

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Tecnologias de RF e de Comunicações Ópticas para Redes 6G



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	30/06/2021	Arismar Cerqueira Sodré Junior Carlos Filipe Moreira e Silva Celso Henrique de Souza Lopes Eduardo Saia Lima Hugo Rodrigues Dias Filgueiras Letícia Carneiro de Sousa Luiz Augusto Melo Pereira Matheus Sêda Borsato Cunha Jorge Ricardo Mejía Salazar Ramon Maia Borges Rausley Adriano Amaral de Souza Thiago Alencar Moreira de Bairros Tiago Henrique Brandão	Elaboração de conteúdo
2	31/08/2021	Arismar Cerqueira Sodré Junior Luciano Leonel Mendes	Revisão de texto

Lista de Figuras

1	Rede de espaço-ar-solo integrada.	27
2	Funções densidade de probabilidade (a) e funções distribuição cumulativas (b) estimada e teóricas na frequência de 28 GHz [178].	30
3	Taxa de cruzamento de nível na frequência de 60 GHz [179].	31
4	Arquitetura básica de uma rede PON.	38
5	Arquitetura básica de uma rede TWDM-PON.	40
6	Sistema WDM <i>overlay</i> em um cenário de coexistência com topologias PON. Adaptado de [228].	41
7	Planejamento para alocação de comprimentos de onda por aplicação, de acordo com a recomendação G.989.2 da ITU [230].	42
8	Arquitetura básica de uma Super-PON (adaptado de [231]).	42
9	Rede de acesso de rádio centralizada, apta a suportar transporte e acesso de dados em uma arquitetura chamada <i>Xhaul</i>	44
10	Esquema <i>digital radio over fiber</i> (D-RoF).	45
11	Taxa de dados total exigida no <i>fronthaul</i> em função da interface de rádio (eCPRI e CPRI). $n \times n$ - configuração MIMO com n antenas transmissoras e n antenas receptoras. Adaptado de [242].	46
12	Esquema A-RoF.	47
13	Enlace <i>analog radio-over-fiber</i> (A-RoF) multibanda com amplificação de radiofrequência (RF) assistida por fotônica [250].	48
14	Rádio sobre fibra híbrido: (a) Ilustração da arquitetura; (b) Técnica baseada em <i>wavelength division multiplexing</i> (WDM); (c) Técnica baseada na multiplexação no domínio elétrico, com banda de guarda; (d) Técnica baseada na multiplexação por divisão de polarização; (e) Técnica baseada na multiplexação no domínio elétrico, com sobreposição de sinais.	49
15	Diagrama Simplificado de um sistema de comunicação FSO.	53
16	Diagrama em blocos de um transceptor óptico. PRD - Processamento de dados; LD - Diodo Laser; SAC - Sistema de Acoplamento; FOT – Feixe Óptico Transmitido; FOR – Feixe Óptico Recebido; PD – Fotodetector; LA - Lente de Alinhamento.	54
17	Diagrama simplificado de um sistema de comunicação em luz visível.	56
18	Distribuição da densidade espectral de lâmpadas incandescentes e fluorescentes e emissão de radiação solar em função do comprimento de onda.	57

Lista de Tabelas

1	Resposta dos dispositivos apresentados em [38].	5
2	Estado da arte em soluções de antenas na faixa de mmWaves.	13
3	Estado da arte em soluções de arranjo de antenas para MIMO e mMIMO.	16
4	Soluções de antenas aplicadas à mmWaves pelo grupo de pesquisa do Inatel.	18
5	Estado da arte em antenas em THz.	25
6	Fibras comerciais de baixa atenuação de acordo com os padrões da ITU.	34

Acrônimos

1G	primeira geração de rede móvel celular
2G	segunda geração de rede móvel celular
3G	terceira geração de rede móvel celular
3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
4G	quarta geração de rede móvel celular
4PAM	<i>4-level pulse amplitude modulation</i>
5G	quinta geração de rede móvel celular
6G	sexta geração de rede móvel celular
AlGaN	<i>aluminium gallium nitride</i>
AOs	amplificadores ópticos
AO	amplificador óptico
APON	<i>asynchronous transfer mode PON</i>
AR	<i>augmented reality</i>
ARF	<i>antiresonant fiber</i>
A-RoF	<i>analog radio-over-fiber</i>
ATM	<i>asynchronous transfer mode</i>
AWGN	<i>additive white Gaussian noise</i>
BBU	<i>baseband unit</i>
BDCL	<i>back-side DC line</i>
BER	<i>bit error rate</i>
BiCMOS	<i>bipolar CMOS</i>
BPON	<i>broadband PON</i>
BW	largura de banda
CAeC	<i>contextu-ally agile emBB communications</i>
CI	<i>closed-in free space reference distance</i>
CMOS	<i>complementary metal-oxide-semiconductor</i>
CNC	controle numérico computadorizado
CO	<i>central office</i>
COC	<i>computation oriented communications</i>
CPRI	<i>common public radio interface</i>
C-RAN	<i>centralized radio access network</i>
CRoF	<i>conventional radio over fiber</i>
CS	<i>common-source</i>
CS-CPW	<i>coupled slow-wave coplanar waveguide</i>

CU *central unit*
CW *continuous wave*
DA *distributed amplifier*
DAC *digital-to-analog conversion*
DAT *delay adaptation techniques*
DAT *distributed active transformer*
DD-MZM *dual-drive Mach-Zehnder modulator*
DMGD *differential mode group delay*
DPD *digital pre-distortion*
DPSK *differential phase-shift keying*
DQPSK *differential quadrature phase-shift keying*
D-RoF *digital radio over fiber*
DSP *digital signal processing*
DU *distributed unit*
DWDM *dense wavelength division multiplexing*
E/O *eletroóptica*
eCPRI *enhanced common public radio interface*
EDFA *erbium-doped fiber amplifier*
EDuRLLC *event defined ultra-reliable low latency communications*
ELPC *extremely low-power communications*
eMBB *enhanced mobile broadband communication*
EOM *electro-optic modulator*
EPON *ethernet PON*
eRAC *enhanced remote area communication*
ERB *estação radiobase*
EVM *error vector magnitude*
FD-SOI *fully depleted silicon on insulator*
FEC *forward error correction*
FeMBB *further enhanced mobile broadband*
FET *field effect transistor*
FI *floating intercept*
FinFET *fin field effect transistor*
FiWi *fiber-wireless*
FMF *few-mode fibers*
F-OFDM *filtered orthogonal frequency division multiplexing*

f_{op} frequência de operação
FSAN *full service access network*
FSO *free space optical*
FSS *frequency selective surface*
FTTB *fiber-to-the-building*
FTTC *fiber-to-the-cabinet*
FTTH *fiber-to-the-home*
FTTX *fiber-to-the-everything*
GaAs *gallium arsenide*
GaN *gallium-nitride*
gapWG *gap-waveguide*
GBSM *geometry based stochastic model*
GCPW *grounded coplanar waveguide*
GPON *gigabit PON*
HBT *heterojunction bipolar transistor*
HCF *hollow-core fibers*
HEMT *high electron mobility transistor*
HNLF *highly nonlinear fiber*
HST *high speed trains*
HTC *holographic-type communications*
IA *inteligência artificial*
IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
IIP3 *third order input intercept point*
Inatel Instituto Nacional de Telecomunicações
InGaAs *indium gallium arsenide*
InP *indium phosphide*
IoE *Internet of everything*
IoT *Internet of things*
ISI *inter-symbol interference*
ISMN *interstage matching network*
ITU *International Telecommunication Union*
LDHMC *longdistance and high mobility communications*
LED *light emitting diode*
LNA *low-noise amplifier*
LO *local oscillators*
LOS *line-of-sight*

LTCC *low-temperature co-fired ceramic*
LTE *long-term evolution*
MCF *multicore fiber*
MDL *mode dependent loss*
MDM *mode-division multiplexing*
mHEMT *metamorphic HEMT*
MIMO *multiple-input multiple-output*
ML *machine-learning*
MMF *multimode fiber*
mMIMO *massive MIMO*
mMTC *massive machine-type communication*
mmWaves *millimeter waves*
MPA *medium power amplifier*
MR *mixed reality*
MU-MIMO *multiple-user MIMO*
NANF *nested antiresonant nodeless fiber*
NF *noise figure*
NG-PON1 *next-generation PON 1*
NG-PON2 *next-generation PON 2*
NLOS *non line-of-sight*
NOMA *non-orthogonal multiple access*
NR *new radio*
O/E *optoeletrica*
OBSAI *open base station architecture initiative*
OCDM-PON *optical code division multiplexing PON*
ODN *optical distribution network*
oDSP *optical digital signal processing*
OFDM *orthogonal frequency division multiplexing*
OFDM-PON *orthogonal frequency division multiplexing PON*
OIP3 *third order output intercept point*
OLT *optical line terminal*
ONU *optical network unit*
OOK *on-off keying*
ORI *open radio equipment interface*
ORR *optical ring resonators*

OSNR *optical signal-to-noise ratio*
OWC *optical wireless communications*
OWSNs *Optical Wireless Satellite Networks*
OWTNs *Optical Wireless Terrestrial Networks*
OWHNs *Optical Wireless Home Network*
P1dB_{in} *input one-dB compression point*
P1dB_{out} *output one-dB compression point*
PA *power amplifier*
PAA *photonic-assisted amplification*
PAE *power-added efficiency*
PAPR *peak-to-average power ratio*
PBGF *photonic bandgap fiber*
PCB *printed-circuit board*
PCF *photonic-crystal fiber*
PDM *polarization division multiplexing*
PDP *power delay profiles*
PIFA *planar inverted-F antenna*
PMD *polarization-mode dispersion*
PM-QPSK *polarization-multiplexed quadrature phase-shift keying*
PON *passive optical network*
P_{out} *potência de saída*
P_{sat} *potência de saturação*
PSDD *power spectral Doppler density*
QAM *Qadtrature amplitude modulation*
QoS *qualidade de serviço*
RAN *radio access network*
RF *radiofrequência*
RIS *reconfigurable intelligent surface*
RMS *root mean square*
RoF *radio over fiber*
RRU *remote radio unit*
SDM *space-division multiplexing*
SFP *small form-factor pluggable*
SHE *self-heating effect*
SICL *substrate integrated coaxial line*

SiGe HBT *silicon-germanium heterojunction bipolar transistor*

SiGe *silicon germanium*

SIW *substrate integrated waveguide*

SMF *single-mode fiber*

SNR *signal-to-noise ratio*

SOI *silicon on insulator*

SSPA *solid-state power amplifier*

sub-mmWaves *sub millimeter waves*

SWAA *slotted-waveguide antenna array*

TDD *time-division duplexing*

TDM-PON *time division multiplexing PON*

THF *tremendously high frequency*

THz *tera-hertz*

TWDM-PON *time and wavelength division multiplexing PON*

UF-OFDM *universal filtered orthogonal frequency multiplexing*

uHSLC *ultrahigh-speed-with-low latency communications*

UPA *unit-power-amplifier*

URLLC *ultra reliable low latency communications*

V2I *vehicle to infrastructure*

V2V *vehicle to vehicle*

VANT *veículos aéreos não tripulados*

VLC *visible light communication*

VR *virtual reality*

WDM *wavelength division multiplexing*

WDM-PON *wavelength division multiplexing PON*

WiFi *wireless fidelity*

Sumário

1	Introdução	1
2	Dispositivos de radiofrequência	3
3	Antenas aplicadas às redes 6G	10
3.1	Evolução das antenas ao longo das gerações de comunicações móveis	10
3.2	Estado da arte em antenas e arranjos de antenas nas faixas sub-6 GHz e mm-Waves	12
3.3	Antenas em THz	18
4	Modelagem de canal sem fio	26
5	Evolução das redes ópticas	32
5.1	Fibras ópticas	32
5.2	Topologias de rede	37
6	Sistemas óptico-<i>wireless</i>	44
6.1	Tecnologias de rádio sobre fibra	44
6.2	Soluções baseadas em fibra-rádio	50
6.3	Soluções baseadas em óptica no espaço livre	52
6.4	Comunicação por luz visível	55
7	Conclusões	58

1 Introdução

Hugo Rodrigues Dias Filgueiras, Matheus Sêda Borsato Cunha
 hugo.rodrigues@inatel.br, matheus.seda@inatel.br

A quinta geração de rede móvel celular (5G) foi recentemente padronizada em sua primeira versão [1], o *Release 15* do *3rd generation partnership project* (3GPP), que não foi idealizado para atender a todos os cenários previstos para a tecnologia: *enhanced mobile broadband communication* (eMBB), *massive machine-type communication* (mMTC), *ultra reliable low latency communications* (URLLC) e *enhanced remote area communication* (eRAC). Na próxima década, conforme a tecnologia e o mercado evoluem, novos lançamentos do padrão serão propostos para abranger todos os cenários 5G. O *Release 16*, já proposto, foca no cenário URLLC e o *Release 17*, previsto para o início de 2022, prevê endereçar os cenários mMTC e eRAC. Além da rede 5G, a rede sexta geração de rede móvel celular (6G) é uma visão para 2030, que exigirá uma abordagem muito mais ampla e holística para atender as necessidades das aplicações [2]. M.L.K. Latva-aho *et. al.* afirmam que a ideia principal do 6G consiste em uma rede baseada no termo *Ubiquitous Wireless Intelligence* [2], o que significa serviços que seguem os usuários em todos os lugares e de forma integrada, com conectividade sem fio, serviços e aplicativos inteligentes e sensíveis ao contexto dos usuários humanos e não humanos.

Os casos de uso da rede 6G devem exigir operações muito sofisticadas, com localização de alta resolução com precisão de centímetros, sincronização entre dispositivos com precisão de 1 μ s, suporte a uma rede ultradensa com 100 dispositivos por metro cúbico e vida útil da bateria de até 20 anos [2]. Os requisitos de baixa latência e confiabilidade serão muito mais restritivos na rede 6G [2,3], ou seja, uso industrial, latência máxima de apenas 1 ms e confiabilidade de pelo menos 99,9999% [2]. Como toda a evolução anterior da comunicação móvel (primeira geração de rede móvel celular (1G) ao 5G), aumentar a taxa de transferência do sistema também é uma das principais premissas. Espera-se que a rede 6G seja o primeiro padrão sem fio com enlaces operando com taxas de comunicação excedendo o marco de 1 Tbit/s [2–4]. Espera-se ainda que a faixa de frequência de tera-hertz (THz) seja explorada devido à sua enorme capacidade e largura de banda [2–4].

As tecnologias de semicondutores permitiram a evolução dos sistemas de comunicações móveis em direção à rede 5G, porém, para a rede 6G, as tecnologias atuais não serão suficientes e avanços serão necessários tendo em vista os novos requisitos [5]. As redes de comunicação de dados requerem o desenvolvimento rápido de tecnologias essenciais de semicondutores a *chipssets* completos para manter a tendência de evolução [6,7]. Devido à expansão das comunicações de rádio visando taxas de dados na ordem de Tbit/s utilizando frequências mais altas, além de *millimeter waves* (mmWaves), uma outra tendência é o crescimento em pesquisas na área de comunicações ópticas. Busca-se a migração de soluções com fio para soluções sem fio, como é o caso das tecnologias *free space optical* (FSO) [5,8–10]. Desse modo, novas bandas espectrais, novas tecnologias de *hardware* e soluções avançadas de camada física serão necessárias para suportar essas taxas extremamente altas e lidar com os desafios canais de propagação. Nesse contexto, dentre as tecnologias habilitadoras para a rede 6G, as comunicações em THz são vistas como fundamentais para atender essa demanda, possibilitando aliviar a escassez de espectro de frequências e as limitações de capacidade dos sistemas atuais. Além disso, há a visão da tecnologia em THz ser complementar às tecnologias existentes em sub-6 GHz e mmWaves, permitindo que uma infinidade de aplicações emergentes atinjam os seus potenciais. Novas aplicações são esperadas em diversos campos, viabilizando não apenas a alta vazão, mas flexibilidade na nova geração de comunicação móvel [5,11].

A banda de THz corresponde à faixa de 300 GHz a 3 THz, a qual é sustentada pela delimitação da *International Telecommunication Union* (ITU) quanto à região *tremendously high frequency* (THF). Entretanto, tal definição varia na literatura [5,12,13]. Outros autores também definem como banda de THz as frequências compreendidas entre 100 GHz a 10 THz, que ficou conhecida na literatura como *THz gap*, pelo fato de compreender frequências muito altas para a eletrônica convencional e muito baixas para emissores fotônicos [4,10,11,14,15]. Dito isso, implementar sistemas nessa faixa de frequência implica em superar diversos desafios científicos e de engenharia. Estudos iniciais propõem a utilização de mmWaves, pretendidas para a rede 5G de 30 GHz a 100 GHz, e a faixa inicial da banda de THz, compreendida entre 100 GHz e 300 GHz e também denominada de sub-THz [10,16,17]. Os estudos precisam ser aprofundados quanto aos desafios do canal e dispositivos THz, mas também visando as oportunidades que essa tecnologia proporciona. Quanto aos dispositivos THz, a geração, recepção e processamento (conversão, amplificação, filtragem, emissão e captura) de sinais THz em dispositivos móveis exigem abordagens eletrônicas, fotônicas, eletromagnéticas e/ou híbridas que ultrapassam os limites das propriedades do material de fabricação e da capacidade do dispositivo [10,15].

Neste contexto, este relatório apresenta uma análise do estado da arte das soluções em óptica e radiofrequência (RF) aplicadas à rede 6G, incluindo dispositivos de RF, antenas, tecnologias de fibras ópticas, topologias de redes ópticas de transporte e acesso e novas topologias baseadas em soluções híbridas óptico-*wireless*. Além disso, propõe-se uma análise voltada para modelagem de canais rádio-móveis nas altas frequências previstas para a rede 6G. O relatório é composto por sete Seções, o qual a Seção 2 aborda o estado da arte em dispositivos de RF e a Seção 3 traz os avanços no desenvolvimento e aplicação de antenas. A modelagem do canal sem fio é tratada na Seção 4, enquanto que os conceitos concernentes às topologias de rede baseadas em fibras ópticas são tratadas na Seção 5. A Seção 6 apresenta as principais evoluções em tecnologias óptico-*wireless* e, por fim, a Seção 7 discorre a respeito das conclusões do relatório.

2 Dispositivos de radiofrequência

Matheus Sêda Borsato Cunha, Jorge Ricardo Mejia Salazar, Carlos Filipe Moreira e Silva
 matheus.seda@inatel.br, jrmejia@inatel.br, cfms@gtel.ufc.br

A busca por maiores larguras de banda nas comunicações sem fio, que permitam atender o crescimento exponencial no tráfego de dados, tem motivado o uso de faixas de frequência cada vez mais altas [18]. Em particular, o recente desenvolvimento das redes 5G promete atingir taxas de transferência de dados na ordem dos 20 Gbit/s usando ondas milimétricas [19,20]. Porém, mesmo que as redes 5G atendam as demandas atuais, sérias limitações são esperadas nos próximos anos devido ao aumento no número de dispositivos por usuário, à transmissão de vídeos com resolução 8K, bem como às futuras formas de conexão e cyberinteração homem-homem, homem-máquina, e máquina-máquina, que estão sendo pesquisadas e/ou desenvolvidas [3,8,10,21]. Neste sentido, a banda de THz surgiu recentemente como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de redes de comunicações sem fio com taxas de transferência na ordem dos Tbit/s [4,7,22], o que permitiria o fluxo de dados com ultra-baixa latência e em tempo real para as tecnologias atuais e futuras [23]. Contudo, a implementação desta tecnologia em aplicações da vida real só será possível após o desenvolvimento de fontes, detectores, moduladores e filtros de THz de alta eficiência, qualidade e desempenho [24–28]. Dentre os dispositivos para THz, os que se destacam de modo geral são os *power amplifiers* (PAs) e os *low-noise amplifiers* (LNAs). Por um lado, estes dispositivos têm uma resposta linear em uma determinada faixa, passando a ser não linear a partir de uma dada potência de entrada. Por outro lado, em bandas THz, a compensação das perdas de propagação, a maior largura de banda disponível e o aumento da densidade de usuário (logo, de tráfego) podem demandar um aumento considerável da potência de entrada.

