem mais nós conectados a rede e mais possibilidades de falhas e vulnerabilidades [116]. Inúmeros autores defendem a construção de uma nova arquitetura para Internet com mais ênfase na segurança [74, 117–119]. Garantir uma boa gestão de identidade representa outro grande desafio. A mobilidade por redes ubíquas implica em maior liberdade informacional pelo espaço urbano, mas também, uma maior exposição à formas sutis de controle, monitoramento e vigilância [120]. A correta autenticação de entidades e a integridade das informações são problemas que precisam ser avaliados em conjunto com a QoS.

Nos últimos anos, dispositivos *Smartphones* e suas conexões *Mobile Broad-Band* (MBB) de 4G suportaram, de forma bem estabelecida, serviços de multimídia de vídeo. Espera-se que os futuros serviços multimídia do mercado de massa sejam altamente imersivos e interativos. De acordo com a especificação técnica TS 22.261 [121] do 3GPP, no 4G, o provisionamento de QoS tem sido bastante abstrato e considerado de forma agnóstica por parte dos aplicativos e dos serviços, enquanto que nos sistemas 5G esperados, o provisionamento de QoS deve ser baseado em abordagem de *stakeholders*, na aplicação e no serviço de modo consistente. Isso significa que, além dos indicadores-chave genéricos de

QoS e dos valores-alvo a serem atingidos pelas tecnologias 5G, as implantações e operações reais da rede 5G devem ser adaptadas de forma automática para atender aos requisitos de várias partes interessadas e serviços. Para este propósito, o desenvolvimento de tecnologias 5G está intimamente ligado à análise dos requisitos das partes interessadas e de seus serviços para que o último possa ser mapeado com recursos de rede 5G, funcionalidades, estratégias de implantação, entre outros itens. De acordo com o documento TS 22.261 [121], deve-se obter um ecossistema holístico voltado para as partes interessadas para inovação técnica e de negócios que integra recursos de rede, computação e armazenamento em uma infraestrutura programável e unificada. Embora os recursos e funcionalidades de rede em redes 4G estejam migrando cada vez mais para *software*, existe uma suposição geral de que em 5G as funções e aplicativos de rede serão projetados como aplicativos nativos em nuvem que serão executados em ambientes virtualizados e em arquiteturas distribuídas [121].

Em relação a segurança, 5G traz várias melhorias para a segurança em comparação com a tecnologia 4G e alguns pontos são mostrados a seguir. Detalhes da especificação *5G Phase 1* de todos os aspectos foram publicados em TS 33.501 [122]. Um resumo da especificação *5G Phase 1* está disponível em [123]. As principais melhorias na segurança 5G em comparação com 4G: autenticação primária, armazenamento de credenciais, autenticação secundária, segurança entre operadores, privacidade, arquitetura baseada em serviços, hierarquia chave e mobilidade. A autenticação mútua de dispositivos e redes no 5G é baseada em duas autenticações a autenticação primária e a secundária [123]. O mecanismo de autenticação primária possui um controle interno integrado que permite ao operador doméstico saber se o dispositivo está em determinada rede e receber uma chamada final de autenticação. As opções de autenticação obrigatórias são *5G Authentication and Key Agreement (5G AKA)* e *Extensible Authentication Protocol (EAP) - AKA*, denominado EAP-AKA. Opcionalmente, outros mecanismos de autenticação baseados em EAP também são permitidos no 5G para casos específicos, como redes privadas. Além disso, a autenticação primária é independente da tecnologia de acesso de rádio, portanto, pode ser executada em tecnologias que não sejam 3GPP, como o *Wi-Fi* [122]. O conceito de Armazenamento de Credenciais é definido porque no 5G as credenciais de segurança podem ser armazenadas não apenas no *Universal Integrated Circuit Card (UICC)*, mas em outras plataformas de armazenamento de *hardware* seguras especificadas. A autenticação secundária em 5G destina-se à autenticação com redes de dados fora do domínio da operadora móvel. Para esse propósito, diferentes métodos de autenticação baseados em EAP e credenciais associadas podem ser usados [122].

O 5G também fornece segurança entre operadores. Isso deve evitar problemas de segurança presentes em *Signaling System 7 (SS7)* ou *Diameter*¹. A privacidade é garantida pela chave pública da rede doméstica que é usada para fornecer privacidade de identidade do assinante, o conceito de *International Mobile Subscriber Identity (IMSI)* é usado para identificar o usuário de uma rede celular como uma identificação única associada a todas as redes celulares. A arquitetura baseada em serviços, *Service Based Architecture (SBA)*, para a rede principal 5G pode fornecer segurança adequada. No 5G a estação base é dividida em Unidade Central, ou *Central Unit (CU)* e em Unidade Distribuída, ou *Distributed Unit (DU)* com uma interface entre elas. A segurança é provisionada para a interface CU-DU. Embora a mobilidade em 5G seja semelhante a 4G, a diferença em 5G é a suposição de que a âncora de mobilidade na rede principal não está em local seguro. Assim, a mobilidade segura entre pontos de ancoragem de mobilidade também é provisionada em 5G. As especificações *Non-Standalone (NSA)* para 5G NR foram aprovadas seguidas pelas especificações *Standalone*, completando a parte chamada de *5G Phase 1* [121]. O Grupo de Trabalho de Segurança 3GPP (SA3) está envolvido com os trabalhos

¹*Diameter* é um protocolo de autenticação, autorização e contabilidade para redes de computadores, pertence aos protocolos da camada de aplicação no conjunto de protocolos da Internet.

das especificações desde o início.

3.2.3 Padronização do Sistema 5G

Observa-se o crescimento no número de trabalhos e projetos encontrados na literatura que abordam a padronização do sistema 5G. Por exemplo, [83], [96], [124] e [125] destacam tecnologias emergentes juntamente com desafios de implementação para atender as exigências do 5G. A padronização define a interoperabilidade entre as tecnologias. Além de permitir que diferentes tecnologias se comuniquem, os padrões ampliam o mercado para novos produtos e serviços. As tecnologias de controle, virtualização, gerência e distribuição de dados até os usuários finais aparecem como elementos chave para suportar eficientemente uma grande variedade de serviços e requisitos [90], [124] e [126–128]. Logo, sua integração ao 5G têm sido amplamente explorada, mostrando que elas podem permitir a simplificação no gerenciamento da rede [129–131]. O cenário integrado de tecnologias conjuntas ao 5G, unificado à comunicação via satélite, é capaz de prover conectividade global e instantânea com alta capacidade, fornecendo gerenciamento do tráfego e serviços flexíveis e reconfiguráveis [87] e [132–134].

Analisando trabalhos relacionados à padronização, como os vistos em [135–138], entre outros, é possível definir características de um serviço de entrega de conteúdo ideal com a utilização de CDN, ICN e Internet do Futuro. De acordo com as referências analisadas, semelhante às redes de entrega de conteúdo, que armazenam conteúdo em *cache*, o 5G permitirá o armazenamento de conteúdos onde ele for mais necessário e o mais próximo possível dos consumidores. Existe relação entre o armazenamento temporário integrador e SDN, pois esse exigirá um controlador SDN para gerenciamento do tráfego e orquestração da comunicação dos dispositivos. A CDN é um *backbone* transparente da Internet, responsável pela entrega de conteúdo armazenado em *cache*, visando minimizar a latência entre os consumidores e os servidores. As aplicações, conteúdo e comércio de próxima geração requerem CDN flexíveis e econômicas, como serviços essenciais, com agregação, gerenciamento e distribuição de conteúdo. A necessidade do mercado de soluções CDN se correlaciona diretamente com a explosão de redes de banda larga, *smartphones* e aplicativos, serviços e conteúdo relacionados. Em particular, a convergência de redes celulares suportadas pela tecnologia sem fio de banda larga 5G e aplicativos baseados em nuvem, facilita a necessidade de soluções de conteúdo mais inteligentes.

Um dos principais problemas da CDN são os possíveis monopólios de transmissão de dados e conteúdo que levantam questionamentos sobre segurança, privacidade e até mesmo estabilidade de serviços. A empresa americana Akamai é uma das companhias de distribuição de conteúdo mais utilizadas no mundo [77]. A empresa Akamai tem milhares de servidores espalhados pelo planeta e mesmo com seu investimento em segurança, há riscos de instabilidade para parte da Internet caso seus serviços sejam atacados. A empresa chega a realizar tráfego a 6 TB/s em operações comuns, o que equivale a 30% do tráfego de toda a rede mundial de computadores. Isso significa que qualquer problema técnico ou de segurança do Akamai vai afetar o fluxo de um terço de todo o conteúdo transferido pela Internet diariamente.

A ITU tem gerenciado os esforços do governo, da indústria e do setor privado visando a construção de um sistema global de telecomunicações móveis internacionais de banda larga, conhecido como *International Mobile Telecommunications* (IMT). Atualmente, os sistemas de banda larga móvel 3G e 4G são baseados, respectivamente, nos padrões IMT-2000 e IMT-Advanced da ITU [139]. O programa “*International Mobile Telecommunications for 2020 and Beyond*”, conhecido como IMT-2020 foi estabelecido em 2012 pela ITU, a fim de proporcionar a estrutura para pesquisa e desenvolvimento do 5G em

todo o mundo. Sendo assim, a ITU define o *framework* e os objetivos gerais do processo de normalização 5G, bem como as diretrizes deste processo até à sua conclusão em 2020, em sua Recomendação ITU-R M.2083-0 [140]. A recomendação ITU-R M.2083-0 foca em tendências de usuários e aplicativos mostrando como dispositivos móveis desempenham vários papéis em constante evolução nos cenários de comunicação atuais. De acordo com o documento, os futuros sistemas IMT devem suportar novos casos de uso emergentes, incluindo aplicativos que requerem comunicações de taxa de dados muito altas, um grande número de dispositivos conectados e aplicativos de latência ultrabaixa e alta confiabilidade. Tendências mais específicas de usuários e aplicações são explicadas no parágrafo 2.1.1 até o 2.1.8 da recomendação ITU-R M.2083-0 [140].

O parágrafo 2.1.1 do documento ITU-R M.2083-0 trata do suporte de baixa latência e alta confiabilidade de comunicação centrada nos usuários. Os usuários esperam a experiência da conectividade instantânea em que os aplicativos precisam exibir um comportamento em tempo real [140]. A entrega do serviço deve ser sem tempos de espera, onde através de um único clique a resposta é percebida como instantânea. O comportamento do serviço em tempo real será um fator-chave para o sucesso dos serviços em nuvem e dos aplicativos de realidade virtual e realidade aumentada. A comunicação de baixa latência e alta confiabilidade que suporta tal comportamento torna-se assim um facilitador para o desenvolvimento futuro de novas aplicações, por exemplo, em *e-Health* ou Cibermedicina, em segurança, atividades de escritório, entretenimento, entre outros setores [140]. No parágrafo 2.1.2 são consideradas questões para o suporte de baixa latência e alta confiabilidade das comunicações M2M. O documento define que a confiabilidade e a latência nos sistemas de comunicação atuais foram projetadas com o usuário humano em mente. Para futuros sistemas sem fio, o *design* de novas aplicações é previsto com base na comunicação M2M com restrições em tempo real. São consideradas aplicações de carros autônomos, veículos conectados, serviços aprimorados de nuvem móvel, otimização de controle de tráfego em tempo real, resposta a emergências e desastres, redes inteligentes, *e-Health* e comunicações industriais eficientes [140].

A padronização é a chave para a interoperação futura e para a redução dos custos eventuais de equipamentos utilizados nas redes em construção, pois isso aumenta a escalabilidade de fabricação [141]. O 3GPP e o ETSI estabeleceram um caminho para a padronização 5G baseado no projeto *Satellite and Terrestrial Network for 5G (SaT5G)* [141]. O projeto de rede terrestre e satélite para 5G, tem mais de 100 contribuições submetidas às reuniões 3GPP RAN e RAN1 de Junho de 2017 a Junho de 2018, utilizando os resultados das análises efetuadas em parte no *SaT5G Working Package 4.4 (WP4.4)* incorporado no TR 38.811 [142]. O WP4 *Research to Prototype Development*, pesquisa e desenvolve os capacitadores técnicos dentro de seis pilares de pesquisa, facilitando a integração de soluções baseadas em satélite em 5G. O WP4 seleciona as soluções mais relevantes para cada um desses recursos com base em simulações ou testes e desenvolverá os processos de construção das soluções selecionadas para implementação no WP5. Um grupo de trabalho mais avançado e consolidado do que o WP4.

O projeto SaT5G também conta com mais de vinte contribuições submetidas pelos parceiros às reuniões do 3GPP SA1, de Novembro de 2017 a Junho de 2018, utilizando parcialmente os resultados da análise realizada no SaT5G WP2, sob o título: *Scenarios for Satellite Integration in 5G*, que identifica os cenários e requisitos comerciais, operacionais e técnicos para a integração de redes terrestres e de satélite no contexto 5G. O 3GPP SA1 desenvolve os modelos de negócios para os cenários do SaT5G, especificamente na TR 22.822 [143]. Ainda, foi feita uma contribuição para o 3GPP CT4 usando os resultados da análise realizada no SaT5G WP3. Ou seja, o WP3, *Integrated Network Architecture Design*, define a arquitetura de referência para a integração de sistemas de satélites em redes 5G, com

base em infraestrutura espacial de última geração. Em relação ao ETSI, o SaT5G contribuiu com os resultados do WP2 e do WP3 mostrados acima, para o item de trabalho existente DTR/SES-00405 [144]. E também contribuiu para a criação de dois novos itens de trabalho DTR/SES-00446 [145] e DTR/SES-00447 [12].

O ETSI apresenta no programa de trabalho DTR/SES-00447 [12] a análise técnica de como configurar redes de satélite integradas à 5G para entrega de conteúdo de borda e identificar as regras de projeto que otimizam esse tipo de serviço. Em particular, os seguintes casos de uso são considerados principalmente em áreas não atendidas: atualizações MEC, atualizações de *cache* CDN, *streaming* multimídia linear e não linear. A análise engloba questões específicas de satélite, como segurança, escalonamento com reconhecimento de grande número de dispositivos, entrega robusta, inter MEC ou orquestração de *caching*/satélite, e mobilidade *multicast* entre pontos de acesso, por exemplo, a bordo de aeronaves ou veículos conectados. O estudo identifica os padrões existentes para distribuição de conteúdo e alavanca, tanto quanto possível, os tópicos mais relevantes considerados para o sistema 5G [12].

O ETSI também considera para as atualizações MEC [146] que para implantação desse tipo de computação em 5G, a rede deve passar por modificações. O MEC é utilizado atualmente nas redes 4G conectado ao plano do usuário por meio de uma das opções descritas no documento “*GS MEC WP 24 MEC Deployments in 4G and Evolution Towards 5G*” [147]. Com as redes LTE já operando há vários anos, foi necessário projetar a solução MEC como um complemento a uma rede 4G para oferecer serviços de borda [146]. Como consequência, o sistema MEC, é em grande parte autônomo, cobrindo tudo, desde gerenciamento e orquestração até interações com o plano de dados para direcionar fluxos de tráfego específicos [148]. No 5G, o ponto inicial de construção da arquitetura de rede é diferente do 4G, pois a computação de borda é identificada como uma das principais tecnologias necessárias para oferecer suporte a baixa latência, juntamente com serviços de missão crítica [15].

O relatório técnico 3GPP TR 22.906 *Release 12* [13] apresenta a visão geral, casos de uso e outros aspectos como mobilidade e segurança dos serviços de distribuição de conteúdo ponto-a-ponto baseados no sistema multimídia sobre IP, o *IP-Multimedia Subsystem (IMS)*. Os objetivos do relatório 3GPP TR 22.906 são estudar serviços de distribuição de conteúdo baseados em IMS para identificar casos de uso visando descrever como os usuários, operadores e provedores de serviços, poderão se beneficiar com a utilização de redes convergentes fixas e móveis com tecnologia ponto-a-ponto IMS. O IMS, proposto pelo 3GPP, é visto como uma rede central de convergência fixa e móvel para fornecer serviços de multimídia, definindo uma infraestrutura para autenticação do usuário, registro, descoberta de serviços requisitados e necessários e controle de sessão multimídia [13].

A rede ICN é considerada como tecnologia promissora para atender demandas 5G em potencial devido à sua capacidade de integrar funções de camada de rede com reconhecimento de conteúdo para que as operações de roteamento, encaminhamento, armazenamento em *cache* e transferência de dados sejam executadas através dos nomes das entidades na rede, independentes de topologia em vez de endereços IP [91]. Sobre a padronização para ICN, o 3GPP apresenta a arquitetura: *5G Next Generation Core (5G NextGen)*, que permite a introdução de novas funções de usuário e plano de controle dentro do contexto de fatiamento de rede para permitir maior flexibilidade no manuseio de dispositivos e aplicativos heterogêneos. A arquitetura 5G NextGen pode ser integrada com futuras tecnologias de rede como a ICN. Os detalhes técnicos são especificados em TS 23.501 [149] e em TS 23.502 [150]. As especificações abrangem cenários de redes em itinerância (*roaming*) e fora da área de cobertura da operadora do usuário, incluindo o interfuncionamento entre 5G e *Evolved Packet System (EPS)*, mobilidade dentro de 5G, controle de políticas e rede de distribuição de dados.

Dentro de uma rede 5G heterogênea, o projeto de padrões e protocolos é complexo e precisa ser bem definido [125]. Novas soluções e protocolos podem ser aplicados a cada camada da arquitetura rede. Para obter uma solução 5G com excelente QoS baseada em satélite, cada protocolo deve ser otimizado [151]. Nesse contexto, as camadas física (PHY) e de enlace (MAC) desempenham um papel crucial no gerenciamento do recurso de transmissão, como por exemplo, otimizando a largura de banda utilizada. A camada de rede precisa usar eficientemente a largura de banda oferecida pelas camadas inferiores e implementar mecanismos de mapeamento de QoS e reserva de QoS, enquanto os protocolos de transporte e de aplicativo devem usar com eficiência os recursos oferecidos pela camada de rede [32], [151]. Levando esses conceitos em consideração, uma abordagem *cross-layer* representa uma solução necessária a ser aplicada em uma rede tão heterogênea. Na prática, a abordagem de *cross-layer* permite que a entidade de protocolo explore o conhecimento de um conjunto de parâmetros (medidos ou estimados) das camadas subjacentes e forneça uma estrutura de otimização envolvendo todas as camadas, do físico até o transporte [152]. Em uma rede 5G baseada em satélite heterogênea, o mapeamento de QoS é geralmente necessário verticalmente, ou seja, a camada MAC deve oferecer um serviço para a camada de rede e horizontalmente, conectando as tecnologias de rádio e satélite e mecanismos de QoS através de um esquema de sinalização adequado [28], [38]. Detalhes específicos sobre os conceitos e técnicas relacionados podem ser encontrados no texto de Shi [152].

5G Infrastructure Public Private Partnership

Iniciativa conjunta entre a Comissão Europeia e a Indústria Europeia de Tecnologias de Informação e Comunicação, a parceria pública-privada de infraestrutura 5G, *5G Infrastructure Public Private Partnership* (5G PPP), possui o desafio de garantir a liderança europeia nas áreas específicas onde a Europa é forte ou onde existe potencial para criar novos mercados, tais como cidades e transportes inteligentes, *e-health*, educação, entretenimento e meios de comunicação. Com a missão de repensar a infraestrutura e criar uma nova geração de redes de comunicação e serviços que proverá conectividade rápida e ubíqua, com entrega de serviços sem interrupção em todas as circunstâncias, o 5G PPP tem como objetivo principal propor soluções envolvendo arquiteturas, tecnologias e padrões para a infraestrutura de comunicação de próxima geração 5G [153].

A Figura 3.2 apresenta alguns projetos do programa 5G PPP selecionados para estudo durante a revisão da literatura. Os avanços de pesquisas e implementações desses projetos vêm contribuindo muito com o desenvolvimento e padronização dos sistemas 5G. Assim sendo, analisando as propostas desses projetos, identificou-se que sete deles estão relacionados diretamente com o tema dessa dissertação, sendo: 5G MEDIA, 5G NORMA, CHARISMA, 5G-XHaul, 5G-Xcast, SESAME e o Sat5G.

O projeto *Programmable edge-to-cloud virtualization fabric for the 5G MEDIA Industry* (5G MEDIA), faz parte do programa de investigação e inovação H2020 da União Europeia, que tem como objetivo inovar aplicações relacionadas a mídia, investigando como essas aplicações e redes 5G subjacentes devem ser acopladas e interoperadas para o benefício de ambas. O projeto visa garantir que os aplicativos aloquem os recursos necessários para fornecer alta QoE e QoS e para que a rede não seja sobrecarregada pelo tráfego de mídia. O projeto tem como metas capitalizar e estender adequadamente os resultados dos projetos 5G PPP em execução para oferecer uma plataforma de programação, verificação e orquestração ágil para serviços. Busca também, desenvolver funções e aplicativos de rede a serem demonstrados em implantações de grande escala.

Em Andriani, Nucci e Pantelopoulos [101], com o entregável “D1.1 *Quality Plan*”, que é produzido dentro do *Work Package* (WP) “WP1 - Gestão e Coordenação”, fornece uma rápida visão geral



Figura 3.2: Projetos do 5G PPP estudados durante a análise da literatura [153].

dos objetivos do projeto e dos aspectos gerenciais mais relevantes a serem seguidos, descrevendo a implementação adequada dos mecanismos gerais de trabalho e definindo as regras e responsabilidades do consórcio 5G MEDIA. O objetivo é garantir um progresso de alta qualidade do trabalho na vida do projeto. Isso inclui a produção das entregas e outros resultados do projeto, os mecanismos para o seu processo de submissão e revisão interna e quais são os meios de comunicação entre os parceiros, por exemplo, reuniões, listas de discussão e espaço colaborativo de trabalho.

No entregável “D1.2 *Data Management Plan (DMP)*”, é destacado que o gerenciamento de dados é um componente importante da conduta responsável de uma pesquisa. Assim, existe a necessidade de um documento para descrever como os dados serão coletados ou armazenados e preservados, gerenciados e compartilhados. Este documento, que serve a esse propósito, é um plano de gerenciamento de dados. Os projetos do programa H2020 são necessários para exportar dados de acesso aberto ao público. Por esse motivo, os usuários devem poder ter acesso *online* gratuito a informações e resultados científicos do projeto. Mais especificamente, as informações que são oferecidas no âmbito do projeto 5G MEDIA incluem: (i) artigos de pesquisa científica revisados por pares (publicados em periódicos acadêmicos) ou (ii) dados de pesquisa (publicações subjacentes de dados, dados selecionados e dados brutos). Através do desenvolvimento de um DMP, a descrição de quais dados serão abertos e como esses dados serão compartilhados e preservados serão introduzidos. O DMP pode ser dividido em duas categorias principais: a exploração de dados de pesquisa gerados e coletados dentro do projeto e a divulgação dos resultados científicos que são criados pelo projeto. O escopo do atual DMP é tornar os dados 5G MEDIA facilmente, detectáveis, acessíveis, utilizáveis e com interoperabilidade.

O entregável “D2.1 *APIs and Tools for Operation Support*”, descreve as ferramentas de trabalho selecionadas para o projeto 5G MEDIA. A principal justificativa para a seleção das ferramentas tem sido a sustentabilidade, com a seleção, na maioria dos casos, de ferramentas de código aberto com uma comunidade forte, capaz de oferecer suporte valioso. A maioria das ferramentas utilizadas são hospedadas na infraestrutura de nuvem da empresa que faz parte do projeto, *Engineering – Ingegneria Informatica SPA (ENG)*, com acesso concedido de acordo com uma lista de usuários autorizados compartilhados com ENG e atualizados ao longo do tempo. Qualquer solicitação relacionada a novos

usuários, bem como alterações de configuração, deve ser gerenciada abrindo um problema para o ENG usando a plataforma de gerenciamento JIRA, a fim de acompanhar as operações.

Em Nucci [154], os autores trazem que o foco da pesquisa em redes 5G até hoje tem sido amplamente dedicado aos avanços nas arquiteturas, tecnologias e infraestruturas de rede em todos os projetos financiados na 5G PPP Fase I. Menos esforço foi feito nas aplicações e serviços que irão alavancar e explorar tais capacidades avançadas de 5G. O 5G MEDIA Fase 2 é um novo projeto de P & D financiado pela Comissão Europeia sob o programa 5G PPP Fase II H2020, que visa investigar como as aplicações relacionadas à mídia devem ser acopladas e interagir com as redes 5G para o benefício de ambas.

Nesse artigo os autores mostram os objetivos do projeto 5G MEDIA para a fase 2 [154]. O projeto aplica os conceitos SDN e NFV em aplicativos de mídia para incorporá-los de forma flexível e dinâmica como *Virtual Network Functions* (VFN) nas redes 5G e nas infraestruturas em *Cloud*. Na forma de máquinas virtuais, contêineres ou *unikernels*², esses aplicativos serão gerenciados usando um paradigma de computação sem servidor. Para garantir altos níveis de desempenho em termos de largura de banda e baixa latência, as funções do aplicativo de mídia serão implantadas próximas das fontes de tráfego, e a função 5G MEDIA *Management and Orchestration* (MANO), implantará algoritmos inteligentes e virtualizados para configurar caminhos e para fornecer capacidade de rede para os níveis de desempenho necessários na borda da rede [154].

O 5G MEDIA tem como objetivo inovar aplicações relacionadas a distribuição de mídia, investigando como essas aplicações e a rede 5G subjacente devem ser acopladas e interoperadas para o benefício de ambas: garantir que os aplicativos aloquem os recursos necessários para fornecer alta QoE enquanto, ao mesmo tempo, a rede não fique sobrecarregada com o tráfego de mídia [154]. A esse respeito, 5G MEDIA aborda os seguintes tópicos: (i) capitalizar e ampliar os resultados dos projetos 5G PPP em execução para oferecer uma plataforma ágil de programação, verificação e orquestração para serviços de mídia, e (ii) desenvolver funções de rede e aplicativos a serem distribuídos em larga escala para diversos requisitos, visando três casos de uso. O primeiro caso trata de mídia imersiva e realidade virtual, o segundo de produção inteligente e conteúdos gerados pelo usuário, e o último a alta definição em rede de entrega de conteúdo. Com base em uma abordagem de inovação aberta, a plataforma 5G MEDIA resultante será oferecida a organizações terceirizadas que desenvolverão, combinarão, verificarão, implementarão e validarão aplicativos de mídia, utilizando *Software Development Kit* (SDK) e a plataforma de virtualização de Serviços do projeto. Além disso, o projeto planeja introduzir o conceito de *Streaming-as-a-Service*, que resultará em um impacto comercial relevante para a distribuição de conteúdo [154].

Em relação à padronização o projeto 5G MEDIA amplia o trabalho do 5G PPP sobre tecnologias chave NFV e SDN no documento “D3.1 *Initial Design of the 5G MEDIA Operations and Configuration Platform*”. O foco da padronização sugerida pelo 5G MEDIA é oferecer um ambiente de gerenciamento avançado para serviços de rede e aplicativos relacionados a mídia que vincula diretamente o gerenciamento do ciclo de vida *online* com a experiência do usuário, decisões sobre uso de recursos e infraestruturas de otimização. Nesse escopo, a Plataforma de Operações e Configuração do 5G MEDIA tem como objetivo estabelecer uma plataforma de DevOps de orquestração e verificação de código aberto, compatível com o padrão ETSI-NFV para serviços e aplicativos de mídia de rede. O projeto busca atender um grande conjunto de serviços e funções de rede de código aberto respondendo às necessidades dos desafios da rede de mídia do H2020 de acordo com a visão 5G.

²Os *unikernels* são utilizados para remover a fatia que separa a *hardware* da aplicação final e mantém no sistema operacional apenas o suficiente para executar o código da aplicação.

Outro projeto do 5G PPP que introduz uma arquitetura de rede relevante é o *5G Novel Radio Multiservice adaptive network Architecture* (5G NORMA), que apresenta o objetivo de garantir a sustentabilidade econômica da operação da rede, através da abertura de oportunidades para novos participantes, ao mesmo tempo em que potencializa a eficiência da arquitetura para fazê-lo de maneira econômica e com baixo consumo de energia [155–158]. O principal objetivo do 5G NORMA é desenvolver uma arquitetura de rede móvel 5G conceitualmente nova e adaptável, para permitir níveis de personalização da rede, garantindo que os requisitos rigorosos de desempenho, segurança, custo e energia da padronização exigida pelo 5G sejam atendidos. Busca também fornecer uma abertura arquitetônica baseada em *Application Programming Interface* (API), alimentando o crescimento econômico por meio de inovações. Com o 5G NORMA, os principais participantes do ecossistema móvel visam sustentar a posição de liderança da Europa em 5G [155–158]. A verificação da arquitetura através de testes aplica uma metodologia com três casos de avaliação de serviços 5G genéricos, como: *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *massive Machine Type Communications* (mMTC) e *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC). Os testes visam analisar até que ponto o projeto da arquitetura atual atende aos diferentes requisitos definidos no 5G NORMA e no ecossistema geral, incluindo iniciativas de padronização do 5G PPP e do 3GPP.

O 5G NORMA integra as funções de controle e de camada enlace de dados desenvolvidas no projeto em uma arquitetura de rede móvel, aplicando paradigmas de composição, decomposição e alocação adaptativa de funções de rede, *Network Functions* (NF), controle de rede programável e licenciamento de rede ponto a ponto. O projeto apresenta uma camada de gerenciamento e orquestração de múltiplos serviços com interfaces dedicadas para locatários de redes móveis. Segundo os autores, não seguindo o paradigma de um sistema que serve para todos os serviços, apresentado nas arquiteturas atuais, o 5G NORMA permitirá a adaptação dos mecanismos executados para um determinado serviço aos requisitos de serviço específicos, resultando em um novo serviço e adaptação dependente do contexto do paradigma de funções de rede [155–158]. A abordagem técnica baseia-se no conceito de decomposição adaptativa e atribuição de funções de rede móvel, que decompõe de forma flexível as funções de rede móvel e coloca as funções resultantes no local mais adequado. Ao fazer isso, o acesso e as funções principais residem em locais diferentes, o que é explorado para otimizar conjuntamente sua operação quando possível. A adaptabilidade da arquitetura é ainda mais reforçada pelos conceitos inovadores de controle de rede móvel definido por software e multilocalização móvel, e sustentada por demonstrações corroborantes [155–158].

O projeto: *Converged Heterogeneous Advanced 5G Cloud-RAN Architecture for Intelligent and Secure Media Access* (CHARISMA), tem como objetivo lidar com baixa latência e segurança *end-to-end* para redes convergentes fixas e sem fio 5G, a fim de atender às complexas demandas de paradigmas de negócios emergentes, como: *Smart Cities*, *eHealth* e Indústria 4.0 [159]. No artigo [159], são apresentados os principais direcionadores e requisitos para uma arquitetura hierárquica 5G de inteligência distribuída, suportando baixa latência, segurança e acesso aberto como recursos intrínsecos ao seu *design*. Os autores também investigam a perspectiva de negócios da solução 5G proposta e as mudanças que podem ser previstas para o ecossistema de telecomunicações. Esse trabalho apresenta uma arquitetura de rede de acesso 5G hierárquica, inteligente e virtualizada, baseada em nós denominados de *Converged Aggregation Level* (CAL) e unidades de gerenciamento inteligentes, denominadas *Intelligent Management Unit* (IMU) flexíveis, adequados para serviços e aplicativos que exigem baixa latência, segurança aprimorada e multilocalização [58], [159].

A arquitetura CHARISMA consiste em várias tecnologias de *hardware* diversificadas e inovadoras

operando em conjunto, cujas funcionalidades são fundamentais para permitir a baixa latência, o acesso aberto e a transmissão segura de dados necessários nas futuras redes 5G [58]. Essas tecnologias contam com diversos dispositivos de rede que incluem, o roteador *TrustNode* para roteamento seguro e de baixa latência e a placa de interface de rede *Accelerated Network Interface Card* (ANIC). O projeto opera com comunicações *device-to-device*, para baixa latência com segurança local e distribuída, armazenamento e distribuição por *cache* hierárquico, para permitir o fornecimento de vídeo com baixa latência e também o balanceamento de carga de rede. Sistema de *Cloud* móvel para baixa latência e funções de rede escaláveis, virtualizadas, conforme necessário. *Fronthaul Ethernet* baseada nas tecnologias *Orthogonal Frequency Division Multiplexing-Passive Optical Network* (OFDM-PON) e o padrão de rede *Next-Generation Passive Optical Network 2* (NG-PON2), para conectividade *Remote Radio Head* (RRH) de baixa latência, baixo custo e resiliente e *backhaul* de baixa latência confiável, fornecendo conectividade de acesso aberto entre a *Radio Access Network* (RAN) e a rede principal. Cada nó é rotulado como um CAL e é designado com um número, para indicar seu nível na hierarquia. Cada nó ativo, ou seja, a CAL tem sua própria unidade de gerenciamento inteligente escalonável (IMU) que executa as funcionalidades de armazenamento de dados, processamento e roteamento.

Para atingir os requisitos de baixa latência, o CHARISMA explora o roteamento hierárquico com o *cache* da rede, a aceleração de NFV para caminhos de dados usando ANIC programáveis e a tecnologia OFDM-PON. A fim de atender aos desafios de segurança, tanto física como virtual, e multilocação aprimorados, a arquitetura proposta emprega o conceito de fatiamento de rede junto com os princípios de SDN e NFV. No trabalho de [58], também são listados vários casos de uso, onde a arquitetura de inovação da CHARISMA pode desempenhar um papel vital para permitir as soluções de rede 5G necessárias. Os requisitos extraídos desses casos de uso permitiram refinar a arquitetura CHARISMA. Segundo os autores o consórcio do projeto CHARISMA planeja demonstrar a prova de conceito, para três principais impulsionadores: baixa latência, segurança aprimorada e acesso aberto ou multilocação³.

O projeto denominado *Dynamically Reconfigurable Optical-Wireless Backhaul/Fronthaul with Cognitive Control Plane for Small Cells and Cloud-RAN* (5G-XHaul) propõe uma solução de rede óptica e sem fio convergente capaz de conectar *Small Cells* de forma flexível à rede central [160]. O 5G-XHaul explora a mobilidade do usuário permitindo a alocação dinâmica de recursos de rede para *hotspots* de borda. Para apoiar esses novos conceitos propostos, a arquitetura de rede utiliza transceptores de onda milimétrica multiponto programáveis dinamicamente, de alta capacidade e baixa latência, cooperando com sistemas Sub-6 GHz. Utiliza também uma rede óptica compartilhada por tempo que oferece alocação de largura de banda, cooperando com redes ópticas passivas avançadas e um plano de controle cognitivo definido por software, capaz de prever a demanda de tráfego e reconfigurar os componentes da rede [160].

A arquitetura do 5G-XHaul é construída com tecnologias de *Small Cells*, C-RAN, SDN e NVF para atender à demanda por conectividade de banda larga com baixo custo e implementações flexíveis. As *Small Cells*, em conjunto com C-RAN, SDN, NVF apresentam requisitos rigorosos para a rede de transporte. Aqui, soluções sem fio flexíveis são necessárias para arquiteturas *backhaul* e *fronthaul* dinâmicas, juntamente com interconexões ópticas de alta capacidade. Os objetivos do consórcio 5G-XHaul está no desenvolvimento de novas arquiteturas convergentes ópticas / sem fio e através de algoritmos de gerenciamento de rede para cenários móveis. O projeto pretende introduzir transceptores ópticos e ondas milimétricas com funções de controle avançadas e apoiar o desenvolvimento de padrões internacionais por meio de contribuições técnicas e técnico-econômicas [160].

³ Atualizações sobre o projeto podem ser encontradas em: <http://www.charisma5g.eu/> [Online]

A arquitetura C-RAN é, em sua forma atual, baseada em amostras de rádio digitalizadas, por exemplo, *Common Public Radio Interface (CPRI)*⁴, que não é escalonável para redes de acesso 5G RAN. Consequentemente, divisões funcionais alternativas de RAN entre a célula e um local centralizado foram propostas para ganhos de centralização de compensação com requisitos reduzidos para a rede de transporte [161]. Esse trabalho levou ao padrão *enhanced CPRI (eCPRI)*, suportando uma variedade de divisões funcionais [162]. O 3GPP também adotou uma arquitetura 5G RAN capaz de suportar múltiplas divisões funcionais, onde uma estação base é dividida em uma unidade centralizada, uma unidade distribuída e uma unidade remota [161]. De acordo com [160], várias divisões funcionais RAN coexistirão no cenário formado pelas tecnologias das gerações 4G e 5G, apresentando *Distributed Architectures RAN (D-RAN)* em situações onde o *backhaul* é limitado, por exemplo, para *Small Cells, fronthaul* tradicional baseado em CPRI para redes 4G e novo *fronthaul* baseado em eCPRI para 5G RAN em futuros ambientes. Uma arquitetura de rede de transporte unificada é necessária para atender a todas essas interfaces e, ao mesmo tempo, oferecer suporte a multilocação, por meio de um conjunto coeso de tecnologias de plano de dados e um plano comum de controle e gerenciamento que minimiza os custos operacionais [160–162].

O projeto 5G-Xcast que trata diretamente de conceitos relacionados à distribuição de conteúdo em redes CDN e IDN, está alinhado com princípios e conceitos da padronização do 3GPP para a rede 5G, como interface baseada em serviços com o plano de controle definido por funções de rede virtualizadas, separação e modularização de funções e princípio de *design* com separação e controle do plano do usuário [163]. O 5G-Xcast é um projeto 5G PPP Fase II focado em capacitadores de comunicação de *broadcast* e *multicast* para 5G. O projeto analisa os requisitos para mídia em redes futuras, incluindo 4k e 8k *Ultra-High-Definition Television (UHDTV)*, *High-Dynamic Range (HDR)*, *High Frame Rates (HFR)*, realidade virtual, aumentada e mista, mídia visual 360 graus e áudio de última geração, cobrindo aspectos comerciais e técnicos [164]. O projeto parte da abordagem de padronização que é compatível com arquitetura 5G. A solução proposta no 5G-Xcast visa integrar os recursos de distribuição *multicast* e *broadcast* como um recurso de otimização integrado da rede principal. As arquiteturas de rede propostas no projeto podem suportar a transmissão terrestre-satélite [163].

O projeto pretende definir as especificações de nível superior para as camadas de transporte e aplicação necessárias para abordá-las, junto com as arquiteturas de sistema. As API comuns serão desenvolvidas para permitir um acesso contínuo a conteúdo e serviços a qualquer momento, em qualquer lugar e de qualquer dispositivo [164]. O 5G-Xcast apresenta uma abordagem prática com especificações abrangentes, provas de protótipos de conceito e demonstrações, visando colaborar com outros projetos do 5G PPP Fase II relevantes para contribuir com o 3GPP e outros órgãos padronizadores. O sistema 5G-Xcast deve explorar os modos de entrega de conteúdo para comunicações em modo *unicast*, *multicast*, *broadcast* e também *cache* local. O projeto também busca estratégias para facilitar a migração de conteúdo e serviços de mídia de sistemas legados. No desenvolvimento de soluções de distribuição de mídia, o projeto levará em conta as gamas mais amplas de uso de 5G, incluindo serviços para veículos inteligentes, segurança, saúde pública e comunicação M2M para garantir que essas áreas se encaixem em um sistema interoperado [163].

O projeto *Small Cells Coordination for Multi-Tenancy and Edge Services (SESAME)* visa trazer inovações em torno de três elementos centrais do 5G: (i) a adição de inteligência na borda da rede por meio de NFV e *Edge Cloud Computing*; (ii) evolução substancial do conceito de *Small Cell*, já dominante em 4G, mas esperado para entregar todo o seu potencial nos cenários desafiadores de 5G de alta

⁴O CPRI define uma interface entre o controle de equipamentos de rádio e o equipamento de rádio.

densidade; e (iii) a consolidação da multilocação em infraestruturas de comunicações, permitindo que várias operadoras e provedores de serviços se envolvam em novos modelos de compartilhamento de capacidade de acesso e recursos de serviços de computação [165]. O projeto SESAME propõe o conceito de *Cloud-Enabled Small Cell* (CESC), um novo tipo de *Small Cell* habilitado para multioperadores que integra uma plataforma de execução virtualizada, o *Light DC*, para a implantação de funções NFV, suportando gerenciamento auto-x (auto gerenciamento para diversas funções dependendo da demanda) para execução de novos aplicativos e serviços dentro da infraestrutura de rede de acesso [166].

O *Light DC* do projeto SESAME contará com processadores de baixo consumo de energia e aceleradores de *hardware* para operações críticas que dependam de acesso rápido e construirá uma infraestrutura de computação de ponta em *cluster* gerenciável. O gerenciamento ideal de uma implantação de CESC é um desafio chave do SESAME, para o qual uma nova orquestração, gerenciamento de NFV, virtualização de visualizações de gerenciamento por usuário, recursos self-x e técnicas de gerenciamento de acesso de rádio serão desenvolvidos. Após projetar, especificar e desenvolver a arquitetura e todos os módulos CESC envolvidos, o SESAME culminará com um protótipo com todas as funcionalidades para comprovar o conceito em casos de uso relevantes. Além disso, o CESC será formulado de forma consistente e sinérgica com outros componentes do 5G PPP por meio da coordenação com os projetos correspondentes e padronizações que possam surgir [165, 166].

Por fim, o projeto SaT5G contribuiu para a padronização de tecnologias para comunicações por satélite na *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* (CEPT) com o documento ECC FM44 *Satellite Communications* FM44/ECC PT [167], que apresenta requisitos para a integração de redes de satélites em sistemas 5G. O projeto SaT5G ainda contribuiu com o documento ITU-R WP4B do ITU que cobre elementos chave para a integração de sistemas de satélite em tecnologias de acesso de última geração [141].

3rd Generation Partnership Project

O 5G será introduzido a partir do resultado de melhorias no LTE, LTE-Advanced e LTE Pro, porém será seguido por uma grande mudança técnica, com a perspectiva de uma interface aérea totalmente nova [168]. Os trabalhos referentes ao 5G no 3GPP tiveram início em 2015, na *Release 14*, a partir do relatório técnico, *Technical Report* (TR) 22.891, mediante o estudo de viabilidade sobre novos serviços e tecnologias introdutórias ao mercado, realizado pelo 3GPP *Working Group* SA1 [169]. Com o foco nos casos de uso e requisitos que não podem ser atendidos pelo *Evolved Packet System* (EPS), o estudo investigou setenta e quatro casos de usos inspirados nos resultados publicados em documentos da *Next Generation Mobile* (NGM) [170], 5G PPP [171], IMT2020 [172], 4G Americas [173], *GSM Association* [174] e da organização de desenvolvimento de padronização japonesa ARIB [175], que ilustram as novas capacidades requeridas pelo 5G [176]. Essa especificação se consolidou a partir de outras quatro especificações abordadas nos seguintes documentos: TR 22.861 [177], TR 22.862 [178], TR 22.863 [179] e TR 22.864 [180]. Das especificações citadas, as três primeiras consideram os três casos de uso definidos pela ITU no IMT2020 e referem-se respectivamente aos cenários de: eMBB, *Critical Communications* e mMTC. Já a especificação TR 22.864 foi definida pelo 3GPP SA1 para discutir o cenário *Network Operation*, abordando os requisitos operacionais que as redes 5G têm que cumprir.

São diversos os documentos de especificações do 3GPP e os assuntos neles abordados. Sendo assim, foram selecionadas algumas especificações, julgadas essenciais para o entendimento da interoperabilidade da comunicação terrestre e por satélite nas redes 5G. Devido à quantidade considerável de especificações definidas pelo 3GPP, optou-se por iniciar os estudos dos padrões 5G a partir do docu-

mento TS 22.261 *Service Requirements for the 5G System* [121]. A especificação TS 22.261 descreve as exigências operacionais e de serviço para um sistema 5G, incluindo *User Equipment* (UE), *New Generation-Radio Access Network* (NG-RAN) e *core* da rede. Nesse documento, são identificados os requisitos de alto-nível, as capacidades básicas, os requisitos de desempenho e a segurança do 5G [121]. Os requisitos de alto nível tratam da migração para as redes de quinta geração, apontando os requisitos de interoperação entre sistemas 5G, o suporte a serviços legados e a interoperabilidade entre os sistemas 5G e 3GPP já definidos. Além disso, são definidas vinte e seis capacidades básicas para 5G, das quais investigou-se nessa dissertação, exclusivamente, as relacionadas aos temas relevantes, sendo elas:

- *Network Slicing*: permite que várias redes virtuais sejam criadas sobre uma infraestrutura física comum compartilhada. Devido à multiplicidade de casos de uso e aos novos serviços que o 5G suportará, espera-se que o fatiamento de rede desempenhe um papel crucial nas redes 5G. Tal capacidade permite que o operador forneça redes personalizadas, que apresentam requisitos diferentes sobre funcionalidade e desempenho para atender às necessidades específicas de aplicativos, serviços, dispositivos, clientes ou operadores. Esse requisito é fundamental para viabilizar *Virtual Network Operators* (VNO). Uma rede virtualizada em camadas pode fornecer a funcionalidade de uma rede completa, incluindo funções de rede de acesso via rádio e funções centrais de rede de acordo com a demanda dos usuários. Na especificação TS 22.261, há uma quantidade razoável de requisitos para o *Network Slicing* definidos com relação à gestão, às restrições e à coordenação das redes. De modo geral, o 5G deverá suportar o fornecimento de conectividade para usuários domésticos e móveis, e além disso, deverá ser capaz de suportar o subsistema multimídia de conteúdo IP, *IP Multimedia Subsystem* (IMS). Na configuração de rede 5G compartilhada, cada operador deverá aplicar todos os requisitos desta cláusula aos recursos de rede alocados.
- *Mobility Management for Multiple Diverse Applications*: o sistema 5G suportará diferentes métodos de gerenciamento para mobilidade devido sua proposta de arquitetura flexível. Essa característica permitirá suporte aos equipamentos do usuário (UE) com diferentes necessidades de mobilidade, além de, minimizar a sobrecarga de sinalização e otimizar o acesso para esses diferentes tipos de equipamentos. Os UE são classificados de acordo com seu comportamento de mobilidade, sendo categorizados como: i) totalmente imóvel, estacionário durante toda a sua vida útil, por exemplo, sensores e atuadores fixados na infraestrutura; ou ii) estacionário durante períodos ativos, porém móveis entre ativações. Os requisitos para *Mobility Management* são definidos em relação à continuidade de serviço e ao *roaming* para o UE. No que diz respeito à continuidade de serviço, um dos principais requisitos estabelecidos para o cenário 5G suportado por satélites está relacionado à continuidade do serviço entre o acesso terrestre 5G e as redes de acesso por satélite pertencentes ao mesmo operador ou detidas por dois operadores diferentes. Com relação ao *roaming*, no cenário 5G suportado por satélites, o sistema com acesso via satélite deverá permitir o *roaming* entre redes de satélites e redes terrestres 5G, além de apoiar a reeleição da rede escolhida com base na política do operador local. Já os UE com acesso via satélite deverão apoiar mecanismos de seleção de redes com manuseio adequado para sistemas 5G com acesso via satélite.
- *Multiple Access Technologies*: o sistema 5G suportará múltiplas tecnologias de acesso, entre elas, NG-RAN, WLAN, rede de acesso de banda larga fixa e rede de acesso por satélite 5G, devendo também ser capaz de suportar a mobilidade entre essas redes de acesso. A interoperabilidade entre as várias tecnologias de acesso suportadas deverá ser transparente ao usuário e os sistemas 5G serão capazes de selecionar a tecnologia de acesso padronizada 3GPP ou não 3GPP mais apropriada para um serviço, possibilitando que múltiplas tecnologias de acesso sejam usadas si-

multaneamente para um ou mais serviços ativos em um UE. Os requisitos para interoperabilidade de múltiplas tecnologias de acesso são definidos para o acesso via *Evolved Universal Mobile Telecommunication System Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), satélite e banda larga fixa. No que diz respeito ao acesso via satélite, os sistemas 5G deverão ser capazes de proporcionar serviços usando o acesso via satélite, bem como suportar configurações diferentes, em que a rede de acesso via rádio é uma rede de satélite NG-RAN, uma rede de acesso via satélite não 3GPP, ou mesmo ambas.

- *Resource Efficiency*: tratando-se da eficiência de recursos no cenário de comunicações, os sistemas 5G deverão suportar o uso de enlaces de satélite entre a rede de acesso de rádio e o *core* da rede, aprimorando o sistema 3GPP para lidar com as latências introduzidas pelo *backhaul* de satélite. Além disso, esses sistemas deverão suportar a conectividade em malha e interconectados com enlaces entre satélites.
- *Efficient User Plane*: para alcançar um plano de usuário eficiente, os sistemas 5G deverão estabelecer de forma independente, conectividade de *uplink* e *downlink* através da rede de acesso por satélite e das redes de acesso terrestre. Além disso, esses sistemas também deverão ser capazes de selecionar o enlace de comunicação fornecendo ao equipamento do usuário a conectividade que melhor satisfaz o acordo de QoS. Por fim, o UE com acesso por satélite deverá ter dupla conectividade com uma rede de acesso via satélite e uma rede de acesso terrestre.
- *Efficient Content Delivery*: serviços baseados em distribuição de áudio e vídeos como, transmissão ao vivo, realidade virtual, *streaming* entre outros serviços e aplicativos de armazenamento de dados pessoais têm sido fundamentais para o enorme crescimento do tráfego de banda larga móvel. Dentre os requisitos definidos, no que diz respeito ao sistema 5G suportado por comunicação via satélite, a rede deverá ser capaz de otimizar a entrega de conteúdo de um aplicativo de *cache* de conteúdo, aproveitando os satélites para oferecer suporte a serviços onipresentes, bem como o modo de transmissão *broadcast* e *multicast* em grandes quantidades para coberturas globais.
- *Connectivity Models*: o equipamento do usuário poderá se conectar diretamente à rede (conexão de rede direta), utilizar outro UE como um UE de retransmissão (conexão de rede indireta) ou utilizar os dois tipos de conexão. Os sistemas 5G com acesso via satélite deverão ser capazes de suportar o UE de retransmissão por acesso via satélite. Sendo assim, os UE de retransmissão com acesso via satélite deverão ser capazes de fornecer um conjunto mínimo de serviços com QoS associado aos UE remotos. Esses sistemas deverão suportar também *Mobility Management* dos UE de retransmissão e os UE remotos conectados entre as RAN 5G.
- *Extreme Long Range Coverage in Low Density Areas*: espera-se uma sociedade totalmente conectada com o advento do 5G, capaz de obter o acesso à rede em qualquer lugar, incluindo enlaces de longa distância, por exemplo, em áreas rurais extremas ou no mar. Referindo-se aos requisitos relacionados ao cenário de cobertura de longa distância, o sistema 5G deverão suportar cobertura extrema de longo alcance em até 100 km para áreas de baixa densidade, até 2 usuários / Km^2 . Taxa de transferência mínima do usuário de 1 Mbps no *downlink* e 100 kbps no *uplink*. Capacidade de transferência de células mínima de 10 Mbps (com base em uma suposição de 1 GB / mês / assinante) e por fim, suportar o máximo de 400 ms de latência *end-to-end* para serviços de voz. O Transceptor Flexível MIMO GFDM ou modem 5G *Long Range* desenvolvido pelo CRR do Inatel opera com esses requisitos e foi utilizado em testes importantes para cenários de longa

distância.

A Figura 3.3 apresenta a evolução das gerações das tecnologias de comunicações móveis de acordo com suas *Releases*, ano de lançamento, serviços e taxas de transmissão. É possível visualizar na Figura 3.3 a taxa de transmissão desde a geração que utilizava a tecnologia GSM até a taxa de transmissão pretendida pelo sistema 5G. O 5G será complementado por diversas tecnologias e proverá recursos para vários serviços. Na Figura 3.3 observa-se entre outras, a sigla para o serviço *Mission Critical Push-To-Talk* (MCPTT) que suporta a comunicação entre pares de usuários (chamadas privadas) e múltiplos usuários (chamadas em grupo), onde cada usuário tem permissão para falar, transmitir voz ou áudio, em horários específicos. O sistema permite que os participantes solicitem um *token* para comunicação pressionando um botão no dispositivo do usuário. O serviço MCPTT fornece um método para um usuário com prioridade mais alta, por exemplo, em uma situação de emergência, e também implementa um mecanismo para limitar o tempo que um usuário fala. Desta forma, quando o tempo de um usuário em uma chamada se esgota, os usuários de mesma prioridade ou menor têm a oportunidade de obter autorização para utilizar a rede. O 3GPP tem feito esforços para padronizar o serviço MCPTT. Este esforço visa alavancar as redes 4G LTE existentes e as futuras 5G de banda larga, para fornecer comunicações de voz *push-to-talk* que se aproximam do desempenho de voz *Private Mobile Radio* (PMR) e *Land Mobile Radio* (LMR). O objetivo final do 3GPP é oferecer uma alternativa econômica, aberta e interoperável para redes *Mission Critical* (MC) legadas, ao mesmo tempo em que prepara o caminho para os próximos serviços de dados e vídeos com requisitos de banda larga. Espera-se que a transição para uma rede 5G totalmente capacitada aconteça tomando-se gradualmente os equipamentos 4G.