Na Rede 5G, a tecnologia *complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS) de processo planar em 28 nm tem se mostrado suficiente para a fabricação de *chips* com frequências de operação acima de 20 GHz, ou seja, na faixa das ondas milimétricas prevista para essa geração de comunicação móvel [29–33]. Já para a Rede 6G, a tecnologia CMOS não será capaz de alcançar a mesma eficiência seja para a geração ou amplificação de sinais, considerando a faixa de frequências de sub-THz [34]. Por isso, várias tecnologias com potencial de atingir uma potência de saída aplicável e uma maior eficiência em frequências cada vez mais altas estão em estudo. Dentre elas pode-se destacar: *fully depleted silicon on insulator* (FD-SOI), *silicon germanium* (SiGe), *indium phosphide* (InP), *gallium-nitride* (GaN) e *gallium arsenide* (GaAs) [15,34].

Os PAs e os LNAs exercem funções essenciais e específicas nos transmissores e receptores, respectivamente. Certamente, o desempenho de um transceptor não depende apenas de PAs e LNAs, porém os transceptores não podem evoluir caso não haja a evolução por parte dos amplificadores, incluindo as tecnologias de processo de fabricação. As propriedades específicas desses dispositivos determinam o alcance de um enlace através de um *link budget*, definindo uma *signal-to-noise ratio* (SNR) na recepção, na qual tanto o nível do sinal quanto o nível do ruído são altamente dependentes da frequência de operação [5]. Dessa forma, várias pesquisas têm sido realizadas referente ao projeto de amplificadores desde que surgiu a proposta do uso da faixa de mmWaves impulsionado pela Rede 5G.

Em relação aos PAs, outro desafio, além da migração para frequências mais elevadas, é obter dispositivos que possam apresentar uma potência de saída (P_{out}) acima de 17 dBm com *power-added efficiency* (PAE) superior a 10%, porém trabalhos recentes tem apresentado melhores resultados em função desses parâmetros [5]. Em [30], os autores propuseram e implementaram

um PA de 3 estágios com frequência de operação (f_{op}) de 39 GHz com tecnologia CMOS de processo planar em 28 nm. O dispositivo foi projetado usando as técnicas de *triple-well device stacking* para superar a limitação da tensão de alimentação dessa tecnologia de processo e de *distributed active transformer (DAT) on-chip* para equalizar o acoplamento capacitivo. Também empregaram uma metodologia de *layout* baseada em célula unitária distribuída em cada transistor da pilha (*stack*) para minimizar o *self-heating effect* (SHE) e a degradação de ganho devido a elementos parasitas de interconexão [33]. A potência de saturação (P_{sat}) obtida foi de 26 dBm com uma PAE de pico de 26,6%. Além disso, o PA foi testado com sinais 5G *new radio* (NR) usando *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) com 64-QAM e forneceu P_{out} média de 14,7 dBm. Por fim, obtiveram uma largura de banda (BW) entre 37 e 42,3 GHz com ganho máximo medido para pequenos sinais de 38 dB na frequência de 38 GHz [30]. Chiang *et al* [31] fabricaram um amplificador de potência totalmente integrado com processo planar em 28 nm utilizando a técnica de neutralização e transformador de baixa perda. O dispositivo alcançou uma P_{sat} de 17,9 dBm, densidade de potência de saída de 513,8 mW/mm² e *output one-dB compression point* ($P1dB_{out}$) de 14,7 dBm em torno da frequência de 27 GHz. O PAE de pico alcançado nessa frequência foi de 40,7% e mediu-se 13,1 dB de ganho para pequenos sinais [31]. Em [32], os autores apresentaram um projeto de um PA visando transceptores 5G totalmente integrados em ondas milimétricas, com frequência de operação em torno de 28 GHz e uma BW de 3,5 GHz. A potência de saturação e o $P1dB_{out}$ do dispositivo foram de 21,5 e 20,7 dBm, respectivamente, com o ganho de potência medido de 20,4 dB e o PAE de 26%. Adicionalmente, foram realizados testes com um sinal de entrada com BW de 100 MHz e *peak-to-average power ratio* (PAPR) de 10 dB para a modulação 64-QAM. Nesses experimentos, obteve-se um *error vector magnitude* (EVM) de -25 dB com uma P_{out} média de 13,4 dBm e uma PAE média de 7,3% [32]. Ainda empregando a tecnologia CMOS em 28 nm, Daneshgar *et al* [33] implementaram um amplificador de potência na faixa de frequência de 39 GHz e a potência de saturação alcançada foi de 26 dBm com PAE de aproximadamente 29%, o mesmo descrito em [30]. Adicionalmente, os autores apresentaram a implementação de um PA com P_{sat} de 18,3 dBm de tecnologia *fin field effect transistor* (FinFET) de 16 nm em 39 GHz. As mesmas técnicas empregadas no PA de 28 nm foram usadas no *layout* do PA FinFET, com exceção da técnica de DAT. Em contrapartida, um dissipador de calor foi utilizado para atenuar ainda mais o SHE. Os parâmetros obtidos de densidade de potência de saída, $P1dB_{out}$ e PAE foram de 600 mW/mm², 16,6 dBm e 29%, respectivamente [33]. Os resultados de potência e eficiência mostraram que o PA FinFET pode alcançar desempenho comparável ao CMOS *silicon on insulator* (SOI) na geração de altas potências em mmWaves, visto que os *front-ends* baseados em SOI podem fornecer PA com alta eficiência, baixa figura de ruído do receptor e baixa perda de transmissão-recepção de *Q-switch* [35]. Em [36], os autores demonstraram o projeto de um PA com frequência de operação em 64 GHz e operação entre 59 a 68 GHz aplicando-se a tecnologia de processo FD-SOI CMOS de 22 nm. A potência de saturação obtida foi de 21 dBm com tensão de alimentação de 2 V e o $P1dB_{out}$ e a PAE foram de 15,3 dBm e 28,7%, respectivamente. Além disso, o dispositivo ofereceu um ganho máximo para pequenos sinais de 31 dB e uma alta densidade de potência em relação a área do componente de 3,7 W/mm² [36].

Bagger *et al* [37] apresentaram um projeto de um amplificador de potência de três estágios com transformadores de impedância acoplados indutivamente, baseando-se na técnica de transformação de Norton e utilizando a tecnologia de processo de fabricação SiGe de 130 nm. O PA foi projetado para uma frequência central de 37 GHz com uma largura de banda de 20 GHz e apresentou um ganho de potência nominal de 31 dB em grande parte da BW, devido à técnica de equalização de ganho aplicada aos transformadores inter-estágios. Obteve-se os parâmetros

de P_{sat} , $P1\text{dB}_{\text{out}}$ e PAE máximo de 20 dBm, 19 dBm e 17%, respectivamente. Um sinal OFDM com 64-QAM e 100 MHz de BW foi inserido na entrada do dispositivo e mediu-se na saída uma P_{out} de 11,6 dBm e EVM de -25 dB [37]. Outro projeto relevante que aplica a tecnologia de processo de SiGe de 130 nm foi relatado em [38], no qual os autores propuseram e implementaram um amplificador que pode operar com uma f_{op} de 28 ou 60 GHz e que pode funcionar como um LNA para recepção ou PA para transmissão. Essas funcionalidades foram viabilizadas pela aplicação de chaves *shunt* baseadas em *silicon-germanium heterojunction bipolar transistor* (SiGe HBT), as quais são co-otimizadas e integradas ao dispositivo a fim de reduzir sua área e melhorar o seu desempenho. As análises dos parâmetros de ganho, a *noise figure* (NF), o *third order input intercept point* (IIP3) e o *input one-dB compression point* ($P1\text{dB}_{\text{in}}$) referentes ao LNA e dos parâmetros de o ganho, a P_{sat} , o *third order output intercept point* (OIP3), o $P1\text{dB}_{\text{out}}$ e a PAE de pico referentes ao PA em ambas frequências de operação estão apresentados na Tabela 1. Por fim, os autores estimaram numericamente o EVM usando um sinal 64-QAM com uma BW de 50 MHz e PAPR de 7,6 dB. O EVM obtido foi de 6,6%/6,7% no modo RX/TX em 28 GHz e 4,4%/2% no modo RX/TX em 60 GHz, respectivamente [38].

Tabela 1: Resposta dos dispositivos apresentados em [38].

Parâmetro	LNA		Parâmetro	PA	
	28 GHz	60 GHz		28 GHz	60 GHz
Ganho [dB]	13,9	14,1	Ganho [dB]	14,1	14,7
NF [dB]	4,2	4,6	P_{sat} [dBm]	16,3	16
IIP3 [dBm]	-3,4	-0,5	OIP3 [dBm]	15,8	23,6
$P1\text{dB}_{\text{in}}$ [dBm]	-13	-13,5	$P1\text{dB}_{\text{out}}$ [dBm]	14,7	7,2
			PAE (%)	23,6	15,2

Migrando para as frequências de sub-THz, Han *et al* [39] desenvolveram um PA que trabalha na faixa de frequência entre 75,1 a 151,4 GHz, operando completamente em toda *W-band* e em 77% da *D-band*. O dispositivo foi projetado com 16 unidades SiGe HBT combinados por oito *sandwich slab transformers* e combinadores *T-junction*. Ao longo de toda faixa de operação, o ganho do amplificador está acima de 14,1 dB, enquanto que a P_{sat} foi de 19,8 dBm em 100 GHz e 19,3 dBm em 133 GHz. Obteve-se $P1\text{dB}_{\text{out}}$ de 16,6 dBm e PAE de pico de 8,8% [39]. Outro trabalho que vale mencionar é descrito em [40], no qual os autores apresentaram o projeto de um PA destinado a um sistema que possua f_{op} em torno de 180 GHz. O dispositivo foi implementado com uma tecnologia de processo SiGe *bipolar CMOS* (BiCMOS) em 130 nm. O projeto se baseou em uma estrutura de distribuição simétrica de 4 vias com complexidade reduzida, usando quatro unidades de ganho idênticas formadas por um pré-amplificador diferencial, um estágio de potência e *baluns* de banda larga. A abordagem diferencial oferece uma implementação compacta com linearidade e estabilidade aprimoradas. O PA alcançou uma faixa de frequência de operação de 140 a 220 GHz com ganho médio de 19 dB, P_{sat} de 15 dBm, $P1\text{dB}_{\text{out}}$ de 13 dBm e PAE máxima de 3,5% [40].

Outra tecnologia em estudo para os dispositivos de RF para as futuras redes de comunicações é baseada em GaN. Wang *et al* [41] propuseram e fabricam um amplificador de potência através da tecnologia de processo *aluminium gallium nitride* (AlGaN)/GaN em 100 nm. Foram empregadas as técnicas de *common-source* (CS) *high electron mobility transistor* (HEMT) distribuída, a qual divide o projeto em partes escaláveis e não escaláveis, e de combinação de Wilkinson-Lange de 4 vias com relação de transformação de baixa impedância para minimizar

a redução da potência de saída e aumentar a confiabilidade, ao custo de diminuir a largura de banda. O dispositivo apresentou uma BW entre 90 a 97 GHz com ganho máximo de 15,3 dB na frequência de 92 GHz. A medida de $PAE_{m\acute{a}x}$ foi de 18,3% e a P_{sat} e o $P1dB_{out}$ foram de 37,8 dBm e 35,5 dBm, respectivamente [41]. Cwiklinsk *et al* [42] apresentaram um conjunto de PAs para as frequências de sub-THz, especificamente em *D-band* e *G-band*, também empregando a tecnologia de processo de *Gallium-nitride* HEMT. O PA projetado na *D-band* consistiu na aplicação da técnica em quatro estágios *cascode* casados de modo reativo e cobriu uma faixa de frequências entre 107 e 148 GHz com ganho para pequenos sinais acima de 25 dB. Entre 120 e 145 GHz, o dispositivo forneceu uma potência de saturação média de 23,3 dBm e uma PAE de pico de 16,5% foi atingida para uma f_{op} de 120 GHz. Nos amplificadores da *G-band*, foram aplicadas a técnica de *4-stage CS* e *5-stage CS*. O PA com a topologia *4-stage CS* operou com uma faixa de frequências de 152 a 192 GHz com variação do ganho entre 7,5 e 10,5 dB. Na topologia *5-stage CS*, a faixa de frequência ficou entre 150 e 189 GHz, porém com ganhos de 10 a 13 dB. Os valores máximos da P_{sat} e da PAE foram de 15,8 dBm e 2,4% [42]. Como continuidade do trabalho em [42], os mesmos autores propuseram em [43] dois novos projetos de amplificadores de potência com frequências de operação além dos 200 GHz. Novamente aplicaram a tecnologia de processo de GaN HEMT, porém a composição dos dispositivos foram de *10-stage CS*. Um novo conceito de uma *interstage matching network* (ISMN) compacta e de banda larga foi incorporado ao projeto para permitir o elevado número de estágios. Os dois PA propostos se diferem pela largura do *gate* de seus HEMTs, os quais foram de 20 μm e 18 μm . O PA com o *gate* de 20 μm apresentou uma faixa de frequência de operação entre 145 e 205 GHz, um ganho entre 15 e 30 dB, com uma P_{sat} máxima de 16,9 dBm e $PAE_{m\acute{a}x}$ de 1,7% na frequência de 195 GHz. Já o amplificador com o *gate* de 18 μm demonstrou um maior alcance na f_{op} , que foi de 162 a 217 GHz, porém com queda no desempenho dos outros parâmetros. O ganho variou entre 7,5 e 13 dB, a medida de $PAE_{m\acute{a}x}$ foi de 18,3% e a P_{sat} máxima foi de 15 dBm [43].

Dentre as tecnologias de processo em estudo, aquelas baseadas em *Gallium Arsenide* (GaAs) são as que aparecem em uma maior quantidade de trabalhos com frequências na faixa de THz [44–47]. Apesar disso, também há pesquisas em mmWaves, como apresentado em [48], na qual os autores propuseram um amplificador de potência baseado em GaAs pHEMT de 100 nm para aplicação em cadeias de *local oscillator*s (LOs) de receptores radioastronômicos em frequências *W-band*. O estudo adotou o uso de uma topologia balanceada a fim de aprimorar a capacidade de potência de saída e o casamento entre a entrada e a saída. Além disso, empregaram redes de *multi-section matching* para aumentar a largura de banda e, dessa forma, obtiveram uma faixa de frequência de operação entre 78 e 93 GHz. Os valores máximos dos parâmetros de ganho, P_{sat} , $P1dB_{out}$ e PAE, foram de 11,5 dB, 19,6 dBm, 18,2 dBm e 12,8%, respectivamente [48]. Migrando para as frequências mais altas, Amado-Rey *et al* [44] realizaram um estudo de comparação entre dois acopladores para aplicação em amplificadores de potência balanceados. O dispositivo proposto por eles, um acoplador *broadside grounded coplanar waveguide* (GCPW), foi baseado em heteroestruturas *metamorphic* HEMT (mHEMT) em substratos semi-isolantes de GaAs, usando *T-gates* com comprimento de 35 nm, e alcançaram uma largura de banda que se estende de 251 a 326 GHz. Especificamente sobre o amplificador, foi projetado um *medium power amplifier* (MPA) com duas células *field effect transistor* (FET) de empilhamento triplo em uma topologia balanceada para aumentar a potência de saída e, além disso, o acoplador *broadside* GCPW foi utilizado. O MPA atingiu seu melhor ponto de operação na frequência de 300 GHz, com potência de saturação de 4,5 dBm, ganho de 7,5 dB e PAE de 2,5% [44]. Outro MPA foi proposto em [47], o qual apresentou uma largura de banda

de 3 dB entre 280 e 430 GHz. O ganho de pequenos sinais se mostrou praticamente plano em torno de 20 dB em uma faixa de 290 a 430 GHz e a potência de saída variou entre 1,5 e 3,3 dBm para frequências de 355 a 395 GHz. O amplificador foi projetado com quatro estágios *cascode*, e cada estágio é composto de dois mHEMT baseado em *indium gallium arsenide* (InGaAs) [47].

Por fim, é importante mencionar os trabalhos em PAs com a tecnologia de processo baseada em InP. Nguyen *et al* [49] apresentaram uma nova proposta de projeto de um *distributed amplifier* (DA), utilizando uma técnica de realimentação indutiva, a qual permite aumentar o ganho em toda faixa de frequência de maneira uniforme. O dispositivo foi fabricado baseado em *heterojunction bipolar transistors* (HBTs) de InP, incluindo um transistor emissor comum, uma estrutura de *cascode* e HBTs *double-stacked*. O DA projetado alcançou de 60 a 145 GHz de BW com ganho médio de pequenos sinais medido de 10,5 dB e P_{sat} máxima de 20,9 dBm com $P_{1\text{dB}_{\text{out}}}$ de 18,5 dBm aferidos na frequência de 75 GHz. Adicionalmente, apresentou uma $\text{PAE}_{\text{máx}}$ de 19,2% na frequência de 110 GHz [49]. Em [50], os autores projetaram dois *solid-state power amplifier* (SSPA) baseado na tecnologia InP HBT de 250 nm operando na faixa de frequências de 160 a 183 GHz. Os dispositivos foram fabricados com uma faixa de ganho de cinco estágios, a qual foi projetada usando uma topologia de células PA comprovadas pelos autores em outro trabalho [51]. O primeiro SSPA baseou-se em uma estrutura de combinação de 4 vias e apresentou um largura de faixa entre 158,5 e 182,8 GHz com um ganho médio de 21 dB. Os valores medidos de P_{sat} máxima de 23,87 dBm, $P_{1\text{dB}_{\text{out}}}$ de 20,79 dBm e PAE máxima de 7,5% na frequência de operação de 170 GHz. O segundo SSPA foi estruturado em uma combinação de 2 vias e obteve um ganho médio de 23,6 dB com uma BW de 161,0 a 184,8 GHz. As medidas de P_{sat} máxima de 21,46 dBm, $P_{1\text{dB}_{\text{out}}}$ de 18,45 dBm e PAE máxima de 9,5% na frequência de operação de 170 GHz [50]. Na faixa de frequências de THz, Hamada *et al* [52] propuseram um *front-end wireless* operando com frequências em torno de 300 GHz e taxa de transmissão de dados de 120 Gbit/s baseados em PAs e mixers de tecnologia InP HEMT de 80 nm. O circuito dos PAs foi projetado com combinação de *unit-power-amplifier* (UPA), o qual cada um é composto de um amplificador de fonte comum em cascata de seis estágios. Foram utilizadas as técnicas de *inter-stage-matching* de baixa impedância para redução das perdas de casamento interestágios e de *back-side DC line* (BDCL), a qual simplifica o *layout* e melhora o ganho dos PAs. Os amplificadores apresentaram uma faixa de f_{op} de 278 a 302 GHz e os parâmetros de P_{sat} máxima, $P_{1\text{dB}_{\text{out}}}$ e PAE máxima foram de 12 dBm, 6,8 dBm e 0,61%, respectivamente, obtidos na frequência de 296 GHz. Além disso, foi realizado um experimento enviando um sinal modulado em 16-QAM com taxa de transmissão de 120 Gbit/s em uma distância de 9,8 m de um enlace sem fio e obtiveram uma SNR de 16,7 dB, a qual esteve acima do valor de 16,5 dB, estabelecida como mínima aceitável [52]. Como continuação de suas pesquisas, visando dispositivos de RF operando em frequências mais altas, os autores de [52] desenvolveram em [53] um SSPA fabricado com tecnologia InP HEMT de 60 nm, operando em frequências de 469,5 a 482,5 GHz. A técnica de neutralização foi utilizada para alcançar maiores ganhos que teve seu valor máximo de 20,2 dB na frequência de 480 GHz. Também, os UPAs foram colocados em cascatas de 3 estágios e no estágio de saída foi aplicado uma *4-way power-combining* para poder alcançar um potência de saída de -1,1 dBm em 475 GHz. Conforme os autores relataram, este trabalho foi o primeiro sobre um amplificador nas faixas de análise com uma técnica de combinação de potência. Dessa forma, a potência de saída máxima de -1,1 dBm foi um resultado satisfatório [53].

O ruído domina a sensibilidade do receptor, principalmente na detecção de pequenos sinais. Por isso os LNAs são tão relevantes quanto os PAs [5]. A NF de um LNA é limitada pelo desempenho transistor utilizado em função do ruído e pode variar com a tecnologia de processo

de fabricação aplicada. Com isso, a figura de ruído do amplificador não pode ser mais baixa que a figura de ruído mínima do transistor. Parveg *et al* [54] apresentaram um LNA baseado em FD-SOI CMOS de 28 nm utilizando *coupled slow-wave coplanar waveguide* (CS-CPW) para realizar o casamento de impedância. O dispositivo operou com uma largura de banda de 143 a 166 GHz e, na f_{op} de 160 GHz, atingiu os valores de ganho e NF de 15,7 dB e 8,5 dB, respectivamente [54]. Em [55], os autores propuseram um amplificador de baixo ruído fabricado com tecnologia CMOS SOI de 45 nm na faixa de frequência de sub-THz. O LNA implementado atingiu um ganho de 16 dB, figura de ruído de 8 dB e $P1dB_{in}$ de -14,5 dBm, operando na faixa de frequência de 125,5 a 157 GHz. Sua topologia de fabricação é composta por quatro estágios de células diferenciais CS, as quais são neutralizadas por efeito capacitivo em cascata através de transformadores de mmWaves [55]. Ryynanem *et al* [56] projetaram um LNA com frequência de operação de 140 GHz, que foi implementado com SiGe BiCMOS em 130 nm. O dispositivo consiste em dois estágios *cascode* com ressonadores de base para o aumento de ganho. Dessa forma, alcançou-se um ganho de 18,7 dB e uma NF de 7,2 dB na frequência de operação do amplificador [56]. Ainda na faixa de frequência de sub-THz, Li *et al* [57] apresentaram o projeto de um amplificador, que pode ser utilizado como um LNA devido ao desempenho satisfatório alcançado em relação a ganho, NF, BW e potência de saída. O amplificador foi implementado com tecnologia SiGe BiCMOS em 130 nm e consiste em um estágio *cascode* de terminação única para otimizar o ruído e dois estágios *cascode* diferenciais para consideração da capacidade de energia. O dispositivo forneceu um ganho medido de 21,8 dB na f_{op} de 232 GHz com uma BW de 35 GHz e a potência de saída medida e a PAE em 225 GHz foram de 3,5 dBm e 2,9%, respectivamente. A figura de ruído simulada do amplificador na frequência de 230 GHz foi de 10,5 dB [57]. Por fim, entrando na faixa de frequência de THz, mesmo que no início da faixa, Dan *et al* [58] propuseram um LNA com largura de banda entre 235 e 315 GHz. O amplificador foi fabricado usando tecnologia mHEMT de 35 nm baseada em InGaAs e foi construído com três estágios *cascode* e blocos de casamento de impedância para obter uma relação de compromisso entre largura de banda com alto ganho em combinação com baixo ruído. O dispositivo obteve ganho médio de 26 dB e, na f_{op} de 300 GHz, apresentou uma NF de 7 dB [58]. Recentemente, os mesmos autores apresentaram em [59] este LNA aplicado ao estágio de *downconversion* totalmente integrado de um receptor super-heteródino para comunicação de alta taxa de dados.

No caso dos moduladores e filtros, grandes avanços têm sido observados nas últimas décadas [60–64]. Em particular, dispositivos baseados na exploração de princípios ópticos [65–67], eletro-ópticos [68], magneto-ópticos [69,70] e eletro-mecânicos [61,64] encontram-se amplamente disseminados na literatura recente. No entanto, a maioria desses sistemas continuam sendo volumosos e de alto custo, motivando mais pesquisas que permitam vencer esses desafios para chegar na implementação de aplicações portáteis e eficientes. Uma das linhas de pesquisa mais recentes e promissoras consiste na exploração do efeito plasmônico [68], que representam oscilações coletivas de cargas ressonantemente acopladas ao campo eletromagnético, permitindo simultaneamente a localização e aprimoramento do campo em regiões muito menores que o comprimento de onda da fonte. Por um lado, o aprimoramento do campo tem associado um consequente aprimoramento na resposta óptica do meio, seja linear ou não linear, permitindo melhorias consideráveis em termos de eficiência e desempenho. Por outro lado, a habilidade de localizar o campo em regiões muito pequenas viabiliza o desenvolvimento de dispositivos altamente integrados [27]. Outra característica importante dos sistemas plasmônicos é a sua natureza híbrida eletrônica-fotônica, que permite uma perfeita integração entre essas duas tecnologias. Por exemplo, a possibilidade de desenvolver *front-ends* plasmônicos altamente integrados foi

demonstrada recentemente considerando moduladores, fontes e nanoantenas plasmônicas [68]. Além disso, trabalhos recentes reportaram o uso de moduladores plasmônicos para a conversão de sinais ópticos para THz e vice-versa [71,72]. Mais especificamente, moduladores plasmônicos tipo Mach-Zender de banda ultralarga foram usados em um enlace de THz sem fio, com 16 m de alcance, integrado à uma rede de fibra óptica usando conversão direta de sinais de THz para frequências ópticas [71]. Estes moduladores plasmônicos também podem ser implementados futuramente para aplicações residenciais usando fotodiodos e misturadores plasmônicos, para transmitir sinais desde e para as casas usando os postes de luz residenciais, como indicado em [73]. Tais avanços são de grande importância para manter as vantagens de portabilidade e flexibilidade inerentes às redes sem fio, em conjunto com a alta confiabilidade e capacidade virtualmente ilimitada dos sistemas de transmissão óptica, nas futuras redes móveis baseadas em sinais de THz.

3 Antenas aplicadas às redes 6G

Hugo Rodrigues Dias Filgueiras, Tiago Henrique Brandão, Arismar Cerqueira Sodré Junior
 hugo.rodrigues@inatel.br, tiagob@get.inatel.br, arismar@inatel.br

Ao longo da evolução da telefonia móvel, diversas antenas foram propostas de acordo com as demandas que cada geração se propunha atender. Esta Seção tem por objetivo apresentar, de forma breve, a evolução no desenvolvimento de antenas ao longo das gerações de telefonia móvel e, mais especificamente, busca-se aprofundar nas principais soluções técnicas e tecnológicas que poderão ser aplicadas na rede 6G, de acordo com suas principais características e casos de uso. Aborda-se nessa Seção as soluções de antenas das redes 1G às redes 5G, a fim de identificar pontos em comum que poderão ainda ser utilizados e aprimorados para a futura rede de comunicações móveis. Serão discutidas as principais características eletromagnéticas que uma antena deve apresentar para operação em sistemas *multiple-input multiple-output* (MIMO) e *massive* MIMO (mMIMO), além de uma investigação na literatura especializada nas inovadoras antenas operando em THz, incluindo as potenciais faixas de frequência e suas devidas aplicações em cenários propostos para as redes 6G, tecnologias de fabricação e modelos já propostos.

3.1 Evolução das antenas ao longo das gerações de comunicações móveis

Em sistemas de comunicação móvel, as antenas são uma das tecnologias projetadas para atender aos requisitos que as aplicações exigem. Desde a primeira implementação das redes móveis (1G) as mesmas foram projetadas para o reuso de frequência. Por isso, criou-se áreas de cobertura chamadas de células, para que um mesmo recurso de frequência fosse reutilizado com níveis controlados de interferência. As estações radiobase (ERB)s, por sua vez, normalmente definem uma célula, as quais podem ter vários setores, e as antenas são responsáveis por cobrir estes setores [74]. As antenas são dispostas de forma a cobrir toda área geográfica atribuída à ERB e o número de antenas ou arranjos de antenas está relacionado com a frequência, a abertura de feixe e o ganho almejados [75–77].

Nas redes 1G, as antenas implementadas nas ERBs tinham como objetivo principal maximizar a área de cobertura. Desta maneira, arranjos de antenas foram utilizados para se obter feixes diretivos, que por sua vez, cobriam determinados setores com maior ganho comparado a um sistema com uma única antena [75,78]. Esta estratégia demanda o uso de mais de um arranjo de antenas, visto que os feixes são diretivos e cobrem setores menores. Porém, esta abordagem permite um número menor de ERBs, já que o alcance da célula pode ser aprimorado. Na maioria dos casos, utilizou-se arranjos de antenas lineares, dispostos na vertical, a fim de estreitar a abertura de feixe em elevação, garantindo maior cobertura em azimute e com alto ganho. Atualmente, arranjos de antenas ainda são implementados nas modernas redes de comunicação [75,78].

O crescimento das redes de telefonia móvel impulsionou diversas novas tecnologias. Além das propostas de novas formas de onda digitais empregadas na segunda geração de rede móvel celular (2G) para aumento de qualidade de serviço (QoS), propôs-se o conceito de arranjos de antenas reconfiguráveis com feixe orientado no plano de elevação para aumento da SNR [77]. A proposta deste novo tipo de arranjo era prover maior capacidade e controle da rede em relação à área de cobertura, visto que as redes se expandiam e se tornavam mais densas [75]. Por meio

de um controle de fase entre os elementos do arranjo, foi possível implementar uma inclinação no feixe principal em elevação, possibilitando aumentar a área de cobertura ou nível de sinal dentro das células [79,80]. Entretanto, os requisitos de capacidade e cobertura ainda eram modestos comparado ao custo de implementação desta nova técnica em larga escala [77].

Na terceira geração de rede móvel celular (3G), o uso de antenas com direcionamento de feixe foi otimizado para aumento de precisão, sendo mais explorados que na rede 2G [75]. Outra técnica que foi empregada na rede 3G foi o MIMO que foi incluído no último *Release* da rede 3G. Por meio desta técnica, é possível explorar a diversidade e multiplexação espaciais e melhorando tanto a cobertura quanto a capacidade do sistema. A técnica MIMO não foi bem aceita em sua primeira proposta para o 3G, pois demandava importantes mudanças nos sistemas já legados. Outro fator que prejudicou a implementação da técnica MIMO foi o a utilização de modulações baseadas em múltiplas portadoras, pois permitia o aumento de taxas de pico do sistema por meio da melhora de eficiência espectral, além de combater o canal seletivo em frequência do enlace rádiomóvel [77].

Na quarta geração de rede móvel celular (4G) as técnicas de MIMO foram consideradas na padronização, *Release* 10, do 3GPP [81]. Nesta etapa, os requisitos no desenvolvimento de antenas não exigiam alta complexidade comparado às antenas com feixes reconfiguráveis, uma vez que o princípio de funcionamento das antenas para MIMO depende do distanciamento entre as antenas e o baixo acoplamento entre as portas do sistema. A rede 4G foi padronizada para suportar *multiple-user* MIMO (MU-MIMO) sendo aplicável a MIMO 8x8 no *downlink* e MIMO 4x4 no *uplink* [81], porém a implementação de até oito camadas não foi concluída [77]. A evolução das aplicações das redes móveis trouxe requisitos de vazão e eficiência espectral que impulsionaram o uso de antenas integradas, com controle de amplitude e fase, nas ERBs [77].

A partir do *Release* 10, não houve mudanças no padrão que justificassem alterações nas antenas para rede 4G. A partir deste ponto, foram exploradas técnicas de desfasamento baseadas em *phase-shifter*, números diferentes de elementos em arranjos e integração de antenas de diferentes faixas de frequência em uma única estrutura. As antenas empregadas da rede 1G à rede 4G, em sua grande maioria, se tratam de arranjos de dipolos com um plano refletor e cobrem as faixas de frequências: de 698 a 960 MHz; de 1,700 à 2,650 MHz. Além disso essas antenas, conseguem cobrir tipicamente setores de 30°, 60°, 90° e 120°, com ganhos que podem variar de 10 dBi a 25 dBi. Nos sistemas 3G e 4G, os arranjos de antenas possuem a capacidade de varrer o diagrama no plano de elevação de até $\pm 15^\circ$, sendo esse controle incorporado à configuração dos rádios. Nas redes 3G e 4G, a técnica de dupla polarização também foi utilizada, e os arranjos de antena passaram a trabalhar nas polarizações de $\pm 45^\circ$. Isso permitiu explorar a diversidade de polarização e garantir menores perdas de polarização quando comparado a arranjos de antenas com polarizações lineares vertical e horizontal, uma vez que a polarização vertical geralmente é beneficiada pela disposição das antenas e modo de utilização dos terminais móveis. Por fim, para a rede 4G, foram desenvolvidas antenas integradas aos rádios, para explorar o MIMO 4x4. Esse tipo de antena pode variar entre antenas impressas ou convencionais dipolos com refletor. Porém, de forma geral, as antenas são espaçadas de valores superiores a um comprimento de onda e possuem abertura de feixe de aproximadamente 60° [75].

As antenas dos terminais móveis passaram por mudanças mais significativas da rede 1G à rede 4G. Com a evolução da tecnologia e o aumento da faixa de frequência operação da rede, as antenas dos terminais foram aprimoradas em relação a tamanho e desempenho. Nos primeiros terminais móveis das redes 1G e 2G, as antenas eram normalmente monopolos com tamanhos que ocupavam uma área externa do dispositivo. Muitas das antenas destes terminais eram monopolos retráteis que eram expandidos ao efetuar uma chamada. Com a evolução da ele-

trônica e dispositivos integrados, as antenas também foram aprimoradas nos terminais móveis, sendo incorporadas dentro dos dispositivos já no final da rede 2G. Diversos modelos de antena impressa foram propostos, como antena do tipo *planar inverted-F antenna* (PIFA), *Patch* e *Loop*. Na rede 3G, as antenas dos terminais já não necessitavam de uma região externa e eram capazes de operar em mais de uma banda de operação. Além disso, os dispositivos móveis passaram a possuir outras funções que empregavam diferentes antenas para outras bandas, além das exigidas pelas redes móveis, como por exemplo o *bluetooth* e *wireless fidelity* (WiFi) [75,82]. Nos dispositivos móveis para as redes 4G, os aparelhos oferecem suporte para aplicações MIMO 4x4, *bluetooth* 5.0, MIMO 2x2 para WIFI e todas as faixas de frequência das redes legadas. Isto exige complexos sistemas de antenas integradas, pois o tamanho dos dispositivos diminuíram ao longo da evolução e, conseqüentemente, o espaço disponível para antenas também foi reduzido. Técnicas baseadas em fractal, múltiplas frequências e miniaturização são utilizadas no desenvolvimento das antenas para otimização de espaço e operação em varias faixas de frequência [77].

3.2 Estado da arte em antenas e arranjos de antenas nas faixas sub-6 GHz e mm-Waves

Pode-se considerar que a primeira revolução no desenvolvimento de antenas aplicadas à telefonia móvel para ERB ocorreu juntamente com a proposta da rede 5G. Devido ao congestionamento do espectro de frequências abaixo de 6 GHz (sub-6 GHz), foi proposto o uso da faixa de mmWaves e *sub millimeter waves* (sub-mmWaves), acima de 20 GHz, para suprir a alta demanda de vazão que as novas aplicações impõem à rede [19,83]. Tais frequências são pouco exploradas e possuem grande capacidade para transmissão faixa-larga. Entretanto, altas frequências impõem mais perdas de propagação e menos penetração do sinal em estruturas e as técnicas MIMO são soluções potenciais para compensar tais perdas. Além disso, devido ao pequeno comprimento de onda, torna-se possível o agrupamento em arranjos de alta ordem (centenas de elementos de antenas no arranjo) sem que as dimensões finais do arranjo se tornem proibitivas [19,83]. Tais tecnologias ainda serão aplicáveis aos desafiantes casos de uso previstos para as redes 6G.

Técnicas MIMO consistem na utilização de múltiplas antenas para transmitir e receber os sinais a fim de se tirar proveito de múltiplos canais de comunicação para aumento de SNR e/ou taxa de comunicação por meio de multiplexação espacial ou aumento da robustez por meio da diversidade. Do ponto de vista de desenvolvimento de antenas, é necessário garantir que múltiplos elementos de antena operem de forma simultânea, com baixo acoplamento entre si, a fim de garantir a diversidade/descorrelação de canal. O principal desafio consiste no desenvolvimento de arranjos de alta ordem, com complexos circuitos de alimentação, sem degradação de desempenho de cada elemento irradiador. Nestas aplicações, cada elemento de antena deve ser alimentado de forma independente.

Diversos artigos na literatura propõem o desenvolvimento de antenas para aplicação em arranjos voltado para sistemas MIMO e mMIMO operando desde sub-6 GHz até a faixa de mmWaves. De 2016 em diante, muitas soluções aplicadas às redes 5G e 6G foram apresentadas na literatura. Os trabalhos de [84–89] são alguns exemplos de soluções diversificadas aplicadas às frequências de 26 a 37 GHz. As aplicações variam de terminais externos [84], chaveamento de feixe [85,88], cobertura omnidirecional para radiodifusão [86], aplicações MIMO de baixa ordem [87] e desenvolvimentos de antenas de baixo perfil para otimização de espaço [89]. Cada autor busca atender os mais diversos cenários, entretanto, todos visam prover resposta faixa-

larga para cobrir cenários de alta vazão e, os desenvolvimentos de elementos voltados para MIMO, se preocupam em garantir baixo acoplamento entre eventuais elementos adjacentes no contexto de confecção de arranjos. As tecnologias aplicadas ao desenvolvimento variam de acordo com as características que a antena deve apresentar para atender os diversos cenários propostos para as redes 5G. Por exemplo, as aplicações que demandam alto ganho priorizam tecnologias de cavidades ressonantes, lentes dielétricas, metamateriais, *slotted-waveguide antenna array* (SWAA) e outras tecnologias de alto fator de mérito. A Tabela 2 compila os principais resultados obtidos nos artigos citados.

Tabela 2: Estado da arte em soluções de antenas na faixa de mmWaves.

Referência	Tecnologia	Banda [GHz]	Aplicação
[84]	Guia de ondas e <i>printed-circuit board</i> (PCB)	27,2 a 28,7	Terminal de RF externo
[85]	SWAA	27,75 a 28,35	Chaveamento de feixe
[86]	Dipolos e cavidades integradas ao substrato	27 a 29,5	Cobertura omnidirecional aplicado em radiodifusão
[87]	Antena baseada em fendas com ressonador dielétrico	27,2 a 28,5	MIMO de baixa ordem
[88]	Lente Luneburg	25 a 37	Chaveamento de feixe
[89]	Metamaterial baseado em <i>patches</i>	26,3 a 30,7	Antenas de baixo perfil

Em aplicações voltadas para MIMO, que exigem baixo acoplamento, tipicamente os autores focam nas técnicas de redução de acoplamento mútuo entre elementos, tornando as trilhas de alimentação um fator determinante para o bom desempenho do sistema. Neste caso, encontram-se muitos estudos na literatura de antenas impressas excitadas com *substrate integrated waveguide* (SIW) [90–93], *gap-waveguide* (gapWG) [94–96], *substrate integrated coaxial line* (SICL) [97–101] e outras técnicas que proveem uma blindagem efetiva do sinal eletromagnético. Por fim, existem muitas soluções a fim de viabilizar o chaveamento ou guiamento do feixe eletromagnético, a fim de aumentar a SNR do sistema. As antenas desenvolvidas para atender à esse cenário focam em técnicas de reconfiguração mecânica ou elétrica [85] para chaveamento entre múltiplos elementos irradiadores ou controle independente de fase entre elementos. Além disso, existem muitos estudos em lentes dielétricas, *frequency selective surface* (FSS) e metamateriais para viabilizar o guiamento do feixe principal em um arranjo de antenas [88].

O advento da rede 5G motivou o desenvolvimento sem precedentes de uma diversidade de antenas para atender a pluralidade de aplicações possíveis. SWAA, *patches*, dipolos, vivaldis, fendas impressas, PIFA e outros diversos modelos são encontrados na literatura especializada para aplicações em larga faixa de frequências. Além disso, pela primeira vez, faz necessário um estudo aprofundado do desempenho do elemento de antena dentro de um arranjo e, mais do que isso, a influência da disposição dos elementos do arranjo no desempenho final do sistema.