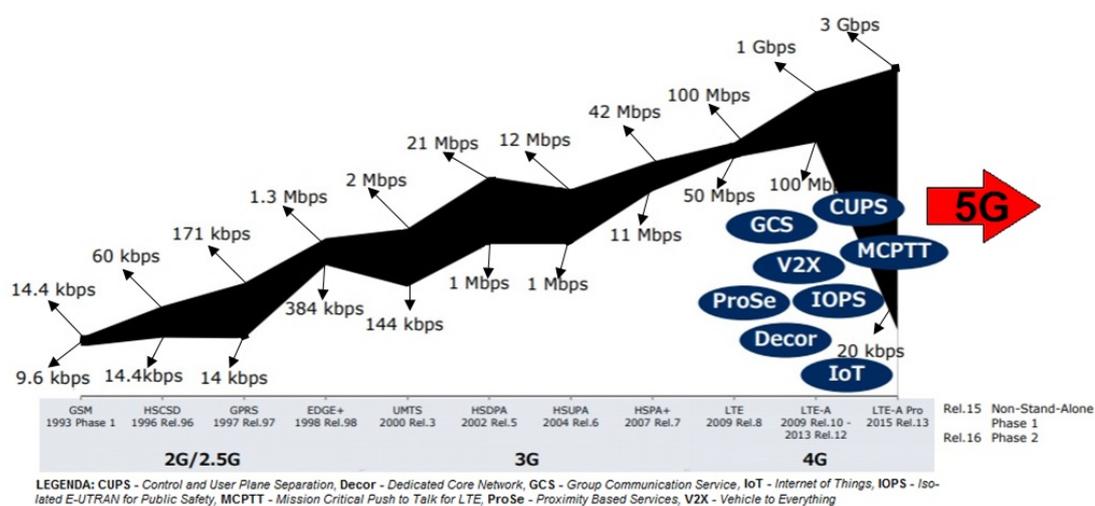


Figura 3.3: Evolução entre as tecnologias de comunicação móvel de 1G até o 5G [24, 143, 180].

Atualmente o 3GPP está desenvolvendo o padrão de interface de rádio para 5G, denominado *New Radio* (NR), que permitirá novos casos de uso, exigindo taxas de transferência de dados, latência, cobertura, capacidade e confiabilidade aprimoradas [181]. O padrão NR visa a utilização aprimorada de desempenho de energia da rede e a capacidade de explorar o espectro em bandas de frequência elevadas. Os principais componentes tecnológicos para alcançar esses objetivos incluem *Flexible Numerology* (FN), estrutura de quadro otimizada por latência, MIMO massivo, funcionamento conjunto entre bandas de alta e baixa frequência e modo de transmissões *ultra-lean* [181]. O conceito FN citado acima é diferente do conceito de numerologia para divisão de frequências encontrado em 4G. O espaçamento da subportadora não é mais fixo para 15 kHz. Em vez disso, o espaçamento da subportadora é dimensio-

nado em $2n \times 15$ kHz, onde n é o valor da numerologia, para cobrir diferentes serviços, tais como: QoS, requisitos de latência e faixas de frequência próprias para NR. Espaçamento de subportadoras de 15, 30 e 60 kHz são usados para bandas de frequência mais baixa, e espaçamentos de subportadora de 60, 120 e 240 kHz são usados para bandas de frequência mais altas. O número de *slots* aumenta à medida que o valor da numerologia, n , aumenta.

O conceito de FN pode utilizar *Mini-slots* para aplicações de baixa latência. Um *slot* padrão possui quatorze símbolos do método de codificação digital que utiliza múltiplas subportadoras OFDM. Em contraste, os *Mini-slots* podem conter 7, 4 ou 2 símbolos OFDM. Os *Mini-slots* também podem ser iniciados imediatamente, sem a necessidade de esperar pelos limites dos *slots*, permitindo a entrega rápida de cargas úteis de baixa latência. Os *Mini-slots* não são úteis apenas para aplicações de baixa latência, mas também desempenham um papel importante na coexistência e no *beamforming* do LTE/NR [168]. Os *slots* podem ser para *downlink*, *uplink* ou flexíveis e a estrutura do *slot* NR permite a atribuição dinâmica da direção do *link* em cada símbolo OFDM dentro do *slot*. Com isso, a rede pode balancear dinamicamente o tráfego otimizando sua utilização conforme a demanda de serviços [181]. Avaliações preliminares indicam que através destes componentes de tecnologia, a NR pode atingir as metas 5G [168].

De acordo com o documento do 3GPP, TR 22.822, os estudos técnicos estão focados na descrição de casos de uso e no entendimento de quais problemas técnicos devem ser resolvidos sobre 5G e cenários que envolvem satélites [24]. Esse item de trabalho 3GPP não se concentra apenas nos casos de uso eMBB, mas também procura atender aos requisitos de comunicação de tipo mMTC para conectividade híbrida. Portanto, é um momento oportuno para considerar como essas mesmas redes podem evoluir e ampliar para atender às aspirações futuras do 5G mMTC.

De acordo com o estudo do 3GPP, o objetivo do 5G é amplo e visa abordar conceitos como banda larga móvel com maiores capacidade de sistema, melhor cobertura e maiores taxas de dados [182]. A implantação de redes mMTC para permitir consumos de energia e custo de dispositivo baixos, fornecer cobertura extrema e lidar com dispositivos em quantidades massivas e comunicação URLLC, fornecendo entrega de dados com confiabilidade em combinação com latência muito baixa para aplicações específicas. Através do NR, as aplicações 5G trabalharão com operações de altas frequências e com flexibilidade de espectro [27]. Diferentemente do 4G, onde o suporte para espectro licenciado é de 3,5 GHz e espectro não licenciado é de 5 GHz, o NR poderá operar desde 600 MHz até 52,6 GHz com a operação de espectro licenciado e não licenciado, dependendo do país que o utiliza (a utilização do espectro acima de 52,6 GHz é para casos de uso específicos).

As operações em frequências de onda milimétrica, *Millimeter-Wave* (mmWave), são operações em ondas eletromagnéticas com comprimento de onda de 1 a 10 milímetros que oferecem a possibilidade de uma quantidade muito grande de espectro e largura de banda de transmissão mais ampla, permitindo uma capacidade de tráfego e taxa de dados alta [183]. No entanto, o 3GPP adverte que a utilização de frequências mais altas, como as acima do 6 GHz, estão associadas à maior atenuação do canal de rádio, limitando a cobertura de rede [182]. E, embora isso possa ser parcialmente compensado por meio de técnicas de transmissão e recepção avançadas de múltiplas antenas, habilitada pelo tamanho menor dos componentes das antenas, uma desvantagem de cobertura substancial permanece, especialmente em configurações *non-line-of-sight* e condições de propagação *outdoor-to-indoor*. Para resolver o desafio da operação em bandas de frequência mais altas, que se mostram um componente crítico para comunicação sem fio na era 5G, o 3GPP sugere a operação conjunta de espectro inferior, por exemplo, abaixo de 3 GHz, e superior com as mmWave para fornecer benefícios substanciais. Com a operação conjunta uma

camada de frequência mais alta com acesso a uma grande quantidade de espectro será capaz de fornecer serviços a uma grande fração de usuários, apesar da cobertura mais limitada. Isso reduzirá a carga no espectro de frequência mais baixa com restrição de largura de banda, permitindo que o uso se concentre nos usuários em pior caso [182].

O NR está sendo construído sobre princípios técnicos como *design Ultra-Lean*, Flexibilidade e *Forward Compatibility* visando melhor performance da rede [65]. As redes celulares transmitem sinais em intervalos regulares, mesmo quando não há dados para transmitir para nenhum usuário. Sinais de referência, sinais de sincronização e informações de transmissão do sistema são exemplos de tais transmissões. O conceito de *design Ultra-Lean* refere-se a minimizar essas transmissões que estão sempre ativas. A rede deve transmitir sinais apenas quando necessário. O *design Ultra-Lean* melhora significativamente a eficiência energética da rede, que é vital para o conceito de sociedade sustentável, reduzindo as despesas operacionais e permitindo novas implementações de rede conforme haja necessidade. O *design Ultra-Lean* reduz a interferência em condições de alta carga de tráfego e aprimora a compatibilidade com versões futuras do NR para modificar as transmissões sempre ativas, também chamadas de *always-on*, sem prejudicar o desempenho dos dispositivos legados [65]. Sob as condições típicas de tráfego atuais, tais transmissões constituem apenas uma pequena parte das transmissões gerais da rede e, portanto, têm um impacto relativamente pequeno no desempenho da rede. No entanto, no futuro, pode-se esperar que a carga média de tráfego por nó de rede seja relativamente baixa em redes muito densas implantadas para taxas de pico muito altas. Isso torna as transmissões sempre ativas uma parte mais substancial das transmissões de rede globais. As transmissões *always-on* têm dois impactos negativos: elas impõem um limite superior ao desempenho energético de rede alcançável; e causam interferência em outras células, reduzindo as taxas de dados possíveis. O princípio de *design Ultra-Lean* tem como objetivo minimizar as transmissões *always-on*, permitindo assim um melhor desempenho energético e altas taxas de dados. O NR possui quatro sinais de referência principais: sinais de referência de demodulação, sinais de referência de rastreamento de fase, sinais de referência de sondagem e sinais de referência de informação de estado do canal. Esses sinais são transmitidos apenas quando necessário, tornando o *design NR ultra-lean* [65].

O sistema 5G é uma evolução dos sistemas de comunicação móvel 4G e conseqüentemente, a arquitetura de segurança 5G foi projetada para integrar uma segurança equivalente a encontrada no 4G [184]. Além disso, a reavaliação de outras ameaças de segurança, como: ataques a interfaces de rádio, plano de usuário, autenticação, privacidade, repetição de mensagens e problemas de segurança entre operadores, também foram considerados para 5G que levará melhorias de segurança adicionais. A primeira tecnologia padronizada pelo 3GPP para a cobertura 5G completa foi a NR *Non-Standalone* (NSA), também conhecida como *E-UTRA-NR Dual Connectivity* (EN-DC) ou Arquitetura Opção 3 [185].

A principal característica do NSA é a capacidade de utilizar a infraestrutura existente de LTE e EPC, disponibilizando assim a nova tecnologia de rádio baseada em 5G sem a substituição completa da rede. A EN-DC usa LTE como tecnologia de acesso de rádio principal, enquanto a nova tecnologia de acesso de rádio (ou seja, NR) serve como tecnologia de acesso de rádio secundária. Exceto para negociação de capacidade, os procedimentos de segurança para EN-DC seguem basicamente as especificações para segurança de conectividade do 4G. Um *Master eNB* (MeNB) verifica se o UE tem capacidades 5G NR para acessar o *Secondary gNB* (SgNB), isto é, a estação base 5G. A verificação de recursos e direitos de acesso garante que o padrão seja compatível com versões futuras, pois os UE com diferentes recursos, incluindo recursos de segurança, podem ingressar na rede. Durante a conexão, o MeNB envia a chave de autenticação a ser usada pelo SgNB para comunicação segura sobre NR e o UE também obtém a mesma

chave. Ao contrário da conectividade dupla em redes 4G, as mensagens de controle, *Radio Resource Control* (RRC), podem ser trocadas entre o UE e o SgNB, assim como as chaves usadas para proteção de integridade e confidencialidade de mensagens RRC, bem como dados do plano de usuário, *User Plane* (UP). Embora a proteção de integridade para dados do UP seja suportada na rede 5G, ela não será usada no caso EN-DC, o uso da proteção de confidencialidade é opcional para UP e RRC [185].

Em relação aos protocolos, as especificações 5G foram publicadas como documentos na série 3GPP 38 [186]. O documento TS 38.211 trata da especificação de canais físicos e de modulação. O escopo estabelece as características dos canais físicos, geração de sinais e modulação da camada física, especificando [187]: (i) definição dos canais físicos, compartilhamento de sinais e sinais de referência de *uplink* e *downlink*; (ii) estrutura de quadros e recursos físicos; (iii) mapeamento de modulação BPSK ou QPSK; (iv) geração de sinal OFDM; e (vi) mapeamento e pré-codificação de sinais entre camadas.

European Telecommunications Standards Institute

O instituto europeu de padronização para telecomunicações possui várias tecnologias que serão integradas em sistemas 5G, sendo algumas delas: *Network Functions Virtualization* (NFV) [188], *Multi-access Edge Computing* (MaEC) [189], *Millimetre Wave Transmission* (mWT) [190] e *Next Generation Protocols* (NGP) [191]. De acordo com o modelo de informação descrito em ETSI NFV *Network Slicing* [192], o NFV é um capacitador de tecnologia essencial para o 5G. A rede 5G evoluída será caracterizada por redes móveis e fixas convergentes e resilientes baseadas em tecnologias NFV e SDN. Essas redes serão capazes de suportar funções de rede e aplicativos que abrangem diferentes domínios, incluindo áreas remotas e locais [192]. Isso requer integração com os sistemas de rede existentes, ampliando com eficiência o suporte de rede e *backhaul*, e implementando o gerenciamento de serviços de ponta a ponta. Objetivos como, alta escalabilidade, latência ultra-baixa, capacidade de suportar um grande número de sessões simultâneas, a computação de borda e a segurança, devem ser levados em conta no contexto da virtualização. Além disso, dado que o objetivo do NFV é desacoplar as funções de rede do *hardware*, e as funções de rede virtualizadas são projetadas para rodar em um ambiente de nuvem genérico, os princípios de *design* nativos da nuvem e os modelos de licenciamento compatíveis com nuvem são assuntos críticos [192].

Os principais recursos do NFV que o ETSI aborda para realizar casos de uso 5G são: *Network Slicing*, Princípios de *Design* Nativos de Nuvem, *End-to-End Service Management*, *Edge Computing*, *Cloudification of the Radio Access Network*, *Multi-site/domain Services*, Gerenciamento de Licença NFV, Segurança, Confiabilidade e Escalabilidade [193]. Do ponto de vista de uma operadora de rede, o *Network Slicing* é uma construção de rede orientada a serviços, fornecendo rede sob demanda para aplicativos simultâneos. *Network Slicing* pode ser visto como uma implementação do paradigma “Rede como Serviço”, em que uma rede comum é capaz de fornecer e expor partes simultâneas, isoladas, particionadas e autônomas para suportar diferentes tipos de serviços de acordo com a demanda e de maneira eficiente para fornecer a QoS requerida [193].

De acordo com a visão de padronização do ETSI, a *Cloud Radio Access Network* (CRAN) e a *Multi-access Edge Computing* (MaEC) são tecnologias altamente complementares. O MaEC é uma tecnologia emergente atualmente reconhecida como um facilitador chave para redes 5G [165]. Compatível com as atuais redes 4G, a MaEC abordará muitos usos importantes do sistema 5G, motivados pela difusão massiva das comunicações M2M e consumo de conteúdos diversos. A CRAN é uma candidata às técnicas de rede de acesso da próxima geração que pode resolver o problema dos operadores de telefonia móvel em relação aos crescentes gastos de capital, despesas operacionais e um baixo crescimento de renda [194].

A estrutura lógica da CRAN pode ser configurada para trabalhar com planos físico, de controle e um plano de serviço que enfatiza a noção de nuvem de serviços, agendamento e gerenciamento de recursos orientados a entrega de serviços, o que facilita a utilização de novas técnicas de comunicação e computação [194]. Colocar as duas tecnologias, CRAN e MaEC, em conjunto ajuda a tornar a economia de cada uma delas significativamente mais cogitada [195]. Utilizar a CRAN e a MaEC ajuda um operador de rede móvel ou *Mobile Network Operator* (MNO), a suportar alguns dos principais aplicativos 5G que não poderiam ser suportados de outra forma [195]. A visão de MNO para o desafio na ativação de aplicativos associados aos casos de uso 5G é o investimento significativo necessário para implantar uma rede suficientemente extensa de *Points-of-Presence* (PoP) de computação de borda, para tornar-se rentável desenvolver aplicativos ao explorar a infraestrutura de processamento de dados [195].

Uma maneira de mitigar o custo e o risco significativo de investimento estratégico é a implantação da MaEC em conjunto com a implantação de uma CRAN [195]. O custo de fornecer o poder de processamento adicional em um conjunto já planejado de pontos de processamento centralizados, por exemplo, um conjunto de *Base Band Units* (BBU) é significativamente menor do que uma implantação de MaEC independente [195]. No entanto, para perceber essas vantagens, as MNO precisam superar os desafios associados à localização, além de maximizar o retorno que pode ser obtido com a MaEC. Além disso, o conjunto das tecnologias, como, a API de informações da rede, API de localização, API de identidade UE e API de gerenciamento de largura de banda pode ativar os serviços MaEC e permitir que os aplicativos explorem as informações do CRAN. As operadoras de telefonia móvel poderiam, por exemplo, resolver as complexidades de gerenciamento associadas a várias camadas de *Infrastructure-as-a-Service* (IaaS), enquanto monetizam serviços como o *Radio Network Information Service* (RNIS), que são exclusivos das nuvens de borda do MaEC [148].

De acordo com o documento ETSI GE MEC 003 [148], o RNIS é um serviço que fornece informações relacionadas à rede de rádio para aplicativos de borda móvel e para plataformas móveis. A gerência das informações da rede de rádio pode ser ajustada com base em parâmetros. Esses parâmetros podem ser: informações das células, informações por equipamento do usuário UE ou informações por classe de *Quality Class Indicator* (QCI). O conceito de granularidade da rede é abordado nesse documento e se caracteriza pela extensão à qual a rede é dividida em partes pequenas. É a extensão até a qual uma rede grande é subdividida. O serviço RNIS pode ser usado pelas aplicações e plataforma de borda móvel para otimizar os serviços existentes e fornecer novos tipos de serviços baseados em informações atualizadas sobre condições de rádio [148]. Informações que podem ser fornecidas por este serviço são: (i) atualizações sobre as condições da rede de rádio em tempo real; (ii) informações de medição relacionadas ao plano do usuário com base nas especificações 3GPP; (iii) informação sobre UE ligados aos nós de rádio associados ao usuário de borda móvel, ao seu contexto de UE e aos portadores de acesso de rádio relacionados e (iv) alterações nas informações relacionadas aos UE conectados aos nós de rádio. Um exemplo de aplicativo de borda móvel que usa informações de rede de rádio para otimizar serviços atuais é a orientação de taxa de transferência de vídeo. Na orientação de taxa de transferência de vídeo, um aplicativo de borda móvel de análise de rádio usa serviços da MaEC para fornecer ao servidor de vídeo de *backend* uma indicação quase em tempo real do *throughput* estimado disponível na interface de *downlink* de rádio no próximo instante. Em seguida, o aplicativo de análise de rádio de orientação de processamento calcula o rendimento com base nas informações de rede de rádio necessárias obtidas de um serviço de borda móvel em execução no UE de borda móvel [148].

A especificação técnica ETSI TS 182 032 [138] define que as redes CDN atualmente implementadas são baseadas em uma ampla rede de nós de distribuição de conteúdo controlada por uma entidade funci-

onal que cuida das decisões finais da rede. A entidade funcional de controle mantém o controle de todos os locais de conteúdo, gerencia a distribuição entre os nós de distribuição ou *clusters* e também decide qual nó de distribuição deve atender a uma solicitação do cliente [138]. A solução definida pelo ETSI é interconectar duas CDN e compartilhar a infraestrutura existente para entrega de conteúdo. A interconexão de redes CDN é obtida interconectando as entidades funcionais centralizadas que representam a lógica por trás das decisões em cada CDN e é denominado de Interconexão de Rede de Entrega de Conteúdo, *Content Delivery Network-Interconnection* (CDN-I). O documento ETSI TS 182 032 [138] define a arquitetura e os princípios da interconexão entre CDN de acordo com os requisitos apresentados no ETSI TS 102 990 [196], que também contém casos de uso informativos para interconexões de CDN. A especificação ETSI TS 102 990 [196] apresenta tópicos para distribuição de áudio, técnicas de *broadcast*, regulamentação *multimedia*, distribuição de TV e vídeo. Outras fontes de informações relevantes sobre tópicos de interconexão de CDN são os seguintes documentos: ETSI TS 182 019 [197] e TR 102 688-9 [198] e IETF WG CDN-I RFC 6707 [199].

Internet Engineering Task Force

O *Internet Engineering Task Force* (IETF) é o principal órgão de padrões para a Internet, sendo responsável pelo desenvolvimento de padrões por meio de processos abertos. A IETF é uma grande comunidade internacional aberta de designers, operadoras, fornecedores e pesquisadores de rede preocupados com a evolução e com o bom funcionamento da arquitetura da Internet. O trabalho técnico do IETF é feito em grupos de trabalho, que são organizados por tópico em várias áreas. O documento de especificação IETF RFC 7252 [200] define o protocolo *Constrained Application Protocol* (CoAP), que visa atender dispositivos com restrição de energia em comunicações M2M e IoT. O protocolo CoAP é utilizado na camada de aplicação baseado no *User Datagram Protocol* (UDP), projetado para comunicações M2M e IoT, destinado a dispositivos com recursos restritos em redes IP. Sendo assim, o CoAP é projetado para permitir que dispositivos simples e restritos se unam à Internet, mesmo através de redes restritas com baixa largura de banda e baixa disponibilidade [200]. O CoAP funciona como o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), que é o protocolo de comunicação na camada de aplicação segundo o Modelo OSI. O CoAP pode ser utilizado em sistemas de informação de hipermídia, distribuídos e colaborativos, para dispositivos restritos, comunicação M2M e permitindo que sensores ou atuadores se comuniquem, sendo controlados e transmitindo seus dados como parte de uma solução convergente com 5G [201]. O protocolo CoAP é projetado para comunicações de alta confiabilidade, baixa largura de banda e para utilização em aplicações de alto congestionamento por meio de seu consumo de energia baixo e baixa sobrecarga de rede. As características eficientes do protocolo podem permitir que dispositivos operando com qualidade de sinal ruim enviem seus dados de forma confiável ou permitam que um satélite em órbita mantenha sua comunicação distante com sucesso. Aproveitando a capacidade do CoAP de funcionar em dispositivos pequenos, espera-se com o protocolo o suporte a redes com bilhões de nós [201].

O IETF está trabalhando para promover a adoção do protocolo CoAP, que assim como o protocolo baseado em TCP, *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT), projetado pela IBM, pode ser utilizado em comunicações via satélite [202]. No projeto *Demonstrator of Light-Weight Application and Transport Protocols for Future M2M Applications* (M2MSAT) da *European Space Agency Advanced Research in Telecommunications Systems* (ESA ARTES), protocolos como o CoAP e o MQTT são utilizados para revisar criticamente, propor melhorias e avaliar, em um *testbed* de rede de satélites, os proeminentes protocolos de aplicação e transporte *light-weight* propostos para as comunicações suporte

do 5G como a M2M e a IoT [202]. O principal objetivo do projeto era identificar possíveis otimizações, modificações e procedimentos de convergência de camada inferior para os protocolos selecionados para desempenho aprimorado em cenários de rede de satélite suportando comunicações entre máquinas e redes de sensores. O cenário final foi elaborado e os protocolos de otimização foram selecionados. Para cada um dos protocolos, CoAP e MQTT, as otimizações identificadas foram definidas e analisadas teoricamente. O ambiente de simulação foi colocado em prática e o teste básico de ponta a ponta funcional do ambiente foi realizado [202]. Em paralelo, as organizações de padronização, IETF, 3GPP e ETSI foram informadas. Os recursos do protocolo, conforme previsto atualmente, são o aumento da taxa de transferência por dispositivo, definido como o número de transmissões de mensagens por segundo, o aumento dos tamanhos de rede com os mesmos recursos da rede de satélites e a redução dos atrasos na transmissão. Além disso, os procedimentos de integração de protocolos projetados visam a exploração de recursos *multicast* satelitais, a prevenção ou integração de múltiplos protocolos de *loop* fechado de camada de enlace, agregação de tráfego, compressão de cabeçalho quando possível e diminuição de falhas de rede.

Outra especificação válida é a IETF RFC 8041 [203], documento que discute os casos de uso e a experiência operacional com o protocolo *Multipath TCP* (MPTCP) em redes de distribuição de conteúdo. O IETF RFC 8041 lista vários casos de uso proeminentes nos quais o MPTCP foi considerado e está sendo usado. O documento também fornece informações sobre algumas heurísticas e decisões que ajudaram a realizar esses casos de uso e sugere possíveis melhorias [203]. O MPTCP visa permitir que o protocolo TCP possa usar vários caminhos para maximizar o uso de recursos e aumentar a redundância para a entrega de conteúdo de vídeo [204]. O projeto 5G-Xcast faz uso do protocolo MPTCP em alguns cenários de teste [204, 205]. No documento [206] são apresentados os cenários em que a estrutura de gerenciamento de mobilidade 5G é diferente das gerações celulares anteriores e descreve como 5G pode se beneficiar da adaptação de implementações de MPTCP para aspectos de protocolo no sistema 5G. Este documento também descreve como o MPTCP pode ser aproveitado nas especificações do sistema 5G [206].

O IETF também publicou a RFC 8257 [207], que define um esquema de controle de congestionamento TCP para o tráfego de *data centers* chamado *Data Center TCP* (DCTCP). O DCTCP estende o processamento *Explicit Congestion Notification* (ECN) para estimar a fração de *bytes* que encontram o congestionamento em vez de simplesmente detectar que algum congestionamento ocorreu. O DCTCP, em seguida, dimensiona a janela de congestionamento do TCP com base nessa estimativa. A ECN é uma extensão dos protocolos IP e TCP que permite a notificação de ponta a ponta do congestionamento da rede sem descartar pacotes [207]. A ECN é um recurso opcional que pode ser usado entre dois pontos de extremidade habilitados para ECN quando a infraestrutura de rede subjacente também a suporta. O DCTCP pode ser considerado porque mantém a rede operando com baixa latência e alta taxa de transferência com comutadores de *buffer* superficial [208]. Esse método pode ser dimensionado para redes de nível global com a utilização de satélite, resultando em maiores reduções no atraso durante a transferência de dados [208].

3.2.4 Conexão via Satélite para Distribuição de Conteúdos em Redes 5G

Nas próximas subseções será apresentado como as tecnologias emergentes de distribuição de conteúdo se relacionam à comunicação por satélite para suportar as redes 5G, considerando possíveis cenários de uso, serviços, aplicações finais e a interoperabilidade entre os conceitos abordados na dissertação.

Tecnologias Emergentes e a Relação com 5G Híbrido

Os requisitos desafiadores do 5G, do ponto de vista de aplicativos e arquitetura, motivam a necessidade de explorar a viabilidade de fornecer serviços através de novas arquiteturas de rede. Como o 5G propõe a divisão de rede centrada em aplicativos, que permite o uso de novos planos de dados realizáveis em uma infraestrutura programável de computação, armazenamento e transporte, redes de distribuição de conteúdo e centradas em informações formam uma arquitetura de rede candidata para atingir os objetivos 5G. Isso pode coexistir com os serviços IP de ponta a ponta em operação conjunta com o 4G oferecidos atualmente.

No cenário atual, o conteúdo multimídia é distribuído via redes de transmissão como a Internet, televisão via satélite e através de dispositivos móveis. Os métodos de entrega incluem *broadcast*, *unicast*, por exemplo, serviços de *streaming* 3G, *multicast* e *peer-to-peer* (P2P), mas a experiência é raramente homogênea e perfeita para os usuários, com algumas exceções. A entrega de conteúdo, por sua própria natureza, também inclui várias restrições e regras relativas aos direitos de uso. Os meios de comunicação tradicionalmente têm seus próprios padrões de controle, baseados em diferentes requisitos comerciais.

A convergência entre os dois mundos para a entrega de conteúdo resulta em uma proliferação de opções e especificações técnicas, o que resulta em vários padrões que não operam entre si e na falta de modelos de negócios claros apoiados por uma tecnologia aceita [38]. Além disso, soluções comerciais desenvolvidas por diferentes fabricantes do mercado não interoperam entre plataformas [38]. O ponto crucial é que, em um extremo, os provedores de conteúdo enfrentam o desafio de fornecer diferentes formatos de conteúdo para os vários canais de distribuição, o que gera custos muito altos, enquanto no outro extremo, a adesão dos usuários como clientes permanece bem abaixo das expectativas [38]. Autores apontam para a necessidade de interoperabilidade e soluções padronizadas para a distribuição de mídia e comunicação via 5G terrestre/satélite que atendam realmente aos provedores de conteúdo e às necessidades dos usuários finais [14]. M. Corici *et al.* [209], resume em seu trabalho os principais benefícios da comunicação por satélite dentro de um ambiente 5G convergente padronizado. Aponta os elementos específicos necessários desses benefícios com as características de uma rede via satélite para 5G.

A rede 5G deverá ser capaz de fornecer serviços com acesso via satélite, além de dar suporte à continuidade do serviço entre o acesso terrestre 5G e as redes de acesso baseadas em satélite pertencentes a um mesmo operador ou por acordo entre operadores [38], [121]. A visão do 3GPP em relação ao satélite para atender a rede 5G é sobre empresas e organizações convencidas do potencial de mercado para tornar operacional a infraestrutura de rede terrestre e de satélite integrada no contexto de 5G. Os papéis e benefícios dos satélites em 5G foram estudados no 3GPP *Release 14*, mais especificamente em TS 22.261, “*Service requirements for next generation new services and markets; Stage 1*” [121], reconhecendo o valor agregado que a cobertura de satélite traz, como parte da combinação de tecnologias de acesso para 5G, especialmente para aplicações industriais e de missão crítica onde a cobertura onipresente é essencial.

Além dos satélites, as redes não-terrestres, *Non-terrestrial Networks* (NTN), são redes, ou segmentos de redes, que utilizam veículos aerotransportados ou espaciais para transmissão [142]. Veículos aerotransportados podem ser definidos como plataformas de alta altitude, *High Altitude Platforms* (HAP) que abrangem sistemas de aeronaves não tripuladas, *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), incluindo UAS com cabo, mais leve que o ar e mais pesado que o ar, todos operando em altitude tipicamente entre 8 e 50 km, quase estacionários [142]. As redes não-terrestres estão incluídas no TR 38.811 “Estudo da NR para

suportar redes não-terrestres” [142]. O seu objetivo segundo as especificações do 3GPP, são: (i) ajudar a promover o desenvolvimento do serviço 5G em áreas não atendidas ou carentes de cobertura para melhorar o desempenho de redes terrestres; (ii) reforçar a confiabilidade, fornecendo continuidade de serviço para o equipamento do usuário ou para plataformas móveis (por exemplo, veículos de passageiros, aeronaves, navios, trens de alta velocidade e ônibus); (iii) aumentar a disponibilidade do serviço em todos os lugares, especialmente para comunicações críticas, futuras comunicações ferroviárias, marítimas e aeronáuticas; e (iv) habilitar a escalabilidade da rede 5G por meio do fornecimento de recursos eficientes de difusão seletiva, a difusão para entrega de dados em direção às bordas da rede ou até mesmo diretamente ao equipamento do usuário.

O objetivo da TR 38.811 é estudar modelos de canal, definir os cenários de implantação, bem como os parâmetros do sistema e identificar e avaliar possíveis áreas-chave de impacto do NR [142]. Em uma segunda fase, soluções para os principais impactos identificados em arquiteturas e protocolos de RAN serão avaliados e definidos. Um segundo item de estudo, denominado “Estudo Sobre o Uso de Acesso por Satélite em 5G” está sendo tratado no grupo de trabalho SA1. O documento levará à entrega do correspondente relatório técnico TR 22.822, como parte do *Release 16* [143]. O estudo identificará casos de uso para a prestação de serviços ao considerar a integração de componentes de acesso 5G baseados em satélite.

O papel dos satélites para 5G foi estudado no trabalho de [210], que pesquisa sobre a contribuição que os satélites podem ter para a realização dos indicadores de desempenho para 5G, tais como, onipresença, mobilidade, simultaneidade de transmissão e segurança [210]. Conceitos de *slicing* de rede e multialocação de serviços, que tem sido aplicado com sucesso à tecnologias de computação em nuvem, estão atualmente sendo estendidas para o domínio de rede [211–213]. O *slicing* de rede basicamente permite ao operador de rede fornecer recursos virtuais dedicados com funções associadas a um serviço ou a um usuário [211–213]. Como consequência, várias redes virtuais podem ser criadas sobre uma infraestrutura física compartilhada. Esse padrão de comunicação explora conceitos de SDN e NFV [213]. As redes definidas por *software* permitem o desacoplamento entre o plano de dados e o plano de controle nos nós da rede, com um controlador central que estabelece dinamicamente as regras de encaminhamento. Os nós da rede que apenas aplicam as regras criadas. A virtualização das funções de rede prevê a instanciação, o mesmo que, a criação de um objeto, como por exemplo, alocar espaço virtual para representação de algo físico. As funções de rede virtualizadas operam como módulos de *software* em execução em *hardware* compartilhado, melhorando assim a utilização de recursos. Assim, o SDN pode ser usado para habilitar dinamicamente o NFV para configurar o encaminhamento dos dados na rede visando melhor eficiência [214].

Lançada pela empresa ORBCOM, a rede OG2 é a primeira constelação satelital totalmente dedicada à aplicações M2M [215]. A rede OG2 é composta por satélites do tipo *Low Earth Orbit* (LEO) proporcionando comunicação M2M confiável e rentável para áreas remotas [215]. Iridium é outra empresa que têm investido neste cenário. A empresa possui uma rede composta de sessenta e seis satélites LEO, denominada “Iridium NEXT”, que fornece cobertura global de voz e dados móveis de alta qualidade com capacidade de transferências de dados de até 1,4 Mbps [216]. Recentemente, a Iridium lançou uma solução para redes de comunicação de vários dispositivos, o Iridium Edge. Aprovado para uso diversos mercados no mundo, esta solução permitirá que dispositivos de monitoramento baseados em satélite de localização fixa adicionem conectividade por satélite para aplicações baseadas em celulares [216].

Outra linha de pesquisa relevante considera o *Cognitive Radio* (CR) como uma tecnologia promissora para o uso eficiente do espectro em comunicações sem fio [217]. O CR pode ser usado para resolver

o problema da escassez do espectro ou para explorar recursos de frequência subutilizados para o advento do 5G. O usuário secundário, *Second User* (SU) pode explorar o espectro do usuário primário, *Primary User* (PU), desde que a interferência do SU para o PU esteja abaixo de um certo limite. Os limites fundamentais de capacidade do CR em ambientes de desvanecimento foram investigados e estendidos ao caso com informações de canais imperfeitos em [217]. O ganho de capacidade da taxa adaptativa e o controle de potência no usuário secundário também foram analisados. A probabilidade de produção e indisponibilidade de redes CR foi avaliada quando o *feedback* de *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) foi utilizado [9, 217]. Recentemente, tem havido muito interesse no uso de CR em redes de satélites para melhorar a utilização do espectro. Em [181], sequências de saltos de frequência para transmissão via satélite são ajustadas dinamicamente pela detecção da qualidade do canal usando um módulo CR colocado em um sistema de satélite. Em [168], um algoritmo de detecção de espectro cooperativo e um protocolo de roteamento foram propostos para comunicações móveis em redes de satélites baseadas em *cluster*.

O trabalho de Heyn, Schlichter, Zia e Ilangovan [218], apresenta os casos de uso e desenvolvimentos de teste do projeto “*The role of satellite in collaborative adaptive bit rate streaming services*”(SCORSESE), que explora o papel dos satélites em serviços de *streaming* de taxa de bits adaptáveis em redes 5G híbridas. O projeto SCORSESE desenvolve uma prova de conceito, *Proof of Concept* (PoC), de ponta a ponta para avaliar e quantificar os aprimoramentos de desempenho alcançados pelas arquiteturas integradas, incluindo satélite. A avaliação de dois cenários é apoiada pelo PoC, para satélite como *backhaul* híbrido para redes 5G e satélite como *backhaul* de *gateways* domésticos.

De acordo com a leitura do artigo [218], a crescente disponibilidade de conexões de rede de banda larga fixas e móveis mais acessíveis está mudando rapidamente os hábitos de consumo relacionados ao conteúdo multimídia. Esses serviços multimídia são aplicativos exigentes, tanto em termos de taxa de transferência quanto de QoS, e podem ocasionalmente saturar o núcleo das redes de banda larga durante os picos de tráfego ou em grandes eventos. Assim, nos últimos anos, inovações foram introduzidas para descarregar o *backbone* da rede [218]. Em particular, a implantação de CDN, aproximando o conteúdo dos usuários finais, permite lidar com os requisitos típicos de tráfego atuais. É evidente que o uso de entrega via satélite pode ter um papel crucial no encurtamento do caminho entre os provedores de conteúdo e os nós de borda CDN, possibilitado pelas capacidades de transmissão dos satélites. No entanto, até agora, as várias tecnologias capacitadoras evoluíram de forma independente, como ecossistemas separados e com diferentes modelos de negócios. A oferta colaborativa de serviços de *streaming* de *bitrate* adaptável de vídeo através de redes satelitais e terrestres integradas pode criar novas oportunidades de negócios para provedores de satélite, permitindo que emissoras e provedores de serviços aprimorem seus serviços de vídeo com diferentes serviços multimídia para usuários fixos e móveis [218].

Vários cenários de implantação integrados para entrega de vídeo colaborativo foram identificados no SCORSESE. Dois deles foram priorizados de acordo com um fator análise de tráfego de rede, viabilidade técnica, viabilidade econômica e um fator de convergência: o cenário S1 está definindo o satélite como um *backhaul* híbrido para redes 5G e o cenário S4 usa o satélite como *backhaul* híbrido de *gateways* de usuário final. A PoC do projeto SCORSESE apresenta uma arquitetura que permite a simulação dos cenários S1 e S4, bem como o monitoramento e a configuração de todos os componentes do *testbed*. O que foi necessário para simular os cenários em que os dados são distribuídos para os usuários usando células móveis, são: (i) emulador de *headend* combinado, escudo CDN e entidade de roteamento; (ii) modelo de conexão por satélite e emulador, incluindo *gateways* IP/DVB e DVB/IP⁵;

⁵A sigla DVB significa *Digital Video Broadcasting* ou Transmissão de Vídeo Digital.

(iii) rede de borda 5G incluindo *cache* local; (iv) emulador de link terrestre 5G; e (v) emulador de terminal 5G. Para o cenário S4, as redes de borda 5G e a rede 5G são substituídas por um *gateway* doméstico que consiste em um servidor *Web*, substituição de *proxy* e *cache* com lógica de pré-busca e um emulador de terminal de usuário para o tráfego de vídeo. O *gateway* doméstico está localizado nas instalações do usuário e possui duas conexões para receber os dados da origem: o satélite e um *link* de rede fixa, como por exemplo, DSL. Como o módulo de enlace de satélite, o *gateway* doméstico é dividido em duas partes para integração rápida, um servidor da *Web* com *proxy* e a lógica de substituição e pré-busca de *cache*.

Os dados provenientes do satélite serão armazenados em *cache* dependendo do espaço disponível e da lógica de substituição, levando em conta o histórico dos vídeos visualizados [218]. Os pedidos vindos do emulador de terminal do usuário serão servidos pelo servidor da *Web* e pelo *proxy* em um *cache* para ser encaminhado para o emulador de borda CDN através do enlace de rede fixa terrestre. Uma visão geral do estudo sobre o papel do satélite em serviços colaborativos de *streaming* de taxa de bits adaptativos foi apresentada nesse artigo [218]. O estudo propõe soluções que permitem a entrega de vídeo eficiente para os usuários, explorando as sinergias de CDN de próxima geração, redes terrestres e de satélite. As sinergias são exploradas propondo cenários integrados de entrega terrestre por satélite. Uma visão geral desses cenários integrados foi apresentada. Além disso, o PoC demonstra os aprimoramentos de desempenho alcançados pelo cenário integrado, incluindo satélite, foi descrito.

Historicamente, em gerações de redes móveis anteriores, a integração dos serviços de comunicação por satélite se baseava em soluções sob medida proprietárias no nível de rede móvel para comunicações remotas [9]. Na maioria das vezes, os satélites de telecomunicações eram considerados independentemente das redes terrestres, e em raros casos em que as soluções híbridas foram propostas, a rede de satélites foi usada principalmente para fornecer *backhaul* a algumas células individuais remotas e pouco acessíveis como uma rede de transporte simples, não flexível e potencialmente bastante cara [9]. Com o aumento em larga escala de redes de comunicações móveis, ubiquidade, conectividade e consumo de conteúdo, como o 5G, a visão do projeto SaT5G é fomentar o desenvolvimento de uma atraente solução *plug and play* para 5G suportada por satélite, para operadores terrestres e fornecedores de rede para acelerar a implantação 5G [219].

O conceito apresentado em [219] requer grandes desafios a serem abordados, tais como: i) explorar os recursos do suporte de satélite, por exemplo, transmissão, onipresença e confiabilidade, enquanto atenua suas restrições inerentes como latência de propagação na topologia de rede autônoma ou de enlaces múltiplos; ii) projetar soluções que visem arquiteturas 5G satélite/terrestres integradas por meio da adoção e integração dos principais recursos do 5G, como virtualização do segmento terrestre e a adoção de protocolos padronizados; iii) garantir a integração contínua do suporte por satélite no 5G nos níveis de segurança e gerenciamento de rede; e iv) ter um papel ativo nos esforços de padronização do 3GPP e do ETSI para promover a inclusão de satélites no ecossistema 5G como uma tecnologia de rede de acesso chave para cumprir a implementação das novas soluções em redes em nossa sociedade [219].

Cenários de Uso

O documento de recomendação ITU-R M.2083-0 [140] mostra que a computação presente nas bordas da rede é vista como necessidade para habilitar certas classes de casos de uso definidas para 5G. Os casos de uso 5G considerados pelo 3GPP, pelo ETSI e também pelo ITU, foram classificados em três tipos de serviço [27] [195] [140]: eMBB, URLLC e mMTC.

De acordo com o ETSI em relação à distribuição de conteúdo, o MEC oferece aos desenvolvidos-

res de aplicativos e provedores de conteúdo capacidades de computação em nuvem e um ambiente de serviços de tecnologia da informação na borda da rede [220]. Esse ambiente é caracterizado por latência ultrabaixa e alta largura de banda, bem como acesso em tempo real a informações de rede de rádio que podem ser aproveitadas pelos aplicativos [220]. A utilização do MEC permitirá novos segmentos e serviços de negócios verticais para consumidores e clientes corporativos. Os principais casos de uso considerados pelo ETSI são: (i) aceleração inteligente de codificação e transmissão de vídeo; (ii) serviços de localização; (iii) M2M e IoT; (iv) realidade aumentada; e, por fim, (v) distribuição de conteúdo local otimizada com *cache* de dados [220]. A utilização da configuração de rede de computação de borda de múltiplo acesso permite que aplicativos de *software* acessem conteúdo local e informações em tempo real sobre as condições da rede de acesso local. Ao implantar vários serviços e armazenar em *cache* o conteúdo na borda da rede, as redes centrais móveis são atenuadas de congestionamento adicional e podem atender eficientemente às finalidades locais. Os padrões do setor e a implantação de plataformas MEC funcionarão como facilitadores de novos fluxos de receita para operadoras, fornecedores, usuários e outros interessados.

A emergente rede de comunicação via satélite ubíqua é uma possibilidade de geração de vários novos aplicativos e serviços de acesso sem fio [152]. Com a evolução para o 5G assistiu-se a uma tendência de comunicações por satélite, redes aéreas e os sistemas móveis terrestres evoluírem para uma rede integrada, de modo a acomodar uma grande diversidade de serviços de acesso sem fio em diferentes aplicativos, como computação em nuvem, *Big Data*, Inteligência Artificial e a comunicação entre diversos dispositivos e máquinas. Em particular, uma rede de satélites pode fornecer conectividade contínua para locais extensos, como áreas rurais, oceânicos e montanhosos. Plataformas aéreas podem aumentar a capacidade de áreas cobertas com altas demandas de serviço. As aplicações multimídia desempenham um importante papel das redes de satélites nas futuras redes 5G e o consumo de vídeos em *High-definition* (HD) aumentam nos aplicativos de *streaming* cada vez mais [152].

A companhia Cisco Systems publicou em seu relatório [151, 221] que o tráfego de redes metropolitanas superou o tráfego de longa distância em 2015 e foram responsáveis por 66% do tráfego IP total em 2019. Globalmente, esse tráfego vai crescer quase duas vezes mais rápido que o tráfego de longa distância de 2014 a 2020. O crescimento das redes metropolitanas se deve, em parte, ao papel cada vez mais significativo das redes de distribuição de conteúdo, que ignoram os *links* de longa distância e distribuem tráfego para os *backbones* regionais e metropolitanos [151, 221]. Além disso, o relatório afirma que as redes de distribuição de conteúdo transportarão mais da metade do tráfego da Internet até 2020. Globalmente, 62% de todo o tráfego da Internet cruzará as redes de distribuição de conteúdo até 2020, contra 39% em 2014 [151, 221].

Combinando soluções como a utilização de *Data Center TCP* (DCTCP) [207] e de redes de distribuição de conteúdo, será possível aproveitar a infraestrutura 5G híbrida para entrega de dados de forma mais eficaz. Atualmente, os algoritmos de controle de congestionamento com melhor desempenho permitem que os fluxos maximizem seu rendimento, mantendo pequenas filas nos comutadores da rede [222]. Ter filas pequenas é importante porque diminui a latência de fluxos curtos, minimizando o atraso de enfileiramento. O documento de E. Bouttier *et al.* [222] apresenta um cenário de uso que mantém filas pequenas em *switches* de *data center* sem sacrificar a taxa de transferência. Os autores descobriram que o DCTCP fornece taxa de transferência equivalente ao TCP enquanto utiliza 90% a menos de espaço de armazenamento no *buffer*.

Tradicionalmente, o armazenamento de grandes quantidades de dados em *cache* não fazia sentido para as redes antigas e era um tipo de serviço muito caro [223]. Atualmente, é possível utilizar soluções

de CDN de baixo custo e até mesmo gratuitas para ajudar a controlar como e onde os dados residem [223]. Pode-se utilizar interconexões de *data center* para integrar-se a grandes fornecedores de serviços CDN, como o Amazon CloudFront, o Akamai, o Azure CDN, Level 3, Yottaa e muitos outros. As redes de distribuição de conteúdo se tornarão parte maior do data center tradicional no futuro da Internet [77]. Atualmente é possível integrar as soluções CDN a um *data center* particular ou criar parcerias onde se estende o uso e a manipulação de dados. O *CloudFlare*, por exemplo, armazenará em *cache* o conteúdo em seus pontos de presença, para atuar como uma rede de distribuição de conteúdo, e, em seguida, reverterá as solicitações de *proxy* e entregará conteúdo em *cache* diretamente de seu ecossistema [224]. E, conforme mais organizações aumentam seus requisitos em relação aos dados, as tecnologias CDN e IDN se tornarão ainda mais impactantes [221]. O relatório da Cisco apontou que o tráfego CDN entregará mais da metade de todo o tráfego de vídeo da Internet até 2020. Em 2019 e 2020, 72% de todo o tráfego de vídeo na Internet cruzará as redes de distribuição de conteúdo, comparado a 57% em 2014 [221].

O trabalho de Thibaud *et al.* investiga um cenário com a utilização de satélite como um enlace de acesso para redes domésticas ou como um enlace de retorno para pequenas células em redes 5G [86]. Os autores propõem o uso de armazenamento em *cache* para sistemas de satélite com o intuito de melhorar a experiência dos usuários. Jian Ni *et. al* [225] analisam a sobrecarga de roteamento e o desempenho de CDN correspondente de diferentes esquemas de roteamento de conteúdo dentro do *cluster* de rede. O esquema de distribuição apresentado em [225] é baseado em *semi-hashing* para roteamento de conteúdo dentro do *cluster* e um esquema baseado em consulta de conteúdo para roteamento entre *clusters*. Através de análises qualitativas e simulações apresentadas nos trabalhos estudados, mostra-se que o cenário apresentado em [225] com a utilização do *semi-hashing* torna a rede escalável em roteamento com *overhead* pequeno, eficiente com alta frequência de compartilhamento de conteúdo e flexível com parâmetros ajustáveis. Vale ressaltar que a flexibilidade da rede apresentada aqui é ampliada quando se adicionam à arquitetura tecnologias de virtualização e programação, como NFV e SDN [226].

A demanda por serviços de multimídia em redes móveis tem aumentado nos últimos anos. No entanto, devido à arquitetura centralizada das redes celulares atuais, a capacidade do enlace sem fio, bem como a largura de banda das redes de acesso de rádio e *backhaul*, não podem lidar com o crescimento do tráfego móvel [227]. Recentemente, observa-se o surgimento de técnicas promissoras de *cache* e entrega de conteúdo móvel, por meio das quais os conteúdos populares são armazenados em *cache* nos servidores intermediários, nos *middleboxes*, *gateways* ou roteadores, para que as demandas dos usuários pelo mesmo conteúdo possam ser acomodadas facilmente sem transmissões duplicadas de servidores remotos. Através das técnicas de *cache* e entrega de conteúdo móvel o tráfego redundante pode ser eliminado significativamente [227].

O trabalho de Watts e Aliu [228], baseado no documento do ESA ARTES 1 “Prestação de serviços em redes integradas por satélite e terrestres” que considerou a integração das redes de satélite com a Internet do Futuro e redes 4G, analisa as implicações, benefícios e oportunidades de integração de enlaces de satélite no desenvolvimento de redes, especificamente para fornecer *backhaul* resiliente nas redes 5G que surgirão. O artigo identifica uma série de benefícios para a operadora e o usuário para tal integração e mostra que as redes de satélite modernas podem ser prontamente integradas para suportar os padrões emergentes. A próxima geração de satélites de alto rendimento pode fornecer capacidade flexível e baixo custo para fornecer conexões resilientes integradas para os enlaces 5G emergentes para RAN. Esses enlaces resilientes podem ser usados para melhorar a disponibilidade do *link* e complementar a largura de banda sob altas demandas. Ao adicionar uma sobreposição de *multicast*, esses enlaces resili-

entes podem ajudar a preencher *caches* localizados próximos ao usuário final. Será necessário trabalhar para garantir que a interface do sistema de gerenciamento de rede de satélite esteja em conformidade com os padrões emergentes para 5G, através de tecnologias como CDN e SDN [228].

No trabalho de M. Corici de 2017 [229] há um resumo de práticas de implantações recomendadas e avaliação de divisões de operação entre borda de rede e núcleo, quando uma rede de satélite GEO é usada como *backhaul*. Ao implantar certos componentes em *Edge* na rede, serviços mais eficientes podem ser obtidos para os dispositivos finais, otimizando ao mesmo tempo o uso do *backhaul*. Alejandro García-Domínguez apresenta uma aplicação de 5G e Satélite em conjunto com tecnologias de *Cloud*, *Big Data* e Inteligência Artificial para criar navios inteligentes [230]. Novas tecnologias para aplicações inteligentes em navios e o uso de nuvem, *Big Data* e processo analítico e cognitivo em tempo real são apresentados como novas ferramentas de navegação.

3.3 Análise e Oportunidade de Pesquisa

3.3.1 Análise Qualitativa

A análise qualitativa foi dividida em duas partes para essa dissertação: (i) revisão e análise da literatura e (ii) oportunidade de convergência das redes 5G e redes satelitais numa concepção híbrida de operação para distribuição de conteúdo.

3.3.2 Revisão e Resumo da Análise Bibliográfica

Para revisão e análise da literatura foram elaboradas dez tabelas que resumem os principais trabalhos estudados durante a pesquisa sobre os temas relevantes para essa dissertação. As tabelas denominadas “Tecnologias em cada proposta versus o estado da arte” foram disponibilizadas no Apêndice A dessa dissertação. Nas tabelas, para cada artigo apresentado, é feito: (i) um resumo mínimo dos seu escopo; (ii) a marcação das tecnologias que aparecem no artigo e que são relevantes ao trabalho; (iii) O veículo (conferência, periódico, jornal) em que o artigo foi publicado; e finalmente (iv) uma breve análise de sua relevância para esse trabalho.