Os trabalhos apresentados em [102–108] são exemplos de estudos na faixa de sub-6 GHz, no qual o desempenho do arranjo foi analisado e a técnica MIMO foi considerada para definir

os pré-requisitos de projeto dos arranjos. Os principais resultados são compilados na Tabela 3. Foram apresentados arranjos com 16, 18, 64, 128 e até 256 elementos para aplicações MIMO e mMIMO, além de chaveamento, guiamento e formatação de feixe. Nos casos dos estudos do arranjo completo, tipicamente, a principal contribuição se encontra no sistema como um todo, e não no elemento irradiador em si. Logo, encontram-se na literatura implementações com *patches* [102,106–108], dipolos [103,104] e vivaldis [105] convencionais. Todas as técnicas aplicadas para sub-6 GHz também podem ser aplicadas para frequências acima de 20 GHz, mas são poucos os trabalhos em altas frequências com tantos elementos, uma vez que o custo e complexidade de implementação podem ser impeditivos.

Tipicamente, utiliza-se espaçamento entre os elementos de aproximadamente metade do comprimento de onda ($\lambda/2$) para aplicações de manipulação do feixe de radiação do arranjo. Dessa forma, cria-se um único feixe diretivo e bem definido, controlando a fase e magnitude de cada elemento do arranjo e tornando possível guiar e/ou formatar o diagrama de irradiação do arranjo como um todo. A maneira como a fase e a amplitude é manipulada determina se o guiamento/formatação será contínuo ou discreto, caracterizando um chaveamento no último caso. Em aplicações MIMO e mMIMO, o parâmetro mais importante é a correlação entre os múltiplos canais criados entre transmissor e receptor. Logo, as múltiplas antenas do arranjo devem possuir o mínimo acoplamento possível e, tipicamente, espaçamentos maiores que λ são preferíveis, de maneira que cada antena opere de forma decorrelacionada das demais.

O estudo apresentado em [107] investiga o impacto da geometria do arranjo na correlação co-canal. Dois arranjos de antenas planares foram projetados para análise: o primeiro com distribuição matricial uniforme e o segundo com deslocamento relativo entre linhas do arranjo. O arranjo uniforme foi composto por elementos igualmente distribuídos, alinhados nas direções horizontal e vertical, enquanto o segundo arranjo consistiu-se em linhas de deslocamento dos elementos radiantes na matriz, aumentando o espaçamento entre os elementos adjacentes sem comprometer a área total do arranjo. Os resultados obtidos comprovaram um desempenho superior do arranjo não uniforme em comparação com ao arranjo uniforme convencional em termos de capacidade do sistema, devido ao menor nível de acoplamento mútuo entre os elementos e, conseqüentemente, menor correlação co-canal.

Em [108], os autores foram além e propuseram a investigação de distribuição completamente aleatória no espaçamento entre os elementos do arranjo. Os autores alegaram que a distribuição de elementos de forma aperiódica em um arranjo de antenas tem o potencial de aumentar a QoS por meio da redução de interferência entre usuários, aumentando então a resolução espacial do arranjo. Os autores consideraram quatro topologias de arranjo: i) arranjo de 64 elementos com distribuição de elementos totalmente aperiódica e distância mínima entre elementos adjacentes de $0,5\lambda$; ii) arranjo de 256 elementos com distribuição de elementos totalmente aperiódica e distância mínima entre elementos adjacentes de $0,5\lambda$; iii) arranjo de 256 elementos com distribuição quasi-modular e distância mínima entre elementos adjacentes de $0,5\lambda$; iv) arranjo de 256 elementos com distribuição quasi-modular e distância mínima entre elementos adjacentes de λ . O cenário considerado constitui de uma célula isolada, com *line-of-sight* (LOS) e com um arranjo de antenas de N elementos na ERB prestando serviços simultaneamente a K usuários com antenas omnidirecionais, usando a mesma frequência em esquema de multiplexação por divisão espacial. O desempenho dos arranjos foi avaliado em termos de interferência entre vários usuários. Os autores concluíram que os arranjos com distribuição aperiódica de ordem superior têm o potencial de mitigar a interferência entre os usuários, reduzindo o nível de lóbulos secundários do diagrama de irradiação resultante e, como consequência, a correlação co-canal. Outra conclusão foi que o espaçamento adicional de elementos adjacentes de pelo

menos λ aumenta a interferência inter-usuário devido ao incremento dos lóbulos secundários, mas apenas em LOS. As vantagens de usar mais elementos espaçados neste cenário são em relação à dissipação térmica e criação de espaços para componentes eletrônicos integrados em implementações de antenas ativas, com impacto limitado na QoS.

Nota-se mais soluções na literatura aplicadas a guiamento, formatação e chaveamento de feixe quando comparados com o mMIMO digital. Isso está relacionado aos custos de implementação, uma vez que as técnicas de formatação de feixe podem ser aplicadas com um número menor de cadeias de RF. No entanto, é importante considerar os cenários reais de operação dos canais radio móveis: as técnicas de formação, chaveamento e guiamento de feixe analógicas consideram poucos usuários (alguns artigos consideram um único usuário) sob uma condição LOS, enquanto a formação de feixe digital, tipicamente baseada em *time-division duplexing* (TDD), garante o múltiplo-acesso ao meio devido à diversidade de canais em *non line-of-sight* (NLOS), o que é mais realista em um ambiente urbano denso. Para fins de pesquisa, é importante continuar contribuindo com ambos os cenários, incluindo mMIMO baseado em TDD, considerando a evolução esperada dos dispositivos eletrônicos e de RF, além da redução de custos ao longo dos próximos anos.

O grupo de pesquisa do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) contribuiu ativamente no desenvolvimento de antenas para redes 5G e 6G nos últimos anos. Os principais resultados são compilados na Tabela 4. Em [109] os autores propuseram a primeira SWAA reconfigurável opticamente em mmWaves na literatura. Trata-se de uma SWAA com chaves fotocondutivas para controlar os comprimentos elétricos das fendas irradiantes, permitindo a sintonia de frequência e a reconfiguração do diagrama de irradiação. O protótipo apresentou capacidade de chavear sua operação ao longo de duas bandas de frequência distintas, a saber: 10,95% de banda fracionada centrada em 28 GHz e 4,25% em 38 GHz, com ganho de 8 e 9 dBi em 28 e 38 GHz, respectivamente.

Dois outros projetos foram propostos pelo grupo de pesquisa em antenas do Inatel em 2018 [110]. Os pesquisadores fabricaram uma SWAA omnidirecional operando em 28 GHz, baseada em anéis metálicos, cujo objetivo era perturbar a onda eletromagnética do tipo viajante, dentro de um guia de ondas dielétrico. Além disso, uma SWAA de dupla banda e cobertura para operação simultânea em 28 e 38 GHz também foi proposta. Tal protótipo consistiu em dois grupos de fendas com comprimentos elétricos diferentes e em faces opostas de um guia de ondas. A primeira antena forneceu largura de banda de 26,85 à 29 GHz, com um ganho consideravelmente elevado para antenas omnidirecionais de aproximadamente 12 dBi, enquanto a segunda SWAA foi capaz de operar simultaneamente de 24,7 à 32,2 GHz e 35,5 à 39,15 GHz, provendo ganho de 12,6 e 15,6 dBi em 28 e 38 GHz, respectivamente. A SWAA de banda dupla proposto em [110] foi aplicada em um arranjo para comutação de feixe em 2019 [111]. Os autores agruparam quatro elementos SWAA, rotacionados de 30° entre eles, a fim de criar um conjunto de antenas de banda dupla e quatro feixes comutáveis. A aplicabilidade do protótipo para sistemas MIMO foi avaliada em função do acoplamento mútuo entre as SWAAs, que foi mantido abaixo de 35 dB em toda a faixa de frequência avaliada (24 a 40 GHz).

Tabela 3: Estado da arte em soluções de arranjo de antenas para MIMO e mMIMO.

Referência	Tecnologia	Topologia	Banda [GHz]	Aplicação	Contribuição
[102]	<i>Patch</i>	18 sub-arranjos planares com cobertura em 360°	3,6 a 3,8	MIMO	Esquema de alimentação para obter dupla polarização
[103]	Dipolo com refletor baseado em cavidade	Arranjo planar de 16 elementos (4x4)	4,9 a 6	Formatação de feixe analógico	Guiamento de feixe de até 50° e formatação para até 4 feixes simultâneos
[104]	Dipolo com refletor	Arranjo planar de 128 elementos	3,8 a 4,3	mMIMO digital baseado em TDD	Aumento de eficiência espectral do sistema
[105]	Vivaldi	Arranjo planar de 16 elementos e uso de lente baseada em metamaterial	24,5 a 27,5	Guiamento de feixe digital	Aumento de ganho com a lente e guiamento de -50° a +50°
[106]	<i>Patch</i>	Arranjo planar de 16 elementos e uso de lente baseada em metamaterial	5,17 a 6,1	Múltiplos feixes	Chaveamento de feixe por seleção de porta
[107]	<i>Patch</i>	Arranjo planar de 18 elementos uniformes e deslocados	4 a 4,7	mMIMO digital baseado em TDD	Distribuição deslocada de elementos para redução correlação entre canais
[108]	<i>Patch</i>	Distribuição aperiódica de 256 elementos	26,5 a 29,5	Formatação de feixe	Distribuição aperiódica de elementos para redução correlação entre canais

Uma segunda abordagem aplicada à enlaces ponto-a-ponto foi proposta em [112]. Os autores implementaram um *fronthaul* sem fio de banda dupla usando uma antena *focal-point*/Cassegrain

baseada em FSS, assistido por um *midhaul* óptico. O trabalho consiste na concepção, implementação e análise experimental de desempenho de uma arquitetura inovadora de *fiber-wireless* (FiWi) para redes 5G-Xhaul. A principal contribuição foi quanto à integração de *backhauls* e *midhauls* ópticos com *fronthauls* sem fio operando em dupla banda por meio do uso de uma antena modelada de acordo com o estudo anterior proposto em [113] para aplicações de radar de duplo uso. A antena consiste em dois alimentadores, um operando em 7,5 GHz e o outro em 28 GHz, um refletor principal e um sub-refletor baseado em FSS. O último atua como condutor em 28 GHz e é eletromagneticamente transparente em 7,5 GHz, permitindo a banda dupla mesmo usando um único refletor principal. Resultados experimentais foram obtidos com até 18 Gbit/s de taxa de comunicação, com desempenho de acordo com os requisitos do 3GPP *Release* 15, em um *midhaul* óptico de 25 km seguido por um *fronthaul* sem fio de 20 m, operando simultaneamente em ambas as bandas. Posteriormente, em [114], a mesma antena foi aplicada em uma nova topologia de sistema com um *midhaul* opticamente amplificado, no qual o sinal de RF é amplificado fonicamente usando efeitos ópticos não lineares (*four-wave mixing*).

Finalmente, em [115], o grupo de pesquisa em antenas do Inatel propôs uma SWAA omnidirecional operando em 24 GHz para aplicações em *indoor femtocells*. Propôs-se uma nova abordagem para projetar SWAAs omnidirecionais de banda larga, que foi baseada em fendas em forma trapezoidal com dois comprimentos elétricos diferentes, bem como uma distribuição torcida de grupos de fendas ao longo do eixo longitudinal do arranjo. A fenda trapezoidal é formada aumentando gradualmente o comprimento da fenda entre as superfícies interna e externa do guia de ondas. Desta forma, uma transição de impedância mais suave entre o guia de ondas e o ar é fornecida, a fim de aumentar a largura de banda do arranjo. Além disso, propôs-se uma técnica de torção, responsável por melhorar o diagrama omnidirecional por reduzir a variação de ganho no plano de azimute. Resultados experimentais demonstraram largura de banda de 1,09 GHz centrada em 24 GHz (largura de banda fracionada de 4,54%), ganho variando de 12,49 a 14,71 dBi ao longo da banda de operação e variação de ganho de apenas 2,7 dB no plano de azimute. O arranjo de antenas proposto consiste em uma solução promissora para a aplicação em mmWaves, incluindo comunicações *indoor* para rede 5G operando no modo eMBB.

Tabela 4: Soluções de antenas aplicadas à mmWaves pelo grupo de pesquisa do Inatel.

Referência	Tecnologia	Banda [GHz]	Aplicação	Contribuição
[109]	SWAA	27,6 a 30,8 e 36,8 a 38,4	Cobertura setorial de dupla banda	Reconfiguração óptica em mmWaves
[110]	Antena de ondas viajantes com anéis ressonantes	26,85 a 29	Femtocélula omnidirecional	Antena omnidirecional de alto ganho
[110]	SWAA	24,7 a 32,2 e 35,5 a 39,15	Cobertura setorial de dupla banda	Cobertura simultânea em dois setores com dupla banda
[111]	SWAA	24,42 a 31,58 e 36,1 a 39,9	Chaveamento de feixe	Antena com quatro feixes comutáveis e dupla banda
[112]	Parabólica baseada em FSS	6,9 a 8 e 25,85 a 30,15	Enlace ponto-a-ponto	Conceito e implementação de um <i>fronthaul</i> sem fio de banda dupla, assistida por um <i>midhaul</i> óptico
[114]	Parabólica baseada em FSS	6,9 a 8 e 25,85 a 30,15	Enlace ponto-a-ponto	Implementação de <i>Xhaul</i> FiWi amplificado fotonicamente por meio de efeitos ópticos não lineares
[115]	SWAA	23,45 a 24,54	Femtocélula omnidirecional	Antena omnidirecional de alto ganho

3.3 Antenas em THz

As comunicações em THz estão previstas para serem usadas nas redes 6G, de acordo com muitos artigos presentes na literatura especializada [2,3,34,116–126]. A busca por taxas de dados cada vez mais altas impulsionou o uso de frequências na faixa de mmWaves a partir da rede 5G como um meio de fornecer mais largura de banda. De maneira sem precedentes no universo de comunicações móveis, a rede 6G propõe aumentar a frequência de operação para a banda THz para atingir taxas de comunicação na ordem de Tbit/s. Além disso, as características intrínsecas das frequências THz viabilizarão aplicações adicionais como sensoriamento e imagem, aliadas às capacidades de localização em alta resolução além da comunicação sem fio [34]. A banda de comunicação THz é caracterizada por curto alcance, médio consumo de energia, alta segurança e robustez às condições climáticas comparada às frequências infravermelhas (FSO) e sistemas *visible light communication* (VLC), que são afetados pela turbulência atmosférica, cintilação, poeira e luz ambiente [127,128,128].

A banda THz sofrem com o alto nível de perda por absorção molecular adicionada à perda de espaço livre inerentemente alta [127]. Além disso, as ondas THz sofrem espalhamento ao se deparar em quase qualquer objeto nos ambientes de propagação internos e externos [129]. No entanto, desenvolvimentos recentes em materiais, tecnologias fotônicas e eletrônicas e o crescente interesse nesta faixa de frequência, têm impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento na área para aplicações baseadas em comunicação [15]. Além das vantagens e benefícios, seus principais problemas envolvendo a implementação em rede 6G estão relacionados à alta perda de espaço livre, absorção molecular, arquitetura de transceptores, modelagem de canal, ambiente de propagação, esquema de controle de acesso, algoritmos de controle entre o transmissor e o receptor em tempo real, além da própria fabricação e teste de dispositivos em THz, incluindo as antenas.

Embora existam diversas fontes de ruído na banda em THz, a maior contribuição é dada pelo ruído de absorção molecular, no qual uma fração da energia das ondas eletromagnéticas é convertida em energia cinética vibracional em moléculas gasosas [128]. O ruído de absorção molecular, que não possui densidade espectral de potência plana ao longo da frequência, adiciona aos sistema um ruído extra, diferente do *additive white Gaussian noise* (AWGN). O ruído adicionado é considerado colorido ao invés de branco devido às diferentes frequências de ressonância de cada molécula do ambiente, gerando múltiplos picos espectrais [130]. A perda de propagação em THz é definida como a soma das perdas por espalhamento e por absorção molecular, logo, pode facilmente ultrapassar a marca de 100 dB para distâncias de transmissão na ordem de apenas alguns metros. A absorção molecular define várias janelas de transmissão, tornando a resposta do canal sem fio variante no domínio da frequência [128]. Tais janelas de transmissão possuem larguras de banda que variam de dezenas a centenas de GHz, de acordo com a distância de transmissão e a composição molecular do meio. Para distâncias menores que 1 metro, a perda de absorção molecular pode ser desprezada mas, conforme a distância do enlace aumenta, muitas ressonâncias tornam-se significativas, originando janelas de transmissão variáveis [127].

Por fim, as moléculas de água em suspensão no ambiente, podem introduzir uma atenuação significativa à onda eletromagnética na faixa de THz, embora a atenuação possa variar de acordo com as condições meteorológicas. Conseqüentemente, as comunicações *outdoor* na faixa de THz podem ser altamente restritas e sujeitas a perdas adicionais devido às condições meteorológicas como umidade do ar, chuva e neve [128,131]. Por outro lado, comunicações *indoor* THz são mais robustas a esses problemas e as reflexões e penetrações em paredes, teto, chão e objetos devem ser considerados. As propriedades de reflexão do sinal THz também são diferentes dos canais na faixa de GHz. Por exemplo, as variações de superfície de muitos objetos *indoor* são comparáveis ao comprimento de onda THz (< 3 mm). Dessa forma, superfícies consideradas lisas em GHz tornam-se ásperas para a banda THz, o que influenciará o tipo de reflexão experimentada pelas ondas, denominada reflexão especular ou difusa de acordo com a rugosidade da superfície [132]. Os coeficientes de reflexão, espalhamento e difração para materiais usuais presentes no ambiente interno precisam ser determinados analiticamente e validados com medidas experimentais para toda a banda THz antes de serem usados de forma confiável em simulações de propagação de sinal em futuros sistemas de comunicação sem fio de banda larga [127]. Por exemplo, metais, vidro e ladrilhos são principalmente refletores, os plásticos comuns são quase transparentes e, para madeira, papel e tecido, o sinal THz é parcialmente refletido, parcialmente absorvido e parcialmente transmitido [133].

As próximas Seções buscam investigar as principais aplicações nas quais as comunicações em THz poderão ser aplicadas no contexto da rede 6G. Serão discutidos as principais bandas de

frequência cotadas para tais aplicações e suas principais características, as técnicas de fabricação propostas para as antenas operando nesta faixa de frequência e, por fim, uma breve revisão bibliográfica de soluções propostas no desenvolvimento de antenas.

3.3.1 Aplicações e bandas de frequência

Na rede 6G é previsto uma evolução dos indicadores de desempenho e cenários em relação ao observado para as redes 5G, além, de vislumbrar novos cenários de aplicação ainda não explorados. Prevê-se cenários como: *further enhanced mobile broadband* (FeMBB), *longdistance and high mobility communications* (LDHMC), *extremely low-power communications* (ELPC), *computation oriented communications* (COC), *contextu-ally agile emBB communications* (CAeC), *event defined ultra-reliable low latency communications* (EDuRLLC), *ultrahigh-speed-with-low latency communications* (uHSLLC), e *Rural Connectivity* [134–137]. Tais cenários dividem uma gama de aplicações que se pretende explorar nas redes 6G.

As redes 6G darão suporte a algumas aplicações como: realidade virtual imersiva (*augmented reality* (AR), *virtual reality* (VR), *mixed reality* (MR)), imagem e detecção em 3D, telemedicina, inteligência de previsão de desastres, comunicação holográfica (*holographic-type communications* (HTC)), telepresença, redes com capacidades sensoriais, veículos totalmente autônomos, viagens espaciais, inteligência artificial aplicada robôs, veículos aéreos não tripulados (VANT) [121,134,137], teste de imagem médica THz, monitoramento atmosférico e ambiental, radar THz, segurança nacional e antiterrorismo [138].

O suporte para as aplicações das redes 6G, em sua maioria, exigirá melhorias em termos de: taxa de pico de dados; taxa por usuário; número de dispositivos conectados por área coberta; capacidade de tráfego; eficiência energética; eficiência espectral; velocidade; confiabilidade e latência. Espera-se, por exemplo, taxa de pico superior a 1 Tbit/s e taxa por usuário final próxima de 10 Gbit/s [121,134,136,137]. Esses requisitos exigirão soluções técnicas ainda não exploradas nas redes anteriores, tais como o uso de inteligência artificial (IA), *machine-learning* (ML), ultra mMIMO e comunicações em THz são algumas das técnicas apontadas como promissoras para dar suporte as aplicações das redes 6G.