Na Tabela A.1, B. G. Evans [7], resume o papel dos satélites em 5G e os principais desafios definidos juntamente com um possível roteiro para levar a sistemas operacionais até 2020 foram abordados nesse artigo. Em [14] os autores introduzem a arquitetura de rede centrada na informação, PURSUIT, apresentam as simulações que mostram o ganho de desempenho oferecido pela solução proposta em relação às implementações regulares e as estratégias baseadas em redes IP. K. Liolis *et al.* resumem os conceitos do projeto SaT5G, que foi muito relevante para a elaboração dessa dissertação. No quarto trabalho da Tabela A.1, Chang Ge *et al.* [28] apresentam uma arquitetura de rede que considera a comunicação via satélite como *backhauling* 5G, especialmente para a entrega de aplicativos de banda larga móvel aprimorada (eMBB) que demandam largura de banda no 5G. Por fim, o trabalho de [29] classifica os mecanismos *Multi-access Edge Computing* de acordo com as metas de desempenho pretendidas, que incluem maximização do rendimento, minimização da latência, conservação de energia e segurança aprimorada.

Em [30] na Tabela A.2, os autores definem uma nova política para gerenciar uma sobreposição de P2P que auxilia as CDNs nas tarefas de distribuição de vídeos curtos. Como o tráfego relacionado a vídeos aumentou sua presença na Internet e uma parte significativa desse tráfego é composta por vídeos semelhantes ao YouTube. As redes de distribuição de conteúdo foram usadas para implantar aplicativos

relacionados a vídeo, mas essas redes não conseguem lidar com as demandas de transmissão de vídeo em si. Assim, as CDNs assistidas por P2P têm sido consideradas uma abordagem alternativa, capaz de lidar com requisitos inatos de disponibilidade de tempo e conteúdo de aplicativos contemporâneos relacionados a vídeos. Qi Wang *et al.* [32] apresenta uma estrutura SliceNet, baseada em divisão de rede personalizável para lidar com alguns dos desafios destacados na migração de serviços para redes 5G. O trabalho de [33], muito relevante para a pesquisa efetuada nessa dissertação, propõe um sistema de CDN com *cache* e reconhecimento que associa *cache* para cada tipo de acesso e também várias otimizações, incluindo o *cache* parcial de vídeos com base em filtragem de popularidade do conteúdo. M. De Donno, K. Tange e N. Dragoni [34] abordam de modo extensivo a computação do tipo *Fog*, destacando seu papel na interoperabilidade de tecnologias de M2M, IoT, *Cloud* e *Edge Computing*. Em [36] observa-se o resultado de testes com um modelo de *gateway CDN Interconnection* que fornece operações compatíveis com o padrão IETF com dependência mínima de plataformas CDN legadas. Os serviços CDNI podem reduzir até 43% do volume de tráfego de conteúdo no *link IX* em comparação com sistemas CDN legados. No entanto, para a adoção comercial do CDNI, estudos adicionais sobre segurança, cobrança e modelos de negócios devem ser realizados.

O primeiro artigo da Tabela A.2 é [37], investiga o impacto da política e do ambiente de rede nas implantações de CDN na China. Apresenta diferentes tipos de implantações de CDN. Essas estratégias permitem que os CDNs estendam seu alcance e desempenho a um grande número de redes em todo o mundo. O trabalho de [38] fornece uma visão geral das iniciativas e projetos 5G atuais, seguidos de uma proposta de arquitetura para redes de satélites 5G, onde a abordagem SDN e NFV facilita a integração com o sistema terrestre 5G. Simon Pietro Romano e Cesare Roseti fornecem uma visão geral do projeto SHINE, cujo foco é o *design* e a implementação de uma infraestrutura segura de ponta a ponta para a entrega de serviços multimídia em redes integradas satélite-terrestres [39]. O trabalho de [43] oferece uma visão geral de uma arquitetura centrada em dados para lidar com a interrupção causada pelo excesso de dados gerados pela M2M na extremidade da rede. Em [45] é possível obter detalhes dos conceitos de IDN. Considera a modelagem de identidade e o endereçamento de identidade, que servem como a principal ponte entre o espaço físico e o ciberespaço importantes áreas de pesquisa.

No início da Tabela A.4, o trabalho de José Soler e Michael Gandy também abordam conceitos de IDN através de uma arquitetura de rede doméstica na qual os acessos em rede são realizados com base na personalização e gerenciamento de identidade. S. Adhatarao *et al.* apresentam um cenário com nomenclatura através de ICN para operação eficiente das redes de sensores com recursos restritos, padrões de mobilidade, segurança e comunicação para redes com milhares de dispositivos interconectados [47]. O terceiro artigo analisado na Tabela A.4 trata de detalhes sobre a integração de uma arquitetura terrestre/satélite para comunicação de grandes quantidades de dispositivos através de ICN [53]. No trabalho de [54], questões importantes foram discutidas, tais como: interoperabilidade de redes heterogêneas, gerenciamento de QoS, comunicações baseadas em IPv6. O último artigo da tabela A.4 introduz um conjunto de domínios com as necessidades de segurança e os categoriza em várias classes de controle de segurança com foco em diferentes aspectos do 5G. Apresenta uma configuração de caso de uso de cidade inteligente.

M. Parker *et al.* introduzem a rede 5G CHARISMA com sua arquitetura centralizada de borda virtualizada, hierárquica e distribuída, que processa dados o mais próximo possível de sua origem e destino [58]. Outro artigo analisado e de grande importância para o tema dessa dissertação é encontrado em [59]. Os autores desenvolvem uma estrutura de transmissão de vídeo sobre a infraestrutura de entrega de conteúdo 5G integrada terrestre-satélite, que é investigada no projeto SaT5G fase 2 do EU

5G PPP. A união de conceitos CDN e virtualização é vista no trabalho de [60], que utiliza tecnologias de virtualização e containerização para implementar funções CDN virtuais para fornecer um serviço HTTP genérico, bem como um de *streaming* de vídeo HTTP. M. Luglio *et al.* faz uma análise do serviço de *streaming* IP assistido por satélite para suporte às atuais infraestruturas de CDN com o estudo do projeto SHINE. No último artigo analisado na Tabela A.5, Tomaso De Cola e Andrea Blanco abordam conceitos de distribuição de conteúdo para construir uma solução de *backhauling multi-link*, para aproveitar as vantagens dos *links* de acesso 4G e via satélite, que podem oferecer maior capacidade de rede e garantir a continuidade do serviço mesmo na presença de interrupções na rede.

O artigo de C. Wang, A. Jayaseelan e H. Kim apresenta um estudo de casos através de emulação de CDN em *Cloud* [74]. E o trabalho de [75], apresenta o *ActiveCDN*, uma nova arquitetura de CDN que permite a um editor de conteúdo dimensionar dinamicamente seus serviços de entrega de conteúdo usando virtualização de rede e técnicas de computação em *Cloud*. Os requisitos essenciais para o funcionamento de uma CDN são disponibilizados em [77]. Faraz Ahmed *et al.* abordam o problema de seleção de tráfego da Internet a partir da perspectiva das CDN. Contribui com a seleção de rotas de trânsito em ISP por CDN através de um método para realizar medições de desempenho simultâneas em várias rotas de trânsito que são mantidas por CDNs para entrega de conteúdo para acessar ISPs [81]. A Tabela A.6 é finalizada com o artigo de [85], que sugere nova abordagem para entrega de conteúdo utilizando CDN. Nesse cenário, as soluções MEC precisam lidar de forma eficiente com a mobilidade do usuário, o que requer uma relocação rápida das instâncias de serviço para garantir a QoE desejada.

A Tabela A.7 inicia com [91], que apresenta uma arquitetura 5G-ICN e os seus benefícios, como serviços inovadores de distribuição de conteúdo e controle da rede oferecidos pela alavancagem dos recursos do ICN às atuais arquiteturas móveis baseadas em 3GPP. Pasquale Andriani [101] escreve sobre o projeto 5G MEDIA, que visa garantir que os aplicativos aloquem os recursos necessários para fornecer alta QoE e para que a rede não seja sobrecarregada pelo tráfego de mídia. O artigo de [155] apresenta novos esquemas de gerenciamento de mobilidade, QoE e QoS, mecanismos de controle e orquestração que foram desenvolvidos no projeto 5G NORMA. Em M. S. Siddiqui, A. Legarrea e E. Escalona [159], são apresentados os principais direcionadores e requisitos para uma arquitetura hierárquica 5G de inteligência distribuída, suportando baixa latência, segurança e acesso aberto através do projeto CHARISMA. D. Camps-Mur *et al.*, aborda o projeto 5G-XHaul, uma nova arquitetura de rede de transporte com tecnologias sem fio e ópticas e um plano de controle definido por software multi-tecnologia, que é capaz de suportar conjuntamente serviços de *backhaul* e *fronthaul* [160].

Na Tabela A.8, [165] enfatiza o papel desempenhado por três tecnologias principais: SDN, NFV e MEC. O trabalho analisa os principais problemas em aberto dessas tecnologias em relação ao 5G. M. Säily *et al.* propõem uma arquitetura 5G RAN com base no 3GPP versão 15 com uma série de melhorias e funções, para oferecer suporte a uma seleção eficiente, flexível e dinâmica entre os modos de transmissão *unicast*, *multicast* e *broadcast* e também a entrega de serviços de transmissão terrestre [204]. O terceiro artigo da Tabela A.8 resume os benefícios da comunicação por satélite dentro de um ambiente 5G convergente e os elementos específicos necessários desses benefícios [209]. Em seguida, [218] apresenta casos de uso e desenvolvimentos de teste para explorar o papel dos satélites em serviços de *streaming* com taxa de *bits* adaptáveis em redes 5G híbridas. E por fim, no trabalho de [227], estuda-se técnicas relacionadas ao armazenamento em *cache* nas redes móveis atuais e discutem-se as técnicas potenciais para armazenamento em *cache* em redes móveis 5G, incluindo *cache* de *evolved packet core* e *cache* de rede de acesso por rádio.

O primeiro artigo da Tabela A.9 de S. Watts e O. Aliu analisa as implicações, benefícios e oportu-

nidades para a integração de enlaces de satélite na Internet do Futuro especificamente para fornecer *backhauls* resilientes nas redes 5G [228]. A. García-Domínguez apresenta uma aplicação de 5G e Satélite em conjunto com tecnologias de *Cloud*, *Big Data* e Inteligência artificial para aplicações de transportes inteligentes [230]. Em [231] é proposta a utilização de rede de *backhaul* terrestre/satélite híbrida mono/multi-feixe para *caching* de borda *offline* de estações base de celular a fim de reduzir o tráfego de rede terrestre. F. Mendoza, R. Ferrús e O. Sallent propõem um modelo para a análise de estratégias de gerenciamento de tráfego e capacidade em redes de *backhaul* móvel híbrido satélite-terrestre para 5G [232]. M. Siddiqui *et al.* [233], descreve uma arquitetura de segurança para uma rede de acesso 5G ativada por SDN/NFV com vários usuários baseada em gerenciamento e monitoramento de segurança através de políticas e análise inteligente.

A Tabela A.10 mostra o trabalho de X. Artiga [234] que descreve uma rede de *backhaul* dinâmica para enfrentar alguns dos principais desafios 5G, como cobertura total de áreas remotas, capacidade melhorada e redução no consumo de energia. O trabalho efetuado por [235] trata a convergência de enlaces terrestres e de satélites para suporte do 5G. A arquitetura proposta foca nos detalhes de como integrar 5G, satélite, SDN e NFV abordando vários casos de uso. Yuan Zhang e Ying Wang apresentam arquitetura que une satélite, 4G, ICN, SDN, NFV e distribuição de conteúdo com *Edge* e *Cloud* [236]. O texto de [237] fornece detalhes sobre o posicionamento do servidor de réplica em CDN tradicionais, baseados em *Cloud* e em NFV. O último artigo analisado na Tabela A.10 fornece informações do projeto 5G PPP H2020 SESAME, que aborda um grande número de cenários e casos de uso aplicando computação móvel [238].

3.3.3 Oportunidade de Convergência das Redes Satelitais e das Redes 5G

Com o levantamento de informações, o acompanhamento de projetos e a avaliação das referências para a revisão da literatura foi possível definir aplicações, onde o uso do satélite é de suma importância. Para cada aplicação específica é possível apresentar o futuro papel do satélite na rede. O objetivo é destacar como a rede via satélite pode atender aos requisitos específicos de cada aplicação, identificar desafios e abrir questões para um uso efetivo da comunicação via satélite.

O benefício mais óbvio da utilização de *caches* é que o usuário final experimenta um tempo de resposta muito menor. Mas os *caches* também melhoram a Internet como um todo: menos solicitações para servidores distantes significam menos tráfego de rede, menos congestionamento nas filas nos comutadores de rede e servidores Web, menos pacotes descartados, etc. Analisando trabalhos relacionados à padronização, como [40, 135, 137, 138], é possível definir características de um serviço de entrega de conteúdo ideal ao explorar conceitos referentes com à CDN e IDN:

- A rede possui controle descentralizado, amplo e flexível;
- O serviço é robusto em relação aos erros;
- Reduz o tráfego no *backbone* da Internet com recuperação repetitiva de dados de longa distância;
- Evita inundações de pontos de acesso para evitar servidores sobrecarregados;
- Atualizações automáticas com servidores e distribuidores de conteúdos locais dinâmicos;
- É transparente para os usuários. *Caches* podem ser adicionados e removidos da rede a qualquer momento;
- Diferentes serviços têm diferentes visões sobre quais *caches* estão acessíveis em um determinado momento;

Uma técnica que utiliza funções *hash* para particionar itens para transferi-los é o *Sharding* [135]. Técnica utilizada para dimensionar horizontalmente os sistemas de armazenamento em *cache* e para resolver os limites na capacidade de processamento e armazenamento. De acordo com essa técnica, um grande conjunto de itens é particionado em um conjunto de segmentos, denominados *shards*, com base no resultado de uma função *hash* calculada no identificador do item. Cada fragmento é mapeado para um armazenamento físico ou dispositivo de armazenamento em *cache*.

No trabalho de [135] são apresentados novos e práticos resultados que esclarecem o desempenho de sistemas de *cache* fragmentados. A análise se concentra nos aspectos de desempenho de balanceamento de carga e armazenamento em *cache* através de modelamento matemático e teste prático. O *Sharding* é usado em conjunto com o conceito de *hashing* consistente para minimizar o remapeamento de itens como resultado da junção ou saída do sistema dos membros do *cluster* [239]. O *Sharding* pode ser utilizado em diversas aplicações. Essa técnica é implementada de forma ubíqua em sistemas de bancos de dados, *caches* da Internet, provedores CDN e armazenamentos do tipo chave/valor. Ele também é usado para particionar grandes tabelas de encaminhamento através de placas de rede de um roteador ou através de diferentes roteadores de uma rede [137]. Mais recentemente, *Sharding* foi aplicado a implementações de armazenamento de valor-chave de nó único para particionar itens em regiões de memória e núcleos de *hardwares* como unidades centrais de processamento.

Por meio de *hashing*, o servidor DNS resolve o endereço IP da tabela de roteamento ou da tabela de *hash*. *Hashing* é um processo de busca de endereço rápido amplamente adotado, envolve uma pesquisa através de um grande banco de dados através de um número estatisticamente menor de etapas [239]. Esse processo precisa de um algoritmo de *hash* para encontrar um registro da tabela de *hash*, associado a uma chave de *hash*. Um bom algoritmo de *hash* é essencial para um bom desempenho da tabela de *hash* e a escolha da técnica de *hash* melhora significativamente o desempenho da CDN. A motivação original para o *hashing* consistente era o *cache* da Web. No contexto da Web, pode-se solicitar a página do servidor Web apropriado, se a página estiver sendo solicitada várias vezes, é um desperdício fazer o *download* repetidamente do servidor. Uma ideia óbvia é usar um *cache* da Web, que armazena uma cópia local das páginas visitadas recentemente. Quando um serviço é solicitado, pode-se primeiro verificar o *cache* local de onde o conteúdo está armazenado. Se a informação estiver no *cache*, será possível enviá-la diretamente ao requisitante, e não é necessário entrar em contato com o servidor original.

A Tabela 3.1 apresenta relações entre as tecnologias de distribuição de conteúdo com a rede híbrida composta pela parte terrestre e pelo enlace satélite. De acordo com as referências analisadas, semelhante às redes de entrega de conteúdo, que armazenam conteúdo em *cache*, o 5G permitirá o armazenamento de conteúdos onde ele for mais necessário e o mais próximo possível dos consumidores. Verificou-se a integração do armazenamento temporário (*caches*) terrestre/satelitais para maior eficiência na distribuição dos conteúdos. Essa solução tira proveito da rede híbrida para manter o *cache* atualizado. Existe relação entre o armazenamento temporário integrador e SDN, pois esse exigirá um controlador SDN para gerenciamento do tráfego e orquestração da comunicação dos dispositivos.

De acordo com as referências analisadas, pode-se destacar que SDN propõe a separação dos planos de controle e de dados, uma centralização lógica da inteligência e do estado da rede. A SDN permite a especificação de uma infraestrutura abstrata para aplicações de rede. Em contraste, a NFV busca a virtualização de funções do plano de controle na forma de objetos de software que rodam no *data center* ou na borda da rede de acesso. As tecnologias SDN e NFV podem facilitar a integração e operação das redes satélite-terrestre, oferecer maior flexibilidade aos operadores de rede de satélites, e reduzir as despesas operacionais e de capital através da implantação e gerenciamento de equipamentos de rede

compatíveis quando colocadas em interoperabilidade com CDN. Ou seja, o levantamento do estado da arte em 5G detectou a integração dos planos de controle e gerência terrestres e satelitais como uma necessidade para a evolução das redes. Essa integração contribuí para a coordenação do uso de espectro, criando múltiplas hierarquias e redes *Cloud Radio Access Network* (CRAN).

O conceito da tecnologia IDN visa aplicar controles de rede com base na identidade de um indivíduo ou grupo de indivíduos responsáveis por operar ou utilizar os dispositivos conectados na rede. A rede orientada à identidade resolve políticas em função do identificador do usuário, gerenciando acessos através desse identificador. Os benefícios esperados são melhor eficiência de segurança, melhor escalabilidade em relação à demanda de informação/largura de banda e maior robustez em cenários de comunicação. A IDN pode funcionar em qualquer rede, incluindo Ethernet (cabeadas), celular, Wi-Fi (redes sem fio), rádio e comunicações via satélite. Isso significa que as empresas podem reduzir as despesas de comunicação ao substituir linhas dispendiosas por uma linha de Internet de banda larga. Com uma complexidade de gerência de rede significativamente reduzida através de uma simples orquestração de rede e segurança nativa, as empresas podem reduzir regras de *firewalls* complexas, políticas de *Virtual Private Networks* (VPN), senhas e gerenciamento de VLAN ao considerar a identificação única de usuários e seus dispositivos. A IDN pode criptografar comunicações M2M integrada sem restrições. Pode apresentar conectividade para redes de camada 2 e camada 3 em qualquer meio de conexão.

A ICN visa o acesso aos conteúdos utilizando os seus nomes, independente de onde estejam localizados, através de *cache* da borda da rede, núcleo ou Internet. Os dados tornam-se independentes de localização, aplicação, armazenamento e meios de transporte, permitindo o armazenamento em *cache* e a replicação coerente dentro da rede. Os benefícios esperados são melhor eficiência, melhor escalabilidade em relação à demanda de informação ou largura de banda e maior robustez em cenários de comunicação desafiadores (intermitentes). A ICN beneficia 5G, especialmente na perspectiva da MEC. O armazenamento temporário por popularidade pode estar localizado na borda da rede, auxiliando várias aplicações sensíveis à latência, tais como: realidade aumentada, realidade virtual e URLLC. Estas aplicações especificam requisitos rigorosos, especialmente em termos de latência e confiabilidade de aplicações, sendo adequados para veículos autônomos. A ICN permite a minimização da configuração da rede. O armazenamento de borda permite a replicação de dados independente de localização em pontos estratégicos de armazenamento ou a disseminação de dados através de roteadores ICN. A ICN também permite maior mobilidade de sessão: o chamado princípio de desacoplamento identificador/localizador, que torna possível mover entidades sem a perda da identidade. As redes centradas em informação podem coexistir com os serviços de IP de ponta a ponta que são oferecidos hoje e a tecnologias SDN/NFV podem ser combinadas para suportar ICN em 5G.

De acordo com o trabalho de Tomaso de Cola [14] *et al.*, as redes satélite-terrestres integradas têm um grande potencial no contexto de ICN e de CDN/IDN, permitindo grande flexibilidade de fornecer aos usuários e provedores a agilidade, desempenho, segurança e robustez buscados. Nesse trabalho são explorados os principais componentes do *design* de novos conceitos de carga útil de satélite para plataformas de satélites GEO. Os autores também exploram o interesse em constelações de satélites de órbita baixa LEO que se tornaram requisito quase obrigatório na integração de redes terrestres e satélites para garantir que novos serviços atendam aos requisitos de usuários e QoE que não poderia ser alcançada de maneira independente. Desse ponto de vista, a convergência das tecnologias exploradas nessa dissertação requer considerar as tendências mais recentes em redes, com especial atenção para as novas arquiteturas potenciais que foram recentemente propostas no âmbito da Internet do Futuro, colocando ênfase particular nos aspectos de rede. Para isso, novos protocolos como o *Multipath TCP*

Tabela 3.1: Relação entre as tecnologias estudadas.

| Tecnologia | Relação com a rede 5G |
|------------|--|
| CDN | <ul style="list-style-type: none"> • Minimização de latência para operações 5G via satélite e terrestres; • Melhor gerenciamento e distribuição de conteúdo; • Correlação direta com o aumento do consumo de dados de redes de banda larga: <i>smartphones</i>, aplicativos, serviços e conteúdo relacionados; • Utilização de armazenamento temporário integrado; • Melhor eficiência de segurança, melhor escalabilidade em relação à demanda de informação ou largura de banda e maior robustez em cenários de comunicação baseados em identificação única; • Autenticação e autorização simplificada via identificação única de entidades; • A seleção do segmento espacial pertencente a uma empresa operadora de satélite, o segmento espacial de um sistema artificial de satélites é um dos seus três componentes operacionais, sendo os outros os segmentos usuário e solo; • Infraestrutura de comunicação híbrida terrestre-satélite significativa em relação a operabilidade, para que a estação de satélite possa efetuar transmissões e forneça interconexões à rede terrestre; • Definição da tecnologia de <i>hub</i> e das configurações de rede de satélite mais adequadas que satisfaçam os requisitos de serviço, como canais, serviços habilitados, e tipo de transmissão; • O gerenciamento de serviços baseados em redes centradas em informação ou IP sobre o domínio de satélite. • Reduz o tráfego no <i>backbone</i> da Internet (recuperação repetitiva de dados de longa distância); • Atualizações automáticas. Servidores e distribuidores de conteúdos locais dinâmicos; • Os serviços e funções dos itens apresentados acima devem ser transparentes para os usuários; |
| ICN | <ul style="list-style-type: none"> • Acesso aos conteúdos pelo nome, independentemente de suas localizações; • Evita inundações de pontos de acesso e servidores sobrecarregados; • Otimização da rede para distribuição de conteúdos populares através de armazenamento temporário hierárquico; • Mobilidade de sessão através do princípio do desacoplamento entre identificadores e localizadores; • Roteamento multi trajeto e multi fonte; |

(MPTCP) e tendências de rede, como o paradigma de redes ICN, são explorados pela demonstração de sua aplicabilidade em alguns cenários que implantam segmentos terrestres e satélite [110]. É dada especial atenção aos esquemas de diversidade de gateway satélite inteligente que defendem o uso de sofisticados esquemas de transmissão de múltiplos caminhos para explorar os recursos de *multihoming* oferecidos pelos dispositivos atuais. Os autores propõem em seu trabalho uma rede de comunicação por satélite baseada em uma arquitetura ICN.

As funcionalidades de uma rede construída sobre o paradigma de publicação e assinatura, *Publish-Subscribe Internetworking* (P-SI), princípio das redes ICN, podem ser estendidas e adaptadas para o contexto de comunicações via satélite. O P-SI é uma arquitetura de Internet *clean-slate*⁶ que consiste em três funções separadas que suportam a troca de informações por meio da operação de publicação-assinatura, *publish-subscribe: rendezvous*, gerenciamento de topologia e encaminhamento [240]. Quando a função *rendezvous* coincide com uma assinatura de uma publicação, ele direciona a função de gerenciamento de topologia para criar uma rota entre quem publica e quem assina. Essa rota é usada por função de encaminhamento para realizar a transferência real de dados [240]. Cada informação na P-SI é identificada por um par de ID (identificação) exclusivo, o ID do escopo e o ID de *rendezvous*. O ID do escopo agrupa informações relacionadas, enquanto o ID de *rendezvous* é a identidade real de uma determinada informação. A informação na P-SI pode pertencer a vários escopos (possivelmente com diferentes ID de *rendezvous*), mas devem sempre pertencer a pelo menos um escopo. Os escopos servem como meio de definir conjuntos de informação dentro de um determinado contexto e impor fronteiras com base em alguma estratégia de disseminação para o escopo. Um exemplo é quando um publicador coloca uma fotografia (informação) sob um escopo com o nome de "amigos" e um escopo de "família", com cada escopo tendo direitos de acesso diferentes. O P-SI funciona através dos conceitos de resolução de nomes e roteamento de dados. A resolução de nomes é tratada pela função *rendezvous*, que é implementada por uma coleção de *Rendezvous Nodes* (RN) denominada *Rendezvous Network* (RENE).

A resolução de nomes gera uma quantidade potencialmente grande de memória que um RN pode exigir, portanto, a implementação da funcionalidade *rendezvous* nos satélites não será, na maioria dos

⁶*Clean-slate* ou arquitetura disruptiva, parte da ideia de recriar a Internet do zero

casos, uma solução viável. Isso é real para sistemas de satélites do tipo *bent-pipe* ou satélites GEO transparentes. No entanto, pode haver benefícios reais por ter essa função *rendezvous* em configurações específicas. O tráfego de sinalização do satélite pode ser reduzido significativamente no *link* do alimentador, se as trocas de ponto de partida iniciadas pelos terminais não precisassem ser encaminhadas para o solo, para chegar ao gateway satélite. Ao mesmo tempo, os atrasos de *rendezvous* também podem ser significativamente reduzidos. Isso é relevante para serviços que necessitam de baixo atraso, quando os dados publicados devem ser recebidos pelos assinantes o mais rápido possível. Do ponto de vista prático, pode-se considerar apenas RN em sistemas de constelações LEO para transferência de dados exigidos de forma urgente.

Para o roteamento de dados, a ferramenta *Bloom Filter* (BF) pode ser usada no ambiente de satélite. Esta ferramenta serve para saber se uma informação está dentro de um conjunto com grandes quantidades de dados. Trata-se de um algoritmo que pode mostrar falsos positivos, mas nunca falsos negativos. Conhecer essa probabilidade de ocorrência desses erros e fazer consultas estando ciente que podem acontecer é vital na hora de construir grandes bases de dados para diversas aplicações [241]. Isso significa que, em certo sentido, um *gateway* satélite acompanha quais nós o usamos como um *proxy* para publicar ou assinar dados. Sendo assim, caso os *publishers/subscribers* não sejam terminais de satélite, mas usuários finais, pode ser razoável configurar uma função de *proxy* para aumentar a escalabilidade no nível do *gateway*. Dessa forma, o *gateway* atua como uma ponte onde, no lado da rede, encaminha pacotes usando o encaminhamento baseado na ferramenta BF, enquanto no lado do usuário final pode usar qualquer mecanismo de encaminhamento usando uma tabela que mapeia os identificadores de encaminhamento para endereços finais e vice-versa.

A escalabilidade e o custo das CDN estão se tornando grandes desafios devido ao aumento dos serviços baseados em conteúdo. Para corrigir tais problemas, os sistemas ponto-a-ponto (P2P) estão sendo considerados para complementar-se em um sistema híbrido. A arquitetura híbrida de CDN e rede P2P é promissora no fornecimento de serviços de *streaming* de mídia online. Os trabalhos de pesquisa e implantações práticas analisados mostraram que sistemas híbridos CDN podem ser viáveis, baratos e escalonáveis. No entanto, os sistemas de distribuição de conteúdo baseados em P2P são conhecidos por consumir mais energia de todo o sistema do que as CDN tradicionais. Portanto, a eficiência energética de tal sistema híbrido deve ser levada em consideração antes de uma implementação mais ampla. O custo proibitivo de implantar um CDN baseado em DNS sofisticado torna a CDN baseada em *anycast* uma alternativa atraente para operadoras de CDN novas ou pequenas. Em CDN baseadas em *anycast*, as solicitações do usuário são naturalmente roteadas para o servidor mais próximo determinado pelo roteamento da Internet. Para as operadoras, no entanto, isso tem um custo, perda de controle, uma vez que, o tráfego roteado depende do roteamento *Border Gateway Protocol* (BGP). O servidor mais próximo pode estar sobrecarregado ou não ser a melhor escolha, e essa perda de controle pode prejudicar a escalabilidade das arquiteturas CDN baseadas em transmissão *anycast*. Para ter controle sobre como o tráfego é roteado, o trabalho existente requer a adição de uma grande complexidade ao sistema, através de altos Capex e Opex.

Idealmente, os dados em uma configuração de CDN têm carga balanceada dinamicamente usando informações de tráfego em tempo real coletadas em toda a cadeia de entrega. A CDN não apenas reduz a latência de ponta a ponta do lado do usuário, mas também descarrega os provedores de conteúdo, fornecendo resiliência contra ataques de *Distributed Denial-of-Service* (DDoS). No entanto, ao armazenar objetos em *cache* e processar solicitações do usuário, os provedores de CDN podem inferir as preferências do usuário e a popularidade dos objetos, resultando em vazamento de informações. Infelizmente, esse

vazamento de informações pode resultar na perda da privacidade do usuário e revelar informações específicas do negócio para provedores de CDN não confiáveis ou comprometidos. Soluções de última geração podem proteger o conteúdo de objetos confidenciais, mas não podem impedir os provedores de CDN de inferir as preferências do usuário e a popularidade dos objetos. Verifica-se a necessidade de um sistema CDN criptografado que preserve a privacidade para ocultar não apenas o conteúdo dos objetos e do usuário, mas também protege as preferências do usuário e a popularidade de objetos de fornecedores curiosos de CDN. O conceito de IDN pode auxiliar nessa demanda. A arquitetura CDN tradicional carece de uma visão global de toda a rede e, portanto, não pode executar de forma dinâmica e otimizada a tarefa de seleção do servidor. Uma oportunidade é o desacoplamento do plano de controle do plano de encaminhamento para oferecer flexibilidade e programação usando o controlador centralizado.

Em relação aos recursos e consumo multimídia, nota-se que os provedores de vídeo dependem fortemente de redes de distribuição de conteúdo distribuídas geograficamente para colocar o conteúdo de vídeo o mais próximo possível dos usuários, com o objetivo de melhorar a qualidade do vídeo e evitar pontos únicos de falha no servidor. A eficácia das CDN depende principalmente dos padrões de consumo de conteúdo. Atualmente, os provedores de vídeo estão oferecendo acesso ao conteúdo de diferentes plataformas, como por exemplo, dispositivos móveis e clientes de computadores pessoais, o que pode resultar em padrões de consumo de conteúdo de vídeo distintos e, finalmente, afetar a eficiência do armazenamento em *cache* da CDN. No entanto, o efeito do tipo de acesso em vídeos da Internet não é bem compreendido. Várias observações sugerem que os tipos de acesso devem ser considerados cuidadosamente no projeto de uma CDN. Em particular, o envolvimento do usuário, os interesses do usuário no conteúdo e os padrões de dinâmica de popularidade do vídeo, três fatores importantes para o armazenamento em *cache* do vídeo, variam consideravelmente nos três tipos de acesso. Os trabalhos que abordam os temas estudados demonstram que o *cache* de CDN com reconhecimento de tipo de acesso atinge uma alta taxa de acerto de *cache* e, mais importante, reduz muito a carga de disco medida pelo número de operações de substituição de *cache*.

O uso da *Web* em dispositivos móveis com o advento das redes 5G pode ser desafiador, apesar do crescimento em parâmetros como largura de banda e poder de processamento. As aplicações estão sendo adaptadas conforme demanda e os protocolos envolvidos no processo de distribuição de conteúdo estão sendo cada vez mais desenvolvidos para comunicação entre máquinas. Tráfego de áudio e vídeo digital têm se mostrado fatores chave para a Internet. A maior parte do tráfego atual é composta por vídeo, áudio e aplicações *streaming*. Grande parte do consumo dos usuários flui de servidores utilizando protocolos adaptados para conteúdo dinâmico. O conteúdo multimídia ao vivo atualmente cobre inúmeros usuários, incluindo rádio e TV via Internet, com eventos *broadcast*, conferências em tempo real, chamadas de áudio telefônicas e de videoconferência. A arquitetura da Internet atual é composta por um pequeno número de sites muito populares e requisitados, e um grande número de sites pouco requisitados. Para atender a demanda dos populares que envolvem a maior parte do tráfego, devem ser implantadas as CDN. As CDN podem utilizar *Domain Name System* (DNS) para direcionar usuários ao servidor geograficamente mais próximo, espalhados por centros de dados no mundo todo.

3.4 Considerações Parciais

O Capítulo 3 apresentou a análise bibliográfica que aborda os temas relevantes para essa dissertação. As principais contribuições que se podem destacar nesse trabalho são: (i) análise bibliográfica dos principais trabalhos que relacionam satélite, redes de comunicação móveis e distribuição, armazenamento e

fornecimento de conteúdo; (ii) o desenvolvimento da integração de componentes para uma arquitetura de testes que utiliza equipamentos e um enlace de comunicação por satélite real; (iii) apresentação das políticas de armazenamento em *cache* em detalhes, suas vantagens e desafios para implantação; e (iv) as contribuições que as tecnologias emergentes estudadas poderão trazer ao sistema de comunicação móvel 5G. Após a análise bibliográfica observa-se que o atual panorama é bom para o escopo desse trabalho, pois ele aponta que ainda é possível contribuir com o processo de padronização do 5G globalmente a medida que o processo de padronização avance para incluir o enlace de satélite em todos os aspectos da rede híbrida 5G terrestre-satélite. Observa-se que a maior parte dos projetos analisados e propostas para cenários de testes utilizam emuladores de enlace de satélite e não equipamento real.

O órgãos padronizadores 3GPP, 5G PPP, ETSI, ITU e IETF possuem uma grande quantidade de documentos relacionados a 5G. Entretanto, em muitos deles são mencionados outros documentos de 3G, 4G, Internet, e outras tecnologias, formando uma grande pirâmide de documentos onde é difícil se desenhar em pouco tempo quais são de fato os documentos que valem para 5G com satélite. Procurou-se fazer a análise dos documentos, sempre com o foco na rede híbrida terrestre-satélite para 5G. É importante destacar a incompletude dos documentos com relação ao suporte ao satélite em 5G. Muitos padrões encontrados para 5G não comentam ou não cobrem especificamente o enlace via satélite no 5G. Observou-se que os serviços e casos de uso referentes à integração da comunicação via satélite em sistemas 5G, foram bem definidos no que podemos chamar de uma primeira fase das padronizações. Entretanto, as definições deste cenário a nível de arquitetura e protocolo são recentes, dificultando o aprofundamento em alguns temas relevantes para a dissertação. Em outras palavras, muitas das recomendações estudadas no contexto de satélite em 5G cobrem aspectos muito gerais, sem um maior aprofundamento com relação as tecnologias emergentes, como CDN, IDN, ICN, SDN, NFV e M2M no contexto de 5G com satélite. Foi encontrada diversidades de propostas e escopos para a rede híbrida. Tanto nos projetos da União Europeia, quanto nos padrões analisados observa-se uma grande diversidade de pontos de vista, escopos e objetivos.

Capítulo 4

Integração de Componentes para Arquitetura Híbrida de Distribuição de Conteúdos com 5G

Através da análise da literatura e dos dados obtidos com os estudos sobre armazenamento e fornecimento de conteúdo, rede híbrida terrestre-satélite e redes 5G, foram levantados cenários para integração de componentes para uma arquitetura de testes. Visando contribuir com a padronização 5G no Brasil, tem-se como objetivo principal de pesquisa, propor uma arquitetura híbrida terrestre-satélite para a rede 5G. Ou seja, 5G híbrido com armazenamento temporário na própria rede. Para isso, o desenvolvimento de um ambiente de testes para essas redes se faz necessário.

Nesse contexto, depois da revisão e estudo dos trabalhos relacionados foi necessário definir o melhor cenário 5G para integração de componentes para uma rede de testes de CDN em 5G híbrido. Para isso foi preciso avaliar a interoperabilidade de possíveis ferramentas e plataformas *Open Source*. O objetivo foi levantar as ferramentas que permitem a construção e avaliação de cenários integrados, tais como: CDN, Redes *Multicast* ou *Broadcast* com armazenamento em *cache* e utilização de *proxies*, *Edge* e *Cloud Computing* e redes ICN que possam utilizar o enlace de satélite.

A proposta sugerida nesse trabalho se baseia nos principais projetos do programa *Horizon 2020* e em órgãos padronizadores, tais como: 3GPP, 5G PPP, ETSI, ITU e IETF. Conceitos como controle de rede, segurança, redes centradas em informação, virtualização, distribuição de conteúdo e novos meios de comunicação são explorados e correlacionados. Em seguida, uma rede CDN privada foi construída através da integração de equipamentos e *softwares* no ambiente de testes do ICT Lab., no Inatel para operar via enlace satélite e 5G. A rede foi configurada e em seguida os testes puderam ser realizados através da arquitetura montada com equipamentos reais das empresas de soluções para satélite, SES e COMTECH, ambas parceiras do projeto financiado pelo SINDISAT em parceria com o Inatel. A Seção 4.1 apresenta as características do cenário de testes escolhido para a construção da arquitetura de rede 5G híbrida. As plataformas, *softwares* e ferramentas utilizados na configuração da arquitetura são apresentadas na Seção 4.2. A arquitetura completa e as etapas de configuração são descritos na Seção 4.3. Para finalizar esse capítulo, a Seção 4.4 descreve as considerações parciais do que foi apresentado até o momento.

4.1 Cenário de Testes de Distribuição de Conteúdo via Conexão 5G

Originalmente, a *Web* era apenas um sistema para vincular páginas escritas em HTML de forma transparente entre as máquinas na rede. Nesse sistema as páginas são baixadas através da conexão TCP do navegador para um servidor utilizando HTTP. Atualmente, grande parte do conteúdo *Web* é produzido dinamicamente, tanto no lado do servidor com linguagens semelhantes à PHP, quanto no lado dos navegadores (*Browsers*), com conteúdos construídos com linguagens semelhantes à *Javascript*. Páginas dinâmicas na Internet estão evoluindo para aplicações completas. As técnicas de *caching* e de conexões persistentes estão sendo usadas para melhorar o desempenho das redes. O cenário de uso considerado para a construção da arquitetura foi o de teste visando distribuição de conteúdo considerando *Caching*: utilizar *caches* e outras ferramentas *open source* para rede híbrida 5G. Em seguida, avaliar o suporte ao gerenciamento de *cache* e redistribuição de conteúdo ao usuário final. Trabalhos futuros visam utilização de *streaming* adaptativo e testes de *cache* com arquitetura de Internet do Futuro *NovaGenesis* [48], uma proposta convergente de ICN, CDN, SDN, NFV e SOA, através do enlace de satélite até o ponto final da rede para comparações.

A Figura 4.1 apresenta uma estrutura de fornecimento de informação com *cache*, desde o *Frontend* com as aplicações *Web* até o *Backend* para a transmissão por *broadcast* ou *multicast* via satélite. O modelo verticalmente integrado consiste em uma aplicação de empresa para cliente, *Business-to-Client*, na qual o operador de satélite gerencia o contrato de negócios, desde a infraestrutura de satélite até as assinaturas de serviço. Assim, um provedor de CDN, similarmente a um usuário final comum, assina um contrato de serviço selecionando um dos perfis disponíveis. Da perspectiva do provedor CDN, este modelo apresenta como vantagem a flexibilidade limitada na configuração de serviços e custos operacionais (assinaturas de serviço) favoráveis à escalabilidade. Para esse modelo de serviço gerenciado, o operador de satélite possui e gerencia toda a infraestrutura de satélites e assume as operações de rede, enquanto delega o gerenciamento de serviços a terceiros. O conteúdo *Web* quando combinado com banco de dados *Backend* tornam as páginas do servidor dinâmicas, permitindo assim, o uso de aplicações como *e-commerce* e busca de informações de maneira mais rápida e eficiente.



Figura 4.1: Representação da estrutura de fornecimento de conteúdo utilizando *cache* [72].

Esse modelo integrado pode ser útil para provedores de serviços terrestres, como um provedor que fornece conteúdo CDN, com o objetivo de aprimorar os serviços oferecidos adicionando recursos providos por rede de comunicação via satélite. Ao explorar a arquitetura de virtualização NFV, o provedor CDN pode ativar e gerenciar uma ou mais funções virtuais de rede nas instalações do operador de satélite como ativadores para o serviço requisitado pelo usuário. A rede CDN baseada em comunicação via satélite é proposta para combater o congestionamento de entrega de arquivos pela rede terrestre e pode ser mais escalável e confiável.

Uma ampla visão do cenário de teste pretendido com o sistema híbrido funcionando através de CDN é mostrada na Figura 4.2. A Figura 4.2 ilustra o provedor de serviços que disponibiliza ao usuário os diversos conteúdos requisitados, um *transponder* de satélite geossíncrono e vários servidores receptores CDN operando com técnica *caching*. As camadas subjacentes oferecem serviço *multicast* por satélite de modo unidirecional e serviços *unicast* terrestres de modo bidirecional. No sistema híbrido CDN via satélite, os arquivos mais frequentemente solicitados são entregues através de canais *multicast* para evitar o congestionamento da rede terrestre comum. Outros arquivos e mensagens de controle são transmitidos através de enlaces *unicast* terrestres.

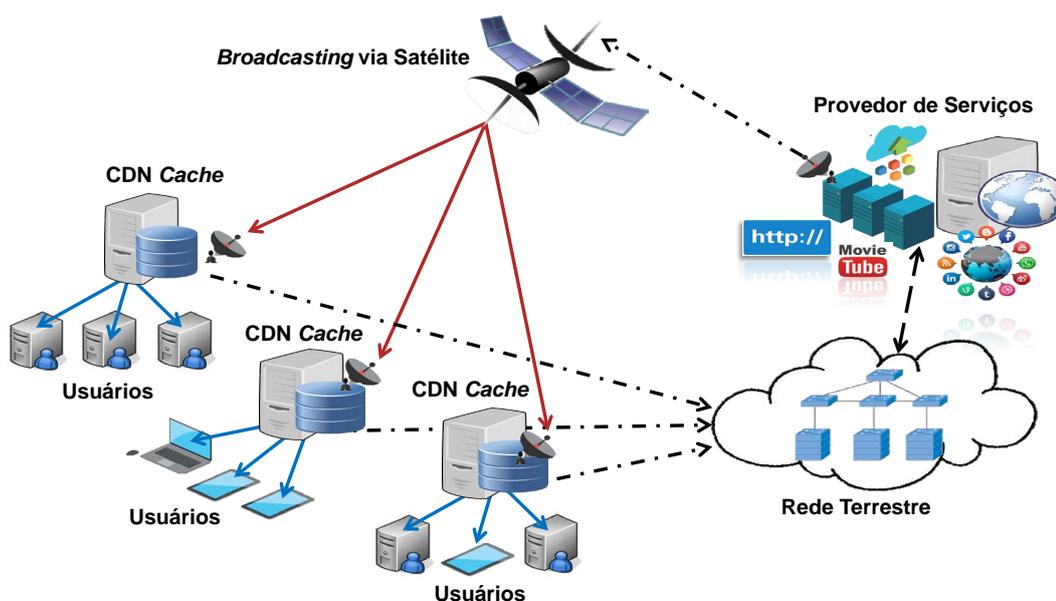


Figura 4.2: Cenário do sistema híbrido terrestre-satélite para fornecimento de conteúdo [72].

4.2 Ferramentas e Plataformas Seleccionadas

Após analisar os projetos do programa H2020 que se enquadram no escopo da dissertação e levando em consideração o cenário apresentado na Seção 4.1, se fez necessária a definição de ferramentas e plataformas *Open Source* e prontamente disponíveis [242] para a execução de testes de desempenho, controle e avaliação da rede, visando a coleta de informações relacionadas ao controle e gerenciamento da rede, distribuição, roteamento e encaminhamento de conteúdo. As atividades de trabalho foram divididas em quatro etapas, sendo elas: (i) escolher e estudar as ferramentas e plataformas seleccionadas; (ii) verificar qual sistema operacional é compatível e montar um teste simples de funcionalidade de cada componente escolhido; (iii) verificar a disponibilidade de integração dos componentes e alteração

para ferramentas compatíveis; e por fim, (v) teste final com todas as ferramentas em interoperabilidade. Com a definição da interoperabilidade da ferramentas escolhidas foi possível integrar e montar uma arquitetura de rede considerando os conceitos do cenário de testes pretendido. Os recursos de *software* utilizados na implementação na arquitetura de testes são descritos na Tabela 4.1.

O sistema operacional (SO) definido para o gerenciamento dos *softwares* para a integração dos componentes e criação da arquitetura foi o GNU/Linux Ubuntu. A versão Ubuntu 16.04 LTS foi utilizada em máquinas físicas e a versão Ubuntu 18.04 LTS foi utilizada nas máquinas virtuais. O *software Nginx* ou *Engine-x* é um servidor *Web* que suporta os protocolos HTTP, *Internet Message Access Protocol* (IMAP), *Post Office Protocol* (POP3) e funciona como intermediário para requisições de clientes através de *proxy* [243]. O *Nginx* é semelhante ao servidor *Apache* e foi gerado a partir da necessidade de desenvolver uma solução capaz de suportar a crescente demanda de solicitações de conteúdo na Internet, em 2002 por Igor Sysoev [243]. No ano de 2004, o *Nginx* foi lançado oficialmente como um servidor *Web*. Desde então, o número de adeptos vem aumentando [244]. O *software Nginx* possui cerca de 20% de todo o tráfego global considerando apenas os sites ativos, sendo capaz de lidar com tráfego intenso de maneira consistente [243, 244]. A ideia de sua utilização é aproveitar os recursos de *proxy* e armazenamento em *cache*. Para isso, é necessário compilar o *Nginx* e alavancar o módulo *proxy*. Este módulo permite armazenar dados em *cache* nos discos locais dos pontos de presença remotos podendo ser posicionados mais próximo do usuário conforme necessário, trabalhando o conceito de CDN.

Em termos práticos, o *Nginx*, pode ser descrito como um *software* que processa as solicitações dos usuários da rede garantindo que a troca de informações seja efetuada. O *Nginx* funciona com o método *Event-driven Architecture* (EDA), que é preparado para lidar com uma maior demanda de conexões se comparado ao modo convencional, como é o caso do *Apache*, no qual o processamento é baseado em um único segmento para cada usuário. No *Nginx*, todo o caminho percorrido e gerenciado pela conexão de rede é *non-blocking*. O *Nginx* exige menos recursos e algumas interfaces de *socket* são bloqueadas em determinadas situações, enquanto outras retornam o resultado de imediato. Para auxiliar na criação de *caches*, o *Varnish Cache* é um mecanismo de armazenamento de alto desempenho usado para manter o conteúdo acessado recentemente na memória [245]. Existe a necessidade de instalar o *Varnish HTTP Cache* para operar em conjunto com o *Nginx*, que agirá como um servidor de conteúdo nos nós de borda da arquitetura proposta. A CDN proposta para testes nessa dissertação mantém a última cópia de arquivos acessados mais próxima dos visitantes globais, e também armazena em *cache* as páginas mais utilizadas na memória nos nós de borda. Esse serviço é semelhante ao que a Akamai e outras empresas que disponibilizam serviços de distribuição de conteúdo com CDN oferecem [77]. Isso significa menos tempo para acesso aos recursos por parte do usuário.

A Figura 4.3 apresenta um *layout* lógico de uma CDN típica com usuários de diversos lugares do mundo sendo representados. Os nós de borda (*edgcdn_node*) podem estar localizados mais próximos dos usuários em servidores estratégicos. Também é possível adicionar mais nós na rede caso haja necessidade de aumento de capacidade. A Figura 4.3 mostra usuários em diversos locais recebendo conteúdos do nó de borda que executa os programas *Nginx* e *Varnish cache*. O nó de borda recebe os dados originais do nó de conteúdo dinâmico e armazena uma cópia no local. O nó de conteúdo dinâmico (*centralcdn_node*) executa alguns *softwares* operando em conjunto, como: *MySQL* (banco de dados) [250], *Nginx* (servidor *Web*), *DNS BIND* (resolução de nomes em endereços IP) [248], *GeoIP* (filtro geográfico) [249] e *software* de programação do lado do servidor central construído usando *Websocket* em *PHP* [251], *Python* [252], *Ruby* [253], *.Net* [254] ou qualquer outra linguagem disponível para API para HTML.

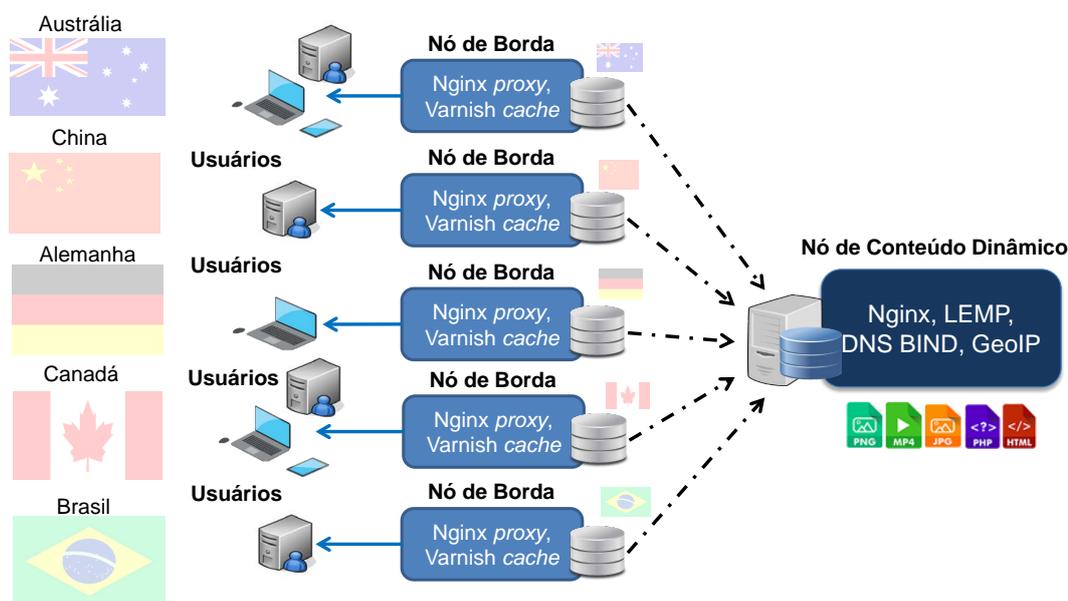


Figura 4.3: *Layout* lógico da CDN com as ferramentas de armazenamento e gerenciamento de conteúdo [237].