As ondas em THz já têm sido historicamente empregadas em diversas aplicações, como imagens médicas, imagens químicas, triagem de segurança, detecção de materiais, exploração planetária, espectroscopia de moléculas, astronomia e farmacologia [139] [134]. Tipicamente, a faixa de 0,1 a 10 THz combinam alta resolução de imagem de luz infra-vermelha e forte capacidade de penetração atuando como um meio não invasivo no campo de sensoriamento biológico e imagem [140,141]. O uso de THz utilizando a faixa de 1 a 2 THz foi proposto em [142] para detecção de estado de ligação de material genético na análise e sondagem de DNA. Os autores avaliam a interação entre o estado de ligação do DNA e o índice de refração complexo das moléculas de DNA utilizando a transmissão de THz para identificar diretamente o estado de ligação das fitas de DNA. Os autores em [143] apresentam o uso de diodos *Schottky* em THz para aplicações como imagens de radar, instrumentação espacial, para prover alta resolução espectral, meteorologia, espectroscopia laboratorial, detecção biológica e química e triagem de câncer.

Na rede 6G, as comunicações em THz serão extremamente promissoras para aplicações relacionadas ao cenário FeMBB, o qual se trata de uma contínua evolução da vazão de dados da rede. Aplicações como comunicação holográfica, realidade imersiva, ultra inteligência para *Internet of everything* (IoE), robôs colaborativos e medicina remota, possivelmente usarão desta técnica [134]. Para aplicações como a presença holográfica, que se trata de uma projeção em

tempo real de imagens em 3D de pessoas ou objetos em movimento, com alto nível de realismo, e a realidade imersiva (AR, VR, MR), que permitirá uma fusão entre o mundo físico e virtual, possibilitando uma experiência capaz de reproduzir de forma virtual sentidos como da visão, audição, tato, olfato e paladar, estima-se que a demanda de dados exigida esteja na ordem de 4 Tbit/s com latência inferior a 1 ms. Para aplicações como ultra inteligência para IoE, que se trata de comunicações inteligentes de dispositivos massivos conectados a rede, robôs colaborativos, e a medicina remota, altas taxas de dados terão que ser superadas em conjunto com baixa latência.

A alta demanda de dados e baixa latência exigida por estas aplicações naturalmente motivam o uso de THz, principalmente devido às questões de disponibilidade de espectro. Por outro lado, desenvolver dispositivos para as bandas de THz ainda é um desafio para as atuais tecnologias.

3.3.2 Estado da arte

Desenvolvimentos de antenas em THz são relatados em [138,144–154]. Muitas propostas são baseadas em técnicas convencionais de desenvolvimento de antenas, escalonadas para a faixa de frequência de THz. Em [144], por exemplo, os autores propõem a utilização de SIW para alimentar dipolos faixa-larga em um arranjo com controle de fase entre elementos operando de 124 a 158 GHz, com ganho máximo de 33,45 dBi em 150 GHz. A fabricação do arranjo é baseada em tecnologia *low-temperature co-fired ceramic* (LTCC) em multi-camadas. Outra proposta de utilização de SIW na confecção de antenas em THz é apresentada em [145], no qual os autores propõem o desenvolvimento de uma antena com 20 GHz de banda, centrada em 550 GHz, e a mesma é fabricada com tecnologia de PCB.

Os autores em [146] propõem o projeto e fabricação de uma antena 100% metálica operando na banda de 135 GHz. A antena é baseada em cavidade ressonante e foi fabricada utilizando duas possíveis técnicas: i) impressora 3D metálica; ii) impressora 3D dielétrica seguido de processo de metalização. Os resultados experimentais comprovam que os dois protótipos foram capazes de prover banda de 14,2% centrado em 135 GHz, com ganho de 15,5 dBi na frequência central. Em [147], os autores propõem uma SWAA baseado em gapWG operando de 134 a 148 GHz. O arranjo é composto de 16 fendas usinadas para prover ganho de 19 dBi em 141 GHz. A utilização de gapWG é empregada para superar problemas contato elétrico associado à montagem mecânica, especialmente em altas frequências, e viabilizar fabricação com processos simples de micro usinagem.

Uma antena do tipo Cassegrain convencional foi proposta em [148] para aplicações de enlaces ponto-a-ponto operando de 220 à 310 GHz. Cada um dos refletores consiste em uma peça de latão maciço. As superfícies refletoras de latão são polidas à mão e depois banhadas a ouro. A corneta utilizada como alimentador, a seção do guia de ondas e os suportes foram também fabricados com latão com revestimento de ouro. A tolerância alcançada nos parabolóides e hiperbolóides usinados com uma máquina fresadora com controle numérico computadorizado (CNC) de alta precisão foi de 30 μm . A corneta foi fabricada com processo de usinagem por eletroerosão, resultando em um tolerância de 20 μm . O protótipo foi capaz de prover abertura de feixe de apenas 0,7° e 0,8° nos planos de elevação e azimute, respectivamente, e um ganho de 48 dBi na frequência central de 265 GHz.

O trabalho apresentado em [149] relata o desenvolvimento de uma antena operando de 220 a 300 GHz para aplicações de guiamento de feixe. O projeto é baseado em uma antena em guia de ondas com preenchimento dielétrico, alimentada por um *pillbox*. O *pillbox* consiste em uma estrutura em guia de ondas de dois níveis com um refletor parabólico integrado para gerar uma

frente de onda plana. A estrutura microusinada de baixa perda foi capaz de prover eficiência de irradiação média de 99,2% e um ganho máximo de 28,5 dBi. Dois protótipos foram fabricados em lotes separados usando o processo de microusinagem de silício. A antena foi capaz de realizar guiamento de feixe de -75° a 30° . Por fim, os autores afirmam que a antena proposta se destaca devido à sua alta eficiência de irradiação, alto ganho, tamanho compacto e grande capacidade de guiamento de feixe em uma ampla largura de banda. O alto desempenho, juntamente com as capacidades de produção em lote de microusinagem de silício, torna a antena uma solução potencial e de baixo custo para diversas aplicações na banda de THz, incluindo radar ou futuros sistemas de comunicações móveis, o que inclui a rede 6G.

Dois trabalhos em 400 GHz são relatados em [150,151]. Em [150], os autores propõem um arranjo de refletor composto por uma fonte de alimentação, um refletor de camada única fabricado via processo de litografia em quartzo e um polarizador de grade de arame implementado em PCB. Uma base impressa em 3D foi usada para montar e encaixar todas as peças. Os experimentos mostraram que o protótipo provê ganho máximo de 33,66 dBi em 400 GHz, com eficiência de abertura de 33,65% e largura de banda de 16% (357 a 421 GHz). Já em [151], os autores propõem uma antena planar de ondas viajantes com baixo nível de lóbulos secundários, baixo nível de polarização cruzada e baixo custo. A antena é baseada em fendas e é fabricada utilizando tecnologias de CNC e PCB. O protótipo foi capaz de prover banda de 390 a 410 GHz, com ganho variando de 23 a 25 dBi ao longo da frequência de operação. Os autores defendem a baixa complexidade de fabricação no artigo, afirmando que tal solução tem potencial de simplificar o desenvolvimento de componentes de alta eficiência operando em THz.

Uma revisão de antenas aplicadas à banda THz é apresentada em [138]. Os autores destacam diversas técnicas de fabricação para dispositivos de alta frequência. Destacam-se a manufatura aditiva ou impressão 3D para construir objetos, imprimindo-os camada por camada com base em um arquivo de modelo digital, usando materiais aglutináveis, como metal em pó ou plástico. A impressão 3D é muito adequada para peças estruturais de grande tamanho e formas complexas. A precisão do equipamento de impressão 3D pode chegar a 0,01 mm. A taxa de encolhimento e a deformação em alta temperatura devem ser consideradas na sinterização. Logo, peças de alta precisão ainda precisam ser fabricadas com métodos de usinagem. Muitos métodos de fabricação, como usinagem por CNC, usinagem por eletroerosão, LTCC e PCB, são capazes de atender aos requisitos de processamento de alta precisão de diferentes dispositivos eletrônicos ou produtos. Os autores ainda destacam a necessidade de investigar novos materiais para desenvolvimento de antenas e dispositivos de RF em altas frequências. Por exemplo, o grafeno consiste no material com a menor resistividade conhecida dentre os materiais condutores, incluindo o ouro e cobre [155,156]. Devido à sua resistividade extremamente baixa e ao movimento rápido dos elétrons, espera-se que seja usado para desenvolver uma nova geração de componentes eletrônicos condutores mais finos e rápidos. Atualmente, o grafeno, com suas propriedades supercondutoras, tem sido usado para projetar circuitos ou antenas reconfiguráveis [157,158].

Ainda em [138], os autores apresentam uma revisão a respeito dos tipos de antenas empregadas na faixa de THz. Destacam-se antenas do tipo cornetas, arranjos de antenas planares, antenas baseadas em lentes dielétricas, arranjos refletores e antenas baseadas em cavidades ressonantes. As cornetas são estruturas simples, com ampla largura de banda e capacidade de operar com altas potências. Os arranjos de antenas planares se destacam pela possibilidade de controle independente de fase e amplitude em cada elemento irradiador para formatação de feixe do diagrama de irradiação resultante do arranjo. As antenas baseadas em lentes dielétricas utilizam os conceitos da engenharia óptica e são usadas em uma ampla gama de aplicações

militares e em comunicações. De acordo com a teoria da óptica geométrica, uma onda esférica, que é irradiada de uma fonte no ponto focal da lente, se refratará ao longo da lente para formar uma onda plana. Durante o processo de transmissão, a refração ocorre quando as ondas passam por diferentes meios não paralelos. As lentes, que são montadas na frente do radiador, podem concentrar a energia da radiação e estreitar o feixe. O mesmo princípio é aplicado aos arranjos refletores, que manipulam o campo refletido com características de fase e amplitude desejada de acordo com o campo eletromagnético incidente. Por fim, as antenas de cavidade ressonante se apresentam como excelentes candidatas para formar uma estrutura plana, de baixa perda e alto ganho e é constituída pela suspensão de uma superfície parcialmente reflexiva, acima de um plano terra a uma altura predeterminada. Percebe-se que todas as antenas destacadas como potenciais para aplicação em THz são soluções amplamente utilizadas em baixas frequências, como sub-6 GHz e mmWaves.

Os trabalhos apresentados em [152,153] propõem desenvolvimento de antenas acima de 1 THz. Em [152], os autores propuseram uma FSS compacta de grafeno do tipo passa-faixas com ângulo de rotação de polarização e banda de frequência sintonizáveis para aplicações THz. A frequência da banda passante não é sensível ao ângulo de incidência para ser polarizada em modo TE ou TM, embora possa ser alterada de 1,6 para 2,2 THz com o ângulo de rotação da polarização variando de 24° a 16°, alterando o potencial químico de polarização de 0,6 a 1,0 eV. Os autores afirmam que a FSS de grafeno proposta possibilita o projeto de vários componentes e sistemas THz reconfiguráveis, como radomes de antenas com filtragem, moduladores, isoladores não recíprocos e radares de imagem polarimétricos.

Um arranjo de antenas microfabricadas de banda larga e baixo perfil para comunicações THz é apresentada em [153]. Os autores afirmam que, embora as comunicações em THz sejam consideradas soluções para as crescentes demandas de largura de banda, os componentes dos *front-end* de RF equivalentes em THz não foram ainda idealizados. Com base nos conceitos clássicos de desenvolvimento de antenas, os autores propõem um arranjo de antenas 2x2, baseadas em fendas e com cavidade ressonante e banda larga. No projeto, as fendas funcionam como dipolos magnéticos, enquanto uma superfície corrugada irradia como um arranjo de dipolos elétricos. O arranjo é desenvolvido para operação em 1 THz por meio da técnica de empilhamento de várias camadas metalizadas, usando tecnologia de microfabricação. Resultados experimentais comprovam uma largura de banda fracionária e ganho de 26% e 14 dBi, respectivamente. A antena proposta pode ser usada como parte de um arranjo de antenas maiores, provendo feixes mais diretivos, possibilitando o desenvolvimento de antenas de baixo perfil e alto ganho para futuras aplicações em sistemas de comunicações móveis.

Outra revisão sobre antenas em THz é apresentada em [154]. Os autores afirmam que a maioria das antenas THz propostas na literatura são antenas de mmWaves modificadas e pouca inovação é observada. Portanto, para melhorar o desempenho do sistema de comunicação THz, um trabalho importante é otimizar as antenas THz. Os autores também abordam as antenas fotocondutivas, que são utilizadas para geração e recepção de ondas em THz. Quando um feixe de luz é irradiado em um semiconductor fotocondutivo (como o arseneto de gálio), um par elétron-lacuna é gerado nele. Se houver um campo elétrico externo à lacuna da chave fotocondutiva, que geralmente é gerado pela tensão de polarização, uma corrente é gerada. Logo, se o sinal luminoso for de curta duração (aproximadamente um impulso com cerca de 100 fs), o sinal THz é gerado a partir da corrente fotocondutiva resultante. O modelo de antena fotocondutiva inclui basicamente uma antena com *gap*, um eletrodo e um substrato fotocondutor. O trabalho reportado em [159] apresenta uma antena fotocondutora para geração de sinal contínuo em THz. Expressões analíticas para a fotocorrente e a potência de radiação

são derivadas sob condição da tensão de polarização. Potência típica de saída na ordem de nW é alcançada utilizando potência na ordem de mW no laser de bombeio para geração de sinais com frequências de até 10 THz.

De maneira geral, conclui-se que ainda há diversos desafios para desenvolvimento de antenas aplicadas a comunicações em THz. Foi possível identificar duas vertentes nas pesquisas de antenas nessa nova faixa de frequência: i) desenvolvimento de antenas que são baseadas em variações das técnicas convencionais aplicadas em mmWaves; ii) desenvolvimento de antenas fotocondutoras para geração de sinais contínuos na faixa de THz, utilizando conceitos que relacionam comunicações ópticas, física de plasma e antenas. A Tabela 5 apresenta um resumo dos principais artigos discutidos nesta Seção.

Tabela 5: Estado da arte em antenas em THz.

Referência	Tecnologia	Banda [THz]	Técnica de Fabricação
[144]	SIW	0,124 a 0,158	LTCC
[145]	SIW	0,54 a 0,56	PCB
[146]	Cavidade ressonante	0,125 a 0,144	Impressão 3D metálica e impressão 3D dielétrica com pós-metalização
[147]	SWAA baseado em gapWG	0,134 a 0,148	Micro usinagem
[148]	Cassegrain	0,22 a 0,31	Micro usinagem via CNC
[149]	Guia de ondas	0,22 a 0,30	Micro usinagem
[150]	Arranjo refletor	0,357 a 0,421	Litografia em quartzo e um polarizador de grade de arame implementado em PCB
[151]	Fendas impressas	0,39 a 0,41	CNC e PCB
[152]	FSS de grafeno do tipo passa-faixas	1,6 a 2,2	Crescimento em <i>wafers</i> de silício
[153]	Fendas com cavidades ressonantes	0,87 a 1,13	Empilhamento de várias camadas metalizadas, usando tecnologia de microfabricação
[159]	Antena fotocondutiva	Até 10	Modelo não fabricado

4 Modelagem de canal sem fio

Rausley Adriano Amaral de Souza, Thiago Alencar Moreira de Bairros
 rausley@inatel.br, thiagob@mtel.inatel.br

Para as redes 6G, a modelagem de canal e a análise de suas características devem combinar diferentes tecnologias e disciplinas, tais como: alta mobilidade, múltiplas mobilidades, a incerteza do movimento da trajetória entre transmissão e recepção e a natureza não-estacionária nos domínios do tempo, espaço e frequência [160]. Assim, conduzir pesquisas a respeito do comportamento de canais nas futuras redes 6G é essencial para as análises teóricas, avaliação de desempenho e futura implementação dessas novas redes.

Análises sobre o comportamento de canais que utilizam mmWaves são relatadas em [161–164], por exemplo. Os fenômenos de desvanecimento de curto e longo prazo em ambientes internos são investigados em [161] por meio de medidas na faixa de 126 até 156 GHz em três ambientes específicos: sala, laboratório e sala de conferência. Em [164], os autores apresentam um modelo estatístico 3D espacial para mmWaves em frequências sub-THz para ambientes internos baseado em medidas em 28 e 140 GHz. Durante estas análises são levantadas algumas estatísticas do canal, como, por exemplo, o número de *clusters* no tempo e a potência de *clusters* de 15000 *power delay profiles* (PDP). A partir destas estatísticas, foi demonstrado que os *clusters* no tempo seguem uma distribuição de Poisson, enquanto o número de percursos dentro de um *cluster* segue uma distribuição exponencial. Esse comportamento foi observado em ambientes LOS e NLOS. Diante destes resultados, um simulador para sistemas MIMO é então desenvolvido. Por meio de simulação, o espalhamento angular e o espalhamento por atrasos são obtidos e comparados com os dados empíricos.

Modelos de canais baseados em *ray tracing* [162,165] e o *geometry based stochastic model* (GBSM) [160–163,165–167] são potenciais candidatos para a modelagem de canais em redes 6G devido à possibilidade de modelar o fenômeno de espalhamento do sinal em função da geometria do ambiente de propagação. Um GBSM para aplicações veiculares é apresentado em [166] e os resultados são validados por meio de simulação. Foram analisadas e comparadas as estatísticas variantes dos enlaces medidos em ambos os cenários visando verificar o impacto de grandes obstruções dentro de um ambiente de comunicação *vehicle to vehicle* (V2V) e *vehicle to infrastructure* (V2I) combinado. Em [167], um GBSM 3D em espaço, tempo e frequência é apresentado e algumas propriedades estatísticas do canal são obtidas. Mais especificamente, a função de transferência variante no tempo, a função de correlação em espaço, tempo e frequência, *power spectral Doppler density* (PSDD) e PDP. Para comunicações entre um VANT e o solo [163], um modelo 3D não estacionário baseado em GBSM é desenvolvido. Um fator importante é que este modelo considera a trajetória 3D, a altitude e a velocidade do VANT como parâmetros de análise e possui aplicações em cenários que utilizam mmWaves e mMIMO. São derivadas algumas estatísticas como PDP, correlação da função espaço temporal, espalhamento por atrasos, valor da dispersão de retardo (*root mean square* (RMS) *delay spread*) e PSDD para diferentes frequências e cenários. Os resultados são confrontados por meio de simulações e medidas, estando ambos de acordo com os obtidos de forma analítica.