Os softwares *Linux*, *MySQL*, *Nginx* e *PHP* operando de forma conjunta são chamados de empilhamento LEMP, ou *LEMP Stack* [247]. O BIND DNS é a ferramenta que mantém todos esses componentes se comunicando na rede. O *software* BIND é o software DNS usado para mapear nomes de *host* da Internet para endereços *Internet Protocol* (IP). O BIND deve ser configurado para adicionar suporte a filtros geográficos, sendo assim, o BIND DNS servirá a cada cliente o IP do nó de borda mais próximo na CDN. Por exemplo, um visitante da Alemanha recebe o IP do nó de borda localizado no local mais próximo na Europa, dependendo dos filtros configurados com o *GeoIP*. As máquinas virtuais contêm

Tabela 4.1: Características dos recursos de *software* da arquitetura proposta.

| <i>Software:</i> | <i>Descrição:</i> | <i>Localização:</i> |
|--------------------------|---|---------------------|
| GNU/Linux Ubuntu | Sistema Operacional utilizado nos servidores e nas máquinas virtuais. Versão 16.04 LTS para os servidores com <i>hardwares</i> físicos e versão 18.04 LTS instalados nas VMs. | Servidor 1 e 2. |
| Máquinas Virtuais | <i>Virtual Machines</i> (VMs) <i>Kernel-based Virtual Machine</i> (KVM) é uma solução <i>Open Source</i> de virtualização completa para Linux em <i>hardware</i> x86 contendo extensões de virtualização (Intel VT ou AMD-V). Consiste em um módulo de kernel carregável, <i>kvm.ko</i> , que fornece a infraestrutura de virtualização central e um módulo específico do processador [246]. | Servidor 1 e 2. |
| Nginx | Servidor <i>Web</i> de alto desempenho capaz de lidar com tráfego intenso de maneira consistente. Utiliza recursos de <i>proxy</i> e armazenamento em <i>cache</i> . O Nginx é compilado junto com o módulo <i>proxy</i> . Este módulo permite armazenar dados em <i>cache</i> no nó local (<i>centralcdn_node</i>) e nos pontos de presença remotos (<i>edgecdn_node</i>) [244]. Versão HTTP 2019-07-23 <i>nginx-1.17.2</i> . | Servidor 1 e 2. |
| Varnish | Versão 2019-03-15 - <i>Varnish 6.2.0</i> , instalado como mecanismo de armazenamento em <i>cache</i> de alto desempenho para manter o conteúdo acessado recentemente na memória [245]. | Servidor 1. |
| LEMP Stack | Versão <i>SO Ubuntu Server 18.04.2 LTS</i> , <i>Nginx HTTP</i> , <i>MySQL Community Serve 8.0.16</i> e <i>PHP 7.3.7</i> , são <i>softwares</i> de código aberto operando de forma conjunta para criação de <i>sites</i> , gerenciamento de banco de dados relacional e linguagem de programação para aplicativos da <i>Web</i> [247]. | Servidor 2. |
| BIND DNS | Versão 9.14.4, instalado para publicar informações de DNS na Internet e resolver consultas DNS para os <i>hosts</i> da rede, é a ferramenta que mantém todos esses componentes se comunicando na rede, serve a cada cliente o IP do nó de borda mais próximo na CDN. Por exemplo, um visitante da Alemanha recebe o IP do nó de borda localizado no local mais próximo na Europa, dependendo dos filtros configurados com o <i>GeoIP</i> [248]. | Servidor 2. |
| GeoIP | Versão <i>geoip-1.6.12</i> , utilizado em servidores para buscar localizações baseadas em IP. Com a utilização do <i>GeoIP</i> e do endereço IP do <i>host</i> , é possível localizar a cidade, estado, país e até mesmo a latitude e longitude do endereço que está acessando o conteúdo [249]. | Servidor 2. |

softwares que operam em conjunto para construir a topologia de distribuição de conteúdo. Os nós da rede foram criados no *hypervisor KVM* por sua interoperabilidade entre plataformas de virtualização abertas e de código livre. O KVM é implementado diretamente no *Kernel* do sistema operacional hospedeiro para otimizar a comunicação das máquinas virtuais com o *hardware*. A Tabela 4.2 apresenta em detalhes as características dos equipamentos utilizados.

Tabela 4.2: Características dos recursos de *hardware* da arquitetura proposta.

| <i>Hardware:</i> | <i>Descrição:</i> | <i>Localização:</i> |
|--|--|--------------------------------------|
| Servidor 1 | DELL PowerEdge R540, Processador Intel Xeon Silver 4110 CPU 2.33 GHz 16 Núcleos; 64 GB de memória RAM; 2 Discos SSD 480 GB; 6 interfaces de 10 Gigabits. | ICT Lab, Inatel, St. Rita Sapucaí/MG |
| Servidor 2 | HP, Processador Intel core i7-4790 CPU 3.60 GHz, 32 GB de memória RAM, HD 2 TB. | Hortolândia/SP |
| Satélite SES 14 | Posição Orbital 47.5 W; Transponders operam nas bandas C, KU e feixes <i>spot</i> HTS. | Órbita GEO |
| COMTECH EF Data Satellite Modem | CDM-760 Advanced High-Speed Trunking and Broadcast Modem. O modem CDM-760 pode ser configurado como um modulador e demodulador de transmissão DVB-S2 e S2X, e suporta operação em modo HTS, GEO e MEO. | St. Rita Sapucaí/MG e Hortolândia/SP |
| Transceptor Flexível MIMO-GFDM | Modem 5G desenvolvido no Inatel pelo CRR (<i>Centro de Referência em Radiocomunicações</i>). | ICT Lab, Inatel, St. Rita Sapucaí/MG |

Considerando a integração da forma de onda de transmissão da camada física nos sistemas de comunicação híbrido via enlace terrestre-satélite, a tecnologia para forma de onda GFDM é introduzida para aplicação em comunicações via satélite. Como potencial forma de onda candidata ao sistema 5G, o GFDM tem muitas vantagens, apropriadas para comunicações na rede híbrida. Estudos estão sendo realizados para superar a complexidade dos receptores GFDM devido à sua interferência intrínseca entre operadoras [255] [256]. A Figura 4.4 mostra a foto da tela de operação do transceptor TX-RX-MIMO-GFDM (Modem 5G) do *LabVIEW Communications System Design Suite* em operação durante as realizações dos testes reportados nessa dissertação. Na Figura 4.4 é possível visualizar as frequências de operação, a forma de onda, o tipo de codificação, a modulação 64-QAM e a qualidade do enlace da conexão entre os pontos localizados na Serra do Paredão (Três Torres) e o Inatel durante a execução dos testes. Um analisador de espectros foi utilizado para análise do espectro em tempo real durante a transmissão do sinal entre os nós da rede.

A capacidade de transmissão máxima do Modem 5G pode chegar a 100 Mbps e depende da largura de banda configurada, da ordem da modulação utilizada, e da taxa do código de correção erros. A capacidade de transmissão máxima do enlace satélite e do Modem 5G durante a execução dos testes são apresentados na Tabela 4.3. Na Tabela 4.3 é possível observar a largura de banda (*Bandwidth*), as taxas de transmissão UDP e TCP e a porcentagem de pacotes transmitidos no enlaces satélite e 5G. O modem COMTECH CDM-760, garante a comunicação livre de perda de pacotes enquanto a SNR for superior a -2.1 dB. A utilização do acelerador TCP é fundamental para aumentar a vazão de dados no protocolo TCP, porém, o acelerador limita a taxa de transmissão de dados por fluxo de dados. Com uma quantidade maior de fluxos de dados, é esperado que a taxa de transmissão alcance valores próximo a capacidade máxima do enlace.

4.3 Arquitetura de Rede Híbrida para Distribuição de Conteúdo em 5G

Considerando o cenário escolhido do sistema híbrido terrestre/satélite para fornecimento de conteúdo com as ferramentas selecionadas para executar cada papel na rede, foi possível desenhar uma figura com a configuração de cada elemento. A Figura 4.5 apresenta essa configuração com a disposição dos elementos na rede. O próximo passo foi integrar a arquitetura para os testes com a configuração dos

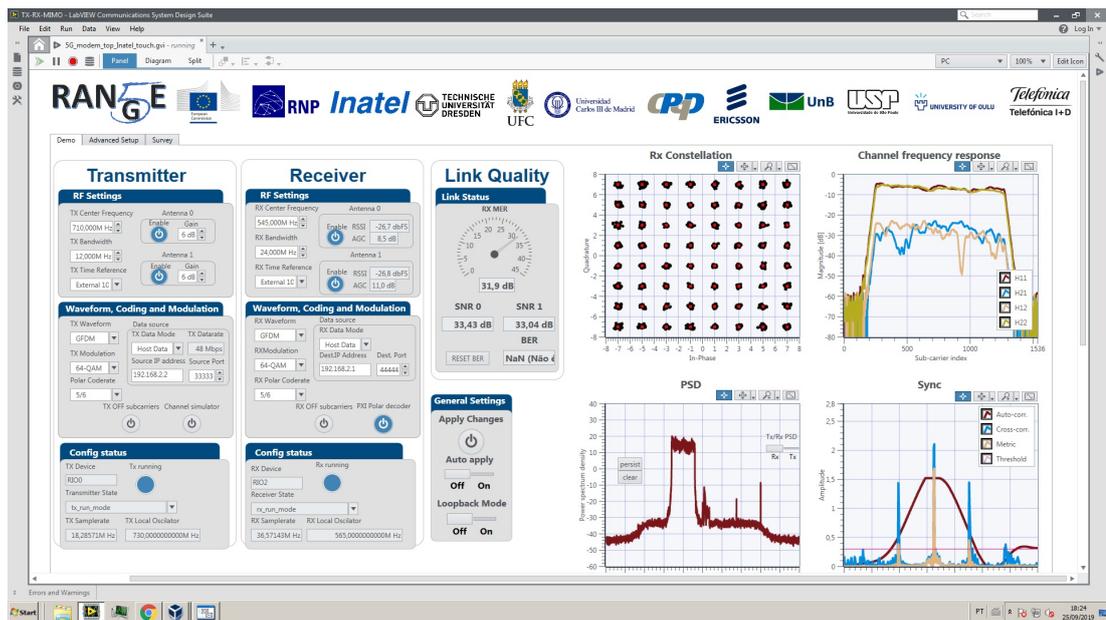


Figura 4.4: Configuração e estado de operação do gerenciador do transceptor TX-RX-MIMO-GFDM (Modem 5G).

endereços IP, a comunicação entre as ferramentas, a comunicação entre os Modems 5G e o teste inicial da CDN. A arquitetura de rede 5G híbrida para distribuição de conteúdo utiliza *cache* de rede e um enlace de satélite real conectado através de um par de Transceptores Flexíveis MIMO-GFDM (Modems 5G). A arquitetura é formada por nós conectados via enlace de satélite geostacionário SES-14 e enlace terrestre que conectam a rede híbrida com recursos virtualizados e CDN para *Broadcast* e *Multicast*. Os equipamentos utilizados são descritos na Tabela 4.2.

O nó de borda (*edgedcn_node*) construído no Servidor 1, está localizado na cidade de Santa Rita do Sapucaí/MG no Inatel e o nó central (*centralcdn_node*), Servidor 2, na cidade de Hortolândia/SP. As máquinas virtuais contém *softwares* que operam em conjunto para construir a topologia de distribuição de conteúdo. Eles são criados com o *hypervisor KVM* que é implementado diretamente no *Kernel* do sistema hospedeiro para otimizar a comunicação das máquinas virtuais com o *hardware*.

Na configuração do cenário de teste utilizado para avaliar o desempenho da solução proposta, foram utilizados dois nós: (i) nó de conteúdo dinâmico ou nó central, que armazena dados do tipo .PNG, .MP4, .JPG, PHP, HTML etc. nomeado na arquitetura como *ICT_SAT_5G_centralcdn-node* e localizado

Tabela 4.3: Capacidade do enlace satélite e do Modem 5G durante a execução dos testes.

| Enlace: | Bandwidth: | Acelerador TCP: | Taxa TCP: | Taxa UDP: | Pacotes Transmitidos: | Jitter: |
|---|---|-----------------|----------------------|-------------------|-----------------------|---------|
| Satélite entre St. Rita Sapucaí/MG e Hortolândia/SP | 25.687,74 MHz <i>Uplink</i> / 11.719,74 MHz <i>Downlink</i> | Não | 4.15 Mbps / 3.9 Mbps | 90 Mbps / 34 Mbps | 99,996% | 0.260ms |
| Satélite entre St. Rita Sapucaí/MG e Hortolândia/SP | 25.687,74 MHz <i>Uplink</i> / 11.719,74 MHz <i>Downlink</i> | Sim | 60 Mbps / 30 Mbps | 90 Mbps / 34 Mbps | 100% | 0.260ms |
| Modem 5G St. Rita Sapucaí/MG | 710,0 MHz TX / 545,0 MHz RX | Sim | 30 Mbps / 30 Mbps | 30 Mbps / 30 Mbps | 99,937% | 0.465ms |
| Satélite com Modem 5G | 25.687,74 MHz <i>Uplink</i> / 11.719,74 MHz <i>Downlink</i> | Sim | 31 Mbps / 28 Mbps | 29 Mbps / 29 Mbps | 99,77% | 0.451ms |

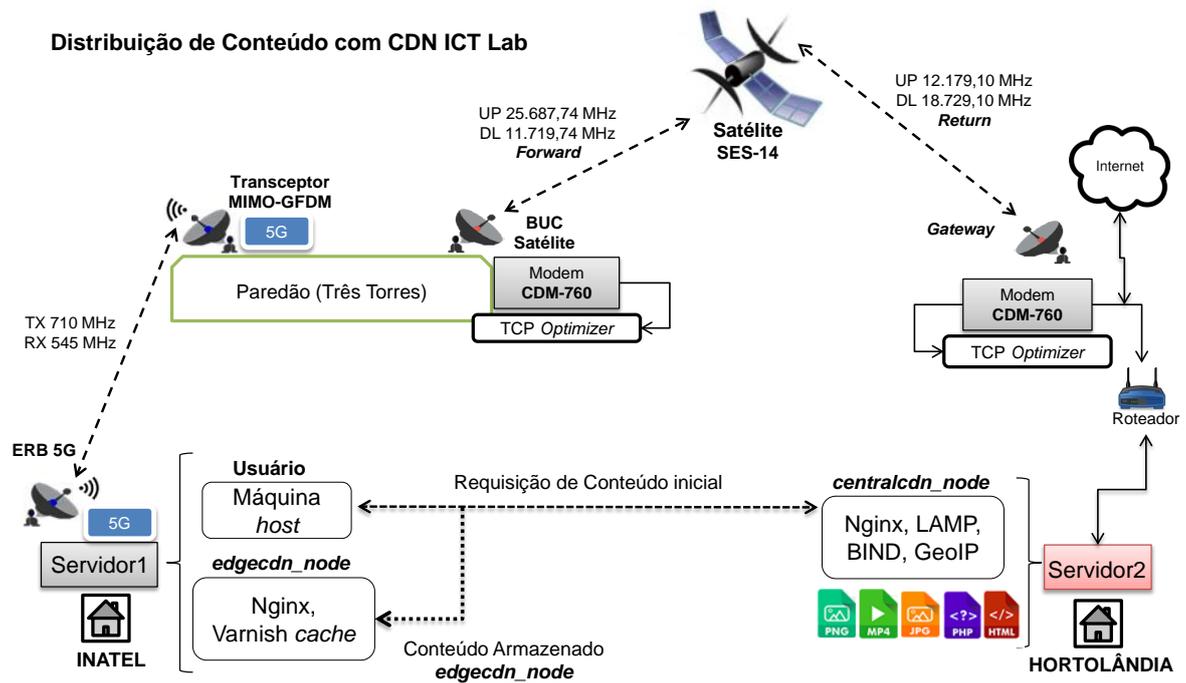


Figura 4.5: Configuração de testes de distribuição de conteúdo via conexão 5G híbrida entre o ICT Lab. (Inatel) Sta. Rita Sapucaí/MG e a estação de Hortolândia/SP.

na cidade de Hortolândia/SP; e (ii) nó de localização de borda com o papel de replicar de forma idêntica o conteúdo uma vez solicitado, denominado *ICT.SAT_5G_edgecdn-node* localizado no ICT Lab. no Inatel. Inicialmente, foi preciso configurar o Servidor 1 instalado no ICT Lab. Dentro do programa *KVM QEMU* foram criadas duas máquinas que emulam o *hardware* físico para instalação dos programas e ferramentas necessárias para a execução dos testes.

O Servidor 1 funciona com o SO Linux Ubuntu 16.04 LTS e a configuração de *hardware* é descrita na Tabela 4.2. O SO do Servidor 1 roda o programa *KVM QEMU* [246] para criação de máquinas virtuais. Dentro do programa *KVM QEMU* foram criadas duas máquinas que emulam o *hardware* físico para instalação dos programas e ferramentas necessários para a execução dos testes. Foram criadas duas máquinas virtuais que constituem os nós com todos os programas utilizados para o teste de distribuição de conteúdo com uma CDN privada. A função de cada máquina virtual representada por um nó na rede é descrita nas Seções 4.3.1 e 4.3.2. Os nós virtuais foram nomeados por padrão como *ICT.SAT_5G_centralcdn-node* e *ICT.SAT_5G_edgecdn-node*, respectivamente. As configurações de cada nó são apresentadas nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4: Características da máquina virtual *ICT.SAT_5G_centralcdn-node*.

| Software Instalado | Hardware Emulado | Quantidade | Localização |
|---|--|------------|---------------------------|
| Sistema Operacional Ubuntu Server 18.04 LTS | Processador Intel Core (Broadwell, IBRS) CPU 2.095 GHz 4 Núcleos x86_x64; 1 interface Gigabit 10/100/1000 Mbps e 1 interface de 10 Gigabits; Memória RAM 8 GB; HD 80 GB. | 1 | Servidor 2 (Hortolândia). |

4.3.1 Programação e Configuração do Nó de Borda

Para a integração da arquitetura híbrida 5G visando a execução dos testes de transferência e recebimento de conteúdo foram configurados dois nós: nó de borda e nó central. O nó de borda denominado *ICT_SAT_5G_edgecdn-node* foi configurado para executar os softwares *Nginx* e *Varnish cache* vinculados. O servidor *Nginx* é um dos servidores Web mais populares no mundo e é responsável por hospedar alguns dos maiores e mais acessados sites na Internet. Essa ferramenta possui mais facilidades de recursos do que o servidor *Apache* em muitos casos e pode ser utilizado como servidor *Web* ou *proxy* reverso. Os passos seguidos para a instalação e configuração de cada programa do *ICT_SAT_5G_edgecdn-node* foram detalhados nesse trabalho.

A versão do *Nginx* utilizada é o *Nginx HTTP* e inicialmente foi preciso criar um usuário regular, não-*root* (com acesso limitado) com privilégios “*sudo*” configurado na máquina virtual *ICT_SAT_5G_edgecdn-node*. O nome do usuário foi definido como *edgecdn_node*. Em seguida foi preciso entrar na máquina virtual com o usuário criado. O programa *Nginx* está disponível nos repositórios padrão do SO Ubuntu. Como essa é a primeira interação com o sistema de gerenciamento de pacotes *apt*, é necessário atualizar o índice local de pacotes para acessar as listas de pacotes mais recentes. As etapas de programação e configuração das ferramentas utilizadas no nó de borda são descritas em forma de tutorial no Apêndice C.1 dessa dissertação.

```

edgecdn_node@edgecdn_node: /var/www/sindisatcdn.com$ systemctl status nginx
● nginx.service - A high performance web server and a reverse proxy server
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/nginx.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Sat 2019-10-05 17:32:48 -03; 4h 34min ago
     Docs: man:nginx(8)
   Process: 2063 ExecStart=/usr/sbin/nginx -g daemon on; master_process on; (code=exited, status=0/SUCCESS)
   Process: 1442 ExecStartPre=/usr/sbin/nginx -t -q -g daemon on; master_process on; (code=exited, status Main PID: 2067 (nginx)
   Tasks: 2 (limit: 4596)
  CGroup: /system.slice/nginx.service
          └─2067 nginx: master process /usr/sbin/nginx -g daemon on; master_process on;
             └─2075 nginx: worker process

out 05 17:32:42 edgecdn_node systemd[1]: Starting A high performance web server and a reverse proxy serv
out 05 17:32:48 edgecdn_node systemd[1]: nginx.service: Failed to parse PID from file /run/nginx.pid: In
out 05 17:32:48 edgecdn_node systemd[1]: Started A high performance web server and a reverse proxy serv
lines 1-15/15 (END)
  
```

Figura 4.6: Teste da instalação do servidor *Web Nginx* no *ICT_SAT_5G_edgecdn-node* da rede CDN.

O terminal de acesso deve apresentar as linhas de código como mostrado na Figura 4.6, que é uma foto da tela no momento da configuração. Depois do serviço ter sido iniciado com sucesso, o objetivo é

Tabela 4.5: Características da máquina virtual *ICT_SAT_5G_edgecdn-node*.

| Software Instalado | Hardware Emulado | Quantidade | Localização |
|---|--|------------|--|
| Sistema Operacional Ubuntu Server 18.04 LTS | Processador Intel Core (Broadwell, IBRS) CPU 2.095 GHz 4 Núcleos x86_x64; 1 interface Gigabit 10/100/1000 Mbps e 1 interface de 10 Gigabits; Memória RAM 8 GB; HD 45 GB. | 1 | Servidor 1 (ICT Lab) e Servidor 2 (Hortolândia). |

instalar e configurar um servidor de *cache Varnish* para operar em conjunto com o servidor *Web*. A próxima etapa foi a de instalação e configuração dos serviços do *software Varnish*.

A saída abaixo apresentada no terminal do Linux mostra que a configuração do servidor *Nginx* operando via *Varnish Cache* está correta. A Figura 4.7 mostra a verificação da configuração realizada por meio de um navegador Web usando o endereço IP: 127.0.0.1:8080, ou a URL criada para a CDN privada, definida como *http://sindisatcdn.com/*.

```
1 #Servidor Web Nginx operando em conjunto com o serviço de cache
  → Varnish:
2
3 HTTP/1.1 200 OK
4 Server: nginx/1.17.2 (Ubuntu)
5 Date: Sat, 24 Aug 2019 17:40:17 GMT
6 Content-Type: text/html/.JPG/.PNG/.mp3/.mp4
7
8 Last-Modified: Sat, 24 Aug 2019 17:45:20 GMT
9 ETag: W/"5a8e342b-324"
10 Vary: Accept-Encoding
11 X-Varnish: 2
12 Age: 0
13 Via: 1.1 varnish (Varnish/6.2.0)
14 Accept-Ranges: bytes
15
16 Connection: keep-alive
```

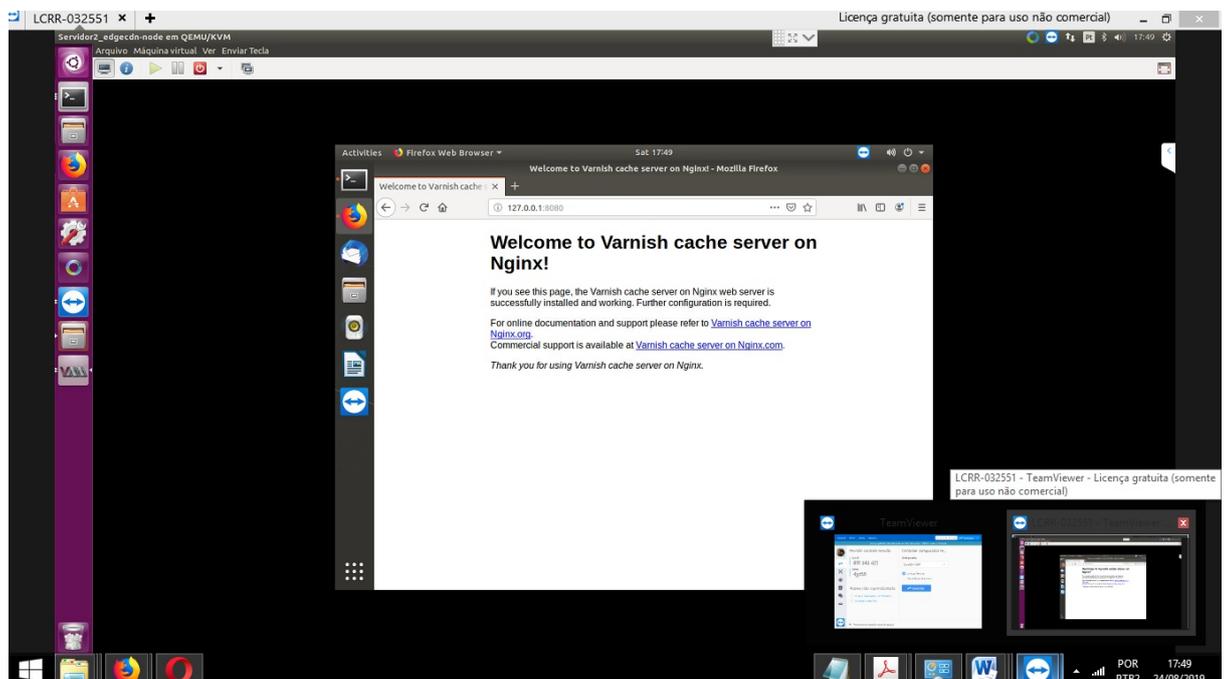


Figura 4.7: Testes iniciais de configuração do *ICT_SAT_5G_edgcdn-node* para o serviço CDN com *Varnish cache*.

4.3.2 Programação e Configuração do Nó Central

O nó central, *ICT_SAT_5G_centralcdn-node*, executará o servidor *Nginx* na *LEMP Stack* (*Linux*, *MySQL*, *Nginx* e *PHP* operando em conjunto), *DNS BIND* e *GeoIP*. Os dados de *backend* são armazenados no banco de dados *MySQL* e o processamento dinâmico é tratado pelo serviço *PHP*. Semelhante ao procedimento efetuado no nó de borda, inicialmente foi instalado o servidor *Web Nginx*. Os passos foram os mesmos que os executados anteriormente na máquina virtual *ICT_SAT_5G_edgcdn-node*. A versão do *Nginx* utilizada é o *Nginx HTTP*. Também foi preciso criar um usuário regular, não-*root* (com acesso limitado) com privilégios *sudo* configurado na máquina virtual *ICT_SAT_5G_centralcdn-node*. O nome do usuário foi definido como *centralcdn_node*.

Inicialmente, para a instalação dos componentes, foi preciso entrar na máquina virtual com o usuário criado. O programa *Nginx* está disponível nos repositórios padrão do sistema operacional. Como esta é a primeira interação com o sistema de gerenciamento de pacotes *apt*, é necessário atualizar o índice local de pacotes para acessar as listas de pacotes mais recentes. O tutorial de programação e configuração do nó central está disponibilizado no Apêndice C.2 dessa dissertação.

A próxima etapa é a de checagem do servidor Web. Ao final do processo de instalação, o SO inicia o *Nginx*. É possível checar a operabilidade do sistema através do comando *init systemd* para ter certeza de que o serviço está executando. A Figura 4.8 apresenta o servidor *Web Nginx* ativo no *ICT_SAT_5G_centralcdn-node*. A partir dessa etapa é possível instalar os outros componentes da pilha *LEMP* para gerenciamento de conteúdos de mídia e *Web*.

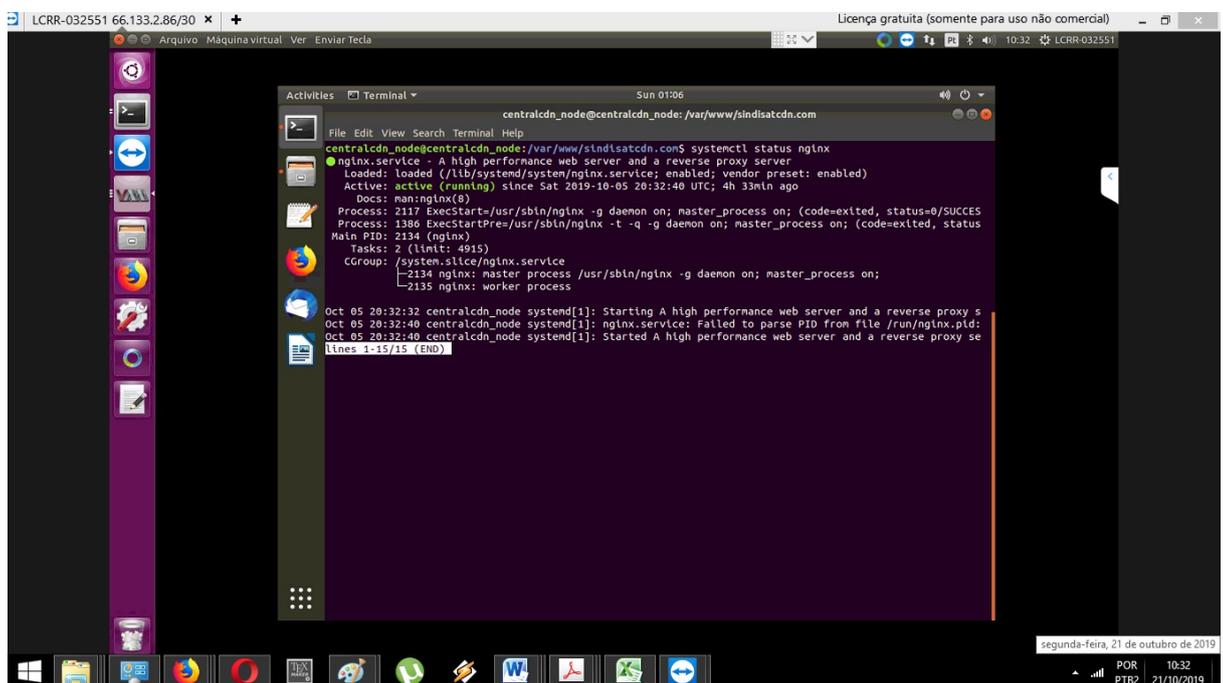


Figura 4.8: Teste da instalação do servidor *Web Nginx* no *ICT_SAT_5G_centralcdn-node* da rede CDN.

- 1 *#Verificando a operabilidade do servidor Nginx:*
- 2 `systemctl status nginx`
- 3
- 4 *#O terminal de acesso deve mostrar as seguintes linhas:*
- 5

```
6 centralcdn_node@centralcdn_node:/var/www/sindisatcdn.com$ systemctl
  → status nginx
7
8 nginx.service - A high performance web server and a reverse proxy
  → server
9   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/nginx.service; enabled;
  → vendor preset: enabled)
10  Active: active (running) since Sat 2019-10-05 20:32:40 UTC; 4h
  → 33min ago
11     Docs: man: nginx (8)
12  Process: 2063 ExecStart=/usr/sbin/nginx -g daemon on;
  → master_process on; (code=exited, status=0/SUCCESS Process:
  → 1442 ExecStartPre=/usr/sbin/nginx -t -q -g daemon on;
  → master_process on; (code=exited, status Main PID: 2067
  → (nginx)
13     Tasks: 2 (limit: 4596)
14    CGroup: /system.slice/nginx.service
```

Ao carregar o servidor *Nginx* com as configurações descritas no tutorial do nó central, a pilha LEMP fica pronta para operações. É possível realizar testes de confirmação de funcionamento de todos os componentes de forma individual. Após os testes o *ICT_SAT_5G_centralcdn-node* está pronto para se comunicar com o *ICT_SAT_5G_edgcdn-node* que irá armazenar os conteúdos requisitados em *cache*.

4.3.3 Configuração Completa da Rede e Instalação dos Componentes

Assim que todos os componentes foram instalados nos computadores físicos e nas máquinas virtuais, foi possível realizar a configuração do protocolo IP em cada dispositivo da rede para a execução dos testes iniciais de latência e conectividade. A arquitetura de testes completa é apresentado na Figura 4.9. Um protótipo da arquitetura de testes inicialmente pretendida foi apresentado em um trabalho sob o título de “Virtualização em Redes Terrestre-Satélite 5G”, no *Workshop* de Teoria, Tecnologias e Aplicações de *Slicing* para Infraestruturas Softwarizadas (WSlice2019) [257]. O Servidor 2 descrito na Figura 4.9 roda uma cópia do nó central, *ICT_SAT_5G_centralcdn-node*, através da máquina virtual. O Servidor 2 está conectado a um roteador com acesso à Internet para fins de configuração no plano de controle. Todo conteúdo acessado pelo usuário provinha do Servidor 1 no laboratório através do enlace 5G híbrido. Esta conexão entre o servidor e o roteador está configurada com o IP: 66.133.2.86/30 e Gateway: 66.133.2.85/30. O roteador também está conectado ao Modem CDM-760 e ao Optimizador de tráfego TCP. O Optimizador de tráfego está configurado com o IP: 172.31.3.1:3131/24 e o Modem CDM-760 com o IP: 10.193.145.30/24 na rede que fecha o enlace entre o BUC e o Gateway (GW) do Satélite SES-14. O *gateway* entre o BUC e o GW está configurado com o endereço IP: 10.193.145.1. Na cidade de Santa Rita do Sapucaí/MG, no Paredão (Três Torres) está localizado o abrigo com o BUC do satélite SES-14 conectado ao outro Modem CDM-760 e ao Optimizador de tráfego TCP. Esses dois estão conectados a um ponto do Transceptor MIMO-GFDM para 5G que fecha o enlace no outro ponto localizado no Inatel. A frequência média de subida do enlace satélite (Forward) foi medida por volta de 25.687,74 MHz para *uplink* e 11.719,74 MHz para *downlink*. O enlace de retorno (Return) medido foi de 12.179,10 MHz *uplink* e 18.729,10 MHz de *downlink*. A frequência média do Transceptor MIMO-

GFDM para 5G para *uplink* foi de 560 MHz e de *uplink* 718 MHz.

A Figura 4.9 também mostra o Servidor 1, configurado com o endereço de rede IP: 66.133.2.82/30 e Gateway: 66.133.2.81, localizado no ICT Lab. no Inatel. O Servidor 1 faz papel de usuário na rede e funciona como um *host* rodando uma cópia do nó de borda, *ICT_SAT_5G_edgcdn-node*, para as requisições de dados multimídia. O testes foram inicialmente configurados para conteúdo estático, com imagens do tipo .PNG e .JPG através de uma página *Hypertext Markup Language* (HTML) com uma imagem padrão. Em seguida, foram efetuadas transferências entre os nós com arquivos do tipo .MP4 e .ISO. Nas Seções 5.1 e 5.2 serão apresentados os resultados obtidos com a utilização da arquitetura descrita na Figura 4.9.

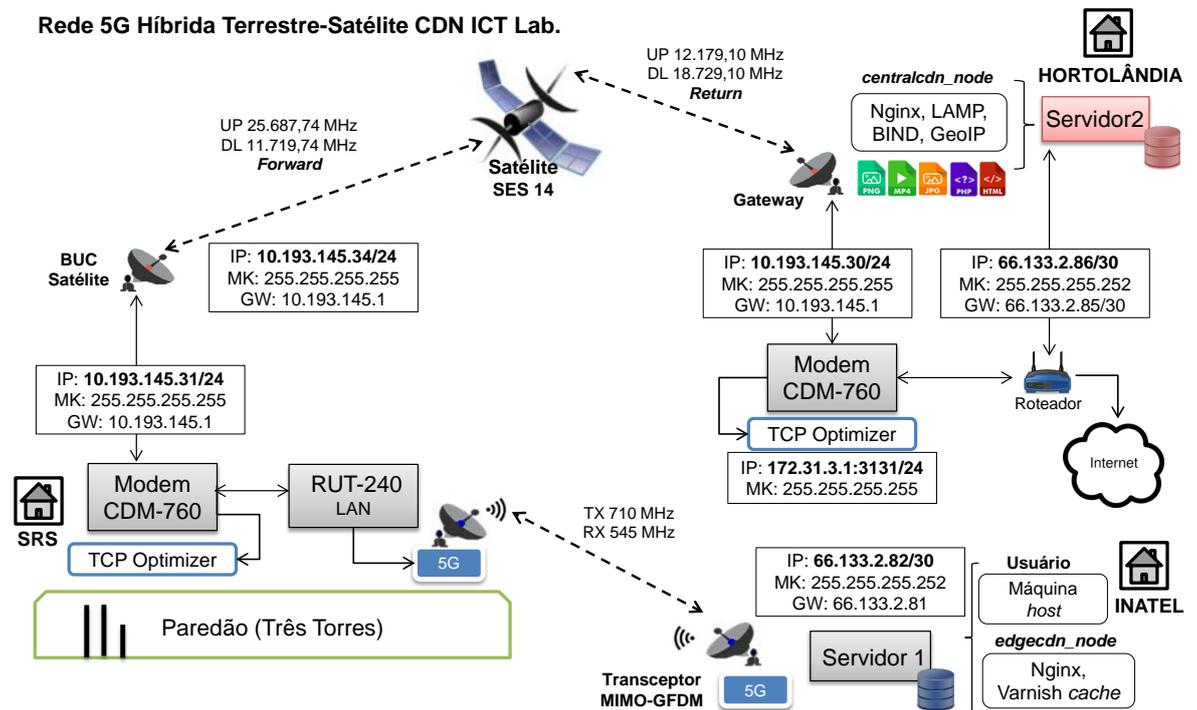


Figura 4.9: Arquitetura de rede completa para os testes de distribuição de conteúdo via rede 5G híbrida. Detalhes da configuração IP.

4.4 Considerações Parciais

O Capítulo 4 apresentou as etapas até a integração de componentes da arquitetura de rede proposta nessa dissertação. Após a análise dos documentos de revisão bibliográfica, foi possível definir o melhor cenário de testes que envolvesse os elementos que compõem a rede híbrida para distribuição de conteúdo. Após a escolha das ferramentas e plataformas *open source* que melhor se enquadraram nos objetivos propostos, a arquitetura foi desenhada e cada elemento da rede configurado. O Capítulo 4 descreveu as configurações em detalhes. Os resultados obtidos com os testes efetuados com a arquitetura proposta serão apresentados no Capítulo 5.

Capítulo 5

Resultado Obtidos

Essa seção apresenta os resultados obtidos. Os resultados são detalhados em tabelas e após a análise dos dados coletados foram plotados gráficos para comparação dos testes realizados. A Seção 5.1 apresenta quais foram os testes executados e em seguida os dados são disponibilizados em tabelas. A análise gráfica é descrita na Seção 5.2.

5.1 Testes de Transferência de Conteúdo

Os programas utilizados para análise dos testes de transferência de conteúdo foram: *WireShark*, *Nload*, *IPtraf*, *Nethogs*, *IFtop* e *MatLab*. O foco dos testes foi medir a latência durante a transferência de diferentes tipos de conteúdos, como imagem, áudio e vídeo, via enlace de satélite e através do enlace com o *hardware* do Transceptor Flexível TX-RX-MIMO-GFDM para redes 5G desenvolvido pelo Inatel [258, 259]. Os testes foram efetuados considerando cenários de distribuição de conteúdo com capacidades-chave para *enhanced Mobile Broadband* (eMBB) [28, 260]. O cenário para o caso de uso de banda larga móvel aprimorada [261], aborda os casos de uso centrados no usuário para acesso a conteúdo, serviços e dados multimídia. Esse cenário aprimorado possibilitará novas aplicações e requisitos de capacidade visando aperfeiçoar o desempenho e a experiência do usuário. Os resultados dos testes também podem ser utilizados para análise em outros cenários como o de áreas remotas. O cenário de acesso em áreas remotas visa atender regiões rurais e de baixa densidade populacional, promovendo uma cobertura satisfatória e com acesso à rede Internet, com baixo custo de implantação e com células de alcance equivalente a 50 km de cobertura. Uma aplicação que pode ser utilizada como exemplo é a *Wireless Regional Area Network* (WRAN). A WRAN dependerá da utilização da rede híbrida terrestre-satélite para suprir as capacidades requeridas.

As Tabelas de Testes 5.1 até a 5.8 apresentam em detalhes os testes efetuados com CDN. Foram considerados trinta ensaios com recebimento e envio de dados para usuários visando a utilização de serviços de armazenamento estáticos e dinâmicos. Na configuração do cenário de teste utilizado para avaliar o desempenho da solução proposta, Figura 5.1, foram utilizados dois nós: (i) nó de conteúdo dinâmico ou nó central, que armazena dados do tipo .PNG, .MP4, .JPG, PHP, HTML etc. nomeado na arquitetura como *ICT_SAT_5G_centralcdn-node* e localizado na cidade de Hortolândia/SP; e (ii) nó de localização de borda com o papel de replicar de forma idêntica o conteúdo uma vez solicitado, denominado *ICT_SAT_5G_edgcdn-node* localizado no ICT Lab. no Inatel.

Uma requisição inicial era realizada e os dados eram transmitidos do *ICT_SAT_5G_centralcdn-node* no Servidor 2, passando pelo otimizador TCP e Modem CDM-760 até o Gateway para o satélite SES-14 e para o BUC. Em seguida, os dados eram transmitidos pelo otimizador TCP e Modem CDM-760 no Paredão (Três Torres) para o Transceptor Flexível MIMO-GFDM que finalizava o enlace 5G até a ERB no *ICT_SAT_5G_edgcdn-node* localizado no ICT Lab no Servidor 1 no Inatel. Uma vez que o conteúdo fosse requisitado o servidor de borda armazenava uma cópia idêntica dos dados e repassava aos usuários dependendo de sua localização simulada em redes criadas por máquinas virtuais.

Nas Tabelas de Testes 5.1 até a 5.8 são informados o valor do tamanho do arquivo transferido em *Bytes*, a taxa média de transferência dada em *Bytes* por segundo e o tempo de transferência apresentado em segundos. O tempo de transferência foi calculado pela divisão do tamanho do arquivo pela taxa de transferência em cada ensaio. No final dos testes, foram calculados: (i) a média obtida para os trinta ensaios; (ii) a taxa de transferência; e (iii) a razão calculada entre o tempo de transferência quando se usa enlace via satélite apenas, dividido pelo tempo necessário para transferir o mesmo arquivo usando enlace via satélite e CDN com o serviço de *cache* local.

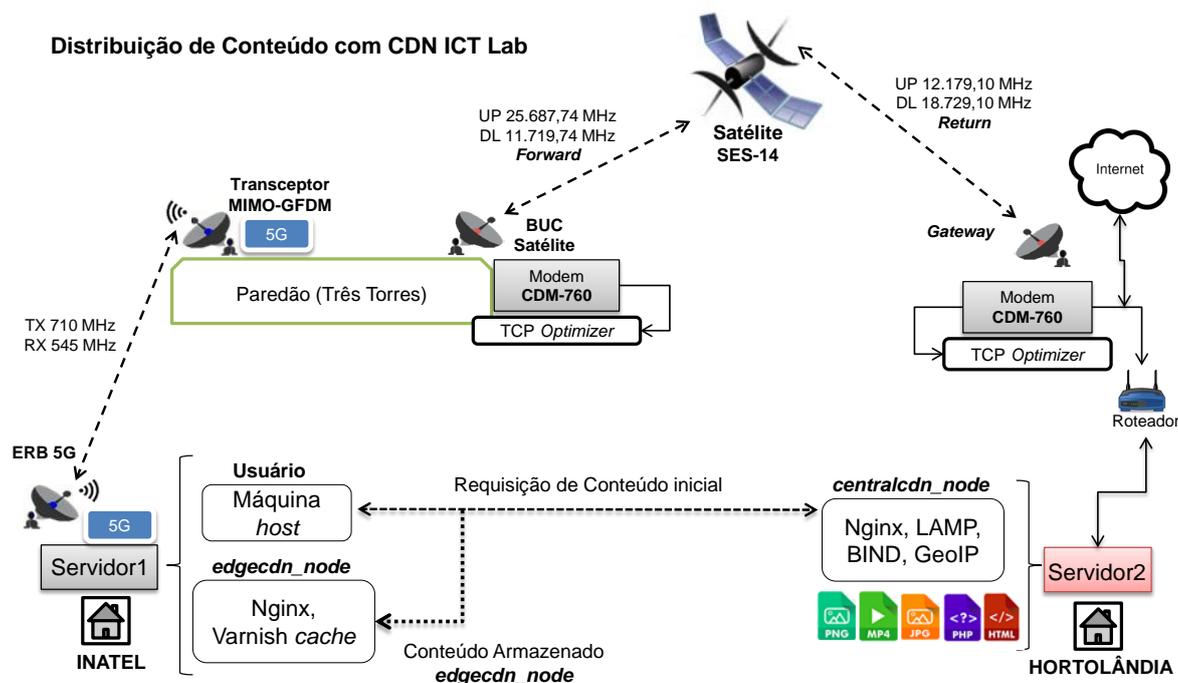


Figura 5.1: Configuração de testes de distribuição de conteúdo via conexão 5G híbrida entre o ICT Lab. (Inatel) Sta. Rita Sapucaí/MG e a estação de Hortolândia/SP.

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados que mostram que para um arquivo de imagem .PNG de 3.083.050 *Bytes*, o tempo médio de transferência entre os pontos de transmissão e envio é de 3,72457 segundos. Via conexão CDN com serviço de armazenamento em *cache* o tempo médio é de 0,12153 segundos. O tempo de transferência foi aproximadamente 30,64733 vezes menor quando se utiliza CDN com *cache* local. No final dos testes foi calculada a razão entre o tempo de transferência quando se usa enlace via satélite dividido tempo necessário para transferir o mesmo arquivo usando rede CDN com o serviço de *cache* local.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os resultados dos testes para o arquivo de imagem .JPG de 6.347.032

Bytes, mais do que o dobro do tamanho anterior. O tempo médio de transferência foi de 4,81943 segundos. O resultado com a rede CDN com serviço de armazenamento em *cache* foi um tempo médio de 0,24273 segundos. A razão para esse ensaio foi de 19,85511, quase 20 vezes mais rápido para o tempo médio medido com o serviço de armazenamento e distribuição por CDN. Esses testes simulam arquivamento de conteúdo estático em *cache*, como imagens armazenadas em um *Web Site* ou *download* de arquivo. O usuário inicialmente faz a requisição para o servidor que contém o conteúdo via enlace satélite através da taxa de transferência possível naquele instante, o conteúdo é armazenado no servidor de borda da rede CDN que disponibiliza para o usuário, ou para qualquer outro, uma cópia idêntica do conteúdo solicitado com um tempo de transferência menor por estar localizado geograficamente mais próximo do destino.

Tabela 5.1: Transferência de Conteúdo: Imagem .PNG sem CDN *cache*.

| | Tamanho (By-tes) | Taxa (By-tes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (By-tes) | Taxa (By-tes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|------------------|-----------------------|------------------|----|------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 3.083.050 | 843.639 | 3,6545 | 16 | 3.083.050 | 835.018 | 3,6922 |
| 2 | 3.083.050 | 839.565 | 3,6722 | 17 | 3.083.050 | 842.675 | 3,6586 |
| 3 | 3.083.050 | 847.135 | 3,6394 | 18 | 3.083.050 | 849.920 | 3,6275 |
| 4 | 3.083.050 | 841.786 | 3,6625 | 19 | 3.083.050 | 854.085 | 3,6098 |
| 5 | 3.083.050 | 851.702 | 3,6199 | 20 | 3.083.050 | 848.985 | 3,6315 |
| 6 | 3.083.050 | 851.518 | 3,6207 | 21 | 3.083.050 | 845.713 | 3,6455 |
| 7 | 3.083.050 | 848.614 | 3,6330 | 22 | 3.083.050 | 845.093 | 3,6482 |
| 8 | 3.083.050 | 842.492 | 3,6594 | 23 | 3.083.050 | 848.941 | 3,6316 |
| 9 | 3.083.050 | 839.212 | 3,6737 | 24 | 3.083.050 | 852.761 | 3,6154 |
| 10 | 3.083.050 | 844.754 | 3,6496 | 25 | 3.083.050 | 852.145 | 3,6180 |
| 11 | 3.083.050 | 843.210 | 3,6563 | 26 | 3.083.050 | 855.391 | 3,6043 |
| 12 | 3.083.050 | 513.410 | 6,0050 | 27 | 3.083.050 | 855.166 | 3,6052 |
| 13 | 3.083.050 | 851.479 | 3,6208 | 28 | 3.083.050 | 822.993 | 3,7461 |
| 14 | 3.083.050 | 844.171 | 3,6522 | 29 | 3.083.050 | 830.211 | 3,7136 |
| 15 | 3.083.050 | 844.723 | 3,6498 | 30 | 3.083.050 | 851.553 | 3,6205 |

Tabela 5.2: Transferência de Conteúdo: Imagem .PNG via CDN *cache*.

| | Tamanho (By-tes) | Taxa (By-tes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (By-tes) | Taxa (By-tes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|------------------|-----------------------|------------------|----|------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 3.083.050 | 20.998.465 | 0,1468 | 16 | 3.083.050 | 26.742.638 | 0,1153 |
| 2 | 3.083.050 | 16.384.376 | 0,1882 | 17 | 3.083.050 | 32.065.645 | 0,0961 |
| 3 | 3.083.050 | 29.616.855 | 0,1041 | 18 | 3.083.050 | 24.415.634 | 0,1263 |
| 4 | 3.083.050 | 25.216.863 | 0,1223 | 19 | 3.083.050 | 25.615.746 | 0,1204 |
| 5 | 3.083.050 | 22.284.618 | 0,1383 | 20 | 3.083.050 | 25.085.153 | 0,1229 |
| 6 | 3.083.050 | 25.184.470 | 0,1224 | 21 | 3.083.050 | 27.645.512 | 0,1115 |
| 7 | 3.083.050 | 28.884.424 | 0,1067 | 22 | 3.083.050 | 25.185.268 | 0,1224 |
| 8 | 3.083.050 | 24.816.861 | 0,1242 | 23 | 3.083.050 | 27.845.334 | 0,1107 |
| 9 | 3.083.050 | 26.716.864 | 0,1154 | 24 | 3.083.050 | 25.585.345 | 0,1205 |
| 10 | 3.083.050 | 25.916.869 | 0,1190 | 25 | 3.083.050 | 38.345.438 | 0,0804 |
| 11 | 3.083.050 | 23.325.291 | 0,1322 | 26 | 3.083.050 | 20.522.749 | 0,1502 |
| 12 | 3.083.050 | 25.024.548 | 0,1232 | 27 | 3.083.050 | 24.114.436 | 0,1279 |
| 13 | 3.083.050 | 21.515.851 | 0,1433 | 28 | 3.083.050 | 33.685.246 | 0,0915 |
| 14 | 3.083.050 | 24.913.521 | 0,1238 | 29 | 3.083.050 | 32.315.517 | 0,0954 |
| 15 | 3.083.050 | 25.345.071 | 0,1216 | 30 | 3.083.050 | 25.115.591 | 0,1228 |

Tabela 5.3: Transferência de Conteúdo: Imagem .JPG sem CDN *cache*.

| | Tamanho (By-tes) | Taxa (By-tes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (By-tes) | Taxa (By-tes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|------------------|-----------------------|------------------|----|------------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 6.347.032 | 1.325.762 | 4,7875 | 16 | 6.347.032 | 1.349.214 | 4,7042 |
| 2 | 6.347.032 | 1.334.630 | 4,7556 | 17 | 6.347.032 | 1.325.695 | 4,7877 |
| 3 | 6.347.032 | 1.334.635 | 4,7556 | 18 | 6.347.032 | 1.322.878 | 4,7979 |
| 4 | 6.347.032 | 1.334.631 | 4,7556 | 19 | 6.347.032 | 1.322.865 | 4,7979 |
| 5 | 6.347.032 | 1.334.641 | 4,7556 | 20 | 6.347.032 | 1.325.732 | 4,7876 |
| 6 | 6.347.032 | 1.317.320 | 4,8181 | 21 | 6.347.032 | 1.353.592 | 4,6890 |
| 7 | 6.347.032 | 1.334.623 | 4,7557 | 22 | 6.347.032 | 1.325.803 | 4,7873 |
| 8 | 6.347.032 | 1.334.617 | 4,7557 | 23 | 6.347.032 | 1.362.174 | 4,6595 |
| 9 | 6.347.032 | 1.351.878 | 4,6950 | 24 | 6.347.032 | 1.325.809 | 4,7873 |
| 10 | 6.347.032 | 1.351.877 | 4,6950 | 25 | 6.347.032 | 1.325.767 | 4,7874 |
| 11 | 6.347.032 | 1.325.651 | 4,7879 | 26 | 6.347.032 | 1.331.397 | 4,7672 |
| 12 | 6.347.032 | 1.325.807 | 4,7873 | 27 | 6.347.032 | 1.125.813 | 5,6377 |
| 13 | 6.347.032 | 1.325.786 | 4,7874 | 28 | 6.347.032 | 1.213.398 | 5,2308 |
| 14 | 6.347.032 | 1.317.442 | 4,8177 | 29 | 6.347.032 | 1.322.813 | 4,7981 |
| 15 | 6.347.032 | 1.241.959 | 5,1105 | 30 | 6.347.032 | 1.338.208 | 4,7429 |

Outro arquivo utilizado para teste de transferência foi um arquivo misto contendo dados, áudio e vídeo, do tipo .ISO. Esse formato de arquivo é uma cópia exata digital de uma mídia física, muito utilizado em processos de trocas de conteúdos entre usuários. São arquivos que contém todo o conteúdo de um CD, DVD ou *Blue Ray*. O formato foi utilizado para simular *downloads* de mídias de arquivos, áudio e vídeo e também de *games*. As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os dados dos testes para esse arquivo. O tamanho total do arquivo foi de 889.192.448 Bytes (889,2 MBytes) e o tempo médio de transferência foi de 325,40174 segundos. Esse valor foi para o arquivo transferido entre os dois pontos de conexão, ICT Lab e Hortolândia, sem o serviço da rede CDN. Para o mesmo caso, com a rede híbrida terrestre-satélite operando com o serviço *cache* da rede CDN o tempo médio de transferência obtido foi 9,5 vezes mais rápido do que as transferências realizadas unicamente via enlace satélite com Modem 5G.