Nas futuras redes 6G são propostos diferentes cenários de comunicação entre dispositivos, além das transmissões que ocorrem nas redes celulares tradicionais entre equipamentos terrestres, como, por exemplo, o Terminal Móvel, a ERB e os carros, dentro de um novo espaço de integração denominado rede de espaço-ar-solo integrada (*space-air-ground integrated network*) [168], tendo como novas formas de comunicação as transmissões V2V [160–162,166], VANT [160,162,169], comunicações espaciais (satélite) [160,162,169], comunicações

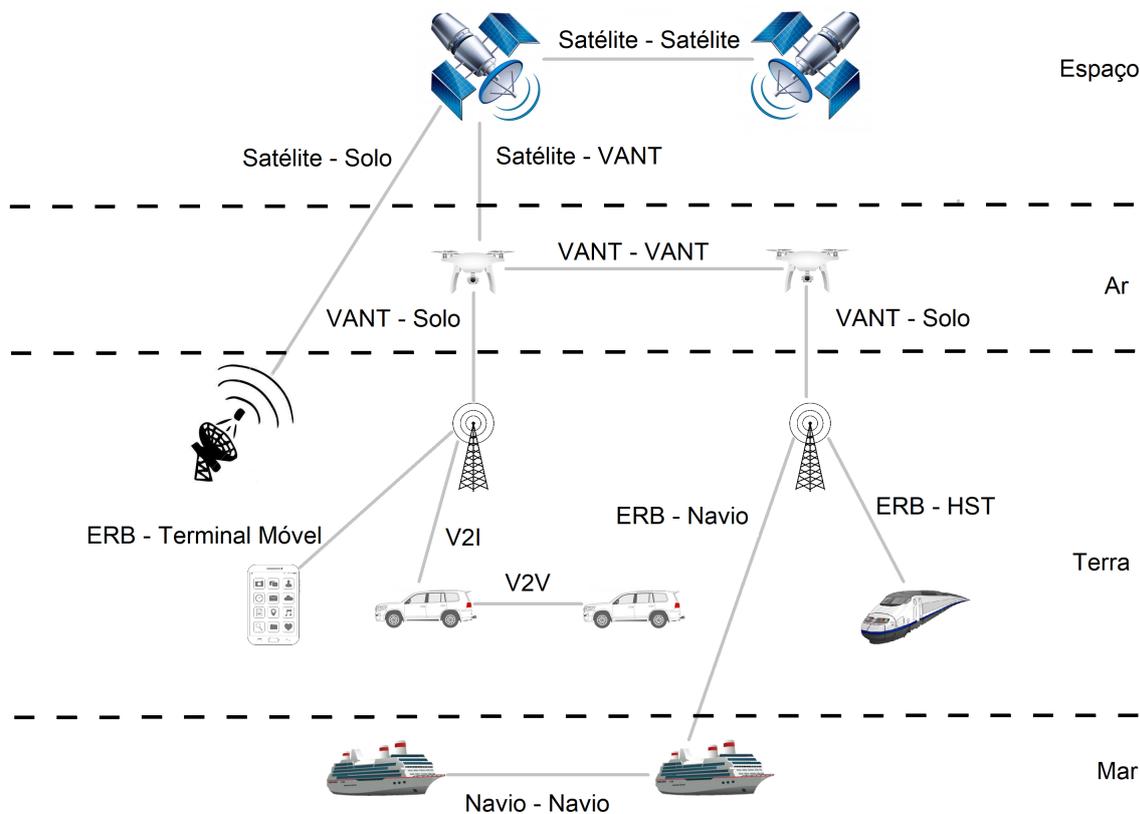


Figura 1: Rede de espaço-ar-solo integrada.

marítimas [160,162], transmissões embaixo d'água por meio de ondas acústicas [162] e em *high speed trains* (HST). A Figura 1 ilustra este novo cenário de transmissão.

Em [161], medidas e análises sobre mmWaves sub-6 GHz para sistemas MIMO com 4 elementos são relatadas. Para um cenário V2I são realizadas medidas, demonstrando por meio dos resultados obtidos, que canais em mmWaves exibem espalhamento moderado de multipercurso e são ideais para comunicação sem fio. Nas faixas de frequências de 28 e 73 GHz sobre veículos com antenas polarizadas e ambiente V2I são efetuadas análises do canal em função da atenuação com a distância (*path-loss*). Campanhas em um cenário V2V em 60 GHz [161] considerando os veículos parados (estáticos) e na faixa de 28 GHz para os veículos em movimento a uma velocidade de 100 km/h também são relatadas. Em [166], é proposto um esquema de retransmissão para enlaces obstruídos por grandes veículos, sendo realizada uma campanha de medidas com uma grande obstrução veicular (ônibus) e mostrando este impacto do ponto de vista de atenuação, dispersão de retardo e espalhamento Doppler. Baseados nos dados medidos, é derivado um modelo GBSM, validado por meio de simulação. Foram analisadas e comparadas as estatísticas variantes dos enlaces medidos em ambos os cenários visando verificar o impacto de grandes obstruções em um cenário V2V e V2I combinado.

Para comunicações VANT para o solo [163] são efetuadas análises de desempenho sobre canais de desvanecimento com duplo espalhamento e sombreamento único e com duplo espalhamento e duplo sombreamento. São obtidas a função densidade de probabilidade, função distribuição cumulativa, duração média do desvanecimento e taxa de nível de cruzamento. São

propostas algumas aproximações para as estatísticas de segunda ordem. Os resultados numéricos das aproximações obtidas se ajustam bem aos resultados analíticos obtidos sobre a forma exata, principalmente para as expressões de taxa de nível de cruzamento. Também é mostrado que com o aumento do número de multipercursos e o grau de severidade do sombreamento ocorre uma melhora do desempenho em termos de estatísticas de segunda ordem, especialmente para menores valores de potência. Outro fator importante mencionado consiste no fato de que com a utilização de um maior número de VANTs pode ocorrer uma melhora no desempenho do sistema.

Outro cenário que é explorado são os ambientes industriais para aplicações *Internet of things* (IoT) industrial [162,168,169]. Este é um ambiente rico em fenômenos de propagação, sendo um destes o fenômeno de espalhamento devido aos diversos objetos metálicos existentes no ambiente [168]. Medidas e análise do canal em 107-109 GHz para ambientes industriais com aplicações IoT industrial são realizadas em [169]. A atenuação com a distância, o fator K (relação entre a energia do percurso dominante e a energia total dos sinais refletidos e espalhados) e os parâmetros de dispersão temporal são investigados. Dois modelos populares de atenuação com a distância para ambientes industriais são utilizados: i) *closed-in free space reference distance* (CI) e ii) *floating intercept* (FI). O atraso em excesso médio e o valor da dispersão de retardo do espalhamento por atraso médio são utilizados para investigar a dispersão do canal. Os resultados de atenuação com a distância mostram que os modelos CI e FI se ajustam bem aos dados em todas as configurações com um expoente de perda de percurso variando entre 1,6 e 2. Os resultados do fator K mostram que o alto valor nos ambientes industriais em bandas sub-6 GHz ainda possui bom desempenho nos ambientes medidos em uma faixa de frequência acima de 100 GHz.

Análises sobre sistemas MIMO são realizadas em [161,165,170] e mMIMO [161–163,165]. Em [161], os autores citam a tecnologia mMIMO como uma das tecnologias fundamentais e determinantes em canais veiculares. Também são relatadas em [161] campanhas de medidas em bandas sub-6 GHz com análises para canais MIMO e mMIMO. São efetuadas também análises sobre mmWaves em um sistema MIMO, analisando as propriedades de frente de ondas esféricas e de não-estacionariedade espacial do canal. Em [170] é proposto um modelo 3D GBSM utilizando um sistema MIMO em conjunto com uma *reconfigurable intelligent surface* (RIS)¹.

As RISs [162,170,171] são consideradas como tecnologia chave para a rede 6G, tendo as vantagens de baixo consumo de potência, baixo custo e facilidade de desenvolvimento e implementação. Entretanto, a modelagem de canal ainda é um caso aberto a ser discutido e analisado. Em [170], um modelo 3D baseado em GBSM sobre um sistema MIMO que utiliza RIS é analisado. O modelo proposto considera o movimento do transmissor, do *cluster* e do receptor. Algumas propriedades estatísticas são obtidas como, por exemplo, autocorrelação temporal, correlação espacial e espalhamento Doppler e a dispersão de retardo. Os resultados obtidos foram validados por meio de simulações. Em [171], o uso de RIS sobre ambientes internos e externos (*indoor* e *outdoor*) em diferentes faixas de frequências (sub-6 GHz até mmWaves) é observado. Análises verificando o desempenho de um simples e um múltiplo sistema assistido sem um caminho direto entre o transmissor e o receptor em um ambiente de propagação foram obtidas. Expressões matemáticas considerando os efeitos de desvanecimento de curto e de longo prazo são derivadas. Dentro desse contexto, dois cenários foram investigados: i) uma RIS e ; ii) múltiplas RISs. Nesse último foi introduzida uma estrutura metálica representando

¹Existem diferentes nomenclaturas para o termo RIS tais como *intelligent reflection surface* ou *intelligent reflecting surface* (IRS), *intelligent walls*, *software-controlled metasurfaces*, entre outras. Sem perda de generalidade, será usado neste trabalho o termo RIS.

uma possível obstrução. Por meio de análises numéricas foi demonstrado que as RISs aparecem como ferramentas atrativas para os sistemas de comunicação internos e externos suprimindo os efeitos destrutivos do ambiente de propagação. Também se conclui que a utilização de múltiplas RISs pode ser uma solução para o problema de bloqueio nas redes 6G.

Outra forma de combater os efeitos do canal é apresentada em [172], que investiga o uso de esquemas de transmissão e equalização adaptativa para combater os efeitos de canais com desvanecimento rápido e com alta mobilidade. São derivados canais de desvanecimento rápido que permitem uma equalização com um baixo valor de erro quadrático médio mínimo. Partindo do princípio de que a informação do estado do canal é conhecida pelo transmissor, uma técnica de transmissão adaptativa com símbolos pré-codificados que melhoram a relação sinal ruído na saída do receptor é então proposta. Os resultados de simulação demonstraram que o esquema de transmissão adaptativa melhora de forma efetiva o desempenho em canais NLOS.

Com o aumento do número de bandas de frequência, cenários, número de antenas e a quantidade de dados trafegados dentro de uma rede 6G, é inegável que resultará em um aumento do tempo de processamento destes dados por meio dos atuais métodos existentes. Alguns trabalhos preliminares [160,162,168,173] relatam que as técnicas baseadas em IA como ML e *deep learning* têm grande potencial de otimização dos dados em tempo real para análise e determinação dos parâmetros dos canais de comunicação sem fio. Ao se utilizar as técnicas de IA, algumas estatísticas do canal podem ser previstas segundo as informações iniciais fornecidas do comportamento do canal no tempo e do movimento relativo entre o transmissor e o receptor. Entretanto, esta direção necessita de futuras pesquisas adicionais.

A diversidade de cenários previstos para a faixa de mmWaves e, principalmente, para os futuros cenários das redes 6G, certamente levará a uma variedade de condições de propagação que são menos prováveis de serem acomodadas pelos modelos clássicos ou convencionais de desvanecimento. As bem conhecidas distribuições Rayleigh, Hoyt, Rice, Nakagami- m , Weibull certamente são aplicáveis, mas podem não ter flexibilidade suficiente para acomodar as situações mais complexas. Alguns modelos mais flexíveis, como κ - μ , η - μ e α - μ podem servir a esse propósito, mas, novamente, podem não ser capazes de modelar com fidelidade o comportamento do canal de comunicação. Algumas pesquisas vêm avaliando o uso de distribuições multiparamétricas para modelar dados de campo nas frequências em mmWaves [174–176]. Porém, os resultados obtidos em um ou outro caso não conseguiram reproduzir alguns efeitos peculiares observados no comportamento do sinal nesta faixa de frequência [174].

Um modelo físico de desvanecimento mais geral, flexível e unificador foi proposto em [177], a distribuição α - η - κ - μ . Este modelo contempla, teoricamente, todos os fenômenos relevantes de propagação de curto prazo, como: i) não linearidade do meio; ii) potência das ondas espalhadas; iii) potência das componentes dominantes, e; iv) *clusters* de multipercursos. O modelo foi descrito por meio da função densidade de probabilidade conjunta da envoltória e fase do sinal. Devido à sua característica multiparamétrica, essa distribuição é capaz de acomodar um grande número de cenários de desvanecimento. Pode-se afirmar que este modelo engloba todos os cenários de desvanecimento mais relevantes encontrados na literatura. Além disso, pode ser aplicada para melhorar os ajustes em regiões específicas nas funções estatísticas, por exemplo, na cauda da função distribuição cumulativa do sinal. Outra característica distinta desta distribuição é sua capacidade inerente de reproduzir a multimodalidade, como explorado em [177, Figs. 2, 3, 4, 5, 6 e 7].

Por exemplo, a recente padronização de porções da banda mmWaves para a operação da rede 5G exigiu mais pesquisas sobre como o desvanecimento de curto prazo se comporta naquela parte inexplorada do espectro.

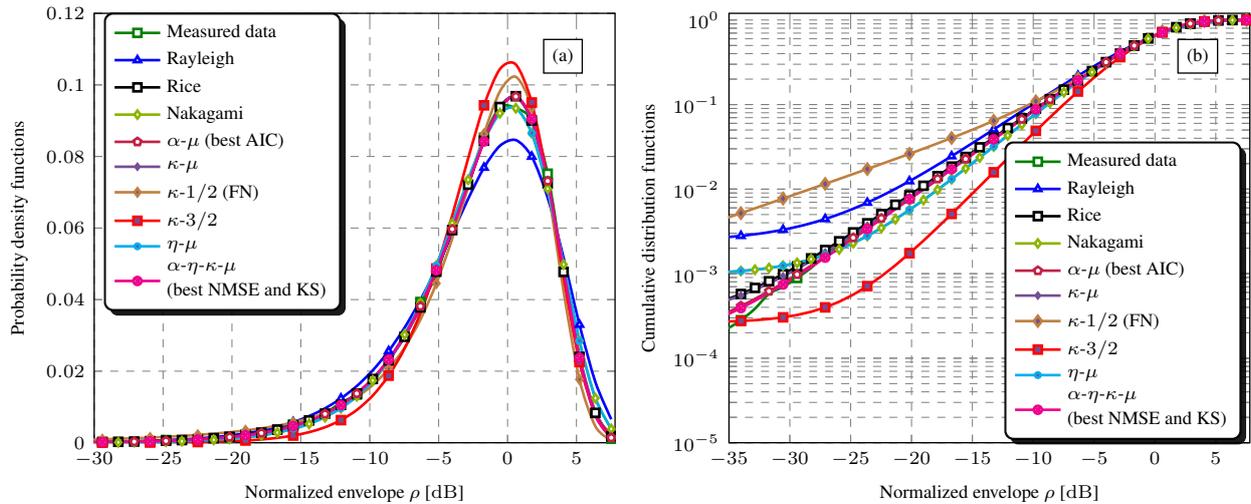


Figura 2: Funções densidade de probabilidade (a) e funções distribuição cumulativas (b) estimada e teóricas na frequência de 28 GHz [178].

Com esse objetivo, em [178] é relatada uma campanha de medição minuciosa conduzida em um ambiente interno caracterizado por um rico espalhamento multipercursos. Particularmente, as medições foram realizadas em uma variedade de cenários, sob condições LOS e NLOS, para uma ampla gama de frequências, a saber, de 25 a 40 GHz - um intervalo de 15 GHz - portanto, incluindo 26, 28 e 39 GHz. Estatísticas de primeira e segunda ordem de modelos representativos de desvanecimento, nomeadamente Rayleigh, Rice, Nakagami, α - μ , η - μ , κ - μ e α - η - κ - μ foram investigados. A Figura 2 mostra, a título de exemplo, os ajustes dos respectivos modelos teóricos e os dados empíricos na faixa analisada.

Outra campanha de medição completa em um ambiente interno na banda mmWaves é reportada em [179] com o objetivo de caracterizar o canal de desvanecimento de curto prazo em termos de suas estatísticas de ordem superior. As medições são realizadas em uma variedade de cenários, com frequências variando de 55 GHz a 65 GHz, em LOS e condições NLOS, e combinações de polarizações horizontais e verticais no transmissor e no receptor. Vários modelos de desvanecimentos são testados, nomeadamente Rayleigh, Rice, Nakagami- m , α - μ , κ - μ , η - μ e α - η - κ - μ . As principais estatísticas de segunda ordem em análise são a taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento, ambos dados por unidade de distância. A Figura 3 exemplifica alguns resultados reportados em [179]. Especificamente, os ajustes referem-se às taxas de cruzamento de nível teóricas e empírica para diversos modelos de desvanecimento.

Diante do exposto ao longo desta seção, é possível afirmar que uma visão detalhada em termos do estado da arte com relação à modelagem de canais, aplicações, análise, tecnologias, cenários emergentes e diferentes faixas de frequências para as redes 6G é um tema ainda a ser explorado, seja nas propostas teóricas, seja em análises estatísticas a partir de campanhas de medidas. As estatísticas empíricas do canal, obtidas por meio de campanhas de medidas, em conjunto com os modelos teóricos de canais (determinísticos ou estocásticos) são imprescindíveis para uma melhor estimativa do comportamento dos diferentes cenários e das diferentes tecnologias aplicadas, auxiliando os engenheiros e pesquisadores no planejamento, projeto, análise e otimização das futuras redes 6G.

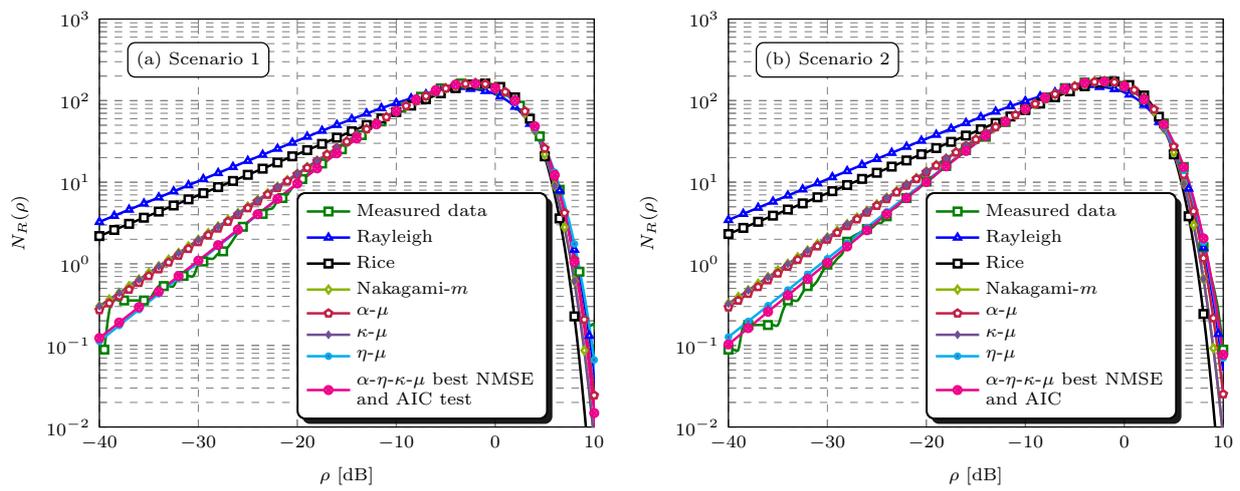


Figura 3: Taxa de cruzamento de nível na frequência de 60 GHz [179].

5 Evolução das redes ópticas

Eduardo Saia Lima, Letícia Carneiro de Souza, Luiz Augusto Melo Pereira e Ramon Maia Borges

elima@get.inatel.br, leticiacarneiro@get.inatel.br, luiz.augusto@dtel.inatel.br,
ramonmb@inatel.br

Ao longo dos últimos 30 anos, a capacidade de transmissão de uma fibra óptica aumentou significativamente. Por exemplo, a taxa de transmissão de dados em uma fibra óptica considerando um canal de portadora única aumentou de 2,5 Gbit/s em 1989 para 400 Gbit/s em 2019. Considerando múltiplos canais, os autores em [180] atingiram 150 Tbit/s em uma *single-mode fiber* (SMF) em um enlace de 40 km. Tal crescimento é oriundo da demanda de dados das redes móveis e *passive optical network* (PON), as quais tendem a crescer ainda mais com a maturidade da rede 5G e surgimento da rede 6G. As principais tecnologias responsáveis pelo aumento da taxa de dados nas fibras ópticas incluem a evolução dos *electro-optic modulator* (EOM), detecção óptica, códigos de correção de erros *forward error correction* (FEC), uso de modulações ópticas como *differential phase-shift keying* (DPSK) e *differential quadrature phase-shift keying* (DQPSK), *optical digital signal processing* (oDSP), *polarization division multiplexing* (PDM), evolução das fibras ópticas quanto a atenuação, dispersão e área efetiva, utilização de *Qquadrature amplitude modulation* (QAM) de alta ordem, bem como a utilização de um elevado número de canais em uma única fibra óptica por meio do *dense wavelength division multiplexing* (DWDM) [181]. Dessa forma, pesquisas visando a melhoria das fibras ópticas utilizadas atualmente, bem como o desenvolvimento de novas fibras para atender as diferentes demandas das redes 6G são essenciais para implementação de tal sistema. Esta Seção foca em apresentar a evolução das fibras convencionais e apontar novos tipos de fibra para aplicações de altas taxas e baixa latência, além de tratar das topologias de rede que empregam fibra óptica.

5.1 Fibras ópticas

As redes de comunicações ópticas oferecem suporte a uma ampla gama de serviços de comunicação, incluindo *radio access network* (RAN), redes residenciais, redes centrais e metropolitanas. Além disso, o advento da rede 5G e o surgimento da rede 6G trazem novos requisitos para as redes ópticas de longo e curto alcance, principalmente, prover elevadas taxas de transmissão e comunicações confiáveis de baixa latência. Dessa forma, a tecnologia de desenvolvimento e fabricação de fibras ópticas evolui continuamente, visando a melhoria das fibras ópticas para atender as diferentes demandas das redes futuras [182].

A otimização das fibras já utilizadas em comunicações ópticas, como a SMF, concentra-se em aumentar a área efetiva e diminuir a atenuação/km das fibras, visto que problemas como dispersão cromática e *polarization-mode dispersion* (PMD) podem ser facilmente compensados utilizando processamento digital de sinais *digital signal processing* (DSP). Ademais, alguns estudos recentes mostram que a capacidade de transmissão utilizando SMF está tendendo rapidamente ao limite fundamental de Shannon [183]. Para superar esse fator, novas tecnologias baseadas em *space-division multiplexing* (SDM) serão necessárias para fornecer uma solução ao crescimento da demanda por taxa de dados, elevando significativamente a capacidade em cada fibra óptica para atender as redes 6G [184]. Nesse contexto, pode-se destacar o uso de *multicore fiber* (MCF) e *few-mode fibers* (FMF). Adicionalmente, a utilização de *multimode fiber* (MMF) tem sido proposta para aplicações de curto alcance, devido a difusão da técnica

de *mode-division multiplexing* (MDM) bem como a utilização de *hollow-core fibers* (HCF) para aplicações que demandem baixa latência em redes 6G.

5.1.1 Fibras de Baixa Atenuação e Área Efetiva Elevada

Com o advento da detecção coerente e técnicas de DSP, os efeitos de dispersão cromática e PMD já não impactam significativamente o desempenho dos sistemas ópticos atuais. Dessa forma, os principais parâmetros a serem otimizados em fibras SMF convencionais, considerando transmissão em longas distâncias, são a atenuação e a área efetiva. Com fibras de baixa atenuação pode-se aumentar o espaçamento e até eliminar amplificadores ópticos, aumentando a *optical signal-to-noise ratio* (OSNR) e, por consequência, elevando significativamente o fator Q, principalmente para enlaces longos. Além disso, o aumento da área efetiva impacta nos limiares de efeitos não-lineares, possibilitando que os enlaces operem com maiores potências ópticas. Assim, a combinação de fibras com baixa atenuação operando com potência ópticas elevadas acarretam em enlaces com maior OSNR e maior fator Q [185].

A atenuação total de uma fibra óptica depende de fatores de perda intrínseca, como espalhamento Rayleigh (α_{RS}), absorções em infravermelho (α_{IR}) e ultravioleta (α_{UV}), de fatores extrínsecos, como absorção devido a metais de transição (α_{TM}), absorção devido aos íons de OH (α_{OH}), além de espalhamento devido a imperfeições do guia de onda (α_{IM}) e perdas ocasionadas por macro e micro-curvaturas no cabo óptico (α_{BL}) [186]. Para os fatores extrínsecos, as absorções devido a contaminantes, como transição metais e íons OH podem ser amplamente eliminados nos processos de fabricação de fibras atuais, por meio da otimização do processo de fabricação de pré-formas, aplicando técnicas de deposição de vapor químico, como *Outside Vapour deposition* (OVD), *Vapour Axial deposition* (VAD), *Modified Chemical Vapour deposition* MCVD e *Plasma-activated Chemical Vapour deposition* PCVD [182].

Quanto as perdas causadas pela imperfeição do guia (birrefringência), essas são oriundas da tensão residual que é induzida durante o processo de fabricação, resultando em uma flutuação da geometria no núcleo da fibra. Os autores em [187] desenvolveram uma fibra óptica com seção transversal homogeneamente viscosa utilizando dois tipos de materiais dopantes (GeO e F) e que apresentam efeitos diferentes na viscosidade do material. Dessa forma, a tensão na fabricação pode ser reduzida, minimizando as imperfeições e atenuações causadas por imperfeições do núcleo da fibra. Em relação ao espalhamento Rayleigh, este pode ser minimizado por meio da redução do material GeO₂ na dopagem da fibra, visto que a perda relacionada ao espalhamento é proporcional a concentração de GeO₂ no núcleo da fibra [188]. Portanto, diversos trabalhos têm reportado a utilização de fibras ópticas com núcleo de sílica pura para reduzir a atenuação causada por espalhamento Rayleigh [185,189]

As perdas relacionadas a macro e micro curvaturas são fatores importantes na implementação de um enlace óptico, principalmente para fibras com grande área efetiva. Dessa forma, faz-se necessário a otimização do perfil do índice de refração do núcleo, a fim de minimizar a atenuação causada por curvaturas. No entanto, alterações no perfil do índice de refração do núcleo também impactam na área efetiva e no comprimento de onda de corte do guia (λ_c). Por exemplo, para uma fibra óptica padrão com índice degrau, a área efetiva pode ser elevada aumentando o raio do núcleo, fazendo com que a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca (Δn) tenha que diminuir para manter o λ_c dentro da janela empregada em enlaces. Se o λ_c da fibra puder se mover para comprimentos de onda mais longos, o desempenho das curvaturas pode ser otimizado, além de aumentar a área efetiva do modo fundamental LP₀₁. Neste caso, a fibra não é mais uma SMF e torna-se uma fibra de poucos modos devido ao

surgimento de outros modos propagantes.

Progressos significantes no desenvolvimento de fibras de perda ultrabaixa e de elevada área efetiva têm sido realizados nos últimos anos, especialmente com a utilização de fibras ópticas com núcleo de sílica pura. Em 2015, os autores de [185] projetaram e caracterizaram uma fibra óptica com núcleo de sílica pura com atenuação de 0,1460 dB/km e $148 \mu\text{m}^2$ de área efetiva, além de apresentar redução de perda nas emendas. Em 2017, os autores reportaram o desenvolvimento de uma fibra óptica com área efetiva de $147 \mu\text{m}^2$ e perda de 0,1419 dB/km. A fibra também apresentou baixa perda por curvatura devido a otimização do material de revestimento primário [189]. Em paralelo aos esforços de grupos de pesquisa em fibra de baixa perda, a indústria também apresenta avanços significativos, tanto na redução da atenuação quanto no aumento da área efetiva das fibras ópticas comerciais. A Tabela 6 apresenta as principais fibras de baixa perda comerciais, de acordo com os padrões da ITU [182]. Nota-se que as fibras com núcleo de sílica pura apresentam as menores atenuações, com destaque para a fibra G.654.D que apresenta 0,15 dB/km de atenuação e $150 \mu\text{m}^2$, enquanto que as SMFs convencionais apresentam, tipicamente, 0,2 dB/km de atenuação e $80 \mu\text{m}^2$ de área efetiva.

Tabela 6: Fibras comerciais de baixa atenuação de acordo com os padrões da ITU.

Parâmetro	G.652	G.654.B	G.654.D	G.654.E
Atenuação (dB/km)	0,18	0,15	0,15	0,17
Área efetiva (μm^2)	82	112	150	125
Dispersão (ps/nm.km)	17	21	21	21
Material de dopagem	GeO ₂	Sílica	Sílica	Sílica

5.1.2 Fibras Multi-núcleo

A SDM em fibras ópticas foi proposta pela primeira vez em 1980 e tem sido amplamente investigada nos últimos anos [190]. Inicialmente, a tecnologia para fabricação não era madura e os processos de produção eram caros e custosos. Ao longo dos últimos anos, os métodos de fabricação de fibras e dispositivos de ópticos evoluíram e novos tipos de fibras ópticas baseadas em SDM têm sido propostas, como a *photonic-crystal fiber* (PCF) e a MCF [184]. As MCFs surgiram com o objetivo de aumentar a capacidade de dados transmitidos em uma fibra óptica, aumentando o número de núcleos em cada fibra. Dessa forma, as MCFs operando em conjunto com formatos de modulação espacial multidimensional e processamento digital no receptor permitem aumentar o limite de capacidade explorando o espaço, comprimento de onda, tempo, amplitude, polarização e fase [191].

A utilização de fibras multi-núcleo apresenta diversas vantagens para atender as demandas dos sistemas ópticos atuais e futuros. No entanto, o método de fabricação das MCFs é de suma importância para cumprir os requerimentos dos enlaces ópticos. Neste contexto, um dos principais desafios tecnológicos na fabricação de MCFs é minimizar o *crosstalk* entre os múltiplos núcleos, fornecendo um alto nível de isolamento. Dessa forma, a distância entre os núcleos, a distribuição e a quantidade de núcleos são parâmetros fundamentais para controlar o nível de *crosstalk* entre os modos LP de cada núcleo. Tipicamente, os projetos são realizados numericamente e focam em determinar a distribuição do modo fundamental ao longo da seção

transversal do guia, a densidade de potência do modo LP e as perdas de energia ocasionadas [191]. A fabricação de MCFs é baseada na tecnologia *stack-and-draw* microestruturada, a qual é bastante flexível e habilita fabricar fibras com características diferentes utilizando os mesmo equipamentos empregados na manufatura de fibras convencionais [192].

De maneira complementar, o projeto e fabricação de lasers e amplificadores ópticos multi-núcleo são de grande importância, visto que tais componentes devem atender os múltiplos núcleos com baixo acoplamento. Nesse contexto, diversos avanços foram alcançados nos últimos anos. Em [193], os autores demonstraram o funcionamento de um laser multi-núcleo. O laser apresenta 19 núcleos que operam em *continuous wave* (CW) em 1030 nm com alguns mW de potência óptica cada em cada feixe. Em relação aos amplificadores ópticos, os autores em [194] projetaram e construíram um amplificador óptico multi-núcleo de fibra dopada com Érbio, denominado de *erbium-doped fiber amplifier* (EDFA), para aplicação de sistemas SDM. O amplificador possui 7 núcleos independentes, permitindo que os mesmos recebam o bombeio individualmente ou simultaneamente. O ganho alcançado foi de 25 dB para cada núcleo, operando na banda C (1550 nm) com banda em torno 40 nm.

A respeito da utilização de fibras multi-núcleo para aplicações atuais e emergentes, taxas de bits significativas foram alcançadas em *backbones* ópticos e redes de acesso 5G com enfoque em redes 6G. O atual recorde mundial do produto taxa de dados x distância foi atingido pelos autores em [195], dobrando o recorde anterior. Os autores utilizaram uma fibra multi-núcleo para transmitir 172 Tbit/s ao longo de 2040 km. Em aplicações para redes 5G, os autores de [196], fizeram uma transmissão em 26 GHz utilizando a técnica de formatação de feixe empregando *optical ring resonators* (ORR) e fibras multi-núcleo. A rede 5G com formatação de feixe 4x1 operando em 26 GHz propiciou taxas de até 16,8 Gbit/s com controle e direcionamento de feixe de 20°. No mesmo contexto, os autores em [197] demonstraram a transmissão de um sinal 5G NR em ondas milimétricas em um *fronthaul* baseado em *analog radio-over-fiber* (A-RoF), utilizando uma fibra óptica com 7 núcleos e processamento dos sinais em tempo real. A fibra MCF habilitou a rede de acesso baseada em multiplexação por divisão espacial transmitir sinais de *downlink* e do oscilador de referência em núcleos distintos, utilizando o mesmo comprimento de onda para realizar o processamento dos sinais recebidos. Em suma, o sistema utilizou sinais 5G NR de até 800 MHz de banda, transmitidos em um enlace A-RoF composto por uma fibra de 7 núcleos com taxas de 1,4 Gbit/s e *bit error rate* (BER) abaixo dos limites dos códigos corretores. No contexto de *backbones* ópticos, os autores em [198] apresentaram a expressiva taxa de dados de 118,5 Tbit/s utilizando 316 km de fibra óptica multi-núcleo. A fibra empregada contém 4 núcleos e apresenta diâmetro compatível com SMF 125 μm^2 além de atenuação de 0,2 dB/km. Cada núcleo foi responsável por transmitir 116 canais *wavelength division multiplexing* (WDM), espaçados de 37,5 GHz, operando entre 1.529,1 e 1.563,5 nm, sendo cada canal individualmente modulado com 36 Gbaud/s nas duas polarizações com sinais 16QAM.

5.1.3 Fibras de Poucos Modos

MDM é uma técnica aplicada em sistemas ópticos com a finalidade de aumentar a taxa de transmissão, sem a necessidade de aumentar o número de comprimentos de onda ou o número de fibras. Basicamente, a ideia é utilizar diferentes modos guiados do mesmo λ , tipicamente de uma fibra de poucos modos ou multimodo, como diferentes canais de transmissão. As principais diferenças entre as fibras MMF e FMF são a quantidade de modos propagantes e o número de canais disponíveis. A FMF transporta algumas dezenas de modos, sendo cada modo tratado

individualmente como um canal de dados MDM. Por outro lado, a MMF carrega centenas de modos que servem como um único canal de dados em um sistema MMF [199].

Além de aplicações MDM, a utilização de fibras de poucos modos para SDM recebeu interesse considerável nos últimos anos para aumentar a capacidade dos sistemas ópticos atuais e futuros. Nesse contexto, a FMF pode operar com diversos caminhos espaciais, em uma fibra com diâmetro de revestimento convencional ($125\ \mu\text{m}$), ao custo de um aprimoramento das técnicas de DSP utilizadas na recepção para desacoplar e avaliar os diferentes modos após a transmissão. A transmissão de vários modos em uma única fibra apresenta algumas vantagens mas tal sistemas torna-se suscetível a efeitos de transmissão que tipicamente não ocorrem em fibras monomodo, como *differential mode group delay* (DMGD) e *mode dependent loss* (MDL). Como os canais espaciais coexistem no mesmo núcleo, ocorre uma mistura entre os modos durante a propagação. Tais problemas podem ser resolvidos aplicando técnicas de DSP, que são tipicamente empregadas em sistemas de comunicação sem fio que utilizam MIMO [200].

No contexto da utilização de fibras de poucos modos para as redes de acesso 5G e 6G, os autores de [201] propuseram uma arquitetura de *fronthaul* baseado em uma rede de acesso centralizada utilizando A-RoF para atender sistemas MIMO em redes 5G de alta capacidade de transmissão. A arquitetura proposta utiliza geração óptica de sinais em ondas milimétricas por meio do método heteródino, além de MDM e WDM. Além de aplicações em rede de acesso, diversos trabalhos relatam a utilização de FMFs para *backbones* de alta capacidade. Por exemplo, em [202] os autores avaliaram experimentalmente a utilização de uma fibra de poucos modos para enlaces ópticos de curta (30 km) de longa distância (1045 km). Para o primeiro caso, o sistema utilizou comprimentos de ondas alocados nas bandas ópticas C e L, resultando em 283 Tbit/s. Nesse caso, cada modo atingiu aproximadamente 90% da taxa de bits relatada em fibras ópticas monomodo utilizando a mesma banda. O segundo experimento apresentou redução na taxa devido aos efeitos de DMGD e MDL ao longo do enlace de 1.045 km, resultando em 159 Tbit/s. Apesar da redução, demonstrou-se a aplicabilidade desta solução para enlaces de curta e de longa distância.

5.1.4 Fibras de Núcleo Oco

As HCF são caracterizadas por possuírem seu núcleo preenchido por ar e envolto por uma casca de vidro micro estruturada, o que permite um alto nível de confinamento de luz. Dessa forma, apresentam características como insensibilidade à variação de temperatura, alto limiar de potência, baixa não-linearidade e baixa latência, as quais as tornam extremamente atrativas para aplicações de sensoriamento de alta resolução, transmissão de altas potências e, principalmente, transmissão de dados de alta velocidade. Dessa forma, têm-se considerado a implementação das HCFs nas futuras redes de telecomunicações de alta capacidade. Porém, alguns dos principais desafios na incorporação das HCFs às redes de fibra óptica existentes estão relacionados à sua atenuação e interconexão com as SMF, as quais constituem o núcleo das redes atuais [203].

As primeiras HCFs desenvolvidas apresentavam uma atenuação de aproximadamente 7,7 dB/m [204], que é impraticável nos sistemas de telecomunicações atuais. Porém, novas técnicas possibilitaram o desenvolvimento de HCFs com diferentes mecanismos de guiamento, como as fibras Bragg, *photonic bandgap fibers* (PBGFs), *antiresonant fibers* (ARFs) e *nested antiresonant nodeless fibers* (NANFs) [203]. Por exemplo, em 2005 foi desenvolvida uma PBGF com atenuação de 1,2 dB/km em 1620 nm [205]. Recentemente, uma NANF com atenuação de apenas 0,28 dB/km entre 1510 e 1600 nm foi apresentada, que uma atenuação na ordem de

grandeza das SMFs [206].

A interconexão das HCFs e SMFs é de suma importância para evitar maiores perdas no sistema óptico. Utilizar lentes com alinhamento preciso não é uma solução de longo prazo viável devido a estabilidade limitada. Conectores também são impraticáveis, já que a HCF estaria exposta à danos mecânicos ou ambientes úmidos. Portanto, uma conexão permanente, hermética e com baixa perda de inserção e de baixa perda por retorno é exigida [203]. Uma das opções é a emenda por fusão por meio de técnicas avançadas. Em [207] e [208], os autores utilizaram técnicas de fusão que resultaram em perdas de 1,3 e 0,73 dB, respectivamente. Também pode ser feita uma interconexão baseada em arranjos de fibras, tal como relatado em [209], a qual apresentou perda menor do que 0,5 dB.

Esses avanços recentes possibilitaram o uso de HCFs em sistemas ópticos de transmissão de dados. Por exemplo, em 2017, foi apresentada a primeira transmissão WDM multi-terabit/s utilizando um enlace de ARF de 270 m [210]. Em 2019, os autores de [211] demonstraram uma transmissão de sinais de 50 Gbit/s com modulação *on-off keying* (OOK) e 100 Gbit/s com modulação *4-level pulse amplitude modulation* (4PAM) ao longo de 1 km de NANF, alcançando uma largura de banda de 700 nm com atenuação de 6,6 dB/km em 1550 nm. Em aplicações DWDM, foi demonstrado uma transmissão de sinais de 10 Gbit/s em um cabo de HCF com latência 31% menor se comparado com cabos de fibras ópticas de núcleo sólido [212]. Nesse mesmo contexto, os autores apresentaram um experimento utilizando 61 canais com modulação *polarization-multiplexed quadrature phase-shift keying* (PM-QPSK) transmitidos por um enlace de NANF de 618 km [213].

5.2 Topologias de rede

A crescente demanda por acesso banda larga impulsiona o desenvolvimento de sistemas de comunicações com elevada taxa de transmissão, confiabilidade e curto tempo de resposta [214]. A evolução de tecnologias fotônicas têm contribuído significativamente com a utilização das comunicações ópticas em diversas redes. Esta tendência se estende até as redes de acesso, dando origem às chamadas *fiber-to-the-everything* (FTTX), alguns exemplos são *fiber-to-the-home* (FTTH), *fiber-to-the-building* (FTTB), *fiber-to-the-cabinet* (FTTC), entre outras, tipicamente, estas conexões são realizadas empregando PON.

As PONs empregam uma topologia ponto-multiponto para maximizar a cobertura com a vantagem de não requerer elementos ativos ao longo dos enlaces. A Figura 4 ilustra a arquitetura básica de uma PON, que é composta por, *central office* (CO), *optical line terminal* (OLT), *optical network unit* (ONU), *optical distribution network* (ODN). A OLT, instalada na CO, provê a interface entre a PON e a rede de *backbone*. A ONU é um dispositivo tipicamente localizado na instalação de distribuição ou próximo do usuário final. Por sua vez, a ODN realiza a interface entre as OLTs e ONUs. As ODNs realizam a distribuição e coleta dos usuário finais por meio de um nó remoto, onde fica disposto os divisores e combinadores passivos.