Tabela 5.4: Transferência de Conteúdo: Imagem .JPG via CDN *cache*.

| | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|-----------------|----------------------|------------------|----|-----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 6.347.032 | 23.517.341 | 0,2699 | 16 | 6.347.032 | 22.419.265 | 0,2831 |
| 2 | 6.347.032 | 26.634.689 | 0,2383 | 17 | 6.347.032 | 24.625.778 | 0,2577 |
| 3 | 6.347.032 | 24.134.686 | 0,2630 | 18 | 6.347.032 | 30.615.750 | 0,2073 |
| 4 | 6.347.032 | 25.334.685 | 0,2505 | 19 | 6.347.032 | 24.615.832 | 0,2578 |
| 5 | 6.347.032 | 31.134.705 | 0,2039 | 20 | 6.347.032 | 29.325.851 | 0,2164 |
| 6 | 6.347.032 | 26.217.371 | 0,2421 | 21 | 6.347.032 | 26.125.859 | 0,2429 |
| 7 | 6.347.032 | 23.934.705 | 0,2652 | 22 | 6.347.032 | 24.345.443 | 0,2607 |
| 8 | 6.347.032 | 25.034.694 | 0,2535 | 23 | 6.347.032 | 25.825.869 | 0,2458 |
| 9 | 6.347.032 | 27.110.798 | 0,2341 | 24 | 6.347.032 | 29.925.830 | 0,2121 |
| 10 | 6.347.032 | 26.072.024 | 0,2434 | 25 | 6.347.032 | 27.725.861 | 0,2289 |
| 11 | 6.347.032 | 22.351.905 | 0,2840 | 26 | 6.347.032 | 23.925.868 | 0,2653 |
| 12 | 6.347.032 | 28.225.863 | 0,2249 | 27 | 6.347.032 | 25.225.863 | 0,2516 |
| 13 | 6.347.032 | 26.425.905 | 0,2402 | 28 | 6.347.032 | 34.915.701 | 0,1818 |
| 14 | 6.347.032 | 26.225.448 | 0,2420 | 29 | 6.347.032 | 29.715.808 | 0,2136 |
| 15 | 6.347.032 | 26.025.869 | 0,2439 | 30 | 6.347.032 | 24.615.927 | 0,2578 |

Tabela 5.5: Transferência de Conteúdo: Misto .ISO sem CDN *cache*.

| | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|-----------------|----------------------|------------------|----|-----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 889.192.448 | 3.314.713 | 268,2562 | 16 | 889.192.448 | 2.116.398 | 420,1442 |
| 2 | 889.192.448 | 3.325.296 | 267,4025 | 17 | 889.192.448 | 2.427.573 | 366,2887 |
| 3 | 889.192.448 | 3.327.123 | 267,2557 | 18 | 889.192.448 | 2.427.605 | 366,2838 |
| 4 | 889.192.448 | 3.325.189 | 267,4111 | 19 | 889.192.448 | 2.426.772 | 366,4096 |
| 5 | 889.192.448 | 3.228.047 | 275,4583 | 20 | 889.192.448 | 2.428.166 | 366,1992 |
| 6 | 889.192.448 | 3.228.121 | 275,4520 | 21 | 889.192.448 | 2.427.685 | 366,2718 |
| 7 | 889.192.448 | 3.223.419 | 275,8538 | 22 | 889.192.448 | 2.428.237 | 366,1885 |
| 8 | 889.192.448 | 3.228.033 | 275,4595 | 23 | 889.192.448 | 2.416.448 | 367,9750 |
| 9 | 889.192.448 | 3.327.259 | 267,2447 | 24 | 889.192.448 | 2.426.570 | 366,4401 |
| 10 | 889.192.448 | 3.322.562 | 267,6225 | 25 | 889.192.448 | 2.428.014 | 366,2221 |
| 11 | 889.192.448 | 3.027.549 | 293,7004 | 26 | 889.192.448 | 2.413.640 | 368,4031 |
| 12 | 889.192.448 | 3.227.896 | 275,4712 | 27 | 889.192.448 | 2.022.438 | 439,6636 |
| 13 | 889.192.448 | 3.128.859 | 284,1906 | 28 | 889.192.448 | 2.528.894 | 351,6132 |
| 14 | 889.192.448 | 3.128.720 | 284,2033 | 29 | 889.192.448 | 2.410.112 | 368,9424 |
| 15 | 889.192.448 | 2.925.788 | 303,9155 | 30 | 889.192.448 | 2.428.762 | 366,1093 |

Tabela 5.6: Transferência de Conteúdo: Misto .ISO via CDN *cache*.

| | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|-----------------|----------------------|------------------|----|-----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 889.192.448 | 25.115.812 | 35,4037 | 16 | 889.192.448 | 25.215.077 | 35,2643 |
| 2 | 889.192.448 | 26.615.764 | 33,4085 | 17 | 889.192.448 | 26.315.570 | 33,7896 |
| 3 | 889.192.448 | 26.115.906 | 34,0479 | 18 | 889.192.448 | 26.215.679 | 33,9183 |
| 4 | 889.192.448 | 27.815.571 | 31,9674 | 19 | 889.192.448 | 26.315.145 | 33,7901 |
| 5 | 889.192.448 | 28.015.237 | 31,7396 | 20 | 889.192.448 | 23.014.888 | 38,6355 |
| 6 | 889.192.448 | 27.315.812 | 32,5523 | 21 | 889.192.448 | 26.314.472 | 33,7910 |
| 7 | 889.192.448 | 27.415.725 | 32,4337 | 22 | 889.192.448 | 26.915.216 | 33,0368 |
| 8 | 889.192.448 | 27.315.799 | 32,5523 | 23 | 889.192.448 | 23.212.910 | 38,3059 |
| 9 | 889.192.448 | 26.715.698 | 33,2835 | 24 | 889.192.448 | 26.815.336 | 33,1598 |
| 10 | 889.192.448 | 25.815.361 | 34,4443 | 25 | 889.192.448 | 27.215.202 | 32,6726 |
| 11 | 889.192.448 | 25.215.236 | 35,2641 | 26 | 889.192.448 | 25.315.854 | 35,1239 |
| 12 | 889.192.448 | 27.415.410 | 32,4340 | 27 | 889.192.448 | 26.015.836 | 34,1789 |
| 13 | 889.192.448 | 27.115.456 | 32,7928 | 28 | 889.192.448 | 27.915.442 | 31,8531 |
| 14 | 889.192.448 | 26.289.877 | 33,8226 | 29 | 889.192.448 | 25.815.691 | 34,4439 |
| 15 | 889.192.448 | 18.813.016 | 47,2647 | 30 | 889.192.448 | 25.615.645 | 34,7129 |

As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam os dados coletados para a quarta série de testes realizados com um arquivo misto de áudio e vídeo. O arquivo utilizado foi um filme do tipo .MP4 com tamanho total de 2.580.263.063 Bytes (2,58 GBytes) para simular tanto *downloads* como uma forma de transmissão instantânea e contínua de dados. O tempo de transferência médio para estes ensaios foi de 897,75052 segundos (14,96251 minutos), operando unicamente via enlace satélite com Modem 5G. Os mesmos ensaios foram feitos via enlace satélite e Modem 5G com a rede CDN e o tempo de transferência médio obtido foi de 127,02721 segundos (2,11712 minutos). A razão entre as transferências com CDN e sem CDN com serviço *cache* foi de 7,1 vezes.

Tabela 5.7: Transferência de Conteúdo: Misto .MP4 sem CDN *cache*.

| | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|-----------------|----------------------|------------------|----|-----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 2.580.263.063 | 3.128.957 | 824,6400 | 16 | 2.580.263.063 | 3.232.266 | 798,2830 |
| 2 | 2.580.263.063 | 3.332.466 | 774,2804 | 17 | 2.580.263.063 | 3.029.111 | 851,8219 |
| 3 | 2.580.263.063 | 3.432.003 | 751,8242 | 18 | 2.580.263.063 | 2.913.621 | 885,5864 |
| 4 | 2.580.263.063 | 3.430.842 | 752,0787 | 19 | 2.580.263.063 | 2.219.744 | 1162,4147 |
| 5 | 2.580.263.063 | 3.332.680 | 774,2307 | 20 | 2.580.263.063 | 2.123.797 | 1214,9292 |
| 6 | 2.580.263.063 | 3.432.362 | 751,7456 | 21 | 2.580.263.063 | 2.476.057 | 1042,0855 |
| 7 | 2.580.263.063 | 3.458.442 | 746,0767 | 22 | 2.580.263.063 | 2.477.659 | 1041,4117 |
| 8 | 2.580.263.063 | 3.432.915 | 751,6245 | 23 | 2.580.263.063 | 2.427.649 | 1062,8650 |
| 9 | 2.580.263.063 | 3.432.447 | 751,7270 | 24 | 2.580.263.063 | 2.440.212 | 1057,3930 |
| 10 | 2.580.263.063 | 3.252.014 | 793,4354 | 25 | 2.580.263.063 | 2.414.260 | 1068,7594 |
| 11 | 2.580.263.063 | 3.232.359 | 798,2601 | 26 | 2.580.263.063 | 2.328.723 | 1108,0163 |
| 12 | 2.580.263.063 | 3.132.195 | 823,7875 | 27 | 2.580.263.063 | 2.528.098 | 1020,6341 |
| 13 | 2.580.263.063 | 3.233.089 | 798,0798 | 28 | 2.580.263.063 | 2.427.733 | 1062,8282 |
| 14 | 2.580.263.063 | 3.132.387 | 823,7370 | 29 | 2.580.263.063 | 2.850.549 | 905,1811 |
| 15 | 2.580.263.063 | 3.231.855 | 798,3845 | 30 | 2.580.263.063 | 2.755.531 | 936,3941 |

Tabela 5.8: Transferência de Conteúdo: Misto .MP4 via CDN *cache*.

| | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) | | Tamanho (Bytes) | Taxa (Bytes/segundo) | Tempo (segundos) |
|----|-----------------|----------------------|------------------|----|-----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 2.580.263.063 | 20.364.045 | 126,7068 | 16 | 2.580.263.063 | 21.045.172 | 122,6059 |
| 2 | 2.580.263.063 | 19.844.651 | 130,0231 | 17 | 2.580.263.063 | 21.046.230 | 122,5998 |
| 3 | 2.580.263.063 | 21.246.522 | 121,4440 | 18 | 2.580.263.063 | 21.045.011 | 122,6069 |
| 4 | 2.580.263.063 | 19.646.041 | 131,3376 | 19 | 2.580.263.063 | 17.742.547 | 145,4280 |
| 5 | 2.580.263.063 | 22.545.918 | 114,4448 | 20 | 2.580.263.063 | 19.742.577 | 130,6954 |
| 6 | 2.580.263.063 | 20.946.095 | 123,1859 | 21 | 2.580.263.063 | 18.722.440 | 137,8166 |
| 7 | 2.580.263.063 | 20.345.470 | 126,8225 | 22 | 2.580.263.063 | 18.543.883 | 139,1436 |
| 8 | 2.580.263.063 | 20.446.443 | 126,1962 | 23 | 2.580.263.063 | 21.245.445 | 121,4502 |
| 9 | 2.580.263.063 | 21.446.024 | 120,3143 | 24 | 2.580.263.063 | 26.380.816 | 97,8083 |
| 10 | 2.580.263.063 | 15.643.362 | 164,9430 | 25 | 2.580.263.063 | 20.045.270 | 128,7218 |
| 11 | 2.580.263.063 | 21.685.186 | 118,9874 | 26 | 2.580.263.063 | 21.345.393 | 120,8815 |
| 12 | 2.580.263.063 | 16.344.520 | 157,8672 | 27 | 2.580.263.063 | 21.546.505 | 119,7532 |
| 13 | 2.580.263.063 | 21.845.877 | 118,1121 | 28 | 2.580.263.063 | 20.946.101 | 123,1858 |
| 14 | 2.580.263.063 | 21.945.938 | 117,5736 | 29 | 2.580.263.063 | 20.517.057 | 125,7619 |
| 15 | 2.580.263.063 | 20.784.131 | 124,1458 | 30 | 2.580.263.063 | 19.809.572 | 130,2533 |

5.2 Análise Comparativa entre as Taxas de Transferência da Arquitetura de Testes

Nessa seção são disponibilizados os gráficos criados após a análise dos dados apresentados nas tabelas na Seção 5.1. O valor da margem de erro utilizada em cada série de testes apresentadas nos gráficos foi de 0,05. A margem de erro está disponibilizada em vermelho com um círculo preenchido para os ensaios sem CDN e quadrado preenchido para os ensaios com CDN. Os gráficos também apresentam a média móvel calculada em cada série de testes. A Figura 5.2 apresenta uma análise comparativa entre a taxa de transferência em cada um dos trinta ensaios sem o serviço da CDN com armazenamento em *cache*. A velocidade média dos trinta ensaios foi de 844.602 Bytes/segundo para um arquivo do tipo .PNG com tamanho de 3.083.050 Bytes. A Figura 5.2 também apresenta a análise dos resultados com a taxa de transferência de dados em cada um dos trinta ensaios com a rede operando com o serviço CDN com

armazenamento em *cache*. A taxa de transferência para o arquivo de 3.083.050 Bytes operando com o serviço CDN *cache*. A taxa média durante a transferência dos trinta arquivos para este caso foi de aproximadamente 26.014.340 Bytes/segundo. Em comparação com a taxa média obtida com os mesmos testes sem o serviço CDN *cache*, de 834.602 Bytes/segundo, consegue-se uma taxa de transferência 30 vezes maior (razão exata de 31,16976 vezes). A medida de latência média obtida para o enlace satélite foi de 560,930 ms (da aplicação PING: RTD (*Round Trip Delay*) mínimo = 510,916, média = 560,930, máximo = 629,949 e *Jitter* = 46,065 ms) para 11.458 pacotes transmitidos, sendo 11.435 os pacotes recebidos, resultando em uma perda de 0,002% da quantidade total dos pacotes.

A Figura 5.3 apresenta uma análise semelhante à anterior com o resultado da taxa de transferência dos trinta ensaios para o arquivo .JPG com tamanho total de 6.347.032 Bytes. A variação da taxa de transferência para este arquivo foi menor e se mostrou mais estável. A taxa de transferência média obtida foi de 1.318.747 Bytes/Segundo. A Figura 5.3 também apresenta os valores de taxa de transferência pelo número de ensaios para um arquivo de 6.347.032 Bytes com a rede CDN operando com *cache* de armazenamento. Para este arquivo, a utilização do serviço CDN com armazenamento *cache* se mostrou 20,0273 vezes mais rápida, considerando a razão entre as médias das taxas de transferência obtidas com a execução dos testes. A menor taxa de transferência obtida para este arquivo foi de 22,352 MBytes/segundo, muito superior a maior taxa registrada durante a transferência do mesmo arquivo para a rede sem o serviço *cache*, de 1,4 MBytes/segundo.

A Figura 5.4 mostra os valores de taxa de transferência para os trinta ensaios considerando um arquivo misto de dados, áudio e vídeo do tipo .ISO com tamanho total de 889.192.448 Bytes. A taxa média obtida para este caso foi de 2.801.529,6 Bytes/segundo. É possível visualizar neste gráfico que para os quinze primeiros ensaios o valor da taxa de transferência se manteve por volta de 3,3 MBytes/segundo e a partir do ensaio dezesseis, o valor caiu para cerca de 2,4 MBytes/segundo. A Figura 5.4 também contém os resultados de taxa de transferência de cada ensaio para o arquivo do tipo .ISO com o serviço CDN *cache*. A taxa média de transferência obtida para essa série de trinta ensaios foi 26.044.454,8 Bytes/segundo, cerca de 9,3 mais rápida do que as transferências sem o armazenamento em *cache* da rede CDN privada criada em laboratório. É possível ver no gráfico, que o menor valor foi o do ensaio quinze, com taxa de transferência de 18,813 MBytes/segundo. Essa valor é 5,6544 maior do que a maior taxa de transferência obtida durante os testes realizados sem o serviço CDN *cache*.

A Figura 5.5 mostra o gráfico com os resultados da última série de testes com a arquitetura de rede 5G híbrida. O arquivo utilizado foi um filme .MP4 de áudio e vídeo para simular modos de transferência contínua. O tamanho total do arquivo transferido foi 2.580.263.063 Bytes (2,6 GBytes). O gráfico mostra a taxa por volta de 3,3 MBytes/segundo até ensaio de número dezoito. A taxa cai para aproximadamente 2,2 MBytes/segundo no ensaio dezenove, se mantém em 2,4 até o ensaio vinte e oito e termina em 2,8 MBytes/segundo. A taxa média de transferência obtida para os dados desta série de testes foi de 2.942.400,8 Bytes/segundo para a rede operando sem o serviço CDN *cache*. Para o arquivo misto .MP4 contendo áudio e vídeo, a taxa média de transferência para os trinta ensaios foi 20.493.474,7 Bytes/segundo, como pode ser visto na Figura 5.5. Esse valor também se mostra significativo, sendo cerca de 7 vezes maior do que a taxa de transferência de dados para os testes com o arquivo do mesmo tamanho total quando transferido sem o serviço CDN *cache*. No gráfico é apresentado que o menor valor foi obtido no ensaio dez e o maior valor no ensaio vinte e quatro. Os valores para esta série de testes variam de 15,643 MBytes/segundo a 26,381 MBytes/segundo. A medida de latência média obtida para o enlace satélite foi de 523.569 ms (da aplicação PING: RTD (*Round Trip Delay*) mínimo = 509.233 ms, média = 523.569, máximo = 619.512 e *Jitter* = 14.061 ms) para 10.258 pacotes transmitidos, sendo

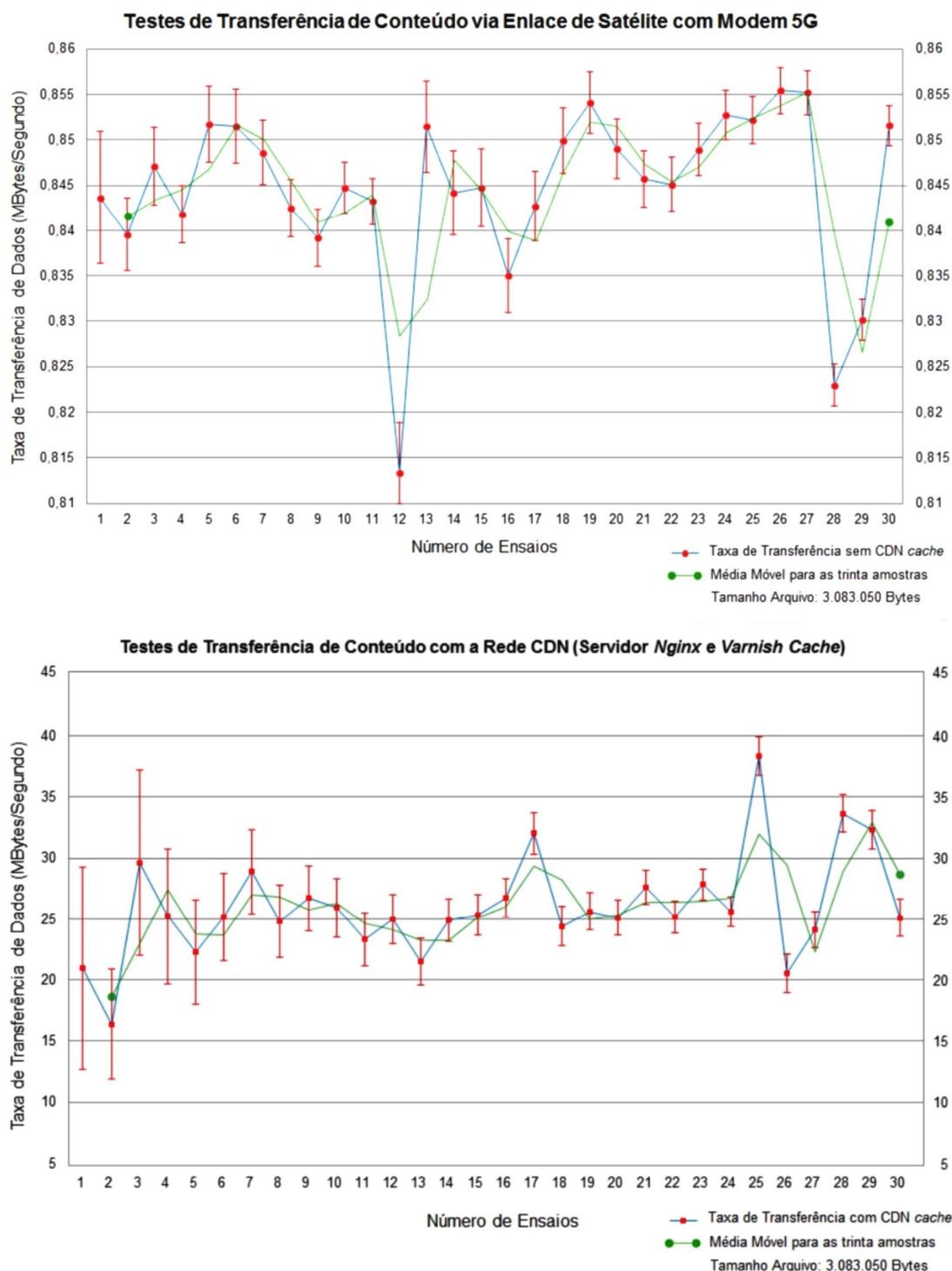


Figura 5.2: Taxa de Transferência pelo Número de Ensaio para o Arquivo .PNG

10.234 os pacotes recebidos, resultando em uma perda de 0,23% da quantidade total dos pacotes.

Durante a execução dos testes, a taxa de transferência, ou *throughput* de rede completa com enlace de satélite e Modem 5G variou entre o valor de 840,0 KB mínimo para o arquivo menor e foi até 3,458 MB de valor máximo para o arquivo maior. Convertida em bits por segundo os valores obtidos foram de 6,720 Mbps mínimo até 27,664 Mbps máximo. Essa limitação no *throughput* de rede pode ter

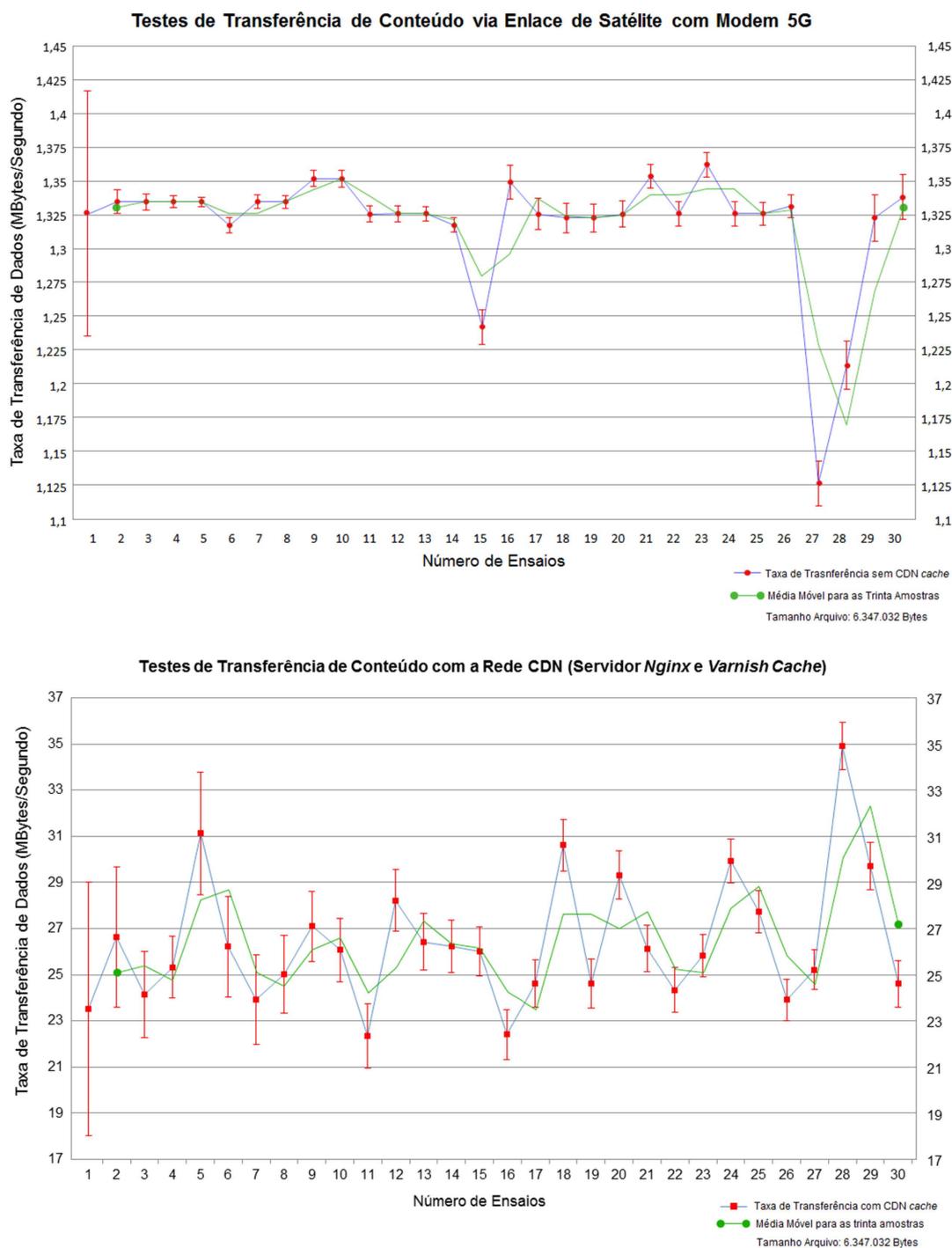


Figura 5.3: Taxa de Transferência pelo Número de Ensaios para o Arquivo .JPG

sido causada pela utilização da aplicação do protocolo TCP. O modem COMTECH CDM-760, garante a comunicação livre de perda de pacotes enquanto a SNR for superior a -2.1 dBA. A utilização do acelerador TCP é fundamental para aumentar a vazão de dados no protocolo TCP, porém, o acelerador limita a taxa de transmissão de dados por fluxo de dados. Com uma quantidade maior de fluxos de dados, é esperado que a taxa de transmissão alcance valores próximo a capacidade máxima do enlace. A capacidade de transmissão máxima do Modem 5G pode chegar até 100 Mbps e depende da largura

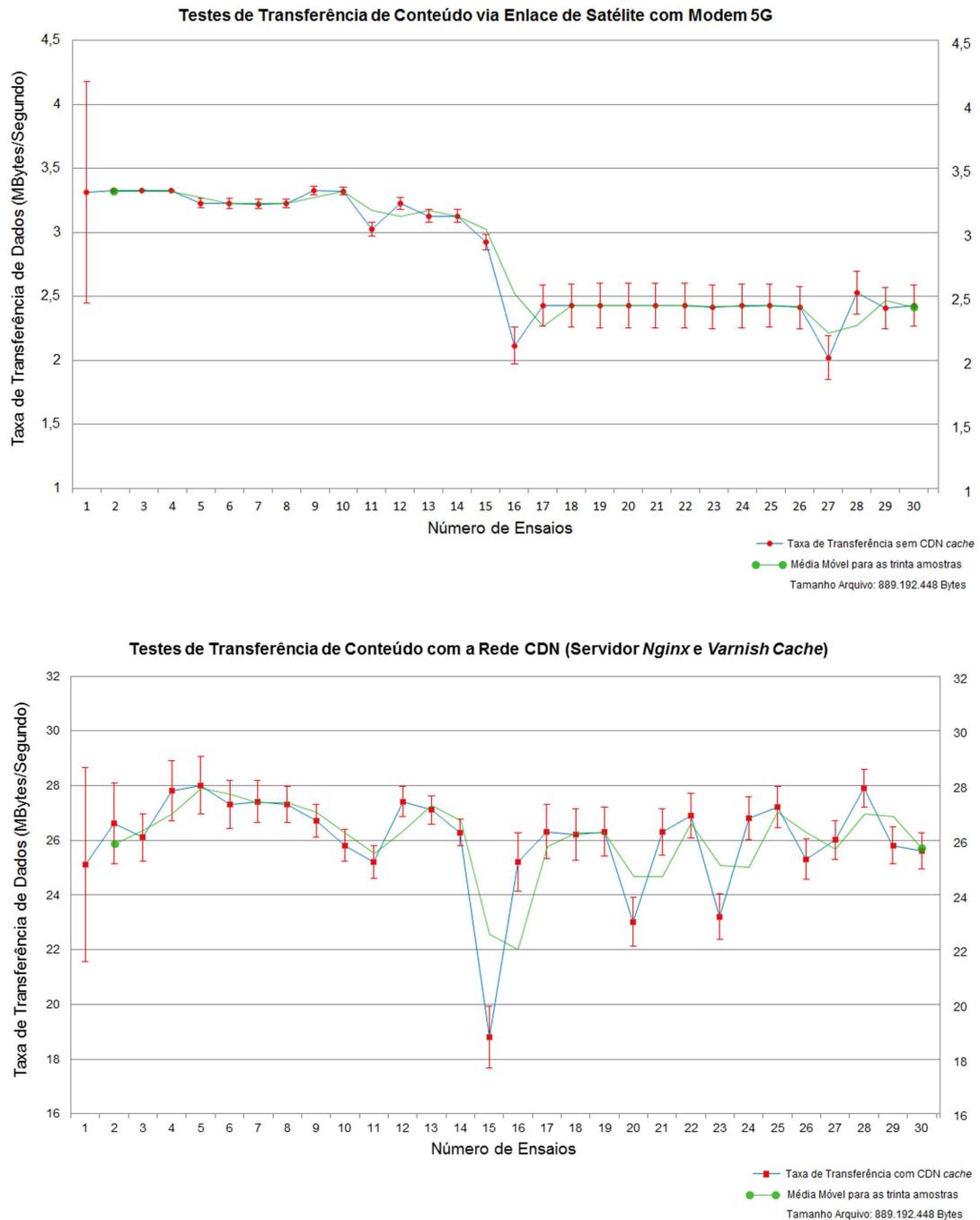


Figura 5.4: Taxa de Transferência pelo Número de Ensaios para o Arquivo .ISO.

de banda configurada, da ordem da modulação utilizada, e da taxa do código de correção erros. A capacidade de transmissão máxima do enlace satélite e do Modem 5G durante a execução dos testes são apresentados na Tabela 5.9. Na Tabela 5.9 é possível observar a largura de banda (*Bandwidth*), as taxas de transmissão UDP e TCP e a porcentagem de pacotes transmitidos no enlaces satélite e 5G. O modem COMTECH CDM-760, garante a comunicação livre de perda de pacotes enquanto a SNR for superior a -2.1 dBA. A utilização do acelerador TCP é fundamental para aumentar a vazão de dados no protocolo TCP, porém, o acelerador limita a taxa de transmissão de dados por fluxo de dados. Com uma

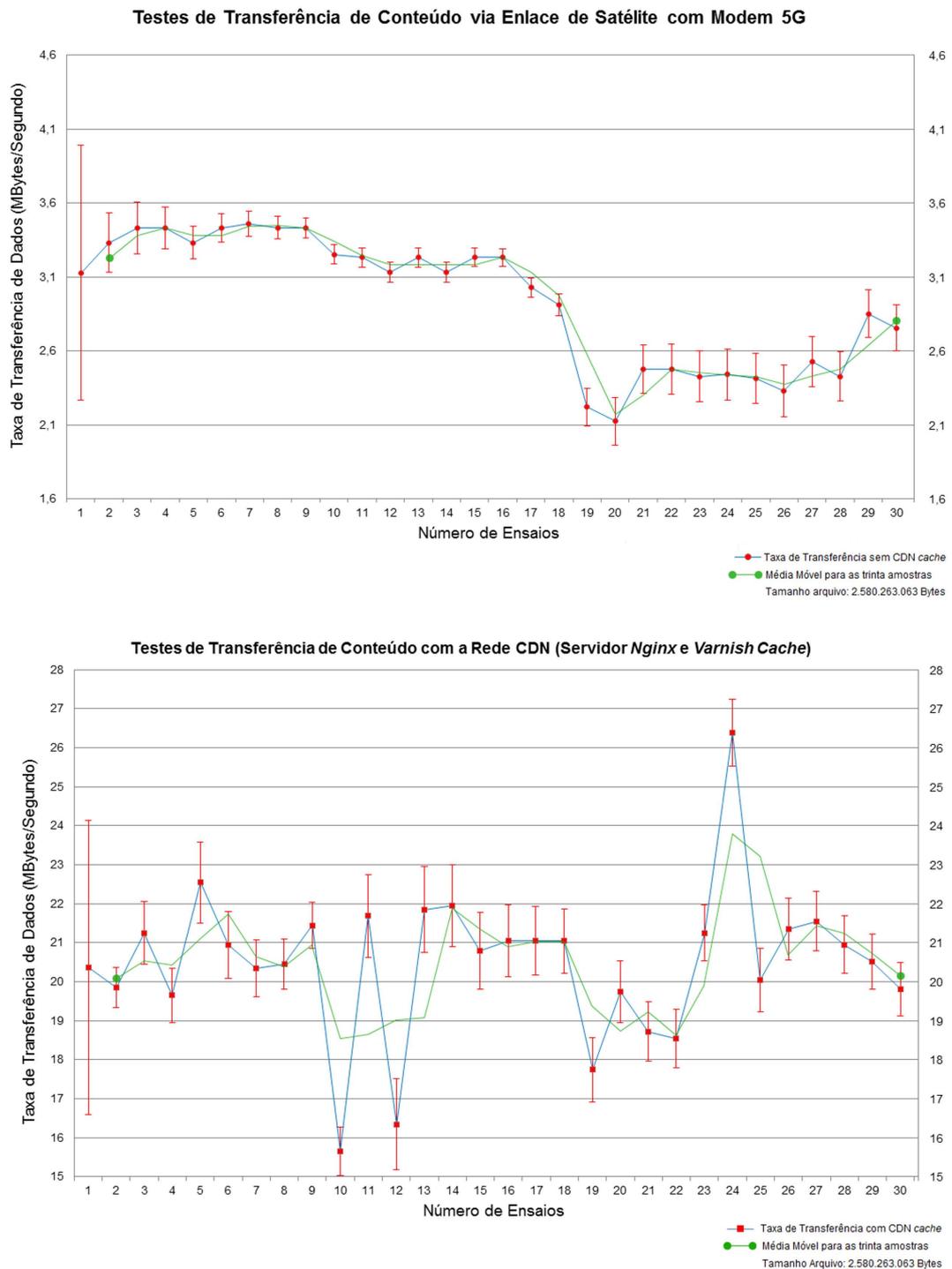


Figura 5.5: Taxa de Transferência pelo Número de Ensaio para o Arquivo .MP4.

quantidade maior de fluxos de dados, é esperado que a taxa de transmissão alcance valores próximo a capacidade máxima do enlace.

Os resultados dos testes mostram através das análises que quanto maior o tamanho do arquivo transferido em Bytes, menor é a razão entre os tempos de transferência via satélite operando sem o serviço da CDN com armazenamento em *cache* do que com o serviço da CDN. Mesmo para os ensaios do arquivo

de 2,6 GBytes, em que o valor obtido da razão entre os tempos de transferência foi 7,1 vezes, é possível visualizar uma vantagem significativa, já que, o conteúdo precisa ser transferido com tempo maior via satélite para o servidor do nó de borda apenas uma única vez. Depois dessa transferência é possível replicar o conteúdo via rede local (rede terrestre) para inúmeros usuários localizados próximo do nó de borda que contém uma cópia idêntica do arquivo.

Para a transferência de arquivos menores os resultados mostram grandes vantagens, de aproximadamente 20 a 30 vezes os tempos gastos com as transferências realizadas apenas via enlace satélite operando com o transceptor flexível TX-RX-MIMO-GFDM para 5G. Esse serviço pode ser configurado para analisar as demandas mais populares e armazenar somente os conteúdos mais acessados em horários em que o usuário não estiver utilizando a rede. Parte da carga pode ser transferida via satélite com alto *throughput* com um tempo maior, e uma vez que o conteúdo original chegar ao servidor de borda, a CDN armazena os conteúdos mais requisitados através de análise e fornece de maneira transparente para o usuário uma cópia do conteúdo em um tempo menor.

Tabela 5.9: Capacidade do enlace satélite e do Modem 5G durante a execução dos testes.

| Enlace: | Bandwidth: | Acelerador TCP: | Taxa TCP: | Taxa UDP: | Pacotes Transmitidos: | Jitter: |
|---|---|-----------------|----------------------|-------------------|-----------------------|---------|
| Satélite entre St. Rita Sapucaí/MG e Hortolândia/SP | 25.687,74 MHz Uplink / 11.719,74 MHz Downlink | Não | 4.15 Mbps / 3.9 Mbps | 90 Mbps / 34 Mbps | 99,996% | 0.260ms |
| Satélite entre St. Rita Sapucaí/MG e Hortolândia/SP | 25.687,74 MHz Uplink / 11.719,74 MHz Downlink | Sim | 60 Mbps / 30 Mbps | 90 Mbps / 34 Mbps | 100% | 0.260ms |
| Modem 5G St. Rita Sapucaí/MG | 710,0 MHz TX / 545,0 MHz RX | Sim | 30 Mbps / 30 Mbps | 30 Mbps / 30 Mbps | 99,937% | 0.465ms |
| Satélite com Modem 5G | 25.687,74 MHz Uplink / 11.719,74 MHz Downlink | Sim | 31 Mbps / 28 Mbps | 29 Mbps / 29 Mbps | 99,77% | 0.451ms |

5.3 Considerações Parciais

O Capítulo 5 apresentou em detalhes os resultados obtidos com a arquitetura de testes integrada em laboratório e campo. Através da análise, é possível apresentar algumas considerações sobre a integração de redes via satélite operando com um serviço CDN. Para operar eficientemente o sistema híbrido deve abordar alguns aspectos, sendo eles: (i) a seleção do segmento espacial pertencente ao operador de satélite. O segmento espacial de um sistema artificial de satélites é um dos seus três componentes operacionais, sendo os outros os segmentos usuário e solo; (ii) deve-se obter uma infraestrutura de comunicação híbrida terrestre-satélite significativa em relação a operabilidade, para que a estação de satélite possa efetuar transmissões e forneça interconexões à rede terrestre; (iii) é importante definir a tecnologia presente *nohub* e as configurações de rede de satélite mais adequadas que satisfaçam os requisitos de serviço que se pretende entregar, como canais, serviços habilitados, e tipo de transmissão, *unicast*, *multicast* ou *broadcast*; e por último, (iv) deve haver gerenciamento contínuo dos serviços baseados em redes centradas em informação ou IP sobre o domínio de satélite.

Capítulo 6

Considerações Finais

Esse capítulo apresenta as conclusões sobre o trabalho efetuado. Esse trabalho teve como objetivo integrar componentes, instalar redes de testes e avaliar o desempenho de uma aplicação de entrega de conteúdo CDN via enlace satélite, considerando *cache* e enlace 5G real através da janela de testes com os equipamentos de satélite das empresas SES e COMTECH e do transceptor flexível TX-RX-MIMO-GFDM para comunicação 5G. Foi pretendido contribuir com cenários do Brasil para parte do desenvolvimento das rede 5G.

6.1 Contribuições

Essa pesquisa contribui com a implementação e configuração de uma arquitetura 5G híbrida formada por conexões terrestres em conjunto com enlace satélite para distribuição de conteúdos com *cache* de rede. Os sistemas de comunicação 5G híbridos são uma solução promissora para estender e complementar o acesso à rede em todas as áreas de cobertura como refletido nos empreendimentos comerciais e de padronização. Os dados obtidos através dos testes provam que a rede híbrida operando com CDN se torna mais rápida, robusta e eficiente. As transmissões efetuadas apresentaram perda mínima de pacotes durante os testes e verificou-se o comportamento da integração do armazenamento temporário em rede híbrida para maior eficiência no acesso aos conteúdos distribuídos. A solução proposta tira proveito da rede híbrida para manter o *cache* atualizado. As pesquisas realizadas mostram que as futuras redes móveis 5G precisam atender à implantação maciça de inúmeros objetos e sensores inteligentes conectados, e suportar uma demanda crescente de consumo e produção de novos serviços e conteúdos. Espera-se que a nova rede de rádio 5G atenda os casos de uso explorados, pois a demanda por comunicações entre máquina continua a crescer extensivamente para conectar um grande número de dispositivos inteligentes com os benefícios do uso de redes de terminais móveis.

A partir da análise qualitativa realizada, concluí-se que o 5G é construído a partir da convergência entre os ambientes terrestre e satélite, ao invés de redes separadas. A arquitetura híbrida se mostra mais adequada a suprir os diversos casos de uso emergentes no contexto da evolução tecnológica. Para tanto, a padronização do 5G deve contemplar a arquitetura híbrida na sua totalidade. Com o foco no aprendizado da interoperabilidade existente no cenário de integração da comunicação via satélite em sistemas 5G, realizou-se um estudo das padronizações mais relevantes existentes, dentre os órgãos mencionados, que abordam as tecnologias envolvidas no escopo desse trabalho. Diversos documentos e especificações técnicas foram analisadas e observou-se que os principais órgãos padronizadores estão de certo modo

alinhados, uma vez que referenciam-se uns aos outros em quase todas suas especificações, e de uma forma indireta, vêm realizando um trabalho de mútua cooperação. Além das padronizações, analisou-se também os projetos submetidos ao IMT 2020 que abrangem o cenário híbrido terrestre-satélite 5G no contexto das tecnologias CDN, IDN e ICN, a fim de investigar o desenvolvimento das soluções propostas a nível de arquitetura e protocolos utilizados, bem como a interoperabilidade e os desafios existentes na implementação destas tecnologias no cenário de comunicação via satélite.

A interoperabilidade deve ser garantida via padrões amplos e que integrem o enlace de comunicação por satélite ao 5G. Os casos de uso do 5G devem ser atendidos através de redes híbridas, sempre garantindo resiliência, cobertura e qualidade. O Brasil por suas dimensões continentais e cultura única demanda pela personalização de atendimentos e serviços singulares. Assim sendo, a padronização da arquitetura híbrida e suas capacidades irá naturalmente permitir o ajuste ao contexto nacional. Os ganhos da arquitetura híbrida 5G são evidentes e comprovados pelo estado da arte da literatura analisada. A evolução da Internet com o 5G é uma oportunidade única para a convergência terrestre/satélite e para a evolução das comunicações globais. No período desse trabalho, houve avanço no entendimento das redes híbridas terrestre-satélite 5G através do estudo dos entregáveis dos projetos Europeus mais próximos do foco da dissertação. Esses projetos contribuem ativamente para o processo de padronização do 5G no 5G PPP, ETSI e 3GPP. Dentre eles, podemos citar os projetos: ESA ARTES SHINE, 5G MEDIA, 5G NORMA, CHARISMA, 5G-XHaul, 5G-Xcast, SESAME, Sat5G entre outros. Os avanços e caminhos relacionados ao processo de padronização do 5G no 3GPP ficaram mais claros com os documentos das *Releases* 15 e 16. Foi possível encontrar uma visão arquitetural mais para os seguimentos da evolução do 4G para o 5G. Nesse contexto, os documentos 3GPP TS 138.401, TS 38.300 e ETSI TR 38.821 que apresenta detalhes da arquitetura NG-RAN para o caso de enlaces de satélite foram analisados cuidadosamente.

O desenvolvimento de um ambiente de testes para essas redes se faz necessário. A proposta se baseou nos principais projetos do programa H2020 e nos órgãos padronizadores estudados nessa dissertação. Conceitos como controle de rede, segurança, distribuição de conteúdo, redes centradas em informação, virtualização, e novos meios de comunicação são explorados e correlacionados. Sobre o cenário de experimentação para o ambiente laboratorial de testes, inicialmente levantou-se as ferramentas e plataformas necessárias para implementar de forma integrada a rede híbrida com um nó localizado no ICT Lab. Inatel em Santa Rita do Sapucaí/MG e o outro em Hortolândia/SP. Um conjunto inicial de ferramentas e plataformas *Open Source* foi selecionado e a interoperabilidade entre os componentes investigado. Uma análise dos serviços prestados por cada componente para os demais foi realizada, permitindo uma visão de sequência do comportamento de cada componente na rede. Em seguida, houve avanço no entendimento das interfaces entre os componentes, onde alguns foram instalados provisoriamente para fins de avaliação individual. Os recursos de *software* utilizados na implementação na arquitetura são: (i) sistema operacional GNU/Linux Ubuntu; (ii) máquinas virtuais criadas com KVM; (iii) *Nginx*, servidor *Web* configurado com recursos de *proxy* e armazenamento em *cache*; (iv) o *Varnish Cache* é um mecanismo de armazenamento de alto desempenho usado para manter o conteúdo acessado recentemente na memória; (v) *LEMP Stack* para construção de *sites*, gerenciamento de banco de dados relacional e linguagem de programação para aplicativos da *Web*; (vi) BIND DNS que mantém todos os componentes se comunicando na rede, serve a cada cliente o IP do nó de borda mais próximo na CDN; e (vii) GeoIP utilizado em servidores para buscar localizações baseadas em IP.

O próximo passo foi a configuração do protocolo IP em cada componente da arquitetura. O Servidor 1 (localizado no ICT Lab. no Inatel) foi configurado para se comunicar com uma estação do transceptor

flexível MIMO-GFDM que fechou o enlace 5G com outra estação localizada no “Paredão ou Três Torres”. O Modem 5G foi conectado via LAN ao Modem COMTECH CDM-760 configurado para operar com um otimizador de tráfego TCP. O Modem COMTECH CDM-760 em conjunto com o otimizador de tráfego TCP faz parte de uma rede IP própria que conecta os equipamentos do enlace satélite. Para finalizar o enlace satélite, o Modem COMTECH CDM-760 é conectado ao BUC da antena localizado no “Paredão ou Três Torres” que se comunica com o satélite GEO SES-14 e esse com o Gateway em Hortolândia/SP. O Gateway foi conectado com o outro Modem COMTECH CDM-760 em conjunto com o otimizador de tráfego TCP que conclui a conexão da arquitetura até o Servidor 2 em Hortolândia/SP. Para questões de testes internos, configuração e controle da rede, o Modem COMTECH CDM-760 e o otimizador de tráfego TCP no lado do Servidor 2 foram conectados a um roteador com acesso à Internet.

O cenário de uso considerado para a construção da arquitetura foi o de teste visando CDN considerando *caching*: utilizar *caches* e outras ferramentas *open source* para rede híbrida 5G. Esses testes simulam arquivamento de conteúdo estático em *cache*, como imagens armazenadas em um *Web Site* ou *download* de arquivo. O usuário inicialmente faz a requisição para o servidor que contém o conteúdo via enlace satélite através da taxa de transferência possível naquele instante, o conteúdo é armazenado no servidor de borda da rede CDN que disponibiliza para o usuário (ou para qualquer outro) uma cópia idêntica do conteúdo solicitado com um tempo de transferência menor por estar localizado geograficamente mais próximo do destino. Avaliar o suporte ao gerenciamento de *cache* e *streaming* adaptativo, se possível para distribuição de conteúdo. Em resumo, foram executados quatro testes de distribuição de conteúdo com a arquitetura 5G híbrida com diferentes formatos de arquivo. Foram considerados trinta ensaios para vários tipos de arquivo de tamanhos diferentes para simular o recebimento e o envio de dados para usuários visando a utilização de serviços de armazenamento estáticos e dinâmicos:

- Série de testes de distribuição de conteúdo com arquivo do tipo .PNG. Os resultados mostram que para um arquivo de imagem .PNG de 3.083.050 Bytes, o tempo médio de transferência entre os pontos de transmissão e envio é de 3,72457 segundos. Com a rede CDN com serviço de armazenamento em *cache* o tempo médio é de 0,12153 segundos. O tempo de transferência foi aproximadamente 30,64733 vezes mais rápido quando se utiliza *cache* local;
- Série de testes de distribuição de conteúdo com arquivo .JPEG. Para esse arquivo de 6.347.032 Bytes (mais do que o dobro do tamanho anterior), o tempo médio de transferência foi de 4,81943 segundos. O resultado com a rede CDN com serviço de armazenamento em *cache* foi um tempo médio de 0,24273 segundos. A razão para este ensaio foi de 19,85511, quase 20 vezes mais rápido para o tempo médio medido com o serviço de armazenamento e distribuição por CDN;
- Série de testes de distribuição de conteúdo com arquivo .ISO. Esse formato de arquivo é uma cópia exata digital de uma mídia física. São arquivos que contém todo o conteúdo de um CD, DVD ou *Blue Ray*. O formato foi utilizado para simular *downloads* de mídias de arquivos, áudio e vídeo e também de *games*. O tamanho total do arquivo foi de 889.192.448 Bytes (889,2 MBytes). Para esse arquivo o tempo médio de transferência foi de 325,40174 segundos. Isso quando o arquivo foi transferido entre os dois pontos de conexão, ICT Lab e Hortolândia, sem o serviço da rede CDN. Para este caso, rede híbrida terrestre-satélite operando com o serviço *cache* da rede CDN se mostrou 9,5 vezes mais rápida do que as transferências realizadas unicamente via enlace satélite com o modulador GFDM para 5G;
- Série de testes de distribuição de conteúdo com arquivo .MP4. A quarta série de testes realizados

foi com um arquivo de áudio e vídeo, um filme do tipo .MP4 com tamanho total de 2.580.263.063 Bytes (2,58 GBytes) para simular tanto *downloads* como uma forma de transmissão instantânea e contínua de dados. O tempo de transferência médio para estes ensaios foi de 897,75052 segundos (14,96251 minutos), operando unicamente via enlace satélite e com o modulador GFDM para 5G. Os mesmos ensaios foram feitos com a rede CDN e o tempo de transferência médio obtido foi de 127,02721 segundos (2,11712 minutos). A razão entre as transferências com a rede CDN e sem o serviço *cache* foi de 7,1 vezes.

O foco dos testes foi medir a latência durante a transferência de diferentes tipos de conteúdos (imagem, áudio e vídeo) via enlace de satélite e através do enlace com o *hardware* do Transceptor Flexível MIMO-GFDM para redes 5G desenvolvido pelo Inatel. Tanto cenários sem *cache* local, quanto com foram considerados, os resultados dos testes mostram através das análises, por gráficos e tabelas, que quanto maior o tamanho do arquivo transferido em Bytes, menor é a razão entre os tempos de transferência via satélite operando sem o serviço da rede CDN com armazenamento em *cache* do que com o serviço da rede CDN. Os resultados obtidos com o experimento provam que a rede híbrida operando com CDN se torna mais rápida, robusta e eficiente, apresentando perda mínima de pacotes durante os testes. Através das análises destaca-se que quanto maior o tamanho do arquivo transferido em Bytes, menor é a razão entre os tempos de transferência na rede híbrida comparando os serviços com e sem CDN. Depois que a transferência é concluída é possível replicar o conteúdo via rede local (rede terrestre) para inúmeros usuários localizados próximo do nó de borda que contém uma cópia idêntica do arquivo.

Para arquivos menores os resultados mostram grandes vantagens, cerca de 30 vezes os tempos gastos com as transferências realizadas apenas via enlace satélite operando com o Modem 5G. Mesmo para os ensaios do arquivo de 2,5 GB, em que o valor obtido da razão entre os tempos de transferência foi 7,1 vezes, é possível visualizar uma vantagem significativa, já que, o conteúdo precisa ser transferido com tempo maior via satélite para o servidor do nó de borda apenas uma única vez. Depois dessa transferência é possível replicar o conteúdo via rede local (rede terrestre) para inúmeros usuários localizados próximo do nó de borda que contém uma cópia idêntica do arquivo. Para arquivos menores os resultados mostram grandes vantagens, de aproximadamente 20 a 30 vezes os tempos gastos com as transferências realizadas apenas via enlace satélite operando com o transceptor flexível MIMO-GFDM para 5G. Este serviço pode ser configurado para analisar as demandas mais populares e armazenar somente os conteúdos mais acessados em horários em que o usuário não estiver utilizando a rede. Parte da carga pode ser transferida via satélite com alto *throughput* com um tempo maior, e uma vez que o conteúdo original chegar ao servidor de borda, a rede CDN armazena os conteúdos mais requisitados através de análise e fornece de maneira transparente para o usuário uma cópia do conteúdo em um tempo menor.

Através das análises destaca-se que quanto maior o tamanho do arquivo transferido em Bytes, menor é a razão entre os tempos de transferência na rede híbrida comparando os serviços com e sem CDN. Depois que a transferência é concluída é possível replicar o conteúdo via rede local (rede terrestre) para inúmeros usuários localizados próximo do nó de borda que contém uma cópia idêntica do arquivo. Para arquivos menores os resultados mostram grandes vantagens, cerca de 30 vezes os tempos gastos com as transferências realizadas apenas via enlace satélite operando com o Modem 5G. O serviço CDN pode ser configurado para analisar as demandas mais populares e armazenar somente os conteúdos mais acessados em horários em que o usuário não estiver utilizando a rede. Parte da carga pode ser transferida via satélite com alto *throughput* em um tempo maior, e uma vez que o conteúdo original

chegar ao servidor de borda, a rede CDN armazena os conteúdos mais requisitados através de análise e fornece de maneira transparente para o usuário uma cópia do conteúdo em um tempo menor.

6.2 Lições Aprendidas

As pesquisas realizadas para elaboração desse trabalho mostram que as futuras redes móveis 5G precisarão atender à implantação maciça da comunicação entre máquinas, da produção e consumo de conteúdo com milhares de objetos e sensores inteligentes conectados. Espera-se que a nova rede de rádio 5G e futuramente 6G atenda os casos de uso explorados, pois a demanda por comunicações de máquina continua a crescer extensivamente para conectar um grande número de dispositivos inteligentes com os benefícios do uso de redes de terminais móveis. A comunicação via satélite poderá dar suporte à conectividade extremamente confiável, segura e contínua em vários cenários e serviços em uma rede 5G. Já existem inclusive trabalhos em 6G que colocam o satélite em posição de destaque. Além disso, os componentes de comunicação por satélite serão essenciais para lidar com desafios referentes ao suporte à cobertura onipresente, às comunicações M2M, às missões críticas de telecomunicações e ao aumento do tráfego multimídia. Devido a isso, principalmente nos cenários WRAN e *enhanced Remote Area Communications* (eRAC), novos paradigmas de arquitetura híbrida têm sido explorados. O intuito é ampliar a provisão de serviços para áreas remotas em diversos setores, como ambientes e transportes inteligentes, agricultura, aeronáutico, militar, marítimo, entre diversos outros.

No que refere-se à padronização, o 3GPP juntamente com o projeto Sat5G (entre outros) da Agência Espacial Europeia (ESA), investiga a integração das redes não terrestres à infraestrutura da rede 5G. Ainda em estado inicial, os estudos técnicos analisaram os casos de uso de banda larga móvel aprimorada (eMBB) buscando atender aos requisitos da comunicação massiva do tipo máquina (mMTC) para uma conectividade híbrida. Os documentos apresentados até o momento, focaram na descrição dos casos de uso e no entendimento de quais problemas técnicos devem ser resolvidos, ao invés de propor a solução. É crescente o número de operadores de satélites LEO apostando no financiando e no lançamento de novas constelações espaciais. Algumas especificamente orientadas ao M2M que beneficiará o consumo e o fornecimento de conteúdo são previstas na *Release 16* do 3GPP, . Por isso, entende-se que o momento é propício para avaliar como essas mesmas redes podem evoluir e ampliar para atender às futuras demandas do cenário mMTC 5G e posteriormente, os cenários que já começam a surgir de 6G.

Antes mesmo do 5G tornar-se realidade, o tráfego de dados aumentou significativamente devido ao cenário de isolamento social atual consequente à pandemia do coronavírus. Essa situação emergencial de saúde pública mundial, na qual a maioria das pessoas estão sendo obrigadas a permanecer em suas casas forçou a população revisar e em alguns casos inovar a maneira como as atividades cotidianas são realizadas. Nesse sentido, para dar continuidade aos seus trabalhos e atividades do dia a dia, a conexão à Internet tem sido essencial para atender os desafios para na maior parte dos casos. Consequentemente, há uma sobrecarga na rede de Internet prejudicando a qualidade e o desempenho da rede. Essa situação pode piorar ainda mais ao considerarmos as inúmeras aplicações emergentes do 5G, onde espera-se que milhares de dispositivos estejam conectados à Internet. Deste modo, ao analisar o cenário atual em conjunto com as futuras demandas exigidas com a chegada do 5G, percebe-se que as tecnologias estudadas neste projeto têm contribuindo extremamente com desenvolvimento de arquiteturas híbridas terrestre-satélite. Amplamente utilizadas, as tecnologias que possibilitam o suporte das demandas que estão surgindo como as práticas para distribuição de conteúdo CDN e ICN em conjunto com a progra-

mabilidade e virtualização de redes, como SDN e NFV, possuem um papel fundamental para evolução de soluções integradas.

6.3 Trabalhos Futuros

Os resultados atingidos com o trabalho efetuado nessa dissertação reforçam e comprovam que a integração da comunicação via satélite será essencial para o atendimento aos vários usuários em potencial que desejam acessar serviços 5G/6G/xG em áreas remotas ou não atendidas pelas redes móveis terrestres. As redes de acesso via satélite 5G trazem possibilidades de inovação e melhorias para a sociedade e viabilizam a prestação de serviço de provedores no âmbito mundial para diversos casos de uso. O serviço CDN pode ser configurado para analisar as demandas mais populares e armazenar somente os conteúdos mais acessados em horários em que o usuário não estiver utilizando a rede. Parte da carga pode ser transferida via satélite com alto *throughput* em um tempo maior, e uma vez que o conteúdo original chegar ao servidor de borda, a rede CDN armazena os conteúdos mais requisitados através de análise e fornece de maneira transparente para o usuário uma cópia do conteúdo em um tempo menor. Testes da arquitetura com fluxo contínuo de dados *streaming* fazem parte das propostas de atividades futuras. Nos casos de uso de satélites de baixa órbita, LEO, por exemplo, a latência é baixa devido aos satélites estarem mais próximos da Terra. As antenas tendem a ser baratas, mas as taxas de dados são limitadas. É um modelo ideal para aplicações M2M entre outras. Para os casos de utilização de satélites GEO, como o da arquitetura desse trabalho, há uma maior latência devido à maior distância da Terra. Mas também uma maior capacidade de transmissão e reenvio de dados com sinal estável, como constatado com os testes efetuados. O que favorece aplicações como a de serviços corporativos, áreas não cobertas, aeronáuticos e marítimos, por exemplo. Trabalhos futuros visam testes de *cache* com arquitetura de Internet do Futuro *NovaGenesis*, uma rede ICN, através do enlace de satélite até o ponto final da rede para comparações.

O 5G híbrido certamente tirará proveito de tecnologias de virtualização, controle e distribuição de conteúdo, reduzindo custos de operação e latência na rede. Contudo, os resultados obtidos reforçam e comprovam que a integração da comunicação via satélite será essencial para o atendimento aos vários usuários em potencial que desejam acessar serviços 5G em áreas remotas ou não atendidas. As redes de acesso via satélite 5G trazem possibilidades de inovação e melhorias para a sociedade e viabilizam a prestação de serviço de provedores no âmbito mundial para diversos casos de uso. Destacam-se: novas formas de digitalizar operações nos setores público e privado, impacto ambiental reduzido, segurança pública, *Health Care*, realidade virtual e aumentada, cidades inteligentes, setor industrial, veículos autônomos, dispositivos vestíveis, *Artificial Intelligence* (AI) e ambientes sempre conectados.

Bibliografia

- [1] F. H. P. F. S. Pandi, S. Wunderlich, “Reliable low latency wireless mesh networks — from myth to reality,” in *15th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. IEEE, March 2018.
- [2] K. K. T. Pasca, S. Dama, “A feasible cellular internet of things,” in *IEEE Consum. Elect. Mag.*, vol. 16, 2017, pp. 66–72.
- [3] C. K. M. Tavares, D. Samardzija, “A 5g lightweight connectionless protocol for massive cellular internet of things,” in *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. Work. WCNCW 2017*, vol. 16, 2017, pp. 01–06.
- [4] J. H. A. Berman, J. Dorrier, “How to think exponentially and better predict the future,” <https://singularityhub.com/2016/04/05/how-to-think-exponentially-and-better-predict-the-future/>, vol. Abril, Outubro 2016.
- [5] W. Hong, “Solving the 5g mobile antenna puzzle: Assessing future directions for the 5g mobile antenna paradigm shift,” in *IEEE Mic. Th. and Tech. Soc.*, vol. 18, no. 07, 2017, pp. 86–102.
- [6] Z. M. F. Y. Kawamoto, H. Nishiyama, “Effective data collection via satellite-routed sensor system (srss) to realize global-scaled internet of things,” in *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 10, 2013, p. 3645–3654.
- [7] B. G. Evans, “The role of satellites in 5g,” in *Adv. Satell. Multimed. Syst. Conf. Signal Process. Sp. Commun. Work. ASMS/SPSC 2014*, vol. 14, 2015, p. 197–202.
- [8] N. Z. Min, Xuemai Gu, “Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5g,” in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23. IEEE, December 2016, pp. 96–106.
- [9] S. C. Guidotti, A. Vanelli-Coralli, “Architectures and key technical challenges for 5g systems incorporating satellites,” in *Transactions on Vehicular Technologies*, June 2018.
- [10] W. Ejaz, M. Imran, M. Jo, N. Muhammad, S. Qaisar, and W. Wang, “Internet of things (iot) in 5g wireless communications,” in *IEEE Access*, vol. 4. IEEE, January 2016, pp. 10 310–10 314.
- [11] O. Y. A. Naser Al-Falahy, “Technologies for 5g networks: Challenges and opportunities,” in *IEEE IT Professional*, vol. 19, no. 01, Feb 2017.
- [12] ETSI, “Satellite earth stations and systems (ses); edge delivery in 5g through satellite multicast edge delivery in 5g through satellite multicast,” in *ETSI Work Programme*. [Online: 24/09/2018] Disponível em: <https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/> Acesso em: 28/09/2018 às 13:26, September 2018.
- [13] 3GPP, “3rd generation partnership project; technical specification group services and system

- aspects; study on ims based peer-to-peer content distribution services,” *Release 12*, August 2012. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/release-12>
- [14] G. G. e. a. Tomaso de Cola, Alberto Ginesi, “Network and protocol architectures for future satellite systems,” in *Foundations and Trends in Networking*, vol. 12. [Online: 24/07/2017] Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1561/1300000046> Acesso em: 02/08/2018 às 16:00, Jul 2017, pp. 01–15.
- [15] F. G. Dario Sabella, Alessandro Vaillant, “Mobile-edge computing architecture: The role of mec in the internet of things,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 5, no. 4, October 2016.
- [16] I. Sodagar, “The mpeg-dash standard for multimedia streaming over the internet,” in *IEEE Multimedia*, vol. 18, 2011, pp. 62–67.
- [17] C. Inc., “Visual networking index: Forecast and methodology, 2016-2021,” in *Cisco Annual Internet Report*. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>. Acesso em: 23/04/2020 às 16:32, 2020.
- [18] Q.-V. P. et al., “A survey of multi-access edge computing in 5g and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art,” in *IEEE Access*, vol. 08. IEEE, June 2020.
- [19] M. J. Marcus, “5g and ”imt for 2020 and beyond” spectrum policy and regulatory issues,” in *IEEE Wireless Communications*, vol. 22. IEEE, August 2015, pp. 2–3.
- [20] B. Dai, “Prospect of 5g communication mode for energy internet,” in *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. IEEE, December 2018.
- [21] N.-I. P. Young, Jae-Ho Kim, “Revolutionary direction for 5g mobile core network architecture,” in *2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. IEEE, December 2016.
- [22] IEEE, “Standards news,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54. IEEE, December 2016, pp. 12–13.
- [23] R. S. e. a. K. Liolis, A. Geurtz, “Use cases and scenarios of 5g integrated satellite-terrestrial networks for enhanced mobile broadband: The sat5g approach,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. Maio, Maio 2018.
- [24] 3GPP, “Study on using satellite access in 5g,” in *Release 16 Technical report (TR) 22.822*. 3GPP, 2018.
- [25] P. B. S. Bibi, P. Sarigiannidis, “Hybrid 5g optical-wireless sdn-based networks, challenges and open issues,” in *IEEE IET Net.*, vol. 06, 2017, pp. 141–148.
- [26] G. A. e. a. Claudio Cicconetti, Agostino Isca, “Architecture and analysis of a satellite downstream boost for xdsl networks,” in *7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*, October 2014.
- [27] 3GPP, “Tr 38.913 study on scenarios and requirements for next generation access technologies,” in *Release 14*. [Online: 12/12/2015] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38913.htm> Acesso em: 19/07/2018 às 13:40, 2016.
- [28] I. S. e. a. Chang Ge, Ning Wang, “Qoe-assured live streaming via satellite backhaul in 5g networks,” in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 65. IEEE, March 2019, pp. 381–391.
- [29] V. L. e. H. S. e. M. R. e. F. H. P. F. M. Mehrabi, D. You, “Device-enhanced mec: Multi-access

- edge computing (mec) aided by end device computation and caching: A survey,” in *IEEE Access*, vol. 7. IEEE, 2019, pp. 166 079–166 108.
- [30] J. A. O. C. A. Viana Melo and G. B. Figueiredo, “Towards peer-assisted video on demand system: Building helpful overlays,” in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14. IEEE, June 2016, pp. 3011–3016.
- [31] H. B. H. Kim, T. Mei and T. Yao, “Exploiting web images for video highlight detection with triplet deep ranking,” in *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 20. IEEE, September 2018, pp. 2415–2426.
- [32] Q. W. et al., “Enable advanced qos-aware network slicing in 5g networks for slice-based media use cases,” in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 65. IEEE, June 2019, pp. 444–453.
- [33] Q. W. Gaogang Xie, Mohamed Ali Kaafar, “Access types effect on internet video services and its implications on cdn caching,” in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 28. IEEE, May 2018, pp. 1183–1196.
- [34] K. T. M. De Donno and N. Dragoni, “Foundations and evolution of modern computing paradigms: Cloud, iot, edge, and fog,” in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 7. IEEE, May 2019, pp. 150 936 – 150 948.
- [35] H. E.-S. et al., “Edge of things: The big picture on the integration of edge, iot and the cloud in a distributed computing environment,” in *IEEE Access*, vol. 6. IEEE, December 2018, pp. 1706–1717.
- [36] Y. B. et al., “Cdn interconnection service trial: Implementation and analysis,” in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 16, May 2016, pp. 94–100.
- [37] J. W. J. Xue, D. Choffnes, “Cdns meet cn an empirical study of cdn deployments in china,” in *IEEE Access*, vol. 05, May 2017, pp. 5292–5305.
- [38] P. P. Giovanni Giambene, Sastri Kota, “Satellite-5g integration: A network perspective,” in *IEEE Network*, vol. 32, September 2018, pp. 25–31.
- [39] C. R. Simon Pietro Romano, “Secure hybrid in-network caching in a hybrid satellite-terrestrial environment: The shine project,” in *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, vol. 32, August 2018, pp. 25–31.
- [40] A. M. e. J. L. e. H. B. e. H. T. e. A. C. e. J. L. J. Liu, K. Au, “Initial access, mobility, and user-centric multi-beam operation in 5g new radio,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 18, 2018, pp. 68–84.
- [41] N. W. G. RFC1772, “Rfc 1772 - application of the border gateway protocol in the internet,” <https://tools.ietf.org/html/rfc1772>, vol. Março, 1995.
- [42] G. Peng, “Cdn: Content distribution network,” *Networking and Internet Architecture*, 2004.
- [43] J. S. e. H. M. e. A. B. e. M. A. E. Schooler, D. Zage, “An architectural vision for a data-centric iot: Rethinking things, trust and clouds,” *Dist. Comp. Sys. (ICDCS), IEEE 37th Int. Conf. on*, vol. Julio, Outubro 2017.
- [44] W. Y. Mahendra Data, Muhammad Luthfi, “Optimizing single low-end lamp server using nginx reverse proxy caching,” in *International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*. IEEE, March 2018.
- [45] F. S. e. M. D. H. Ning, Z. Zhen, “A survey of identity modeling and identity addressing in internet

- of things,” in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 6, June 2020.
- [46] J. S. e M. Gandy, “Personalized home-networks identity-driven network behaviour and configuration,” in *Sixth International Conference on Networking - IEEE*, May 2007, pp. 01–06.
- [47] X. F. S. Adhatarao, D. Kutscher, “Isi: Integrate sensor networks to internet with icn,” in *IEEE Int. Th. J.*, vol. 17, no. c, 2017, p. 1–8.
- [48] A. M. Alberti, M. A. F. Casaroli, D. Singh, and R. da Rosa Righi, “Naming and name resolution in the future internet: Introducing the novagenesis approach,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 67, pp. 163 – 179, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X16302643>
- [49] A. M. Alberti, V. H. D. O. Fernandes, A. F. Casaroli, L. H. D. Oliveira, and M. Frederico, “Performance evaluation of novagenesis information-centric network,” in *10th International Conference on Network and Service Management (CNSM) and Workshop*. IEEE, 2014, pp. 394–399.
- [50] IRTF, “Irtf - information-centric network,” <https://trac.tools.ietf.org/group/irtf/trac/wiki/icnrg>, vol. Agosto, 2017.
- [51] R. R. e. F. N. A. M. Alberti, W. Moreira, “An opportunistic, socially-driven, self-organizing, cloud networking architecture with novagenesis,” in *Closer2015*, vol. 17, 2017, pp. 27–36.
- [52] ICN, “Irtf - information-centric networking research group,” <https://irtf.org/icnrg>, vol. Outubro, Outubro 2017.
- [53] G. P. V. A. Siris, Y. Thomas, “Supporting the iot over integrated satellite-terrestrial networks using information-centric networking,” in *8th IFIP Int. Conf. New Tech. Mobi. Secur. NTMS*, vol. 16, no. 25, 2016, pp. 03–07.
- [54] G. A. e. I. B. e. R. P. M. De Sanctis, E. Cianca, “Satellite communications supporting internet of remote things,” in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 03, no. 01, 2016, pp. 113–123.
- [55] A. G. M. Bacco, M. Colucci, “Application protocols enabling internet of remote things via random access satellite channels,” in *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 17, 2017, pp. 01–06.
- [56] P. C. G. De Angelis, A. De Angelis, “A hybrid outdoor/indoor positioning system for iot applications,” in *Adva. Tech., Sys. and Ser. in Teleco. (TELSIKS)*, vol. 15, 2015, pp. 01–06.
- [57] R. B. e. a. G. Arfaoui, P. Bisson, “A security architecture for 5g networks,” in *IEEE Access*, vol. 06, 2018, pp. 22 466–22 479.
- [58] M. P. et al., “Ultra-low latency 5g charisma architecture for secure intelligent transportation verticals,” in *Transparent Optical Networks (ICTON), 2017 19th International Conference on*, September 2017.
- [59] S. project is funded by the European Commission under the H2020 Research, I. P. (Information, and C. Technologies), “Sat5g project h2020,” <http://sat5g-project.eu>, vol. Junho, Junho 2018.
- [60] A. K. A. Frangoudis, L. Yala, “Cdn-as-a-service provision over a telecom operator’s cloud,” in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 14, no. 03, 2017, pp. 702–716.
- [61] L. C. et al., “Robustness, security and privacy in location-based services for future iot: A survey,” in *IEEE Commun. Mag.*, vol. 05, 2017, p. 8956–8977.
- [62] E. C. R. Sturdivant, “Systems engineering of a terabit elliptic orbit satellite and phased array ground station for iot connectivity and consumer internet access,” in *IEEE Access*, vol. 03, no. 01,

- 2016, p. 9941–9957.
- [63] H. C. Z. Qu, G. Zhang, “Leo satellite constellation for internet of things,” in *IEEE Access*, vol. 05, no. 01, 2016, pp. 18 391–18 401.
- [64] VITAL, “Vital project h2020,” in *VITAL Project*. [Online]. Disponível em: <http://www.ict-vital.eu/>, 2018.
- [65] M. F. S. Parkvall, E. Dahlman, “Nr: The new 5g radio access technology,” in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 4, 2017, pp. 68–84.
- [66] IEEE, “Ieee xplore advancing technology for humanity,” in <https://www.ieeeexplore.ieee.org/>. IEEE Xplore. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. Acesso em: 01/06/2018 às 09:36, 2019.
- [67] Google, “Google scholar sobre os ombros de gigantes,” in <https://scholar.google.com.br/>. Google Scholar. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/>. Acesso em: 01/06/2018 às 09:42, 2019.
- [68] CAPES, “Portal de periódicos capes/mec,” in <https://www.periodicos.capes.gov.br/>. CAPES/MEC. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 01/06/2018 às 09:47, 2019.
- [69] ResearchGate, “Discover scientific knowledge and stay connected to the world of science,” in <https://www.researchgate.net/>. ResearchGate. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 01/06/2018 às 10:03, 2019.
- [70] Elsevier, “Acesso ao conhecimento,” in <https://www.elsevier.com/>. ResearchGate. Disponível em: <https://www.elsevier.com/>. Acesso em: 01/06/2018 às 10:08, 2019.
- [71] S. Nature, “Our business is publishing,” in <https://www.springer.com/>. Springer. Disponível em: <https://www.springer.com/>. Acesso em: 01/06/2018 às 10:08, 2019.
- [72] F. Z. M. Luglio, S. Romano, “Service delivery models for converged satellite-terrestrial 5g network deployment: A satellite-assisted cdn use-case,” in *IEEE Network*, vol. 33, no. 1. IEEE, January 2019, pp. 142 – 150.
- [73] T. D. C. e Andrea Blanco, “Icn-based protocol architectures for next-generation backhauling over satellite,” in *Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on*, July 2017.
- [74] H. K. Chen Wang, Andal Jayaseelan, “Comparing cloud content delivery networks for adaptive video streaming,” in *IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. IEEE, September 2018.
- [75] H. G. S. R. S. Suman, D. L. Batni, “Activecdn: Cloud computing meets content delivery networks,” in *Department of Computer Science, Columbia University*, November 2011.
- [76] ISO/IEC, “Mpeg-dash,” in *ISO/IEC 23009-1:2012*. ISO/IEC, 2012.
- [77] Akamai, “Content delivery for an evolving internet choosing the right cdn for today e tomorrow,” in <https://content.akamai.com/>. Akamai Faster Forward - White Paper Disponível em: <https://content.akamai.com/>. Acesso em: 19/10/2017 às 10:10, October 2016.
- [78] M. Azure, “Rede de fornecimento de conteúdo,” in <https://azure.microsoft.com/pt-br/services/cdn/>. Microsoft Azure. Disponível em: <https://azure.microsoft.com/pt-br/services/cdn/>. Acesso em: 30/05/2019 às 16:35, 2019.

- [79] G. Cloud, “Google cloud cdn,” in <https://cloud.google.com/cdn/pricing>. Disponível em: <https://cloud.google.com/cdn/pricing>. Acesso em: 30/05/2019 às 16:55, 2019.
- [80] L. . Communications, “Over the top video delivery,” in <http://www.level3.com/>. Disponível em: <http://www.level3.com/>. Acesso em: 30/05/2019 às 17:05, May 2015.
- [81] A. R. K. e. A. X. L. Faraz Ahmed, M. Zubair Shafiq, “Optimizing internet transit routing for content delivery networks,” in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, November 2017, pp. 76–89.
- [82] S. Perez, “Netflix reaches 75% of us streaming serviceviewers, but youtube is catching up,” in <https://www.comscore.com/Insights/Blog/OTT-Breaks-Out-of-Its-Netflix-Shell>. Techcrunch. Disponível em: <https://techcrunch.com/2017/04/10/netflix-reaches-75-of-u-s-streaming-service-viewers-but-youtube-is-catching-up/>. Acesso em: 30/05/2019 às 16:45, 2017.
- [83] N. S. M. Agiwal, A. Roy, “Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [84] J. M. R. Viola, A. Martin, “Mec proxy for efficient cache and reliable multi-cdn video distribution,” in *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, vol. 18, 2018.
- [85] H. F. I. Farris, T. Taleb and A. Iera, “Providing ultra-short latency to user-centric 5g applications at the mobile network edge,” in *Trans Emerging Tel Tech. 2018*, Mar 2017.
- [86] A. Thibaud, J. Fasson, F. Arnal, D. Pradas, E. Dubois, and E. Chaput, “Qoe enhancements on satellite networks through the use of caches,” in *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 36, no. 6, 2018, pp. 553–565.
- [87] M. M. M. Robinson, P. Kourtessis, S. Fisher, G. P. Stafford, J. Treiber, M. J. Burrell, and J. M. Senior, “Qoe based holistic traffic engineering in sdn enabled heterogeneous transport networks,” *19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1–4, July 2017.
- [88] L. L. K. Bouraqlia, E. Sabir, “Quality of experience for streaming services: Measurements, challenges and insights,” in *IEEE Access*, vol. 8, January 2020, pp. 13 341–13 361.
- [89] T. H. F. Zahid Akhtar, “Audio-visual multimedia quality assessment: A comprehensive survey,” in *IEEE Access*, vol. 5, September 2017, pp. 21 090–21 117.
- [90] P. B. A. Hakiri, “Leveraging sdn for the 5g networks: Trends, prospects and challenges,” *Software Defined Mobile Networks: Beyond LTE Network Architecture (Series in Communications Networking and Distributed Systems)*, 06 2015. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/corr/corr1506.html#HakiriB15>
- [91] A. A. e. G. W. R. Ravindran, A. Chakraborti, “5g-icn: Delivering icn services over 5g using network slicing,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, May 2017, pp. 101 – 107.
- [92] F. Z. M. Luglio, S. Romano, “Service delivery models for converged satellite-terrestrial 5g network deployment: A satellite-assisted cdn use-case,” in *IEEE Network*, vol. 33, no. 1. IEEE, January 2019, pp. 142 – 150.
- [93] Q. W. Hui Yang, Hewu Li, “An integrating unicast and multicast solution by extending content delivery network to satellite,” in *14th International Wireless Communications and mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE, August 2018.
- [94] K. S. N. Panwar, S. Sharma, “A survey on 5g: The next generation of mobile communication,” in

- Phys. Commun.*, vol. 18, 2016, pp. 68–84.
- [95] Y. D. e. J. L. e. W. G. C. Guo, J. Yu, “Intelligent and ubiquitous positioning framework in 5g edge computing scenarios,” in *IEEE Access*, vol. 08, April 2020, pp. 83 276–83 289.
- [96] A. 5G, “Nfv and sdn networks,” *4G Americas*, Novembro 2016. [Online]. Available: http://www.5gamericas.org/files/9614/4674/3416/4G_Americas_NFV_and_SDN_Networks_White_Paper_-_November_2015.pdf.
- [97] M. B. B. Zoran, B. Bakmaz, “Vision and enabling technologies of tactile internet realization,” in *Adv. Tech., Sys. and Ser. in Teleco. (TELSIKS)*, vol. 16, 2016, pp. 01–07.
- [98] T. Szymanski, “Strengthening security and privacy in an ultra-dense green 5g radio access network for the industrial and tactile internet of things,” *Wire. Commun. and Mob. Comp. Conf. (IWCMC)*, p. 01–08, 2017.
- [99] A. A. M. Farhoudi, P. Palantas, “A novel reliable routing scheme for tactile-oriented internet traffic,” in *IEEE Teleco. (ICT), 2017 24th International Conference on*, vol. 17, Dec 2017, pp. 01–07.
- [100] I. W. T. D. Conf., “World radiocommunication conference 2019 (wrc-19), sharm el-sheikh, 28 october to 22 november 2019,” <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Pages/default.aspx>, vol. Janeiro, 2018.
- [101] F. N. Pasquale Andriani and S. Pantelopoulos, “5g media: Programable edge-to-cloud virtualization fabric for the 5g media industry,” in *5G Media: www.5gmedia.eu/outcomes/deliverables*, 2017.
- [102] K. L. et al., “An ndn iot content distribution model with network coding enhanced forwarding strategy for 5g,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, December 2018.
- [103] M. F. et al., “A collaborative hotspot caching design for 5g cellular network,” in *IEEE Access*, vol. 6, December 2018.
- [104] P. S.-G. e. J. M. A. C. e. Q. W. James Nightingale, “5g-qoe: Qoe modelling for ultra-hd video streaming in 5g networks,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, 2018.
- [105] P. Schulz, M. Matthe, H. Klessig, M. Simsek, G. Fettweis, J. Ansari, S. A. Ashraf, B. Almeroth, J. Voigt, I. Riedel, A. Puschmann, A. Mitschele-Thiel, M. Muller, T. Elste, and M. Windisch, “Latency critical iot applications in 5g: Perspective on the design of radio interface and network architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 70–78, February 2017.
- [106] S. I. I. e. R. V. e. E. H. e. Z. H. Z. Khan, J. J. Lehtomaki, “Iot connectivity in radar bands: A shared access model based on spectrum measurements,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 88–96, February 2017.
- [107] M. H. R. e. A. R. Athar Ali Khan, “Cognitive-radio-based internet of things: Applications, architectures, spectrum related functionalities, and future research directions,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 17–25, 2017.
- [108] N. S. Vo, T. Q. Duong, M. Guizani, and A. Kortun, “5g optimized caching and downlink resource sharing for smart cities,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31 457–31 468, 2018.
- [109] J. Jusak, H. Pratikno, and V. H. Putra, “Internet of medical things for cardiac monitoring: Paving the way to 5g mobile networks,” in *2016 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, Dec 2016, pp. 75–79.

- [110] W. S. Dizhi Zhou, “Multipath tcp for user cooperation in wireless networks,” in *Springer International Publishing*, vol. 12, Jul 2014, pp. 01–15.
- [111] A. Orsino, A. Ometov, G. Fodor, D. Moltchanov, L. Militano, S. Andreev, O. N. C. Yilmaz, T. Tirronen, J. Torsner, G. Araniti, A. Iera, M. Dohler, and Y. Koucheryavy, “Effects of heterogeneous mobility on d2d- and drone-assisted mission-critical mtc in 5g,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 79–87, February 2017.
- [112] N. Saxena, A. Roy, B. J. R. Sahu, and H. Kim, “Efficient iot gateway over 5g wireless: A new design with prototype and implementation results,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 97–105, February 2017.
- [113] A. A. e. B. S. Chun Pong Lau, “An efficient content delivery system for 5g cran employing realistic human mobility,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 4, pp. 742–756, 2018.
- [114] A. G. e. J. G. A. e. E. Y. Z. Dawy, W. Saad, “Toward massive machine type cellular communications,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 1, pp. 120–128, February 2017.
- [115] G. 3rd Generation Partnership Project, “Technical specification group radio access network; study on new radio access technology; radio access architecture and interfaces,” *TR 38.801 v.1.0.0*, December 2016.
- [116] S. P. M. Bilal, “Secure distribution of protected content in information-centric networking,” *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 1921–1932, 2019.
- [117] J. K. B. Cha, “Study of multistage anomaly detection for secured cloud computing resources in future internet,” in *Dependable, Auto. and Sec. Comp. (DASC), 2011 IEEE Nin. Inter. Conf. on*, Dec 2011, pp. 01–05.
- [118] S. S. J. Siegel, S. Kumar, “The future internet of things: Secure, efficient, and model-based,” in *IEEE Int. of Th. J.*, vol. PP, Outubro 2017, pp. 01–13.
- [119] E. C. C. Shepherd, G. Arfaoui, “Secure and trusted execution: Past, present, and future - a critical review in the context of the internet of things and cyber-physical systems,” in *Trust-com/BigDataSE/ISPA, 2016 IEEE*, Fevereiro 2016, pp. 01–10.
- [120] F. Al-Turjman, “Impact of user’s habits on smartphones’ sensors: An overview,” in *HONET-ICT, 2016*, Novembro 2011, pp. 01–05.
- [121] 3GPP, “Ts 22.261 service requirements for the 5g system,” in *Release 15*. [Online: 03/13/2017] Disponível em: www.3gpp.org/DynaReport/22261.htm Acesso em: 17/09/2018 às 13:37, 2017.
- [122] —, “Ts 33.501 security architecture and procedures for 5g system,” in *Release 15*. [Online: 23/03/2018] Disponível em: www.3gpp.org/DynaReport/33501.htm Acesso em: 17/09/2018 às 14h:25min, 2018.
- [123] N. Corporation, “Making 5g a reality,” in *White Paper*. [Online: 23/03/2018] Disponível em: <http://www.nec.com/en/global/solutions/nsp/5gvision/doc/wp2018ar.pdf> Acesso em: 17/09/2018 às 14h:32min, 2018.
- [124] A. P. C. Bouras, A. Kollia, “Teaching 5g networks using the onos sdn controller,” *Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 312–317, July 2017.
- [125] CEA-Let and ETRI, “5g communication with a heterogeneous, agile mobile network in the pyeongchang winter olympic competition,” *5G CHAMPION*, Fevereiro 2018. [Online].

Available: <http://www.5g-champion.eu/>

- [126] M. Sheng, Y. Wang, J. Li, R. Liu, D. Zhou, and L. He, “Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: Resource management architecture and strategies,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 127–133, 2017.
- [127] K. B. R. A. S. Rajan, *Application of NFV and SDN to 5G Infrastructure*. Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies, 2017, pp. 408–420.
- [128] M. B. F. Z. Yousaf, S. Schaller, and F. Schneider, “NFV and SDN: Key Technology Enablers for 5G Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 11, pp. 2468–2478, Nov 2017.
- [129] M. S. S. Tayyaba, “5G Cellular Network Integration with SDN: Challenges, Issues and Beyond,” *Intern. Conf. on Commun., Comp. and Dig. Sys. (C-CODE)*, pp. 48–53, March 2017.
- [130] D. K. M. K. Shin, S. Lee, “A Way Forward for Accommodating NFV in 3GPP 5G Systems,” *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 114–116, Oct 2017.
- [131] A. B. A. Basta, K. Hoffmann, H. J. Morper, M. Hoffmann, and W. Kellerer, “Towards a Cost Optimal Design for a 5G Mobile Core Network Based on SDN and NFV,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 14, no. 4, pp. 1061–1075, Dec 2017.
- [132] G. A. et al., “SDN and NFV for Satellite Infrastructures.” *IEICE Information and Communication Technology Forum*, pp. 1–4, March 2016.
- [133] O. S. e. G. A. e. T. R. e. M. K. e. C. B. e. P. G. e. T. A. R. Ferrús, H. Koumaras, “SDN/NFV-enabled Satellite Communications Networks: Opportunities, Scenarios and Challenges,” *Phy. Commun.*, vol. 18, pp. 95–112, March 2016.
- [134] G. Gardikis, H. K. Chris, and S. Koumaras, “Towards SDN/NFV-enabled Satellite Networks,” *Telecommunication Systems*, p. 615–628, 2017.
- [135] I. P. e. G. P. L. Saino, “Understanding sharded caching systems,” *The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, Abril 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7524442/>
- [136] Y. W. e. W. Z. Yichao Jin, “Content routing and lookup schemes using global bloom filter for content-delivery-as-a-service,” *IEEE Systems Journal*, vol. 08, no. 01, Abril 2014. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6502189/>
- [137] Y. X. e. J. S. S. Feng, Zhu Li, “Compact scalable hash from deep learning features aggregation for content de-duplication,” *19th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)*, December 2017.
- [138] ETSI, “Cdn interconnection architecture,” *ETSI Specifications*, April 2014.
- [139] ITU, “Imt vision – framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond: M series mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services,” in *INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - ITU-R Radiocommunication Sector Of ITU*. [Online.] Disponible em: <http://www.itu.int>, 2015.
- [140] —, “Imt vision – framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond,” in *Recomendation ITU-R M 20830*, September 2015.
- [141] S. Project, “Satellite and terrestrial network for 5g - d 6.2 standardisation action plan,” *Sat5g-*

project.eu, August 2017.

- [142] 3GPP, “Tr 38.811 study on new radio (nr) to support non-terrestrial networks,” in *Release 15*. [Online: 19/06/2018] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38811.htm> Acesso em: 27/07/2018 às 14:00, June 2018.
- [143] —, “Tr 22.822 study on using satellite access in 5g,” in *Release 16*. [Online: 17/06/2018] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/22822.htm> Acesso em: 03/08/2018 às 14:15, June 2018.
- [144] ETSI, “Satellite earth stations and systems (ses); seamless integration of satellite and/or haps (high altitude platform station) systems into 5g system; seamless integration of sat and/or haps systems into 5g system,” in *ETSI Work Programme*. [Online: 28/05/2018] Disponível em: <https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/> Acesso em: 27/09/2018 às 11:26, May 2018.
- [145] —, “Satellite earth stations and systems (ses); reference virtualised network functions data model for satellite communication systems virtualised network functions for satellite communication,” in *ETSI Work Programme*. [Online: 16/11/2017] Disponível em: <https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/> Acesso em: 27/09/2018 às 11:34, November 2017.
- [146] S. K. et al., “Gs mec wp 28 mec in 5g networks,” *ETSI Specifications*, June 2018.
- [147] K. A. e. a. Fabio Giust, Gianluca Verin, “Gs mec wp 24 mec deployments in 4g and evolution towards 5g,” *ETSI Specifications*, February 2018.
- [148] ETSI, “Gs mec 003 mobile edge computing (mec) framework and reference architecture,” *ETSI Specifications*, June 2016.
- [149] 3GPP, “Ts 23.501 system architecture for the 5g system,” in *Release 15*. [Online: 22/12/2017] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23501.htm> Acesso em: 03/09/2018 às 22:11, December 2017.
- [150] —, “Ts 23.502 procedures for the 5g system,” in *ETSI Work Programme*. [Online: 22/12/2017] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23501.htm> Acesso em: 03/09/2018 às 22:30, September 2017.
- [151] C. V. N. Index, “Global mobile data traffic forecast update,” *Cisco Mobile VNI*, Março 2017.
- [152] Y. Shi, “Global mobile data traffic forecast update,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 3, Junho 2018.
- [153] J. B. e. D. B. C. Willcock, “The european annual journal 2017,” in *5GPP*, vol. 1, Setembro 2017.
- [154] S. P. e. a. P. Andriani, F. Nucci, “Media industry meets 5g: the 5g-media project in 5g-ppp phase 2,” in <http://www.5gmedia.eu>, November 2017.
- [155] V. F. e. D. v. H. e. C. M. e. M. A. P. e. K. S. e. B. S. M. Gramaglia, I. Digon, “Flexible connectivity and qoe/qos management for 5g networks: The 5g norma view,” in *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, May 2016, pp. 373–379.
- [156] H. D. e. I. L. P. e. I. U. e. P. S. e. M. D. e. J. R. S. C. Mannweiler, M. Breitbach, “5g norma: System architecture for programmable multi-tenant 5g mobile networks,” in *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, June 2017, pp. 1–6.
- [157] C. M. e. S. K. P. Schneider, “Providing strong 5g mobile network slice isolation for highly sensitive third-party services,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, April 2018, pp. 1–6.

- [158] V. F. e. B. G. e. C. G. e. O. H. e. I. L. P. e. V. S. e. D. v. H. e. S. W. e. F. Z. Y. e. B. S. M. Rates Crippa, P. Arnold, “Resource sharing for a 5g multi-tenant and multi-service architecture,” in *European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference*, May 2017, pp. 1–6.
- [159] A. L. e. E. E. M. S. Siddiqui, “Hierarchical, virtualized, and distributed intelligence 5g architecture for low-latency and secure applications,” in *Trans Emerging Tel Tech. 2018*, June 2016.
- [160] E. G. e. A. T. e. P. F. e. K. C. e. D. G. e. A. F. B. e. T. D. e. J. Z. e. P. L. e. J. B. e. J. K. C. e. A. B. e. J. J. A. e. R. G. e. D. S. D. Camps-Mur, J. Gutierrez, “5g-xhaul: A novel wireless-optical sdn transport network to support joint 5g backhaul and fronthaul services,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 7, pp. 99–105, July 2019.
- [161] 3GPP, “Ts 23.501 system architecture for the 5g system, stage 2,” in *Release 15*. [Online: 22/12/2017] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23501.htm> Acesso em: 14/10/2020 às 00:02, March 2018.
- [162] H. X. e. Y. Z. e. Y. F. e. X. M. e. A. M. M. e. W. H. L. Li, M. Bi, “Enabling flexible link capacity for ecpri-based fronthaul with load-adaptive quantization resolution,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102 174–102 185, 2019.
- [163] H. C. e. E. G. e. J. L. C. e. D. V. e. B. M. e. D. G.-B. M. Fuentes, D. Mi, “Physical layer performance evaluation of lte-advanced pro broadcast and atsc 3.0 systems,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 65, no. 3, pp. 477–488, Sep. 2019.
- [164] D. Gomez-Barquero, D. Navratil, S. Appleby, and M. Stagg, “Point-to-multipoint communication enablers for the fifth generation of wireless systems,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 53–59, MARCH 2018.
- [165] I. G. e. E. K. e. S. P. e. J. P.-R. e. I. T. e. P. K. e. L. G. e. M. P. e. E. S. B. Blanco, J. O. Fajardo, “Technology pillars in the architecture of future 5g mobile networks: Nfv, mec and sdn,” in *Elsevier Journal on Computer Standards & Interfaces*, vol. 54, November 2017.
- [166] J. F. e. F. L. B. Blanco, I. Taboada, “A robust optimization based energy-aware virtual network function placement proposal for small cell 5g networks with mobile edge computing capabilities,” in *Mobile Information Systems*, vol. 2017, 2017, p. 14.
- [167] E. C. of Postal and T. A. (CEPT), “Fm 44 - satellite communications,” in *ECC Groups*. [Online: 29/11/2017] Disponível em: <https://www.cept.org/ecc/groups/ecc/wg-fm/fm-44/client/introduction/> Acesso em: 28/09/2018 às 16:39, November 2017.
- [168] M. V. T. Levanen, S. Nielsen, “5g new radio and lte uplink coexistence,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, April 2018.
- [169] 3GPP, “Tr 22.891, study on new services and markets technology enablers,” in *Release 14*, March 2016.
- [170] NMGN, “Nmgm 5g whitepaper v1.0,” in *NGMN Alliance*. [Online]. Disponível em: <https://www.ngmn.org/>, Feb 2015.
- [171] G. PPP, “European commission 5g ppp “5g vision”,” in *5G PPP*. [Online.] Disponível em: <https://5g-ppp.eu/>, Feb 2015.
- [172] I. 2020, “China imt 2020 (5g) promotion group white paper 5g concept,” in *IMT 2020*. [Online]. Disponível em: <http://www.imt-2020.cn/en/documents/3>, Feb 2015.
- [173] G. Americas, “Recommendations on 5g requirements and solutions,” in *4G Americas*, Oct 2014.

- [174] GSMA, “Understanding 5g: perspectives on future technological advancements in mobile,” in *GSM Association*, Dec 2014.
- [175] ARIB, “Arib 2020 and beyond ad hoc group white paper,” in *Association of Radio Industries and Businesses*, Oct 2014.
- [176] T. Norp, “5g requirements and key performance indicators,” in *Journal of ICT Standardization*, vol. 6, May 2018.
- [177] 3GPP, “Tr 22.861 feasibility study on new services and markets technology enablers for massive internet of things; stage 1,” in *Release 14*, June 2016.
- [178] —, “Tr 22.862 feasibility study on new services and markets technology enablers – critical communications; stage 1,” in *Release 14*, June 2016.
- [179] —, “Tr 22.863 feasibility study on new services and markets technology enablers – enhanced mobile broadband; stage 1,” in *Release 14*, June 2016.
- [180] —, “Tr 22.864 feasibility study on new services and markets technology enablers – network operation; stage 1,” in *Release 14*, June 2016.
- [181] —, “Tr 38.810 study on test methods for new radio,” in *Release 16*. [Online: 13/04/2017] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38810.htm> Acesso em: 13/07/2018 às 13:25, 2018.
- [182] —, “Tr 38.900 study on channel model for frequency spectrum above 6 ghz,” in *Release 14*. [Online: 12/01/2015] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38900.htm> Acesso em: 19/07/2018 às 14:35, 2016.
- [183] J. Y.-K. et.al., “Efficient fast-convolution-based waveform processing for 5g physical layer,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, June 2017, pp. 01–19.
- [184] X. Q. X. Liang, “A software defined security architecture for sdn-based 5g network,” in *IEEE Intern. Conf. on Net. Infra. and Dig. Cont. (IC-NIDC)*, Sept 2016, pp. 17–21.
- [185] 3GPP, “Ts 33.401 3gpp system architecture evolution (sae); security architecture,” in *Release 8*. [Online: 07/04/2016] Disponível em: www.3gpp.org/DynaReport/33401.htm Acesso em: 17/09/2018 às 16h:40min, 2016.
- [186] —, “3gpp specification series,” in *3GPP*. [Online: 07/04/2016] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm> Acesso em: 19/10/2018 às 15h:11min, 2018.
- [187] —, “Ts 38.211 - nr; physical channels and modulation,” in *Release 15*. [Online: 01/02/2018] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38211.htm> Acesso em: 19/10/2018 às 15h:41min, 2018.
- [188] T. Nakamura, “Overview of etsi nfv network slicing report: Network slicing support with etsi nfv architectural framework,” in *IEEE Softwarization*. [Online: 12/2017] Disponível em: <https://sdn.ieee.org/newsletter/december-2017/overview-of-etsi-nfv-network-slicing-report-network-slicing-support-with-etsi-nfv-architectural-framework> Acesso em: 06/08/2018 às 19:55, Dec 2017.
- [189] ETSI, “Gs mec 002 mobile edge computing (mec); technical requirements,” in *ETSI Specifications*. [Online: 03/2016] Disponível em: <http://www.etsi.org> Acesso em: 06/08/2018 às 19:55, Mar 2016.
- [190] —, “Gr mwt 008 millimetre wave transmission (mwt); analysis of spectrum, license schemes

- and network scenarios in the d-band,” in *ETSI Specifications*. [Online: 08/2018] Disponível em: <http://www.etsi.org> Acesso em: 25/09/2018 às 15:06, August 2018.
- [191] —, “Gr ngp 011 next generation protocols (ngp); e2e network slicing reference framework and information model,” in *ETSI Specifications*. [Online: 09/2018] Disponível em: <http://www.etsi.org> Acesso em: 26/09/2018 às 08:06, September 2018.
- [192] —, “Network functions virtualisation nfv release 3,” in *ETSI GS NFV-EVE 012 (V3.1.1)*. [Online: 12/2017] Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi-gr/NFV-EVE/> Acesso em: 06/08/2018 às 20:00, Dec 2017.
- [193] —, “Network functions virtualisation – white paper on nfv priorities for 5g,” in *Portal ETSI NFV*. [Online: 21/02/2017] Disponível em: <https://portal.etsi.org/nfv/> Acesso em: 06/08/2018 às 20:39, Feb 2017, pp. 01–15.
- [194] Y. W. Jun Wu, Z. Zhang, “Cloud radio access network (c-ran): a primer,” in *IEEE Network*, vol. 29, no. 1, Feb 2015, pp. 35 – 41.
- [195] A. R. et al., “Cloud ran and mec: A perfect pairing,” *ETSI White Paper 23*, February 2018.
- [196] ETSI, “Media content distribution (mcd); cdn interconnection, use cases and requirements,” *ETSI Specifications*, Jan 2013.
- [197] —, “Telecommunications and internet converged services and protocols for advanced networking (tispan); content delivery network (cdn) architecture,” *ETSI Specifications*, September 2011.
- [198] —, “Media content distribution (mcd); mcd framework; part 9: Content delivery infrastructures (cdi),” *ETSI Specifications*, July 2013.
- [199] N. B. B. Niven-Jenkins, F. Le Faucheur, “Request for comments: 6707 content distribution network interconnection (cdni) problem statement,” *Internet Engineering Task Force (IETF)*, September 2012.
- [200] K. H. e. C. B. Z. Shelby, “Request for comments: 7252,” in *Internet Engineering Task Force (IETF)*. [Online: 06/2014] Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc7252> Acesso em: 06/08/2018 às 21:46, 2014.
- [201] P. H. e. A. A.-M. G. Akpakwu, Bruno J. Silva, “A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges,” in *IEEE Access*, vol. 06, December 2018, pp. 3619–3647.
- [202] E. ARTES, “Demonstrator of light-weight application and transport protocols for future m2m applications - m2msat,” in *ESA ARTES PROJECTS*, vol. 05. [Online: 02/05/2017] Disponível em: <https://artes.esa.int/projects/m2msat> Acesso em: 18/10/2018 às 20h:05min, July 2017.
- [203] C. P. e. G. D. O. Bonaventure, “Request for comments: 8041,” in *Internet Engineering Task Force (IETF)*. [Online: 11/2017] Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc8041> Acesso em: 19/10/2018 às 21:16, January 2017.
- [204] G.-X. Deliverables, “Broadcast and multicast communication enablers for the fifth-generation of wireless systems,” *D5.1 Content Delivery Vision*, November 2017. [Online]. Available: http://5g-xcast.eu/wp-content/uploads/2018/10/5G-Xcast_D5.2_v2.0_web.pdf
- [205] —, “Broadcast and multicast communication enablers for the fifth-generation of wireless systems,” *D5.2 Key Technologies for the Content Distribution Network*, August 2018. [Online]. Available: http://5g-xcast.eu/wp-content/uploads/2018/10/5G-Xcast_D5.2_v2.0_web.pdf

- [206] U. C. e. F. K. X. de Foy, M. Perras, “Considerations for mptcp operation in 5g,” in *Internet Engineering Task Force (IETF)*. [Online: 08/2018] Disponível em: <https://tools.ietf.org> Acesso em: 19/10/2018 às 21:29, June 2018.
- [207] M. S. S. Bensley, L. Eggert, “Request for comments: 8257,” in *Internet Engineering Task Force (IETF)*. [Online: 10/2017] Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc8257> Acesso em: 09/08/2018 às 17:01, 2014.
- [208] B. B. M. Kühlewind, J. Espinosa, “Using data center tcp (dctcp) in the internet,” in *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2014.
- [209] S. C. e. A. G. e. B. R. e. A. W. M. Corici, A. Kapovits, “Assessing satellite-terrestrial integration opportunities in the 5g environment,” in *Produced by the European Space Agency ARTES Project “INSTINCT: Scenarios for Integration of Satellite Components in Future Networks”*, September 2016, pp. 01–18.
- [210] F. Z. L. Carniato, M. Luglio, “Efficient network resources utilization for ka-band high capacity satellite systems,” in *12th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, May 2014.
- [211] R. K. Lu Ma, X. Wen, “An sdn/nfv based framework for management and deployment of service based 5g core network,” in *China Communications*, vol. 15, October 2018, pp. 86–98.
- [212] Y. H. Zheng Shaoping, Gao Xiujiao, “Virtual network function instantiation and service function chaining mapping in wide area network,” in *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, October 2016.
- [213] O. S. e. a. R. Ferrús, H. Koumaras, “Sdn/nfv-enabled satellite communications: Ground segment network architecture for 5g integration,” *Physical Communication*, 2015.
- [214] E. G. N. 002, “Network functions virtualisation (nfv), architectural framework,” in *ETSI GS NFV 002, V1.1.1*, October 2013.
- [215] G. K. F. e. C. R. S. J. R. Maly, J. C. Goodding, “Espa satellite dispenser for orbcomm generation 2,” *IEEE Consum. Elect. Mag.*, 2013.
- [216] O. ATK, “Iridium next the next generation satellite constellation of iridium communications inc,” in *IEEE Consum. Elect. Mag.*, vol. 16, 2015, pp. 66–72.
- [217] K.-K. R. Abhishek, S. Shamik, “5g wireless with cognitive radio and massive iot,” in *IETE Technical Review*, vol. 34, 2017, pp. 1–3.
- [218] W. Z. T. Heyn, T. Schlichter and A. Ilangovan, “5g collaborative hybrid satellite adaptive bitrate streaming services,” in *European Conf. on Networks and Communications. 2017*, 2017.
- [219] J. C. e. B. T. Jou, O. Vidal, “Architecture options for satellite integration into 5g networks,” in *2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, August 2018.
- [220] S. K. et al., “Mec in 5g networks,” *ETSI White Paper 28*, June 2018.
- [221] Cisco, “Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2016–2021,” *White Paper*, June 2017.
- [222] E. B. et al., “Analysis of content size based routing schemes in hybrid satellite/terrestrial networks,” *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, December 2016.
- [223] R. B. G. Tang, K. Wu, “Rethinking cdn design with distributed time-varying traffic demands,”

- IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, June 2017.
- [224] CloudFlare, “Cloudflare cdn,” *White Paper*, 2018.
- [225] I. S. H. Y. e. X. H. Jian Ni, D. H. K. Tsang, “Hierarchical content routing in large-scale multimedia content delivery network,” *IEEE International Conference on Communications, 2003.*, Junho 2003. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1204454/>
- [226] T. J. e. X. K. Pi Renjie, “Sdn: A service delivery network over end-to-end dht,” *2010 IEEE 2nd Symposium on Web Society*, Outubro 2010. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5607361/>
- [227] T. T. e. K. e. V. L. X. Wang, M. Chen, “Cache in the air - exploiting content caching and delivery techniques for 5g systems,” in *IEEE Communications Magazine*, 2014.
- [228] O. A. S. Watts, “5g resilient backhaul using integrated satellite networks,” in *7th Adv. Sate. Mult. Sys. Conf. and the 13th Sig. Proc. for Sp. Commun. Work. (ASMS/SPSC)*, Sept 2014, pp. 114–119.
- [229] F. B. M. Corici and D. I. Gheorghe-Pop, “Satellite backhauling in software defined telco networks,” in *The results presented in this paper are part of the outcome of the ESA ARTES Advanced Technology study SATINET*, 2017.
- [230] A. García-Domínguez, “Mobile applications, cloud and bigdata on ships and shore stations for increased safety on marine traffic; a smart ship project,” in *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, March 2015.
- [231] S. C. e. T. V. e. B. O. A. Kalantari, M. Fittipaldi, “Cache-assisted hybrid satellite-terrestrial backhauling for 5g cellular networks,” in *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017.
- [232] O. S. F. Mendoza, R. Ferrús, “Flexible capacity and traffic management for hybrid satellite-terrestrial mobile backhauling networks,” in *Intern. Symp. on Wire. Commun. Sys. (ISWCS)*, Sept 2016, pp. 119–124.
- [233] E. T. t. M.S. Siddiqui, E. Escalona, “Policy based virtualised security architecture for sdn-nfv enabled 5g access networks,” in *Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN), IEEE Conference on*, May 2017, pp. 01–06.
- [234] A. P.-N. e. G. J. L. V. e. J. M. F. G. e. G. Z. X. Artiga, J. Nunez-Martinez, “Terrestrial-satellite integration in dynamic 5g backhaul networks,” in *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), 2016 8th*, Sept 2016.
- [235] E. C. e. a. T. Rossi, M. De Sanctis, “Future space-based communications infrastructures based on high throughput satellites and software defined networking,” in *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, Sept 2015, pp. 332–337.
- [236] Y. Z. e Y. Wang, “Sdn based icn architecture for the future integration network,” in *Communications and Information Technologies (ISCIT), 2016 16th International Symposium on*, Sept. 2016.
- [237] R. G. e. H. E. e. J. S. W. Ajib, M. A. Salahuddin, “A survey on replica server placement algorithms for content delivery networks,” in *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 19, no. 02, 2017, p. 1002–1026.
- [238] E. K. e. A. K. e. J. O. F. e. P. S. K. e. A. A. e. H. M. e. V. V. I. Giannoulakis, G. Xylouris, “System architecture and deployment scenarios for sesame: Small cells coordination for multi-tenancy and

- edge services,” in *IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft)*, June 2016, pp. 447–452.
- [239] B. K. S. e M. Jagjit, “Simulation and comparasion of hashing techniques in cdn dns,” *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 03, Abril 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/266334554_SIMULATION_AND_COMPARISON_OF_HASHING_TECHNIQUES_IN_CDN_DNS
- [240] G. X. et al., “Caching and mobility support in a publish-subscribe internet architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 07, pp. 52–58, July 2012.
- [241] T. S. e. J. L. S. Dharmapurikar, P. Krishnamurthy, “Deep packet inspection using parallel bloom filters,” *11th Symposium on High Performance Interconnects, 2003. Proceedings.*, September 2003.
- [242] A. A. et al., “Comparative analysis between proprietary software vs. open-source software vs. free software,” in *Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. IEEE, June 2019.
- [243] I. Sysoev, “Nginx,” in <https://www.nginx.com/people/igor-sysoev/>. Nginx - Senior Architect Disponível em: <https://www.nginx.com/people/igor-sysoev/>. Acesso em: 04/06/2019 às 11:48, 2019.
- [244] D. DeJonghe, “Nginx cookbook advanced recipes for high performance load balancing,” in *Download at nginx.com/freetrial*. IEEE, March 2019.
- [245] P.-H. Kamp, “Varnish http cache,” in *Varnish*. Disponível em: <https://varnish-cache.org/>. Acesso em: 24/07/2019 às 18:35, 2019.
- [246] Y. T. Hirotaka Nakajima, Masao Isshiki, “Websocket proxy system for mobile devices,” in *IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*. IEEE, November 2013.
- [247] L. Foundation, “Lamp stack: A complete guide,” in *What is LAMP?* Disponível em: <https://www.ibm.com/cloud/learn/lamp-stack-explained>. Acesso em: 25/07/2019 às 10:11, 2019.
- [248] I. S. Consortium, “Bind 9,” in *BIND*. Disponível em: <https://www.isc.org/download/>. Acesso em: 25/07/2019 às 09:46, 2019.
- [249] MaxMind, “Geoip,” in *GeoIP Legacy Downloadable Databases*. Disponível em: <https://github.com/maxmind/geoip-api-c>. Acesso em: 25/07/2019 às 15:05, 2019.
- [250] W. S. Komang Rinatha, “Comparative study for better result on query suggestion of article searching with mysql pattern matching and jaccard similarity,” in *5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 2019.
- [251] e. a. Hardono, I. Surjandari, “Development of theses categorization system search engine using php and mysql,” in *5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*. IEEE, January 2018.
- [252] G. G. Abhinav Nagpal, “Python for data analytics, scientific and technical applications,” in *Amity International Conference on Artificial Intelligence (AICAI)*. IEEE, April 2019.
- [253] R. Community, “Sobre o ruby,” in *Os Ideais do Criador do Ruby*. [Online]: Disponível em: <https://www.ruby-lang.org/pt/about/>, 2019.
- [254] R. S. Petr Capek, Erik Kral, “Towards an empirical analysis of .net framework and c sharp language features’ adoption,” in *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, March 2016.

- [255] M. S. B. C. e. a. Ramon Maia Borges, Tiago Reis Rufino Marins, “Integration of a gfdm-based 5g transceiver in a gpon using radio over fiber technology,” in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 4468 - 4477. IEEE, April 2018, pp. 19 282 – 19 292.
- [256] L. Z. Yang Yang, “A data-aided interference cancellation gfdm receiver for hybrid satellite-terrestrial communication systems,” in *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. IEEE, November 2018.
- [257] T. T. R. A. M. Alberti, K. Costa, “Virtualização em redes terrestre-satélite 5g,” in *Anais do I Workshop de Teoria, Tecnologias e Aplicações de Slicing para Infraestruturas Softwarizadas*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019, pp. 69–82. [Online]. Available: <https://sol.sbc.org.br/index.php/wslice/article/view/7723>
- [258] W. D. e. a. Alexandre Ferreira, Luciano Mendes, “5g-range project field trial,” in *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE, August 2019.
- [259] L. M. e. a. Wheberth Dias, Danilo Gaspar, “Performance analysis of a 5g transceiver implementation for remote areas scenarios,” in *2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE, August 2018.
- [260] Y. Sheng, “Scalable intelligence-enabled networking with traffic engineering in 5g scenarios for future audio-visual-tactile internet,” in *IEEE Access*, vol. 6. IEEE, June 2019, pp. 30 378–30 391.
- [261] 3GPP, “Tr 38.913 study on scenarios and requirements for next generation access technologies,” in *Release 14*. [Online: 12/12/2015] Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/38913.htm> Acesso em: 19/07/2018 às 13:40, December 2015.
- [262] P. W. U. Documentation, “Uncomplicated firewall,” in *Ubuntu Documentation*. Disponível em: <https://help.ubuntu.com/community/UFW>. Acesso em: 10/09/2019 às 13:34, 2019.

Apêndice A

Apêndice - Revisão e Resumo da Análise Bibliográfica

A Tabela A.1 inicia uma série de tabelas que resumem os principais trabalhos estudados na análise literária. Nas tabelas, para cada artigo apresentado, é feito: (i) um resumo mínimo dos seu escopo; (ii) a marcação das tecnologias que aparecem no artigo e que são relevantes ao trabalho; (iii) O veículo (conferência, periódico, jornal) em que o artigo foi publicado; e finalmente (iv) uma breve análise de sua relevância para esse trabalho.

A.1 Relação entre as Tecnologias do Estado da Arte

Na Tabela A.1, B. G. Evans [7], resume o papel dos satélites em 5G e os principais desafios definidos juntamente com um possível roteiro para levar a sistemas operacionais até 2020 foram abordados nesse artigo. Em [14] os autores introduzem a arquitetura de rede centrada na informação, PURSUIT, apresentam as simulações que mostram o ganho de desempenho oferecido pela solução proposta em relação às implementações regulares e as estratégias baseadas em redes IP. K. Liolis *et al.* resumem os conceitos do projeto SaT5G, que foi muito relevante para a elaboração dessa dissertação. No quarto trabalho da Tabela A.1, Chang Ge *et al.* [28] apresentam uma arquitetura de rede que considera a comunicação via satélite como *backhauling* 5G, especialmente para a entrega de aplicativos de banda larga móvel aprimorada (eMBB) que demandam largura de banda no 5G. Por fim, o trabalho de [29] classifica os mecanismos *Multi-access Edge Computing* de acordo com as metas de desempenho pretendidas, que incluem maximização do rendimento, minimização da latência, conservação de energia e segurança aprimorada.

Em [30] na Tabela A.2, os autores definem uma nova política para gerenciar uma sobreposição de P2P que auxilia as CDNs nas tarefas de distribuição de vídeos curtos. Como o tráfego relacionado a vídeos aumentou sua presença na Internet e uma parte significativa desse tráfego é composta por vídeos semelhantes ao YouTube. As redes de distribuição de conteúdo foram usadas para implantar aplicativos relacionados a vídeo, mas essas redes não conseguem lidar com as demandas de transmissão de vídeo em si. Assim, as CDNs assistidas por P2P têm sido consideradas uma abordagem alternativa, capaz de lidar com requisitos inatos de disponibilidade de tempo e conteúdo de aplicativos contemporâneos relacionados a vídeos. Qi Wang *et al.* [32] apresenta uma estrutura SliceNet, baseada em divisão de

Tabela A.1: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 1.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|--|--|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|--|--|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| B. G. Evans; <i>The Role of Satellites In 5G</i> | O papel dos satélites em 5G e os principais desafios definidos juntamente com um possível roteiro para levar a sistemas operacionais até 2020 foram abordados nesse artigo. | x | x | x | | x | | | | Adv. Sat. Mult. Sys. Conf. and the 13th Sig. Proc. for Space Commun. Workshop (ASMS/SPSC), 2015. [7] | A integração 5G e satélite é analisada neste artigo para apresentar futuros cenários. Revisão da visão 5G e seus impulsionadores, conforme definido pela comunidade móvel terrestre por meio da associação 5G PPP. Análise das áreas nas quais o satélite pode contribuir para um sistema integrado no 5G. |
| Tomaso de Cola, Alberto Ginesi, Giovanni Giambene <i>et al.</i> ; <i>Network and Protocol Architectures for Future Satellite Systems</i> | Artigo propõe aprimoramento da arquitetura da rede centrada na informação PURSUIT (ICN), de modo a melhorar a qualidade da experiência dos usuários em ambientes altamente móveis. | x | x | x | x | | | | | Foundations and Trends in Networking [14] | Simulações mostram o ganho de desempenho oferecido pela solução proposta em relação às implementações regulares de PURSUIT e as estratégias baseadas em IP como referência. |
| K. Liolis, A. Geurtz, R. Sperber <i>et al.</i> ; <i>Network and Protocol Architectures for Future Satellite Systems</i> | Este artigo apresenta os resultados iniciais disponíveis do projeto de Fase 2 do 5G PPP H2020, SaT5G que aborda rede terrestre e satélite para 5G. | x | x | x | | | x | | x | International Journal of Satellite Communications and Networking [23] | Depois de descrever o conceito, objetivos, desafios e pilares de pesquisa abordados pelo projeto SaT5G, este artigo descreve os casos de uso e cenários selecionados para o posicionamento de comunicações por satélite no cenário de uso 5G de banda larga móvel aprimorada. |
| Chang Ge <i>et al.</i> ; <i>QoE-Assured Live Streaming via Satellite Backhaul in 5G Networks</i> | Introduz uma arquitetura de rede orientada a 5G que é baseada em comunicações por satélite e <i>multi-access edge computing</i> para dar suporte a aplicativos eMBB, que é investigada na rede terrestre e de satélite na fase 2 do programa europeu 5G PPP. | x | x | | | | x | x | x | IEEE Transactions on Broadcasting (Volume: 65, Issue: 2, June 2019) [28]. | Testes de QoE de usuários <i>streaming</i> baseados em HTTP, utilizando links de satélite, onde a principal estratégia é realizar a retenção e a localização transitórias de HTTP para segmentos de vídeo em <i>edge</i> 5G, levando em consideração as características do <i>backhaul</i> de satélite. |
| M. Mehrabi, D. You, V. Latzko, H. Salah, M. Reisslein e F. H. P. Fitzek; <i>Device-Enhanced MEC: Multi-Access Edge Computing (MEC) Aided by End Device Computation and Caching: A Survey</i> | Este artigo analisa de forma abrangente o tópico <i>Multi-access Edge Computing</i> (MaEC), analisando redes que utilizam o mecanismo MaEC com <i>cache</i> instalado para fornecer serviços aos dispositivos finais. | | | | x | x | x | x | x | IEEE Access (Volume: 7) [29]. | Os autores classificam os mecanismos MaEC de acordo com as metas de desempenho pretendidas, que incluem maximização do rendimento, minimização da latência, conservação de energia e segurança aprimorada. Também apresentam futuras direções de pesquisa. |

rede personalizável para lidar com alguns dos desafios destacados na migração de serviços para redes 5G. O trabalho de [33], muito relevante para a pesquisa efetuada nessa dissertação, propõe um sistema de CDN com *cache* e reconhecimento que associa *cache* para cada tipo de acesso e também várias otimizações, incluindo o *cache* parcial de vídeos com base em filtragem de popularidade do conteúdo.

M. De Donno, K. Tange e N. Dragoni [34] abordam de modo extensivo a computação do tipo *Fog*, destacando seu papel na interoperabilidade de tecnologias de M2M, IoT, *Cloud* e *Edge Computing*. Em [36] observa-se o resultado de testes com um modelo de *gateway CDN Interconnection* que fornece operações compatíveis com o padrão IETF com dependência mínima de plataformas CDN legadas. Os serviços CDNI podem reduzir até 43% do volume de tráfego de conteúdo no *link IX* em comparação com sistemas CDN legados. No entanto, para a adoção comercial do CDNI, estudos adicionais sobre segurança, cobrança e modelos de negócios devem ser realizados.

O primeiro artigo da Tabela A.3 é [37], investiga o impacto da política e do ambiente de rede nas implantações de CDN na China. Apresenta diferentes tipos de implantações de CDN. Essas estratégias permitem que os CDNs estendam seu alcance e desempenho a um grande número de redes em todo o mundo. O trabalho de [38] fornece uma visão geral das iniciativas e projetos 5G atuais, seguidos de uma proposta de arquitetura para redes de satélites 5G, onde a abordagem SDN e NFV facilita a integração com o sistema terrestre 5G. Simon Pietro Romano e Cesare Roseti fornecem uma visão geral do projeto SHINE, cujo foco é o *design* e a implementação de uma infraestrutura segura de ponta a ponta para a entrega de serviços multimídia em redes integradas satélite-terrestres [39]. O trabalho de [43] oferece uma visão geral de uma arquitetura centrada em dados para lidar com a interrupção causada pelo excesso de dados gerados pela M2M na extremidade da rede. Em [45] é possível obter detalhes dos conceitos de IDN. Considera a modelagem de identidade e o endereçamento de identidade, que servem como a principal ponte entre o espaço físico e o ciberespaço importantes áreas de pesquisa.

No início da Tabela A.4, o trabalho de José Soler e Michael Gandy também abordam conceitos de IDN através de uma arquitetura de rede doméstica na qual os acessos em rede são realizados com base na personalização e gerenciamento de identidade. S. Adhatarao *et al.* apresentam um cenário com nomenclatura através de ICN para operação eficiente das redes de sensores com recursos restritos, padrões de mobilidade, segurança e comunicação para redes com milhares de dispositivos interconectados [47]. O terceiro artigo analisado na Tabela A.4 trata de detalhes sobre a integração de uma arquitetura terrestre/satélite para comunicação de grandes quantidades de dispositivos através de ICN [53]. No trabalho de [54], questões importantes foram discutidas, tais como: interoperabilidade de redes heterogêneas, gerenciamento de QoS, comunicações baseadas em IPv6. O último artigo da tabela A.4 introduz um conjunto de domínios com as necessidades de segurança e os categoriza em várias classes de controle de segurança com foco em diferentes aspectos do 5G. Apresenta uma configuração de caso de uso de cidade inteligente.

M. Parker *et al.* introduzem a rede 5G CHARISMA com sua arquitetura centralizada de borda virtualizada, hierárquica e distribuída, que processa dados o mais próximo possível de sua origem e destino [58]. Outro artigo analisado e de grande importância para o tema dessa dissertação é encontrado em [59]. Os autores desenvolvem uma estrutura de transmissão de vídeo sobre a infraestrutura de entrega de conteúdo 5G integrada terrestre-satélite, que é investigada no projeto SaT5G fase 2 do EU 5G PPP. A união de conceitos CDN e virtualização é vista no trabalho de [60], que utiliza tecnologias de virtualização e containerização para implementar funções CDN virtuais para fornecer um serviço HTTP genérico, bem como um de *streaming* de vídeo HTTP. M. Luglio *et al.* faz uma análise do serviço de *streaming* IP assistido por satélite para suporte às atuais infraestruturas de CDN com o estudo do projeto SHINE. No último artigo analisado na Tabela A.5, Tomaso De Cola e Andrea Blanco abordam conceitos de distribuição de conteúdo para construir uma solução de *backhauling multi-link*, para aproveitar as vantagens dos *links* de acesso 4G e via satélite, que podem oferecer maior capacidade de rede e garantir a continuidade do serviço mesmo na presença de interrupções na rede.

O artigo de C. Wang, A. Jayaseelan e H. Kim apresenta um estudo de casos através de emulação de CDN em *Cloud* [74]. E o trabalho de [75], apresenta o *ActiveCDN*, uma nova arquitetura de CDN que permite a um editor de conteúdo dimensionar dinamicamente seus serviços de entrega de conteúdo usando virtualização de rede e técnicas de computação em *Cloud*. Os requisitos essenciais para o funcionamento de uma CDN são disponibilizados em [77]. Faraz Ahmed *et al.* abordam o problema de seleção de tráfego da Internet a partir da perspectiva das CDN. Contribui com a seleção de rotas de trânsito em ISP por CDN através de um método para realizar medições de desempenho simultâneas em várias rotas de trânsito que são mantidas por CDNs para entrega de conteúdo para acessar ISPs [81]. A Tabela A.6 é finalizada com o artigo de [85], que sugere nova abordagem para entrega de conteúdo utilizando CDN. Nesse cenário, as soluções MEC precisam lidar de forma eficiente com a mobilidade do usuário, o que requer uma relocação rápida das instâncias de serviço para garantir a QoE desejada.

A Tabela A.7 inicia com [91], que apresenta uma arquitetura 5G-ICN e os seus benefícios, como serviços inovadores de distribuição de conteúdo e controle da rede oferecidos pela alavancagem dos recursos do ICN às atuais arquiteturas móveis baseadas em 3GPP. Pasquale Andriani [101] escreve sobre o projeto 5G MEDIA, que visa garantir que os aplicativos aloquem os recursos necessários para fornecer alta QoE e para que a rede não seja sobrecarregada pelo tráfego de mídia. O artigo de [155] apresenta novos esquemas de gerenciamento de mobilidade, QoE e QoS, mecanismos de controle e orquestração que foram desenvolvidos no projeto 5G NORMA. Em M. S. Siddiqui, A. Legarrea e E. Escalona [159], são apresentados os principais direcionadores e requisitos para uma arquitetura hierárquica 5G de inteligência distribuída, suportando baixa latência, segurança e acesso aberto através do projeto CHARISMA. D. Camps-Mur *et al.*, aborda o projeto 5G-XHaul, uma nova arquitetura de rede de transporte com tecnologias sem fio e ópticas e um plano de controle definido por software multi-tecnologia, que é capaz de suportar conjuntamente serviços de *backhaul* e *fronthaul* [160].

Na Tabela A.8, [165] enfatiza o papel desempenhado por três tecnologias principais: SDN, NFV e MEC. O trabalho analisa os principais problemas em aberto dessas tecnologias em relação ao 5G. M. Säily *et al.* propõem uma arquitetura 5G RAN com base no 3GPP versão 15 com uma série de melhorias e funções, para oferecer suporte a uma seleção eficiente, flexível e dinâmica entre os modos de transmissão *unicast*, *multicast* e *broadcast* e também a entrega de serviços de transmissão terrestre [204]. O terceiro artigo da Tabela A.8 resume os benefícios da comunicação por satélite dentro de um ambiente 5G convergente e os elementos específicos necessários desses benefícios [209]. Em seguida, [218] apresenta casos de uso e desenvolvimentos de teste para explorar o papel dos satélites em serviços de *streaming* com taxa de *bits* adaptáveis em redes 5G híbridas. E por fim, no trabalho de [227], estuda-se técnicas relacionadas ao armazenamento em *cache* nas redes móveis atuais e discutem-se as técnicas potenciais para armazenamento em *cache* em redes móveis 5G, incluindo *cache* de *evolved packet core* e *cache* de rede de acesso por rádio.

O primeiro artigo da Tabela A.9 de S. Watts e O. Aliu analisa as implicações, benefícios e oportunidades para a integração de enlaces de satélite na Internet do Futuro especificamente para fornecer *backhails* resilientes nas redes 5G [228]. A. García-Domínguez apresenta uma aplicação de 5G e Satélite em conjunto com tecnologias de *Cloud*, *Big Data* e Inteligência artificial para aplicações de transportes inteligentes [230]. Em [231] é proposta a utilização de rede de *backhaul* terrestre/satélite híbrida mono/multi-feixe para *caching* de borda *offline* de estações base de celular a fim de reduzir o tráfego de rede terrestre. F. Mendoza, R. Ferrús e O. Sallent propõem um modelo para a análise de estratégias de gerenciamento de tráfego e capacidade em redes de *backhaul* móvel híbrido satélite-terrestre para 5G [232]. M. Siddiqui *et al.* [233], descreve uma arquitetura de segurança para uma rede

de acesso 5G ativada por SDN/NFV com vários usuários baseada em gerenciamento e monitoramento de segurança através de políticas e análise inteligente.

A Tabela A.10 mostra o trabalho de X. Artiga [234] que descreve uma rede de *backhaul* dinâmica para enfrentar alguns dos principais desafios 5G, como cobertura total de áreas remotas, capacidade melhorada e redução no consumo de energia. O trabalho efetuado por [235] trata a convergência de enlaces terrestres e de satélites para suporte do 5G. A arquitetura proposta foca nos detalhes de como integrar 5G, satélite, SDN e NFV abordando vários casos de uso. Yuan Zhang e Ying Wang apresentam arquitetura que une satélite, 4G, ICN, SDN, NFV e distribuição de conteúdo com *Edge* e *Cloud* [236]. O texto de [237] fornece detalhes sobre o posicionamento do servidor de réplica em CDN tradicionais, baseados em *Cloud* e em NFV. O último artigo analisado na Tabela A.10 fornece informações do projeto 5G PPP H2020 SESAME, que aborda um grande número de cenários e casos de uso aplicando computação móvel [238].

Tabela A.2: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 2.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|--|---|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|---|---|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| C. A. V. Melo, J. A. Oliveira, G. B. Figueiredo; <i>Towards peer-assisted video on demand system: Building helpful overlays</i> | Apresenta uma nova política para gerenciar sobreposições P2P que auxilia as CDN nas tarefas de distribuição de vídeos curtos. | | x | x | | | x | x | x | 7th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATIN-COM) [30]. | Sugere forma de gerência para redes de distribuição de conteúdo visando lidar com as crescentes demandas de transmissão de vídeo. Estudos experimentais foram realizados com dados reais coletados no YouTube, o site mais popular para distribuição de vídeos atualmente. |
| Qi Wang <i>et al.</i> ; <i>Enabling Advanced QoS-Aware Network Slicing in 5G Networks for Slice-Based Media Use Cases</i> | Este artigo apresenta uma nova estrutura SliceNet, baseada em divisão de rede avançada e personalizável para lidar com alguns dos desafios destacados na migração de serviços para redes 5G. | | x | | | | x | x | | IEEE Transactions on Broadcasting (Volume: 65, Issue: 2, June 2019) [32]. | Descreve as abordagens técnicas além da divisão de rede de última geração com base em QoS de ponta a ponta para casos de uso exigentes. Os resultados experimentais validam empiricamente os habilitadores prototipados e demonstram a aplicabilidade da estrutura proposta em tais casos de uso ricos em mídia, como <i>streaming</i> de vídeo. |
| Gaogang Xie, Mohamed Ali Kaafar, Qinghua Wu; <i>Access Types Effect on Internet Video Services and Its Implications on CDN Caching</i> | Propõem um sistema de CDN <i>cache</i> com reconhecimento de tipo de acesso que associa um <i>cache</i> para cada tipo de acesso e também várias otimizações, incluindo o <i>cache</i> parcial de vídeos com base em filtragem de popularidade do conteúdo. | | x | x | | | x | | x | IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology (Volume: 28, Issue: 5, May 2018) [33]. | As simulações controladas por rastreamento demonstram que o <i>cache</i> de CDN com reconhecimento de tipo de acesso alcança alta taxa de acertos no <i>cache</i> e reduz bastante a carga na rede de conteúdo irrelevante. A eficácia das CDNs depende principalmente dos padrões de consumo de conteúdo. |
| M. De Donno, K. Tange e N. Dragoni; <i>Foundations and Evolution of Modern Computing Paradigms: Cloud, IoT, Edge, and Fog</i> | Aborda a deficiência de fornecer uma imagem clara do estado atual dos paradigmas de computação e sua relação na literatura. Os autores mostram a evolução dos paradigmas de computação modernos e interesses de pesquisa relacionados delineando ordenadamente seus pontos-chave e sua relação com os outros. | | | | | | x | x | | IEEE Access (Volume: 7) [34]. | Aborda extensivamente a computação <i>Fog</i> , destacando seu papel na interoperabilidade de tecnologias de M2M, IoT, <i>Cloud</i> e <i>Edge Computing</i> . No final, são apresentados os desafios abertos e futuras direções de pesquisa para a computação IoT, <i>Cloud</i> , <i>Edge</i> e <i>Fog</i> . Trabalho inicial para aprofundamento de temas relacionados à <i>Cloud</i> , <i>Edge</i> e <i>Fog Computing</i> . |
| Y. Bang <i>et al.</i> ; <i>CDN Interconnection Service Trial: Implementation and Analysis</i> | Apresenta um modelo de <i>gateway</i> CDNI que fornece operações compatíveis com o padrão IETF com dependência mínima de plataformas CDN legadas. Verificou-se a redução do tráfego, especialmente no <i>link IX</i> , em um teste prático do CDNI envolvendo três grandes ISP e CSP da Coreia do Sul. | | | x | | x | x | x | x | IEEE Communications Magazine (Ano: 2016, Volume: 54, Número: 6) [36]. | A partir dos resultados de teste, observou-se que os serviços CDNI podem reduzir até 43% do volume de tráfego de conteúdo no <i>link IX</i> em comparação com sistemas CDN legados. No entanto, para a adoção comercial do CDNI, estudos adicionais sobre segurança, cobrança e modelos de negócios devem ser realizados. |

Tabela A.3: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 3.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|---|--|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|--|--|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| J. Xue, D. Choffnes e J. Wang; <i>CDNs Meet CN An Empirical Study of CDN Deployments in China</i> | Investiga o impacto da política e do ambiente de rede nas implementações e implantações de CDN na China. Apresenta diferentes tipos de implantações de CDN. | | | x | | x | x | x | x | IEEE Access (Volume: 5). [37] | Os resultados podem ser úteis para a otimização de CDN na China que compreende quase 20% dos usuários da Internet residem. Essas estratégias permitem que os CDNs estendam seu alcance e desempenho a um grande número de redes em todo o mundo. |
| Giovanni Giambene, Sastri Kota e Prashant Pillai; <i>Satellite-5G Integration: A Network Perspective</i> | Esse artigo fornece uma visão geral das iniciativas e projetos 5G atuais, seguidos de uma proposta de arquitetura para redes de satélites 5G, onde a abordagem SDN e NFV facilita a integração com o sistema terrestre 5G. | x | x | | | | | | x | IEEE Network (Volume: 32, Issue: 5). [38] | Considera uma nova técnica baseada na codificação de rede para a exploração conjunta de vários caminhos em um sistema 5G satélite-terrestre integrado. |
| Simon Pietro Romano e Cesare Roseti; <i>Secure Hybrid In-Network Caching in a Hybrid Satellite-Terrestrial Environment: The SHINE Project</i> | Fornecer uma visão geral do projeto SHINE, cujo foco é o <i>design</i> e a implementação de uma infraestrutura segura de ponta a ponta para a entrega de serviços multimídia em redes integradas satélite-terrestres. | x | x | x | | | x | | x | IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). [39] | Analisa arquiteturas e configurações de satélites adaptadas para suportar de forma eficiente a solução SHINE, juntamente com a apresentação do <i>testbed</i> previsto para provar o conceito proposto. |
| E. Schooler, D. Zage, J. Sedayao e H. Moustafa e A. Brown e M. Ambrosin; <i>An Architectural Vision for a Data-Centric IoT: Rethinking Things, Trust and Clouds</i> | Oferece uma visão geral de uma arquitetura centrada em dados para lidar com a interrupção causada pelo excesso de dados gerados pela M2M na extremidade da rede. | | x | x | x | x | x | x | x | IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). [43] | A arquitetura de rede defende a abordagem para o <i>design</i> de <i>Smart Objects</i> , aumentar a confiança organicamente e evoluir as <i>Clouds</i> de <i>back-end</i> para as <i>Edge</i> e <i>Fog clouds</i> . |
| H. Ning, Z. Zhen, F. Shi e M. Daneshmand; <i>A Survey of Identity Modeling and Identity Addressing in Internet of Things</i> | Resume os trabalhos relacionados sobre modelagem de identidade e endereçamento de identidade em M2M e IoT e faz uma comparação e análise geral com base em seus respectivos recursos. | | | | | x | x | | x | IEEE Internet of Things Journal. [45] | Considera a modelagem de identidade e o endereçamento de identidade, que servem como a principal ponte entre o espaço físico e o ciberespaço importantes áreas de pesquisa. |

Tabela A.4: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 4.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|--|--|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|---|--|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| José Soler e Michael Gandy; <i>Personalized Home-networks - Identity-driven network behaviour and configuration</i> | Apresenta detalhes de uma arquitetura de rede doméstica baseada em um <i>gateway</i> residencial aprimorado com IDN. | | | | | x | | | | In 6th International Conf. on Networking (ICN07) IEEE. [46] | Arquitetura de rede doméstica na qual os acessos em rede são realizados com base na personalização e gerenciamento de identidade. |
| S. Adhatarao, M. Arumathurai, D. Kutscher e X. Fu; <i>ISI - Integrate Sensor Networks to Internet with ICN</i> | Apresenta requisitos essenciais para integrar redes de sensores à Internet e fornece uma arquitetura com <i>gateways</i> para criar um caminho para as redes de sensores se tornarem parte das futuras redes de dispositivos massivos. | | | | x | | x | x | x | IEEE Internet of Things Journal, 2018. [47] | Apresenta um cenário com nomenclatura através de ICN para operação eficiente das redes de sensores com recursos restritos, padrões de mobilidade, segurança, comunicação e opções mais adequadas para redes com milhares de dispositivos interconectados. |
| Vasilios A. Siris, Yiannis Thomas e George C. Polyzos; <i>Supporting the IoT over Integrated Satellite-Terrestrial Networks using Information-Centric Networking</i> | Investiga a sobrecarga de mensagem e do controle de dados quando a IoT é suportada através de uma rede terrestre/satélite integrada baseada em ICN. | x | | | x | | | | x | 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS) [53]. | A integração de uma arquitetura terrestre/satélite para comunicação de grandes quantidades de dispositivos através de ICN está presente nesse estudo. |
| M. De Sanctis, E. Cianca, G. Araniti, I. Bisio e R. Prasad; <i>Satellite communications supporting internet of remote things</i> | Este artigo fornece uma visão geral da atividade de pesquisa em comunicação por satélite, tendo em vista seu uso em cenários de aplicação M2M e <i>Internet of Remote Things</i> . | x | x | | x | | | | | IEEE Internet of Things Journal [54]. | Questões importantes que foram discutidas são: interoperabilidade de redes heterogêneas, gerenciamento de QoS, comunicações baseadas em IPv6. Para cada um desses tópicos, os resultados de alguns estudos recentes foram relatados e algumas direções adicionais de pesquisa foram identificadas. |
| G. Arfaoui, P. Bission, R. Blom et al.; <i>A Security Architecture for 5G Networks</i> | Propõe uma arquitetura de segurança 5G que se constrói a partir de órgãos padronizadores 3GPP, ETSI e ITU-T e dos conceitos herdados das arquiteturas de segurança das redes 3G e 4G. | | x | | | x | x | | | IEEE Access (Volume: 6) [57]. | Introduz um conjunto de domínios para capturar as necessidades de segurança e os categoriza em várias classes de controle de segurança com foco em diferentes aspectos do 5G. Apresenta uma configuração de caso de uso de cidade inteligente. |

Tabela A.5: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 5.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa | |
|---|--|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|---------|---|---|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | | |
| M. Parker <i>et al.</i> ; <i>Ultra-Low Latency 5G CHARISMA Architecture for Secure Intelligent Transportation Verticals</i> | Introduz a rede 5G CHARISMA com sua arquitetura centralizada de borda virtualizada, hierárquica e distribuída, que processa dados o mais próximo possível de sua origem e destino. | | x | x | | | | | x | | 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). [58] | Descrição da arquitetura 5G CHARISMA, com baixa taxa de latência para acessos. O 5G CHARISMA pode encontrar aplicação importante em situações futuras de sistemas de transporte inteligente, especificamente em um cenário de caso de uso de ônibus de transporte público. |
| S. Kumar, N. Wang, C. Ge e B. Evans; <i>Optimising Layered Video Content Delivery Based on Satellite and Terrestrial Integrated 5G Networks</i> | Desenvolve uma estrutura de transmissão de vídeo sobre infraestrutura de entrega de conteúdo 5G integrada terrestre-satélite, que é investigada no projeto SaT5G fase 2 do EU 5G PPP, onde o enlace satélite é usado como um canal adicional de <i>backhaul</i> 5G. | x | x | | | | | x | | x | European Conference on Networks and Communications (EuCNC) [59]. | O objetivo é obter distribuição otimizada de carga de conteúdo entre na estrutura 5G integrada terrestre-satélite. Experimentos conduzidos revelam que a estrutura proposta é capaz de atingir uma boa porcentagem de descarregamento de tráfego sem comprometer a QoE do usuário final. |
| P. A. Frangoudis, L. Yala e A. Ksentini; <i>CDN-As-a-Service Provision Over a Telecom Operator's Cloud</i> | Apresenta o projeto e a implementação de uma arquitetura de <i>Content-Delivery-Network-as-a-Service</i> (CDNaaS), que permite a uma operadora de telecomunicações abrir sua infraestrutura de <i>Cloud</i> para provedores de conteúdo para implantar instâncias virtuais de CDN sob demanda, em regiões onde a operadora tem presença. | | | x | | | | x | x | x | IEEE Transactions on Network and Service Management [60]. | Utiliza tecnologias de virtualização e containerização para implementar funções CDN virtuais para fornecer um serviço HTTP genérico, bem como um de <i>streaming</i> de vídeo HTTP. |
| M. Luglio, Simon P. Romano, C. Roset e F. Zampognaro; <i>Service Delivery Models for Converged Satellite-Terrestrial 5G Network Deployment: A Satellite-Assisted CDN Use-Case</i> | Faz uma análise do serviço de <i>streaming</i> IP assistido por satélite para suporte às atuais infraestruturas de CDN com o estudo do projeto <i>Secure Hybrid In Network caching Environment</i> (SHINE). | x | x | x | | | | x | x | x | IEEE Network (Volume: 33, Issue: 1, January/February 2019) [72]. | O trabalho propõe uma revisão dos modelos de prestação de serviços por satélite, a fim de identificar alternativas viáveis para implantar serviços convergentes satélite-terrestre. |
| Tommaso De Cola e Andrea Blanco; <i>ICN-based protocol architectures for next-generation backhauling over satellite</i> | Propõe uma extensão da arquitetura ICN <i>Publish Subscribe Internet Technology</i> (PURSUIT) para uso em ambientes móveis de modo a melhorar a qualidade de experiência dos usuários. | x | x | x | x | | | | | x | Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on [73]. | Aborda conceitos de distribuição de conteúdo para construir uma solução de <i>backhauling multi-link</i> , para aproveitar as vantagens dos <i>links</i> de acesso 4G e via satélite, que podem oferecer maior capacidade de rede e garantir a continuidade do serviço mesmo na presença de interrupções na rede. |

Tabela A.6: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 6.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|---|---|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|--|--|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| Chen Wang, Andal Jayaseelan, Hyong Kim; <i>Comparing Cloud Content Delivery Networks for Adaptive Video Streaming</i> | Os autores emularam usuários de <i>streaming</i> de vídeo na nuvem <i>PlanetLab</i> para medir o desempenho de CDN em nuvem. | | | x | | x | x | x | x | IEEE 11th International Conference on Cloud Computing (CLOUD) [74]. | O trabalho apresenta estudo de casos através de emulação de CDN em nuvem. Os autores utilizaram uma QoE aproximada como métrica de avaliação e definiram que a experiência do usuário e os custos de fornecer o mesmo serviço de <i>streaming</i> de vídeo podem variar ao usar diferentes CDN em nuvem. |
| R. S. Suman, D. L. Batni, H. G. Schulzrinne; <i>ActiveCDN: Cloud Computing Meets Content Delivery Networks</i> | O trabalho apresenta <i>ActiveCDN</i> , uma nova arquitetura de CDN que permite a um editor de conteúdo dimensionar dinamicamente seus serviços de entrega de conteúdo usando virtualização de rede e técnicas de computação em nuvem. | | | x | x | x | x | x | x | Department of Computer Science, Columbia University [75]. | Introduz uma nova abordagem para redes dinâmicas de distribuição de conteúdo que podem ser implantadas usando virtualização de rede e técnicas de computação em nuvem. A arquitetura une CDN com modelos de computação em nuvem. |
| Akamai Technologies, Inc.; <i>Content Delivery for an Evolving Internet - Choosing the Right CDN for Today e Tomorrow</i> | São definidos os requisitos essenciais para uma CDN e embasa por que esses são fundamentais para ajudar na implantação de redes focadas em armazenamento e fornecimento de conteúdo no mercado dinâmico atual. | | | | x | x | x | x | x | Akamai White Paper - As the global leader in Content Delivery Network (CDN) services. [77] | Apresenta as principais características da CDN para a Internet atual e futura. E, como implementar segurança avançada em redes de distribuição de conteúdo. |
| Faraz Ahmed, M. Zubair Shafiq, Amir R. Khakpour e Alex X. Liu; <i>Optimizing Internet Transit Routing for Content Delivery Networks</i> | Abordam o problema de seleção de tráfego da Internet a partir da perspectiva das CDN. Contribui com a seleção de rotas de trânsito em ISP por CDN através de um método para realizar medições de desempenho simultâneas em várias rotas de trânsito que são mantidas por CDNs para entrega de conteúdo para acessar ISPs. | | | x | | x | x | x | x | IEEE/ACM Transactions on Networking [81]. | Abordam o problema de roteamento em CDN para otimizar simultaneamente de ponta a ponta o desempenho e custo. A abordagem permite que as CDN naveguem entre compensação de custo e desempenho no roteamento. |
| I. Farris, T. Taleb, H. Flinck e A. Iera; <i>Providing Ultra-short Latency to User-centric 5G Applications at the Mobile Network Edge</i> | Investiga uma nova abordagem para oferecer suporte ao provisionamento de serviços em ambientes dinâmicos do MEC. De acordo com o artigo o MEC desempenhará uma função importante nas redes móveis de próxima geração para estender a gama de aplicativos sensíveis a atrasos. | | x | x | | | | x | x | Trans Emerging Tel Tech. 2018 [85]. | Sugere nova abordagem para entrega de conteúdo utilizando CDN. Nesse cenário, as soluções MEC precisam lidar de forma eficiente com a mobilidade do usuário, o que requer uma relocação rápida das instâncias de serviço para garantir a QoE desejada. Para isso, deve-se atentar ao fornecimento de serviços centrados no usuário, para melhor atender aos requisitos restritos de novos aplicativos imersivos. |

Tabela A.7: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 7.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|--|---|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|--|---|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| R. Ravindran, A. Chakraborti, S. Amin, A. Azgin, G. Wang; <i>5G-ICN: Delivering ICN Services over 5G using Network Slicing</i> | Apresenta uma arquitetura 5G-ICN e os seus benefícios, como serviços inovadores de distribuição de conteúdo e controle da rede oferecidos pela alavanca-gem dos recursos do ICN às atuais arquiteturas móveis baseadas em 3GPP. | | x | x | x | x | x | x | x | IEEE Communi-cations Magazine (Volume: 55, Issue: 5, May 2017) [91]. | Foca em mobilidade como serviço e apre-senta uma arquitetura que une 5G com tecnolo-gias de distribuição de conteúdo e mos-tra uma visão geral sobre provisiona-mento de recursos, interdependências e coordenações entre as funções 5G e ICN. |
| Pasquale Andriani; <i>Projeto 5G Média: Programable edge-to-cloud virtualization fabric for the 5G Media Industry</i> | Visa garantir que os aplicativos alo-quem os recursos necessários para for-necer alta QoE e para que a rede não seja sobrecarregada pelo tráfego de mídia. | | x | x | | | x | x | | Site do projeto 5G Média: www.5gmedia.eu /outcomes /delive-rables [101]. | Faz parte do programa de investigação e inovação H2020 da União Europeia, que tem como objetivo inovar aplicações relacionadas a mídia, investigando como essas aplicações e redes 5G subjacentes devem ser acopladas e interoperadas para o benefício de ambas. |
| M. Gramaglia, I. Digon, V. Friderikos, D. von Hugo, C. Mannweiler, M. A. Puente, K. Samdanis e B. Sayadi; <i>Flexible connectivity and QoE/QoS management for 5G Networks: The 5G NORMA view</i> | O artigo apresenta novos esquemas de gerenciamento de mobilidade, QoE e QoS, mecanis-mos de controle e orquestração que foram desenvolvi-dos no projeto 5G NORMA. | | x | | | | x | x | x | IEEE International Conference on Communicati-ons Workshops (ICC) [155] | O objetivo previsto pelo 5G NORMA é desenvolver uma nova arquitetura de rede móvel 5G, adaptável e preparada para o futuro. Para atender a esses requisitos, o 5G NORMA prevê uma arquitetura extrema-mente flexível para ser implantada em um <i>data center</i> distribuído em várias camadas de redes. |
| M. S. Siddiqui, A. Legarrea e E. Escalona; <i>Hierarchical, Virtualized, and Distributed Intelligence 5G Architecture for Low-Latency and Secure Applications</i> | São apresentados os principais direcio-nadores e requisitos para uma arqui-tetura hierárquica 5G de inteligência distribuída, supor-tando baixa latência, segurança e acesso aberto. | | x | x | x | | x | x | | Networks and Communications (EuCNC), 2016 European Confe-rence on [159] | Projeto CHARISMA (<i>Converged Heteroge-neous Advanced 5G Cloud-RAN Architecture for Intelligent and Secure Media Access</i>). Projeto que tem como objetivo lidar com arquitetura de redes de baixa latência e com segurança <i>end-to-end</i> para redes convergentes 5G. |
| D. Camps-Mur <i>et al.</i> ; <i>5G-XHaul: A Novel Wireless-Optical SDN Transport Network to Support Joint 5G Backhaul and Fronthaul Services</i> | Apresentação do 5G-XHaul, uma nova arquitetura de rede de transporte com tecnologias sem fio e ópticas e um plano de controle definido por software multi-tecnologia, que é capaz de supor-tar conjuntamente serviços de <i>backhaul</i> e <i>fronthaul</i> . | | x | | | | x | | | IEEE Com-munications Magazine [160] | Neste trabalho, os auto-res implementam e vali-dam a arquitetura 5G-XHaul em um ambi-ente de teste em toda a cidade de Bristol na Inglaterra. |

Tabela A.8: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 8.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|--|---|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|--|---|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| B. Blanco <i>et al.</i> ; <i>Technology pillars in the architecture of future 5G mobile networks: NFV, MEC and SDN</i> | Examina documentos dos principais interessados para selecionar os casos de uso, cenários e setores verticais emergentes que serão ativados pelas tecnologias 5G e para identificar os futuros requisitos de serviços de alto nível. | | x | | | | x | x | | Computer Standards & Interfaces. [165] | Enfatiza o papel desempenhado por três tecnologias principais: SDN, NFV e MEC. O trabalho analisa os principais problemas em aberto dessas tecnologias em relação ao 5G. |
| M. Säily <i>et al.</i> ; <i>5G Radio Access Network Architecture for Terrestrial Broadcast Services</i> | Propõe uma arquitetura 5G RAN com base no 3GPP versão 15 com uma série de melhorias e funções, para oferecer suporte a uma seleção eficiente, flexível e dinâmica entre os modos de transmissão <i>unicast</i> , <i>multicast</i> e <i>broadcast</i> e também a entrega de serviços de transmissão terrestre. | | x | | | | x | x | | IEEE Transactions on Broadcasting. [204] | O trabalho desenvolve a arquitetura baseada em Cloud-RAN do projeto 5G-Xcast e propõe novos conceitos, como o <i>enhanced Multicast/Broadcast Multimedia Service</i> . Metodologias de avaliação de alto nível, incluindo análise de complexidade e inspeção, são usadas para avaliar a viabilidade do projeto de arquitetura proposto e compará-lo com os requisitos de arquitetura 3GP. |
| M. Corici, A. Kapovits, S. Covaci, A. Geurtz, B. Riemer e A. Weber; <i>Assessing satellite-terrestrial integration opportunities in the 5G environment</i> | Resume os benefícios da comunicação por satélite dentro de um ambiente 5G convergente e os elementos específicos necessários desses benefícios. | x | x | x | | | x | x | | Produced by the European Space Agency ARTES Project "INS-TINCT: Scenarios for Integration of Satellite Components in Future Networks". [209] | Define as principais características de uma rede via satélite para 5G. |
| T. Heyn, T. Schlichter, W. Zia e A. Ilanogovan; <i>5G Collaborative Hybrid Satellite Adaptive Bitrate Streaming Services</i> | Apresenta casos de uso e desenvolvimentos de teste para explorar o papel dos satélites em serviços de <i>streaming</i> com taxa de <i>bits</i> adaptáveis em redes 5G híbridas. | x | x | | | | | | | European Conf. on Networks and Communications. 2017. [218] | Trás casos de uso e desenvolvimentos de teste do projeto SCORSESE. O projeto desenvolve uma <i>Proof of Concept</i> para avaliar e quantificar os aprimoramentos de desempenho alcançados pelas arquiteturas integradas, incluindo satélite. |
| X. Wang, M. Chen, T. Taleb e A. Ksentini e V. Leung; <i>Cache in the Air - Exploiting Content Caching and Delivery Techniques for 5G Systems</i> | Neste artigo, estuda-se técnicas relacionadas ao armazenamento em <i>cache</i> nas redes móveis atuais e discutem-se as técnicas potenciais para armazenamento em <i>cache</i> em redes móveis 5G, incluindo <i>cache</i> de <i>evolved packet core</i> e <i>cache</i> de rede de acesso por rádio. | | x | x | x | x | x | x | x | IEEE Communications Magazine [227]. | É proposto um novo esquema para utilização de técnicas <i>cache</i> baseado no conceito de rede centrada em conteúdo ou rede centrada em informações. Usando simulações orientadas a rastreamento, avalia-se o desempenho do esquema proposto e validam-se as várias vantagens da utilização de <i>cache</i> para armazenamento de conteúdo em redes móveis 5G. |

Tabela A.9: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 9.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa | |
|---|--|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|---------|---|--|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | | |
| S. Watts e O. Aliu; <i>5G Resilient Backhaul Using Integrated Satellite Networks</i> | Este documento analisa as implicações, benefícios e oportunidades para a integração de enlaces de satélite na Internet do Futuro especificamente para fornecer <i>backhails</i> resilientes nas redes 5G que surgirão. | x | x | | | | | | x | x | Advanced Satellite Multimedia Systems Conf. and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). [228] | Projeto Europeu ESA ARTES 1 "Service delivery over integrated satellite and terrestrial networks". |
| A. García-Domínguez; <i>Mobile Applications, Cloud and Bigdata on Ships and Shore Stations for Increased Safety on Marine Traffic; a Smart Ship Project</i> | Apresenta uma aplicação de 5G e Satélite em conjunto com tecnologias de <i>Cloud</i> , <i>Big Data</i> e Inteligência artificial para criar Navios Inteligentes. | x | x | | | | | | x | x | Industrial Technology (ICIT), IEEE International Conference on. [230] | Novas tecnologias para aplicações inteligentes em navios e o uso de nuvem, <i>Big Data</i> e processo analítico e cognitivo em tempo real são apresentados como novas ferramentas de navegação. |
| A. Kalantari, M. Fittipaldi, S. Chatzinotas, T. Vu e B. Ottersten; <i>Cache-Assisted Hybrid Satellite-Terrestrial Backhauling for 5G Cellular Networks</i> | É proposta a utilização de rede de <i>backhaul</i> terrestre/satélite híbrida mono/multi-feixe para <i>caching</i> de borda <i>offline</i> de estações base de celular a fim de reduzir o tráfego de rede terrestre. | x | x | | | | | | | x | GLOBECOM 2017 - IEEE Global Communications Conference [231]. | Resultados da simulação mostram que a arquitetura híbrida de satélite-terrestre reduz consideravelmente o tempo de colocação de conteúdo enquanto mantém a taxa de acertos do <i>cache</i> bastante próxima do limite superior em comparação com o método somente de satélite. |
| F. Mendoza, R. Ferrús e O. Sallent; <i>Flexible Capacity and Traffic Management for Hybrid Satellite-Terrestrial Mobile Backhauling Networks</i> | Este artigo propõe um modelo para a análise de estratégias de gerenciamento de tráfego e capacidade em redes de <i>backhaul</i> móvel híbrido satélite-terrestre para 5G. | x | x | | | | | | | | Wireless Communication Systems (ISWCS), International Symposium on [232] | Resultados numéricos são fornecidos para avaliar os ganhos de capacidade que podem ser alcançados quando a capacidade de <i>backhaul</i> de satélite é usada para suportar tráfego em casos de uso 5G. |
| M. Siddiqui <i>et al.</i> ; <i>Policy Based Virtualised Security Architecture for SDN-NFV enabled 5G Access Networks</i> | Descreve uma arquitetura de segurança holística para uma rede de acesso 5G ativada por SDN/NFV com vários usuários baseada em gerenciamento e monitoramento de segurança através de políticas e análise inteligente. | | x | | | x | x | x | | | 2016 IEEE Conf. on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN) [233]. | Este documento fornece uma visão sobre os desafios de segurança enfrentados pelas redes 5G. A segurança de ponta a ponta do serviço de rede, a segurança virtualizada e o gerenciamento de segurança são alguns dos principais desafios enfrentados pelas redes 5G. |

Tabela A.10: Tecnologias em cada proposta *versus* estado da arte: Parte 10.

| Artigo | Resumo | Tecnologias | | | | | | | | Veículo | Relevância para o trabalho de pesquisa |
|--|--|-------------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|--|--|
| | | Satélite | xG | CDN | ICN | IDN | Edge | Cloud | Cache | | |
| X. Artiga, J. Nunez-Martinez, A. Perez-Neira e G. J. Lendrino Vela e J. M. Fare Garcia e G. Ziaragkas <i>et al.</i> ; <i>Terrestrial-Satellite Integration in Dynamic 5G Backhaul Networks</i> | Esse artigo apresenta uma rede de <i>backhaul</i> dinâmica para enfrentar alguns dos principais desafios 5G, como cobertura total de áreas, capacidade melhorada e redução no consumo de energia. | x | x | x | | | x | x | | Adv. Satellite Multimedia Systems Conf. and the 14th Signal Processing for Space Communications Workshop, 8th. [234] | A solução proposta, elaborada dentro do projeto SANSA H2020, baseia-se na integração contínua do componente satélite em uma rede terrestre capaz de reconfigurar sua topologia de acordo com as demandas de tráfego. |
| T. Rossi, M. De Sanctis, E. Cianca, C. Fragale, H. Fenech; <i>Future Space-Based Communications Infrastructures based on High Throughput Satellites and Software Defined Networking</i> | Apresenta uma arquitetura integrada terrestre-satélite baseada em SDN e NFV que explora conceitos de serviços de <i>cloud</i> e CDN. | x | x | x | | | | x | | IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE) [235] | Trata a convergência de enlaces terrestres e de satélites para suporte do 5G. A arquitetura proposta foca nos detalhes de como integrar 5G, satélite, SDN e NFV abordando vários casos de uso. |
| Yuan Zhang e Ying Wang; <i>SDN Based ICN Architecture for the Future Integration Network</i> | Discute a integração com 4G e aponta possíveis evoluções nesse contexto. Defende que o uso de ICN em satélite pode prover a entrega eficiente e sem fronteiras de conteúdos. | x | x | | x | | | x | x | 16th International Symposium on Communications and Information Technologies (IS-CIT), 2016. [236] | Artigo que trata de uma arquitetura que une satélite, 4G, ICN, SDN, NFV e distribuição de conteúdo com <i>Edge e Cloud</i> . |
| W. Ajib, M. A. Salahuddin, R. Gliho, H. Elbiaze, J. Sahoo; <i>A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks</i> | Apresenta pesquisa abrangente de algoritmos de posicionamento de servidor de réplica em CDN baseados em paradigmas tradicionais e emergentes. Identifica requisitos para um algoritmo de posicionamento de servidor e discute os caminhos possíveis para pesquisas adicionais sobre CDN. | | | x | | | x | x | x | IEEE Communications Surveys and Tutorials (Volume: 19, Issue: 2, Secondquarter 2017). [237] | Fornecer detalhes sobre o posicionamento do servidor de réplica em CDN tradicionais, baseados em <i>Cloud</i> e em NFV. O resumo de vários algoritmos mostra que existem oito objetivos diferentes: RTT, latência, contagem de saltos, qualidade do enlace, custo, número de servidores, número de reconfigurações e tráfego de rede propostos na literatura. |
| I. Giannoulakis <i>et al.</i> ; <i>System architecture and deployment scenarios for SESAME: Small cEHS coodinAtion for Multi-tenancy and Edge services</i> | Neste artigo, o projeto 5G PPP H2020 SESAME é apresentado junto com os conceitos e visões desenvolvidos pela equipe no trabalho. | | x | | | | x | x | x | IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft) [238]. | O SESAME foca em: i) combinar as pequenas células 5G principais com <i>Cloud</i> ; ii) promover e desenvolver o conceito de <i>Small Cells-as-a-Service</i> (SCaaS); iii) trazer o poder de computação e armazenamento na borda da rede móvel através do desenvolvimento de micros servidores; e iv) abordar um grande número de cenários e casos de uso aplicando computação móvel. |

Apêndice B

Apêndice - Fotos dos Trabalhos Efetuados no Laboratório e em Campo

Esse apêndice registra as fotos dos equipamentos e dos trabalhos realizados no laboratório de pesquisas, ICT Lab. no Inatel, e dos trabalhos realizados em campo na cidade de Santa Rita do Sapucaí/MG nas “Três Torres”, centro de localização das antenas de telecomunicações e equipamentos de rádio enlace.

B.1 Ferramentas e hardwares utilizados para a execução dos testes

Na Figura B.1 é apresentada uma foto do Transceptor Flexível TX-RX-MIMO-GFDM, modem 5G *Long Range* desenvolvido pelo CRR do Inatel. A foto mostra o *hardware* do modem 5G em funcionamento durante os testes executados.

A Figura B.2 apresenta um analisador de espectros com a forma de onda obtida com as frequências características da transmissão do modem 5G *Long Range* de 710,0 MHz de transmissão e 545,0 MHz de recepção.

A Figura B.3 apresenta a foto do equipamento utilizado como servidor com o nó de borda (*edgecdn.node*) localizado no *rack* fixado no ICT Lab. do Inatel. O *hardware* desse equipamento é composto por um servidor DELL PowerEdge R540, com processador Intel Xeon Silver 4110 e CPU (*Central Processing Unit*) de 2.33 GHz de frequência. Esse servidor foi utilizado para criar as máquinas virtuais para a arquitetura de rede de testes.

O servidor apresentado na Figura B.4 é um equipamento montado especificamente para executar as funções necessárias de nó central (*centralcdn.node*). Esse servidor foi montado com peças disponíveis no laboratório ICT Lab. e a memória RAM teve que ser definida em 32 GB para suportar os processos das máquinas virtuais durante a transferência de dados entre os pontos da rede. O processador desse servidor é um Intel Core i7-4790 com CPU de 3.60 GHz de frequência. Depois de montado, o Servidor 2 foi transferido para Hortolândia/SP para concluir o enlace da arquitetura entre Modem 5G, Modem CDM-760 e acelerador TCP, BUC, satélite SES-14 e *Gateway*.

A Figura B.5 mostra a foto do local onde o *Block Up Converter* (BUC) do satélite SES-14 foi instalado e configurado em conjunto com o modem CDM-760 e com o acelerador TCP da COMTECH.



Figura B.1: *Hardware* do rádio do transceptor TX-RX-MIMO-GFDM (Modem 5G).

O BUC realiza a amplificação e conversão para a frequência apropriada no *uplink* para o processo de transmissão.

A Figura B.7 apresenta uma foto com um esboço da arquitetura de testes desenhada no quadro do laboratório ICT Lab. no Inatel. A Figura B.7 também mostra o desenvolvimento no *Overleaf* do relatório técnico apresentado ao SINDISAT com a proposta do caderno de testes.

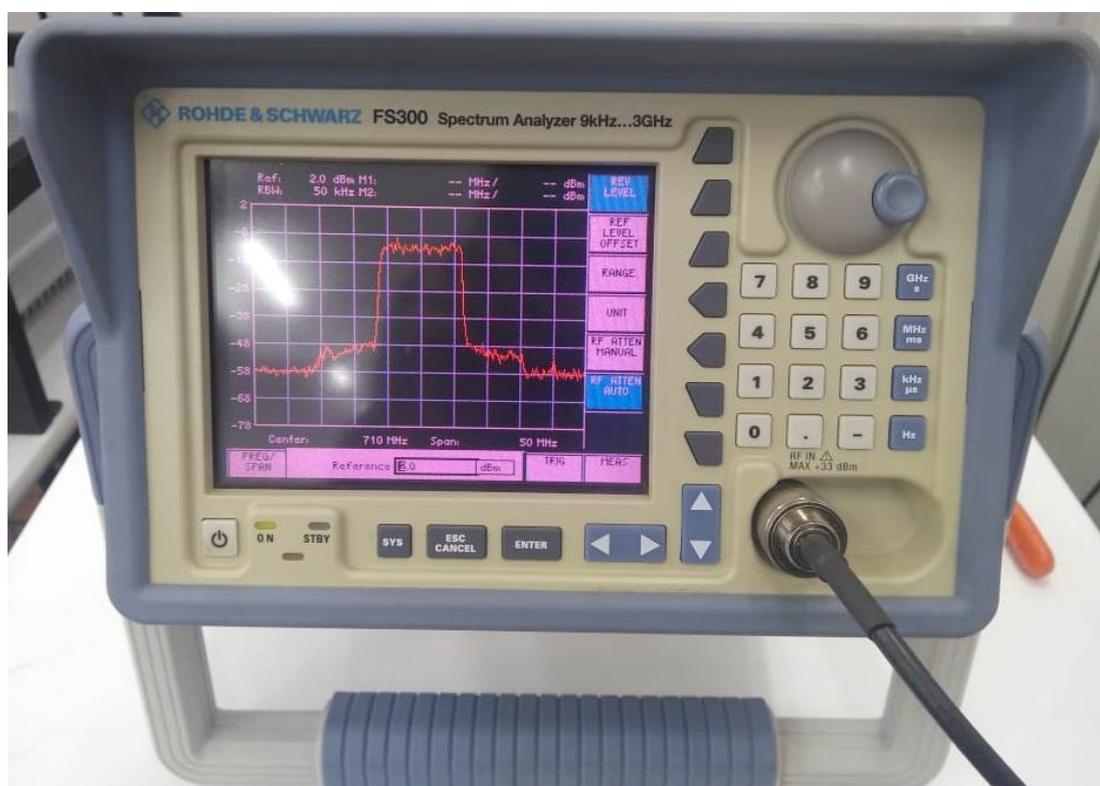


Figura B.2: Analisador de espectro com a forma de onda obtida durante os testes de transferência de conteúdo com modem 5G.

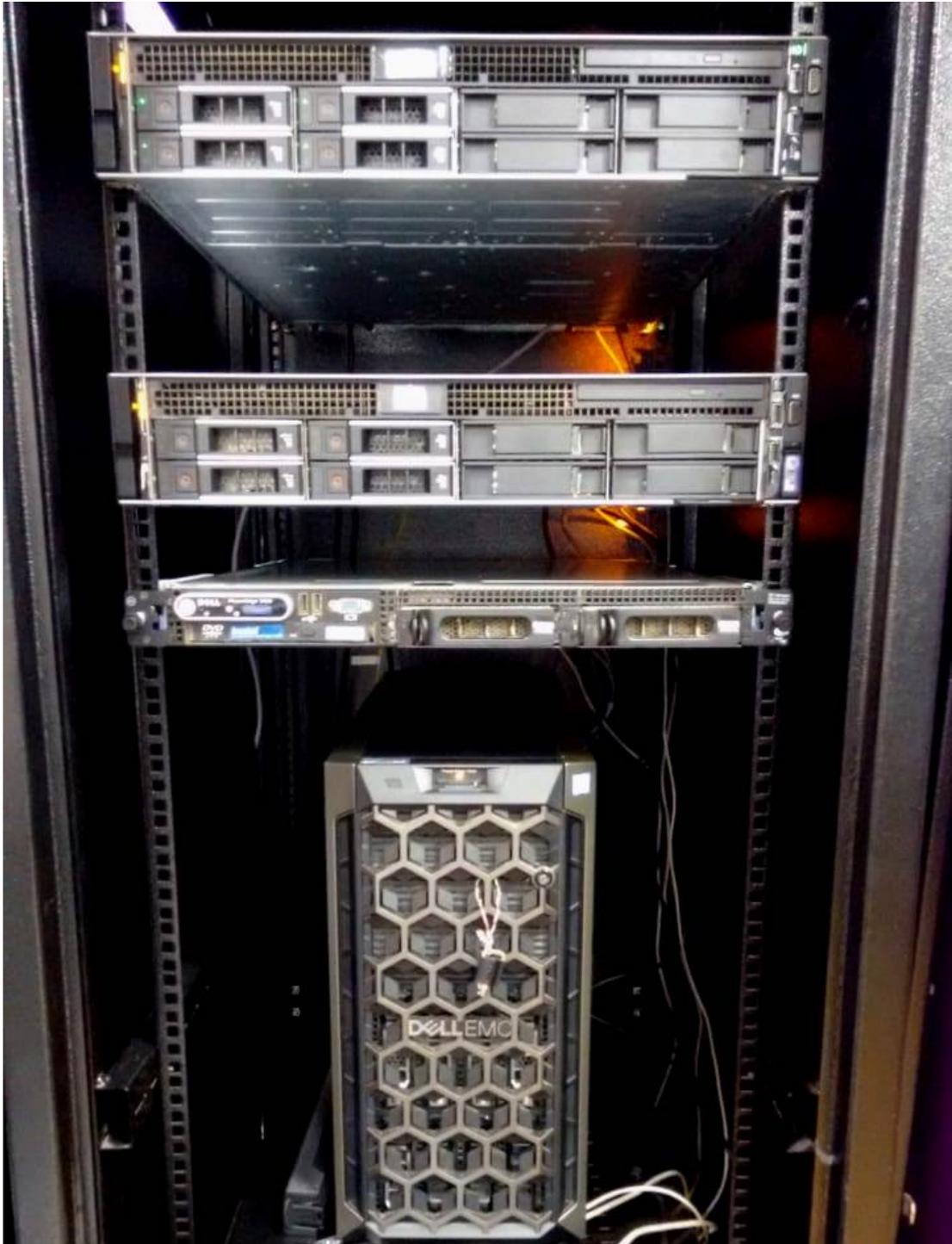


Figura B.3: Foto do Servidor 1 utilizado na arquitetura de rede.

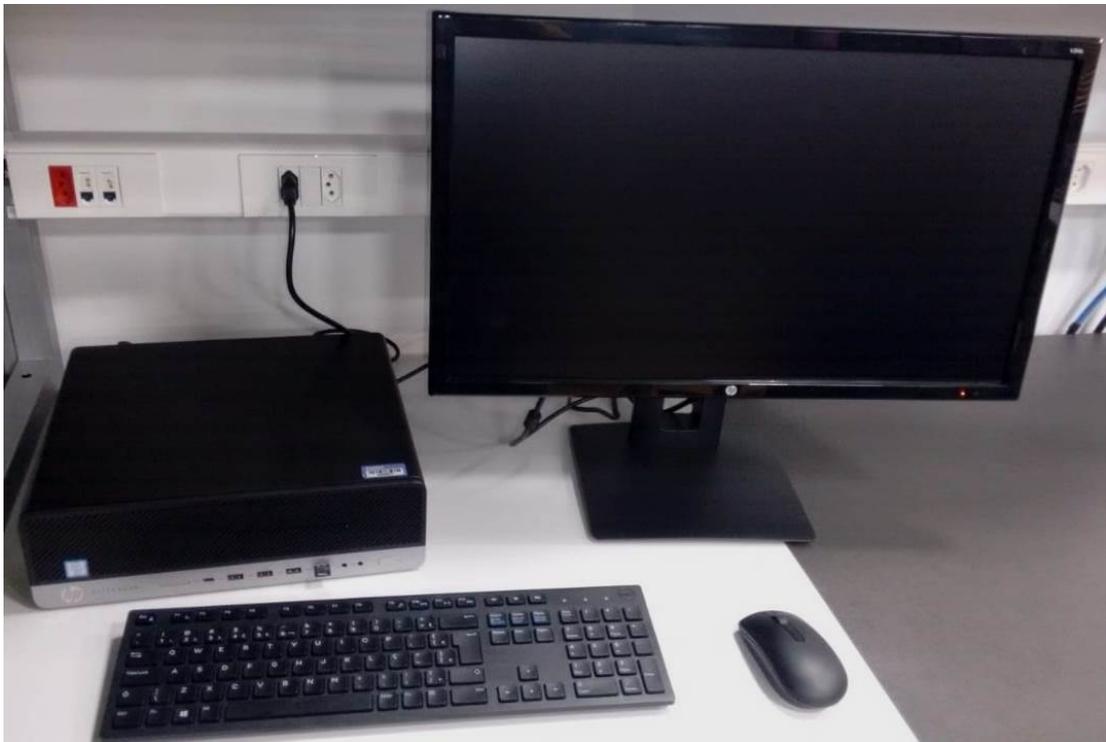


Figura B.4: Foto do Servidor 2 localizado na cidade de Hortolândia/SP.



Figura B.5: Foto do local de instalação do BUC do satélite SES-14.

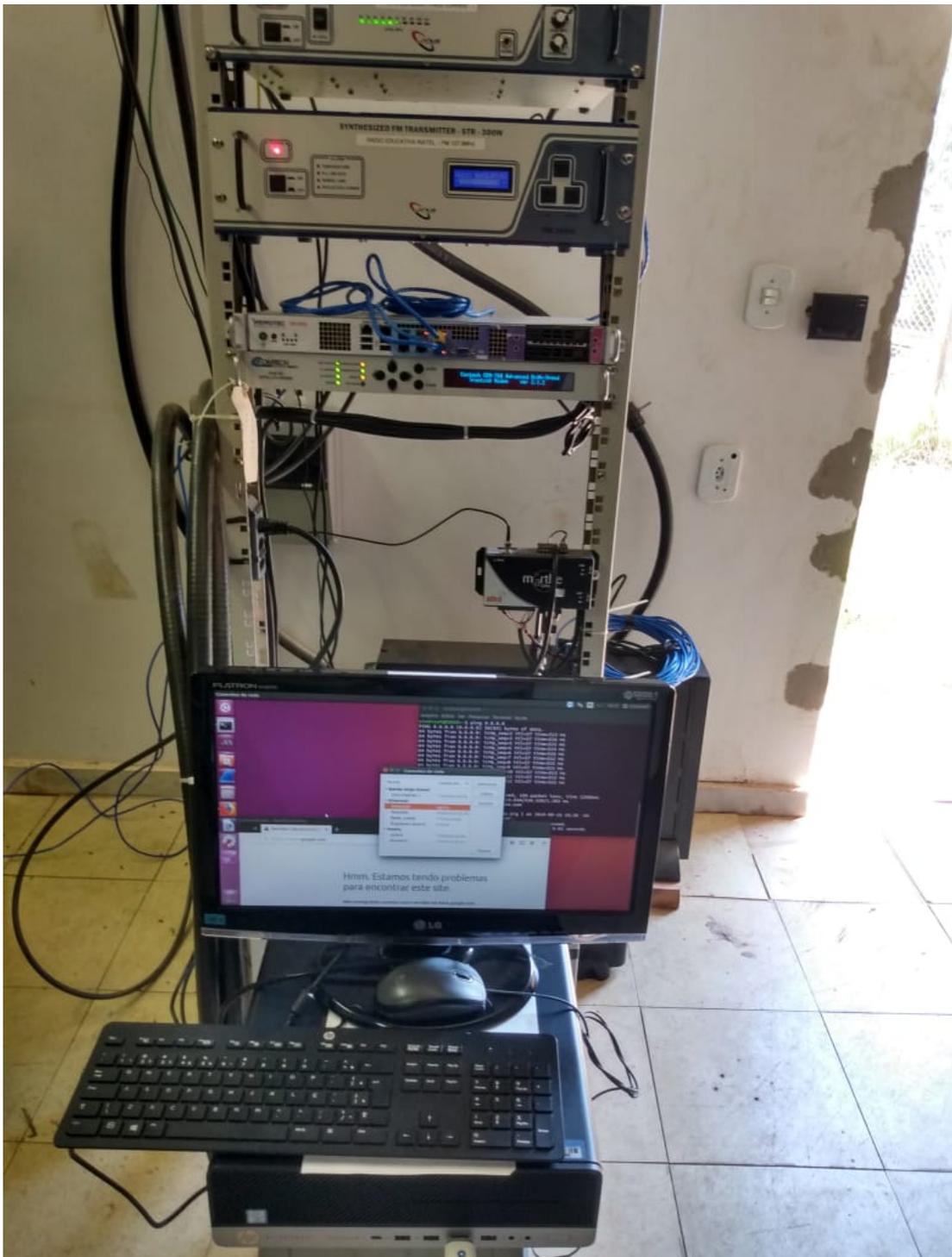


Figura B.6: Foto do Servidor 2 funcionando após configuração do modem CDM-760 e do acelerador TCP.

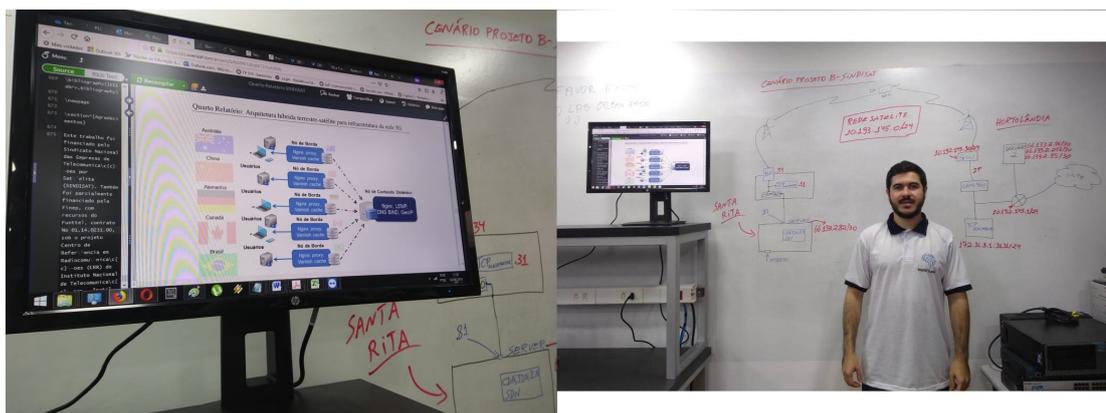


Figura B.7: Foto dos trabalhos realizados em laboratório no ICT Lab.

Apêndice C

Apêndice - Programação e Configuração dos Nós da Arquitetura

Esse apêndice apresenta um tutorial da programação e das configurações realizadas para o funcionamento dos nós que fazem parte da CDN na arquitetura híbrida.

C.1 Nó de Borda

Inicialmente foi feita a programação do nó de borda denominado *ICT_SAT_5G_edgedn-node*. Como essa é a primeira interação com o sistema de gerenciamento de pacotes *apt*, é necessário atualizar o índice local de pacotes para acessar as listas de pacotes mais recentes. As etapas de programação e configuração das ferramentas utilizadas no nó de borda são descritas em forma de tutorial a seguir:

```
1 FROM ubuntu:18.04 ICT_SAT_5G_edgedn-node
2
3 Tibério Tavares Rezende
4 <tiberio@mtel.inatel.br>
5
6 #Os pré-requisitos foram instalados com o comando:
7 sudo apt install curl gnupg2 ca-certificates lsb-release
8
9 #Configurando o repositório \textit{apt} para pacotes Nginx
10 → estáveis:
11 echo "deb http://nginx.org/packages/ubuntu `lsb_release -cs` nginx"
12 → | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/nginx.list
13
14 #Comando executado para utilizar os principais pacotes do servidor
15 → Web Nginx:
16 echo "deb http://nginx.org/packages/mainline/ubuntu `lsb_release
17 → -cs` nginx" | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/nginx.list
```

```
15 #Em seguida, é preciso importar uma chave de assinatura Nginx
    ↳ oficial para que o apt possa verificar a autenticidade dos
    ↳ pacotes:
16 curl -fsSL https://nginx.org/keys/nginx_signing.key | sudo apt-key
    ↳ add -
17
18 #Verificação da chave correta com o comando:
19 sudo apt-key fingerprint ABF5BD827BD9BF62
20
21 #A saída deve conter a impressão digital completa 573B FD6B 3D8F
    ↳ BC64 1079 A6AB ABF5 BD82 7BD9 BF62 como segue:
22 pub   rsa2048 2011-08-19 [SC] [expires: 2024-06-14] 573B FD6B 3D8F
    ↳ BC64 1079 A6AB ABF5 BD82 7BD9 BF62 uid   [unknown] nginx
    ↳ signing key signing-key@nginx.com
23
24 #Para instalar o Nginx, deve se executar os seguintes comandos:
25 sudo apt-get update
26 sudo apt-get install nginx
```

Após a aceitação do procedimento, o comando *apt-get* instala o *Nginx* e quaisquer outras dependências necessárias. Antes de testar o *Nginx* individualmente, é preciso configurar *software* de *firewall* para permitir acesso ao serviço. O *Nginx* se registra como um serviço com o *Uncomplicated Firewall* (UFW) do *firewall*, após a instalação. Para isso, é preciso listar as configurações das aplicações que o UFW pode trabalhar.

```
1 #Lista das aplicações suportadas pelo UFW no sistema operacional:
2 sudo ufw app list
3
4 #O comando apresenta uma lista dos perfis de aplicativos:
5     Output
6     Available applications:
7     Nginx Full
8     Nginx HTTP
9     Nginx HTTPS
10    OpenSSH
```

Existem três perfis disponíveis para o servidor *Web Nginx*: (i) *Nginx Full*, esse perfil abre ambas as portas 80 (normal, tráfego não criptografado) e porta 443 (TLS/SSL, tráfego criptografado); (ii) *Nginx HTTP*, esse perfil abre apenas a porta 80 (normal, tráfego não criptografado) e (iii) *Nginx HTTPS*, esse perfil abre apenas a porta 443 (TLS/SSL, tráfego criptografado). Por segurança é recomendado habilitar o perfil mais restritivo que ainda permita o tráfego configurado. Para este caso foi permitido apenas o tráfego na porta 80.

```
1 #Habilitando o serviço Web com o seguinte comando:
2 sudo ufw allow 'Nginx HTTP'
3
```

```
4 #Em seguida é preciso verificar a alteração do UFW para o firewall,  
  ↳ digitando:  
5 sudo UFW status  
6  
7 #O tráfego HTTP agora está permitido na saída mostrada:  
8     Output  
9     Status: active  
10    To                Action          From  
11    --                - - - - -      - - - -  
12    Nginx HTTP        ALLOW          Anywhere  
13    Nginx HTTP (v6)   ALLOW          Anywhere (v6)
```

A próxima etapa é a de verificação de operação do servidor Web. Ao final do processo de instalação o SO inicia o *software Nginx*. É possível checar a operabilidade do sistema através do comando *init systemd* para ter certeza de que o serviço está sendo executado.

```
1 #Verificação de operação no serviço nginx:  
2 systemctl status nginx  
3  
4 #O terminal de acesso deve apresentar as seguintes linhas:  
5 edgecdn_node@edgecdn_node:/var/www/sindisatcdn.com$ systemctl status  
  ↳ nginx  
6 nginx.service - A high performance web server and a reverse proxy  
  ↳ server  
7   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/nginx.service; enabled;  
  ↳ vendor preset: enabled)  
8   Active: active (running) since Sat 2019-10-05 17:32:48 -03; 4h  
  ↳ 34min ago  
9     Docs: man: nginx (8)  
10  Process: 2063 ExecStart=/usr/sbin/nginx -g daemon on;  
  ↳ master_process on; (code=exited, status=0/SUCCESS Process:  
  ↳ 1442 ExecStartPre=/usr/sbin/nginx -t -q -g daemon on;  
  ↳ master_process on; (code=exited, status=0/SUCCESS Main PID: 2067  
  ↳ (nginx)  
11     Tasks: 2 (limit: 4596)  
12     CGroup: /system.slice/nginx.service
```

O terminal de acesso deve apresentar as linhas de código como mostrado na Figura C.1, que é uma foto da tela no momento da configuração. Depois do serviço ter sido iniciado com sucesso, o objetivo é instalar e configurar um servidor de *cache Varnish* para operar em conjunto com o servidor Web. A próxima etapa foi a de instalação e configuração dos serviços do *software Varnish*.

```
1 #Instalação do serviço de cache:  
2 sudo apt -y install varnish nginx  
3
```

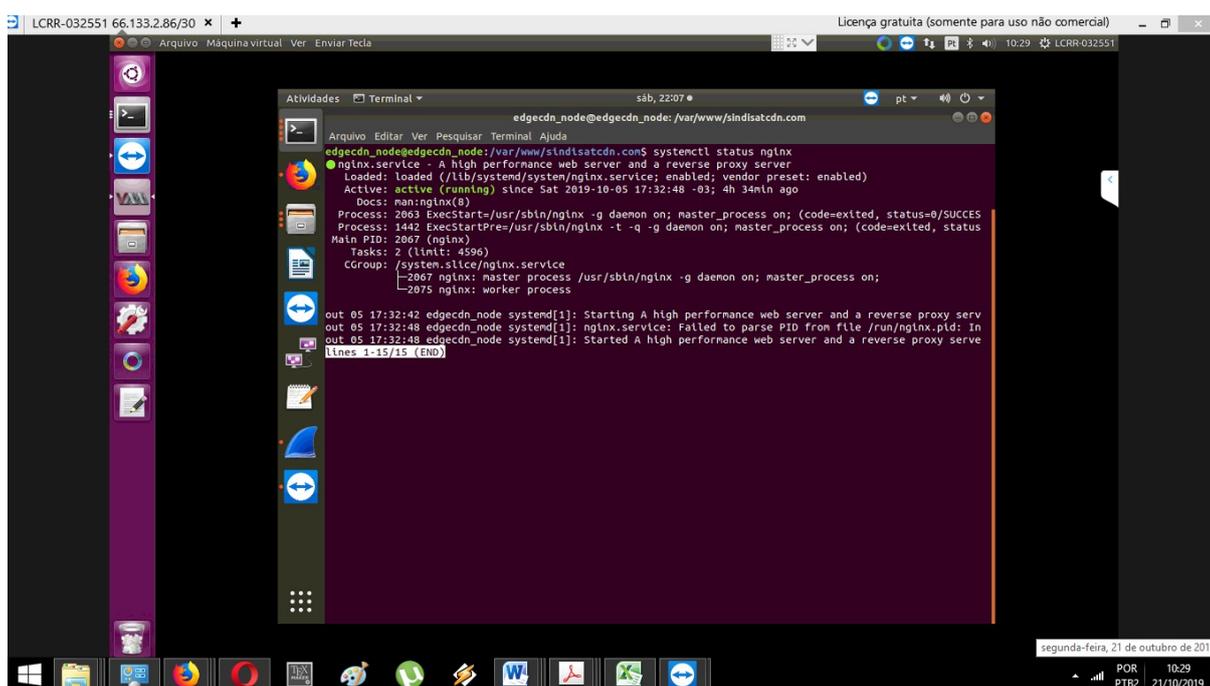


Figura C.1: Teste da instalação do servidor *Web Nginx* no *ICT_SAT_5G_edgecdn-node* da rede CDN.

4 *#Em seguida deve-se verificar as portas que estão operando no*
 → *servidor, para isso o comando "ss" confirma o status da*
 → *instalação:*

5 `ss -tlnf inet`

```

6
7 State      Recv-Q Send-Q Local Address:Port      Peer Address:Port
8 LISTEN    0      128   0.0.0.0:5355             0.0.0.0:*
9 LISTEN    0      128   0.0.0.0:80              0.0.0.0:*
10 LISTEN   0      128   0.0.0.0:22              0.0.0.0:*
11 LISTEN   0      128   0.0.0.0:6081            0.0.0.0:*
12 LISTEN   0      10    127.0.0.1:6082          0.0.0.0:*

```

Após a instalação bem-sucedida do programa, o servidor *Nginx* passa a operar (escutar) na porta 80 (*LISTEN 0.0.0.0:80*), e o *Varnish* utiliza as portas 6081 e 6082. O servidor *Nginx* deve funcionar atrás do servidor de *cache Varnish*. Então, deve-se reconfigurar a porta padrão 80 para alguma outra porta de escuta, por exemplo: 8080.

1 *#Para isso, é necessário abrir o editor de texto nano do SO e editar*
 → *o site padrão do Nginx:*

2 `sudo nano /etc/nginx/sites-available/default`

4 *#Uma vez no modo de edição, a porta padrão 80 deve ser alterada para*
 → *a porta alternativa 8080 como mostrado abaixo:*

6 `server {`

7

```
8     listen 8080 default_server;
9
10    listen [::]:8080 default_server;
11
12    #O próximo passo é salvar as novas configurações e recarregar o
13    ↪ servidor Nginx:
14    sudo service nginx reload
15
16    #O programa Nginx deve agora estar escutando na nova porta padrão
17    ↪ 8080, como mostrado em LISTEN 0 128 0.0.0.0:8080 da saída do
18    ↪ comando "ss":
19    ss -tlnf inet
20
21    State      Recv-Q Send-Q Local Address:Port    Peer Address:Port
22    LISTEN    0      128   0.0.0.0:5355         0.0.0.0:*
23    LISTEN    0      128   0.0.0.0:8080        0.0.0.0:*
24    LISTEN    0      128   0.0.0.0:22          0.0.0.0:*
25    LISTEN    0      128   0.0.0.0:6081        0.0.0.0:*
26    LISTEN    0      10    127.0.0.1:6082      0.0.0.0:*
```

O próximo trabalho é o de configuração da ferramenta *Varnish*. O tráfego deve ser encaminhado do servidor de *cache Nginx* via *Varnish*. O objetivo agora é reconfigurar o servidor de *cache Varnish* para escutar na porta 80, assim, atuar como uma frente para todas as solicitações HTTP públicas. Para fazer isso, é necessário editar o arquivo de configuração `systemd/lib/systemd/system/varnish.service` alterando a porta padrão 6081 para a porta 80.

```
1    #Alterando a configuração do Varnish:
2    sudo nano /lib/systemd/system/varnish.service
3
4    [Unit]
5        Description=Varnish HTTP accelerator
6        Documentation=https://www.varnish-cache.org/docs/4.1/ man:varnishd
7
8    [Service]
9        Type=simple
10       LimitNOFILE=131072
11       LimitMEMLOCK=82000
12       ExecStart=/usr/sbin/varnishd -j unix,user=vcache -F -a :80 -T
13       ↪ localhost:6082 -f /etc/varnish/default.vcl -S
14       ↪ /etc/varnish/secret -s malloc,256m
15       ExecReload=/usr/share/varnish/varnishreload
16       ProtectSystem=full
17       ProtectHome=true
18       PrivateTmp=true
19       PrivateDevices=true
```

```
18
19 [Install]
20   WantedBy=multi-user.target
```

Depois de executar a etapa descrita acima, é preciso instruir o *Varnish* a confiar nos dados provenientes da porta 8080 do *Nginx*.

```
1 #O arquivo deve ser aberto com o comando:
2 sudo nano /etc/varnish/default.vcl
```

Depois de abrir o arquivo, as informações de *socket* do *Nginx* devem ser fornecidas ao servidor *Varnish*. O endereço IP do *Nginx* deve ser inserido em *host = '127.0.0.1'*. O número da porta do servidor *Nginx* foi alterado para 8080.

```
1 # Default backend definition. Set this to point to your content
   → server.
2     backend default {
3         .host = "127.0.0.1";
4         .port = "8080";
5     }
6
7 #Agora é preciso recarregar o daemon do systemd e reiniciar o
   → servidor de cache do Varnish:
8 sudo systemctl daemon-reload
9 sudo service varnish restart
```

Depois de executar os comandos mencionados acima, mais uma vez, deve-se usar o comando *ss* para confirmar as portas configuradas para as ferramentas *Varnish* e *Nginx*.

```
1 #Confirmando as portas das aplicações configuradas:
2 ss -tlnf inet
3
4 State      Recv-Q Send-Q Local Address:Port      Peer Address:Port
5 LISTEN    0      128   0.0.0.0:5355            0.0.0.0:*
6 LISTEN    0      128   0.0.0.0:80              0.0.0.0:*
7 LISTEN    0      128   0.0.0.0:8080            0.0.0.0:*
8 LISTEN    0      128   0.0.0.0:22              0.0.0.0:*
9 LISTEN    0      128   0.0.0.0:6081            0.0.0.0:*
10 LISTEN    0      10    127.0.0.1:6082          0.0.0.0:*
```

A próxima etapa é a de habilitar o tráfego de entrada para as portas dos protocolos HTTP, sem criptografia de dados e HTTPS, com criptografia de dados do serviço do servidor Web. O objetivo é habilitar o programa de *firewall*, UFW do SO Linux [262], negar todas as portas de entrada não utilizadas, e permitir apenas a porta 80 para o protocolo HTTP e a porta 443 para o HTTPS no servidor. Geralmente por padrão, o programa fica desativado e deve-se verificar o estado atual do programa UFW.

```
1 #Verificando o estado da aplicação de firewall:
2 sudo ufw status
```

```
3
4 #Deve-se ativar o programa UFW e bloquear todo o tráfego de entrada
   ↳ usando os comandos via terminal:
5 sudo ufw enable
6 sudo ufw default deny incoming
7
8     Default incoming policy changed to 'deny'
9     (be sure to update your rules accordingly)
10
11 #A permissão deve ser concedida apenas para serviços específicos:
12 sudo ufw allow 'Nginx HTTP'
13 sudo ufw allow 'Nginx HTTPS'
```

O próximo passo visa testar o serviço de *cache* instalado anteriormente. A maneira mais simples de testar a configuração *Varnish* como servidor de *cache* é pelo comando do Linux *Client URL* (*curl*). É necessário verificar o funcionamento, apontando o *curl* para o IP de *loopback* passando pela porta 8080:

```
1 #Verificação do funcionamento da porta configurada:
2 curl -I 127.0.0.1:8080
```

A saída abaixo apresentada no terminal do Linux mostra que a configuração do servidor *Nginx* operando via *Varnish Cache* está correta. A Figura C.2 mostra a verificação da configuração realizada por meio de um navegador Web usando o endereço IP: 127.0.0.1:8080, ou a URL criada para a CDN privada, definida como <http://sindisatcdn.com/>.

```
1 #Servidor Web Nginx operando em conjunto com o serviço de cache
   ↳ Varnish:
2
3 HTTP/1.1 200 OK
4 Server: nginx/1.17.2 (Ubuntu)
5 Date: Sat, 24 Aug 2019 17:40:17 GMT
6 Content-Type: text/html/.JPG/.PNG/.mp3/.mp4
7
8 Last-Modified: Sat, 24 Aug 2019 17:45:20 GMT
9 ETag: W/"5a8e342b-324"
10 Vary: Accept-Encoding
11 X-Varnish: 2
12 Age: 0
13 Via: 1.1 varnish (Varnish/6.2.0)
14 Accept-Ranges: bytes
15
16 Connection: keep-alive
```

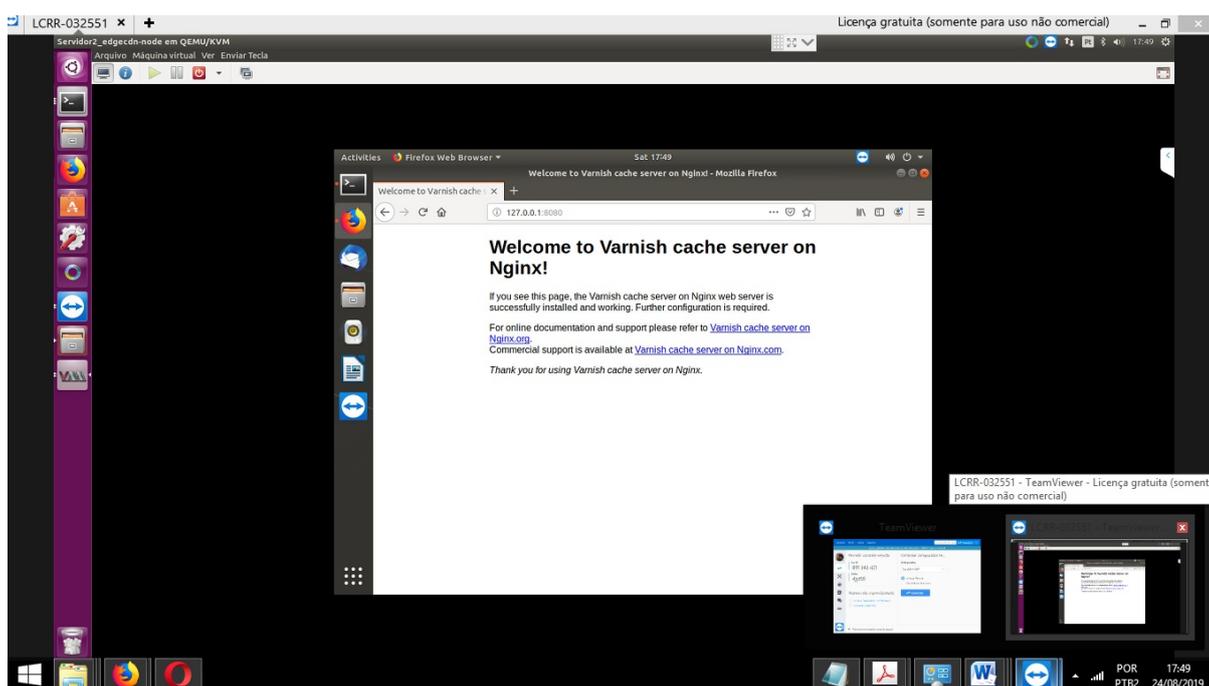


Figura C.2: Testes iniciais de configuração do *ICT_SAT_5G_edgedcdn-node* para o serviço CDN com *Varnish cache*.

C.2 Nó Central

Os passos foram os mesmos que os executados anteriormente na máquina virtual *ICT_SAT_5G_edgedcdn-node*. A versão do *Nginx* utilizada é o *Nginx HTTP*. Também foi preciso criar um usuário regular, não-*root* (com acesso limitado) com privilégios *sudo* configurado na máquina virtual *ICT_SAT_5G_centralcdn-node*. O nome do usuário foi definido como *centralcdn-node*. Para a instalação dos componentes foi preciso entrar na máquina virtual com o usuário criado. O programa *Nginx* está disponível nos repositórios padrão do sistema operacional. Como esta é a primeira interação com o sistema de gerenciamento de pacotes *apt*, é necessário atualizar o índice local de pacotes para acessar as listas de pacotes mais recentes.

```
1 FROM ubuntu:18.04 ICT_SAT_5G_centralcdn-node
2
3 Tibério Tavares Rezende
4 <tiberio@mtel.inatel.br>
5
6 #Para instalar o Nginx, deve se executar os seguintes comandos:
7 sudo apt-get update
8 sudo apt-get install nginx
```

Após a aceitação do procedimento, o comando *apt-get* instala o *Nginx* e quaisquer outras dependências necessárias. Antes de testar o *Nginx* individualmente, é preciso configurar *software* de *firewall* para permitir acesso ao serviço. O *Nginx* se registra como um serviço com o UFW do *firewall*, após a instalação.

```
1 #Listando as configurações das aplicações que o UFW pode trabalhar:
```

```
2 sudo ufw app list
3
4 #A seguir é obtida uma lista dos perfis de aplicativo:
5     Output
6     Available applications:
7     Nginx Full
8     Nginx HTTP
9     Nginx HTTPS
10    OpenSSH
11
12 #Habilitando o serviço Web:
13 sudo ufw allow 'Nginx HTTP'
14
15 #Em seguida é preciso verificar a alteração do UFW para o firewall:
16 sudo ufw status
17
18 #O tráfego HTTP agora está permitido na saída mostrada:
19     Output
20     Status: active
21
22     To Action From
23     --  - - - - -
24     Nginx HTTP ALLOW Anywhere
25     Nginx HTTP (v6) ALLOW Anywhere (v6)
```

A próxima etapa é a de checagem do servidor Web. Ao final do processo de instalação, o SO inicia o *Nginx*. É possível checar a operabilidade do sistema através do comando *init systemd* para ter certeza de que o serviço está executando. A Figura C.3 apresenta o servidor *Web Nginx* ativo no *ICT_SAT_5G_centralcdn-node*. A partir dessa etapa é possível instalar os outros componentes da pilha LEMP para gerenciamento de conteúdos de mídia e *Web*.

```
1 #Verificando a operabilidade do servidor Nginx:
2 systemctl status nginx
3
4 #O terminal de acesso deve mostrar as seguintes linhas:
5
6 centralcdn_node@centralcdn_node:/var/www/sindisatcdn.com$ systemctl
7 → status nginx
8
9 nginx.service - A high performance web server and a reverse proxy
10 → server
11
12 Loaded: loaded (/lib/systemd/system/nginx.service; enabled;
13 → vendor preset: enabled)
14
15 Active: active (running) since Sat 2019-10-05 20:32:40 UTC; 4h
16 → 33min ago
17
18 Docs: man: nginx (8)
```

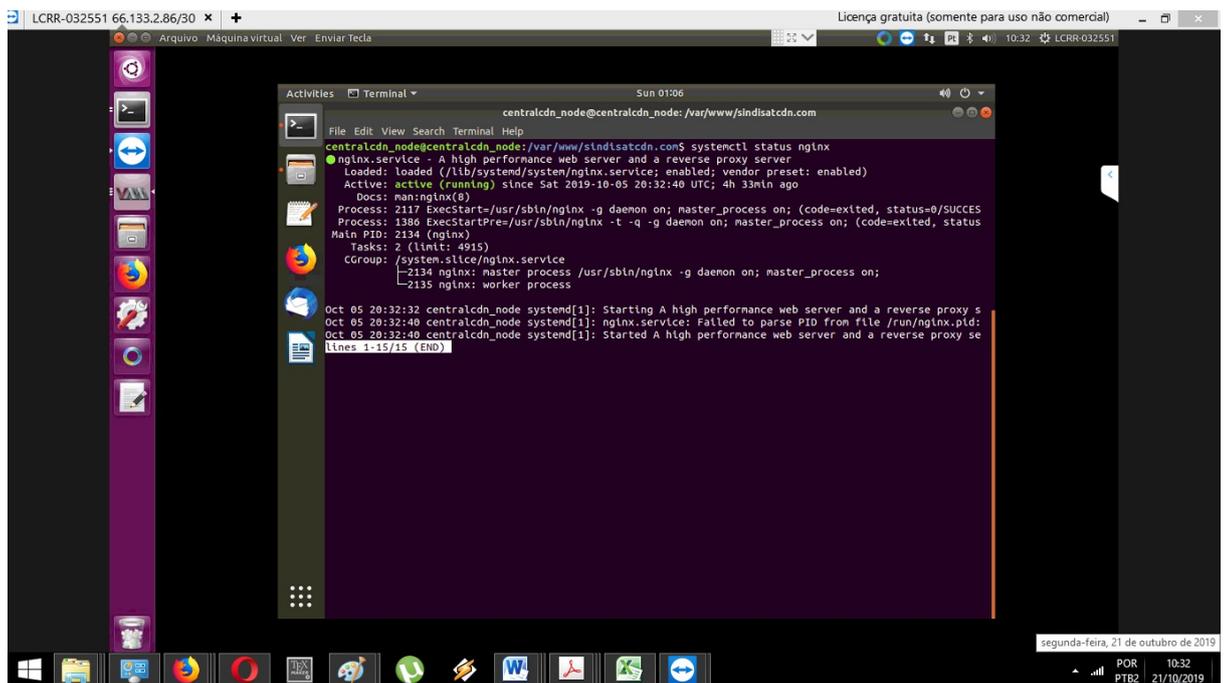


Figura C.3: Teste da instalação do servidor *Web Nginx* no *ICT_SAT_5G.centralcdn-node* da rede CDN.

```

12 Process: 2063 ExecStart=/usr/sbin/nginx -g daemon on;
    → master_process on; (code=exited, status=0/SUCCESS) Process:
    → 1442 ExecStartPre=/usr/sbin/nginx -t -q -g daemon on;
    → master_process on; (code=exited, status=0/SUCCESS) Main PID: 2067
    → (nginx)
13 Tasks: 2 (limit: 4596)
14 CGroup: /system.slice/nginx.service

```

A próxima etapa é a instalação e configuração do *MySQL* para gerenciamento dos dados do site criado para armazenamento de conteúdo.

```

1 #O gerenciador de banco de dados \textit{MySQL} é instalado através
    → do comando:
2 sudo apt install mysql-server

```

O software de banco de dados *MySQL* está agora instalado, mas sua configuração ainda não está completa. Para garantir a instalação, o *MySQL* vem com um *script* para modificação de configurações padrões.

```

1 #O script é iniciado digitando:
2 sudo mysql_secure_installation

```

Após configurar o usuário do *root* (para acesso com privilégios de administrador) do gerenciador de banco de dados *MySQL* para autenticar com senha, não será mais possível acessar o *MySQL* com o comando `sudo mysql` usado anteriormente.

```

1 #O comando executado deve ser:

```

```
2 mysql -u root {p
```

Depois de inserir a senha definida, o prompt do *MySQL* fica acessível. Neste ponto, o sistema de banco de dados está agora configurado e a próxima instalação é do programa PHP para o desenvolvimento da página Web com documentos HTML [251]. Como o *Nginx* não contém processamento PHP nativo, é preciso instalar o *php-fpm* (Gerenciador de processos *fastCGI*). Para configurar o *Nginx* para usar o processador PHP para gerar conteúdo dinâmico, foi preciso atualizar alguns repositórios do SO.

```
1 #Atualizando repositórios do SO:
2 sudo add-apt-repository universe
```

Em seguida, é necessário instalar o módulo *php-fpm* junto com um pacote auxiliar adicional, o *php-mysql*. O pacote auxiliar operando em conjunto com o módulo *php-fpm*, permite que o programa PHP se comunique com o *back-end* do banco de dados do servidor de conteúdo.

```
1 #Instalando os arquivos essenciais do PHP:
2 sudo apt install php-fpm php-mysql
```

Depois que todos os componentes necessários foram instalados na pilha LEMP, é preciso fazer algumas alterações na configuração para informar ao *Nginx* para usar o processador PHP para conteúdo dinâmico. Isso é feito no *Nginx* no nível do bloco do servidor semelhante aos *hosts* virtuais do *Apache*. Para fazer isso, deve-se abrir um novo arquivo de configuração do bloco de servidores no diretório */etc/nginx/sites-available/*.

```
1 #Neste exemplo, o novo arquivo de configuração do bloco do servidor
  ↳ é denominado sindisatcdn.com, e os comandos são:
2 sudo nano /etc/nginx/sites-available/sindisatcdn.com
```

Ao editar um novo arquivo de configuração de bloqueio de servidor, caso necessário, é possível restaurar facilmente a configuração padrão inicial e reconfigurar o PHP na pilha LAMP. Em seguida, é preciso adicionar o seguinte conteúdo, que foi retirado e modificado do arquivo de configuração de bloqueio do servidor padrão, para o novo arquivo de configuração de bloqueio do servidor.

```
1 #Configuração de bloqueio de servidor:
2
3     server {
4         listen 80;
5         root /var/www/sindisatcdn.com;
6         index index.php index.html index.htm
7         index.nginx-debian.html;
8         server_name sindisatcdn.com;
9         location / {
10             try_files $uri $uri/ =404;}
11         location ~ .php\.$ {
12             include snippets/fastcgi-php.conf;
13             fastcgi_pass
14             ↳ unix:/var/run/php/php7.2-fpm.sock;}
15         location ~ /\.ht {deny all;}
```

15

}

Cada uma dessas diretivas apresentadas acima realiza uma função necessária no blocos de localização para o servidor de conteúdo. O *listen* define de qual porta o *Nginx* irá receber as requisições. Nesse caso, o *Nginx* foi configurado para ouvir constantemente a porta 80, a porta padrão para HTTP. A diretiva *root* define a raiz do documento onde os arquivos servidos pelo site são armazenados, sendo */var/www/sindisatcdn.com*. A diretiva *index* configura o *Nginx* para priorizar arquivos de exibição chamados *index.php* quando um arquivo de índice é solicitado, se eles estiverem disponíveis. A *server_name* define qual bloco do servidor deve ser usado para uma determinada solicitação, esta diretiva deve ser apontada para o nome de domínio ou endereço IP público do servidor. A diretiva *location /* é o primeiro bloco de localização que inclui uma diretiva *try_files*, que verifica a existência de arquivos correspondentes a uma solicitação de URI. Se o *Nginx* não puder localizar o arquivo apropriado, ele retornará um erro 404 padrão. E a última diretiva *location /hit* se trata do último bloco de localização que lida com arquivos *.htaccess*, que o *Nginx* não processa.

Depois de adicionar o conteúdo mostrado acima, deve-se salvar e fechar o arquivo editado. Em seguida, é preciso ativar o novo bloco de configuração de servidor criando um *link* simbólico do novo arquivo de configuração do bloco de servidores, no diretório */etc/nginx/sites-available/* para o novo diretório */etc/nginx/sites-enabled/*.

```
1 #Ativando o novo bloco do servidor:
2 sudo ln -s /etc/nginx/sites-available/sindisatcdn.com
   ↪ /etc/nginx/sites-enabled/
```

O próximo passo é o de testar o novo arquivo de configuração no servidor *Web* para erros de sintaxe.

```
1 #Comando para testar o arquivo do servidor modificado:
2 sudo nginx -t
```

Se algum erro for relatado, é preciso voltar e verificar novamente o arquivo antes de continuar. Quando estiver pronto, deve-se recarregar o programa *Nginx* para fazer as alterações necessárias.

```
1 #Carregando o servidor Web Nginx:
2 sudo systemctl reload nginx
```

Ao carregar o servidor *Nginx* com as configurações descritas no tutorial do nó central, a pilha LEMP fica pronta para operações. É possível realizar testes de confirmação de funcionamento de todos os componentes de forma individual. Após os testes o *ICT_SAT_5G_centralcdn-node* está pronto para se comunicar com o *ICT_SAT_5G_edgcdn-node* que irá armazenar os conteúdos requisitados em *cache*.