As PONs demandam técnicas que permitam o múltiplo acesso de usuários, visto que utiliza a topologia ponto-multiponto. Logo, algumas técnicas são exploradas para garantir o múltiplo acesso em PONs, como *time division multiplexing* PON (TDM-PON) [215], WDM-PON [216], *optical code division multiplexing* PON (OCDM-PON) [217] e *time and wavelength division multiplexing* PON (TWDM-PON) [218]. Em redes que empregam a tecnologia TDM-PON, a banda disponível é compartilhada entre todos os usuários e a cada usuário é atribuído um determinado intervalo de tempo. Já na opção *wavelength division multiplexing* PON (WDM-PON), a cada usuário é atribuindo um comprimento de onda. Algumas outras técnicas permitem apro-

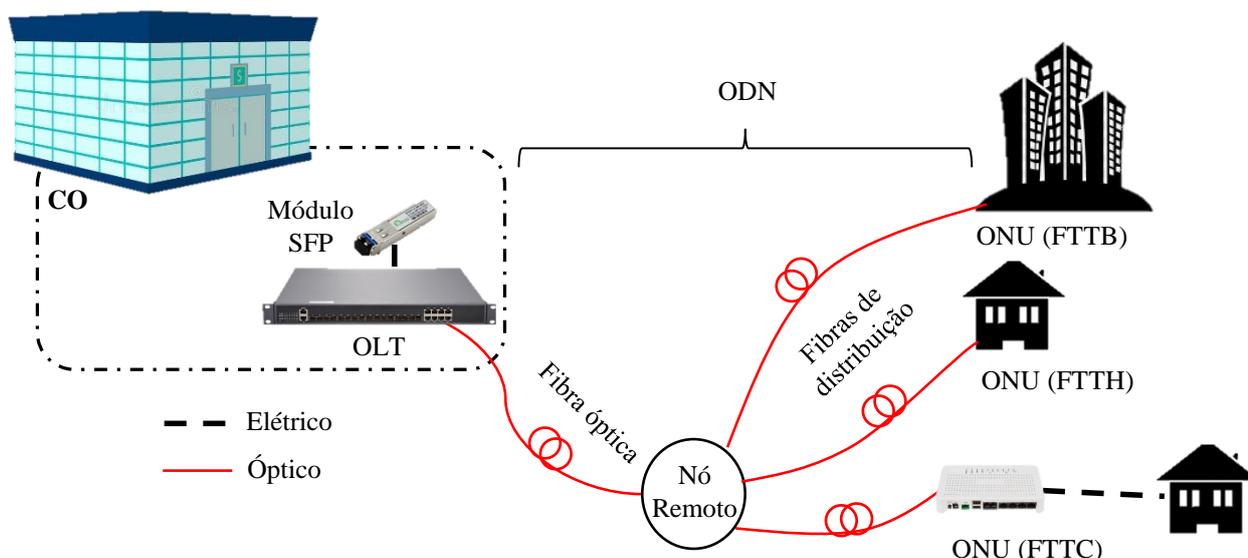


Figura 4: Arquitetura básica de uma rede PON.

veitar os recursos de tempo e frequência como é o caso do OCDM-PON e TWDM-PON. No OCDM-PON, são atribuídos códigos para cada usuário, permitindo a sobreposição dos recursos de tempo e frequência sem que haja interferências entre usuários. Já o esquema TWDM-PON oferece uma solução híbrida, com o objetivo de extrair vantagens em utilizar tanto os recursos de tempo quanto os de frequência.

Diversas arquiteturas para PON foram desenvolvidas pela ITU e pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE). Dentre as arquiteturas para PON desenvolvidas, existem variações nos modos de operação e soluções técnicas utilizadas, as quais deram origem à classificação das PONs em grupos distintos. Por exemplo, classifica-se em um grupo as PONs que operam com *asynchronous transfer mode* (ATM) e em um segundo grupo estão contidas as redes PON síncronas, baseadas na tecnologia *ethernet* PON (EPON). No grupo das redes PON assíncronas, as mais populares e bem aceitas são as do tipo *asynchronous transfer mode* PON (APON), *broadband* PON (BPON) e *gigabit* PON (GPON).

Além da separação em relação ao modo de operação, as PONs são comumente classificadas em gerações. Assim como ocorre nas gerações de sistemas de comunicações móveis, cada geração das PONs visa, principalmente, prover melhorias nas taxas de transmissão e na experiência de uso da rede para o usuário final. A primeira geração refere-se às PON que atualmente estão implementadas e em uso. A segunda geração é conhecida como *next-generation* PON 1 (NG-PON1) e a terceira como *next-generation* PON 2 (NG-PON2). A primeira geração utiliza técnicas de múltiplo acesso por divisão no tempo e é capaz de fornecer taxas de transmissão *downstream* de 1 Gbit/s e 2,4 Gbit/s para os modelos EPON e GPON, respectivamente [219]. Na segunda geração das redes PON, é previsto um aumento considerável nas taxas de transmissão de dados, possibilitando comunicações de na ordem de 10 Gbit/s. Na NG-PON1 definiu-se duas opções de atualização para o EPON e GPON, as quais foram denominadas de XG-EPON e XG-GPON, respectivamente. Estas atualizações visam melhorias na capacidade da rede, aumentando a taxa de transmissão para o usuário final, ao passo que a compatibilidade com redes EPON e GPON legadas serão mantidas, visando proteger o investimento dos provedores na implantação de PONs [220].

As tendências de aumento explosivo nas taxas de transmissão demandada pelo surgimento

de novas aplicações e serviços impulsionam o desenvolvimento contínuo das rede PONs. Isto implica em esforços para desenvolver e padronizar novos estágios desta rede óptica, visto que é muito provável que as tecnologias empregadas no primeiro estágio, ou segunda geração, atinjam um limite máximo de vazão incapaz de atender as expectativas futuras, principalmente em relação à taxa de transmissão e qualidade de serviço. Desta forma, para as redes NG-PON2, discute-se diversas soluções técnicas promissoras para compor as futuras redes ópticas passivas [221,222].

Algumas tecnologias de multiplexação estão sendo consideradas para NG-PON2 para fornecer uma transmissão *downstream* de 40 Gbit/s e transmissão *upstream* de 10 Gbit/s. As tecnologias de multiplexação acima mencionadas, ou seja, multiplexação no tempo, frequência, por códigos ou híbridas, foram consideradas para esta geração. Adicionalmente, a tecnologia *orthogonal frequency division multiplexing* PON (OFDM-PON) também recebeu atenção. Frente as diversas opções disponíveis, observou-se que as técnicas de multiplexação híbridas possuem capacidade simultânea para mitigar desvantagens e aproveitar os benefícios de cada método de multiplexação específico. Dentre as opções híbridas consideradas, destacam-se os seguintes tipos: TDM/WDM-PON; OFDM/TDM-PON; OFDM/WDM-PON; OCDM/TDM-PON; OCDM/WDM-PON. A *full service access network* (FSAN) definiu o método TWDM-PON como a tecnologia base para realização de múltiplo acesso dos usuários em redes NG-PON2 [218]. Tal decisão levou em consideração a eficiência energética, desempenho do sistema e custo de implementação [218,223]. Embora a escolha da tecnologia englobe as considerações acima, ainda existem diversos desafios a serem superados, como aumento do alcance e da capacidade do sistema, a redução do custo de implementação e aumento da eficiência energética. Isto posto, percebe-se que existem diversos aperfeiçoamentos que podem ser empregados visando superar os desafios mencionados.

5.2.1 TWDM-PON

Na arquitetura TWDM-PON, investiga-se algumas tecnologias voltadas para a transmissão via fibras ópticas que permitam aumentar a banda de transmissão em relação a NG-PON1. Em redes NG-PON2, espera-se alcançar taxas de transmissão simétricas no sentido de *downstream* e *upstream* de pelo menos 40 Gbit/s ou ainda taxas assimétricas de 40 e 10 Gbit/s em transmissões *downstream* e *upstream*, respectivamente. Apesar do TWDM-PON permitir aumentar a capacidade e escalabilidade da rede, esta tecnologia ainda é considerada como uma solução temporária devido, principalmente, a desafios e custo de implementação. Por exemplo, as fontes ópticas necessária para gerar os diversos comprimentos de onda e a latência associada a sincronização encarecem e dificultam algumas aplicações como a integração de redes *centralized radio access network* (C-RAN). Além disso, os provedores devem se preparar para operar com um grande número de dispositivos na rede.

A Figura 5 ilustra a arquitetura de uma rede TWDM-PON, na qual três XG-GPONs são empilhadas e são utilizados três pares de comprimento de onda: $(\lambda_1^d \text{ e } \lambda_1^u)$; $(\lambda_2^d \text{ e } \lambda_2^u)$; $(\lambda_3^d \text{ e } \lambda_3^u)$. No lado do usuário, são utilizados ONUs sintonizáveis, os quais recebem sinais em qualquer um dos três comprimentos de onda de *downstream*. Além disso, os comprimentos de ondas podem ser compartilhados no domínio do tempo entre as ONUs, caracterizando um sistema que aproveita conjuntamente as vantagens das arquiteturas TDM-PON e WDM-PON. Assim como as ONUs, os transmissores dispostos no lado do usuário devem ser sintonizáveis, habilitando a transmissão *upstream* em qualquer um dos três comprimentos de onda de *upstream*. Na OLT, tipicamente utiliza-se um amplificador óptico (AO) com o objetivo de amplificar os sinais de

downstream e *upstream*. É importante ressaltar que a ODN continua passiva, pois os AOs e mux/demux são implementados na OLT. Opcionalmente, as redes TWDM-PON podem empregar diversos pares de comprimentos de onda com taxas de transmissão distintas, o que beneficia a integração de diversas operadoras diferentes que compartilham o mesmo meio físico de transmissão [218].

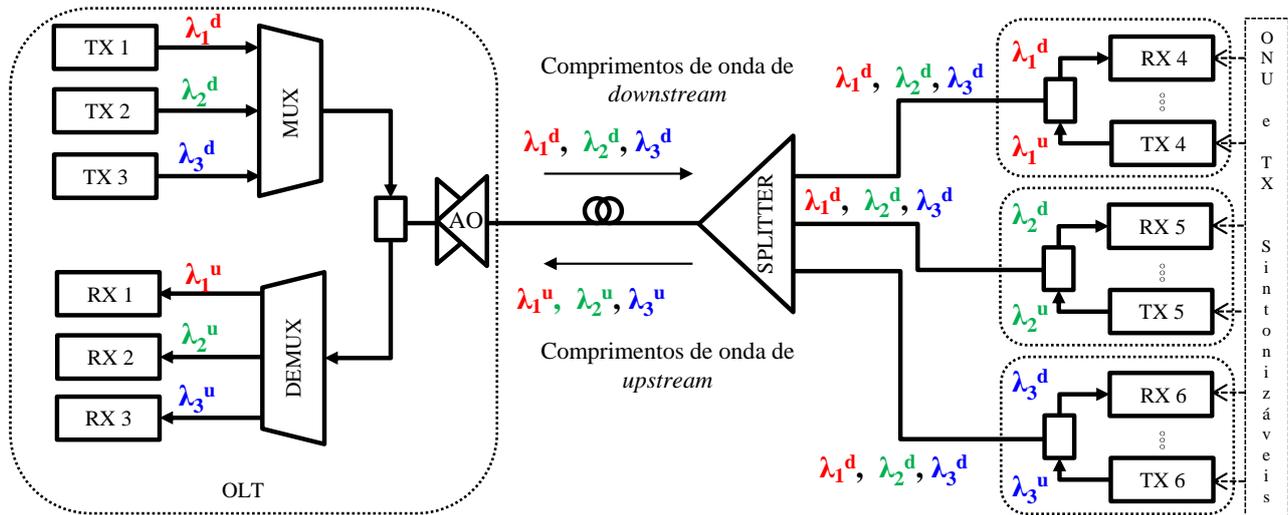


Figura 5: Arquitetura básica de uma rede TWDM-PON.

Diversos trabalhos na literatura estão sendo propostos demonstrando aplicações e investigando características de redes TWDM-PON. Entre as aplicações potenciais do TWDM-PON, destaca-se o suporte para transmissão de dados em *fronthaul* de redes móveis. Ou seja, o objetivo é utilizar a rede TWDM-PON para dar vazão ao tráfego de dados entre as *remote radio units* (RRUs) e *distributed units* (DUs) em arquiteturas de rede C-RAN. Isto posto, os autores de [224] propuseram um novo algoritmo de alocação de comprimento de onda e largura de banda visando satisfazer os requisitos de latência de enlaces *fronthaul*. Adicionalmente, os autores comprovaram que o algoritmo proposto é capaz de minimizar em 50% a quantidade de comprimentos de ondas ativos necessários, uma vez que as características do tráfego de dados do *fronthaul* são levadas em consideração pelo algoritmo. Como conclusão, espera-se que as RRUs possam ser eficientemente acomodadas utilizando redes TWDM-PON para distribuição de tráfego em arquiteturas de rede C-RAN, a qual é amplamente discutida em redes 5G e possivelmente em etapas iniciais das redes 6G.

Considerando a forte tendência de convergência de redes ópticas e sem fio para as próximas gerações de comunicações móveis incluindo a rede 6G, os autores em [225] um *fronthaul* baseado em TWDM-PON capaz de prover aplicações de formação de feixe para mMIMO. Os autores demonstram que a geração de feixes resulta em um problema relacionado ao gerenciamento de recursos de rádio e recursos ópticos, os quais possuem influência direta nas larguras de faixas de transmissão requeridas no *fronthaul*. A solução adotada em [225], empregou três algoritmos heurísticos para otimizar a alocação de recursos de rádio, bem como a largura de faixa do *fronthaul*. Em síntese, [225] apresentou alguns algoritmos que podem ser eficientemente utilizados na otimização conjunta de recursos de rádio, antenas e comprimento de onda, os quais poderão compor futuros sistemas de comunicações móveis.

A arquitetura de rede C-RAN vem sendo considerada como uma importante candidata na composição de redes de comunicações móveis das próximas gerações. Isto implica em diversas

frentes de pesquisas relacionadas à este tipo de arquitetura. Uma dessas frentes de pesquisa é demonstrada em [226], em que os autores focam na investigação do consumo de energia de redes C-RAN com topologia em anel e *fronthaul* baseado na solução TWDM-PON. Isto posto, os autores propõem modelar o problema de consumo de energia em um *fronthaul* óptico utilizando a teoria de filas. Com base no modelo proposto, propõe-se utilizar a rede de maneira mais eficiente em termos energéticos. Os resultados obtidos comprovaram a eficácia do método em reduzir o consumo de energia em torno de 58,1%, quando comparado com arquiteturas convencionais tipicamente utilizadas.

5.2.2 WDM overlay

Um sistema WDM *overlay* consiste em adicionar ou empilhar um ou mais comprimentos de onda sobre o legado de redes ópticas passivas, com o objetivo de explorar a capacidade destas redes e habilitar múltiplas funcionalidades [227]. Uma das principais vantagens oriundas deste tipo de sistema é a possibilidade de aproveitar equipamentos e fibras ópticas existentes para agregar novos serviços de forma simples e ágil, sem descontinuidade da tecnologia prévia. Embora as primeiras aplicações da solução em questão tenham sido direcionadas à distribuição de vídeo em PON, WDM *overlay* tem sido proposto para distribuir sinais de RF sobre a infraestrutura de rede óptica passiva, compondo uma alternativa imediata para implementar a rede de transporte das novas gerações de redes móveis [228,229]. A Figura 6 ilustra um sistema WDM *overlay* em um cenário de coexistência entre diferentes gerações PON e RF *overlay*, sendo uma solução em potencial para atender simultaneamente acesso cabeado e rede de transporte para comunicação móvel.

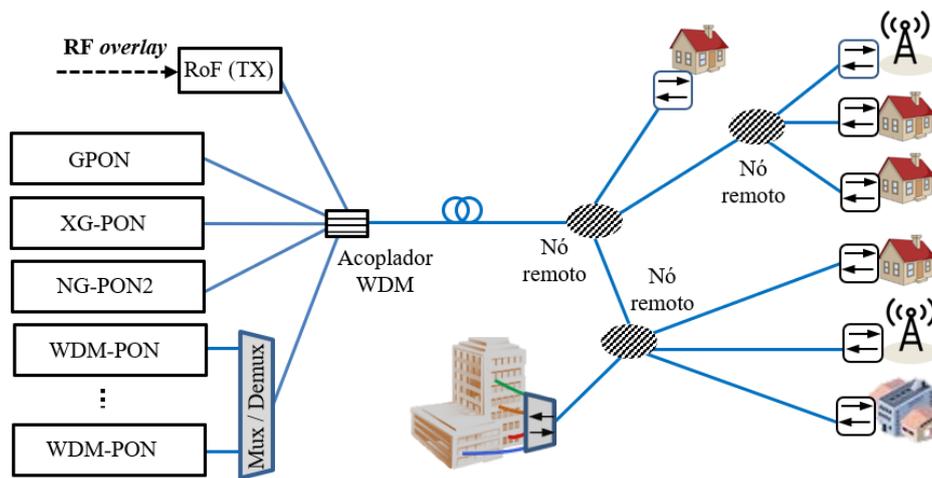


Figura 6: Sistema WDM *overlay* em um cenário de coexistência com topologias PON. Adaptado de [228].

Em direção ao cenário de coexistência exposto, a ITU apresentou um planejamento cuidadoso na alocação de comprimentos de onda para cada aplicação, como mostra a Figura 7 [230]. Observa-se que a faixa espectral entre 1550 nm e 1560 nm foi reservada para RF ou vídeo *overlay*, consolidando, portanto, a perspectiva de transmissão de sinais de RF em PONs como alternativa para implementar as redes de acesso de rádio de nova geração.

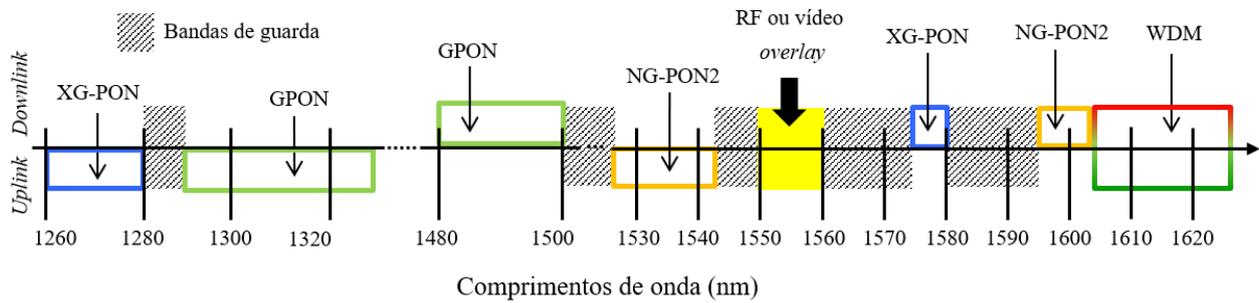


Figura 7: Planejamento para alocação de comprimentos de onda por aplicação, de acordo com a recomendação G.989.2 da ITU [230].

5.2.3 Super-PON

O conceito de arquiteturas Super-PON vem sendo consolidado pelo IEEE P802.3cs *task force* e surgiu com o objetivo de aumentar o alcance das PONs e quantidade de clientes atendidos por fibra. Em tal arquitetura são previstos enlaces ópticos de até 50 km e 1024 clientes atendidos por cada fibra óptica. Estes números representam um aumento significativo de capacidade, uma vez que as PONs convencionais atendem 64 usuário por fibra com alcance de até 20 km [231]. Alguns dos benefícios apresentados por este novo conceito de PONs reside na simplificação da infraestrutura, visto que uma rede Super-PON é capaz de atender a regiões mais extensas e uma quantidade maior de usuários. Dessa forma, as Super-PONs contribuem com a redução de custos de implementação da infraestrutura óptica, uma vez que demanda menos cabos de fibra óptica e menos CO para atender uma determinada área, quando comparado às PONs convencionais. As Super-PONs empregam três técnicas já consolidadas para habilitar as características acima mencionadas, que são WDM, roteamento de comprimento de onda e amplificação óptica.

A Figura 8 descreve a arquitetura da Super-PON. Na direção de *downstream*, os comprimentos de ondas utilizados nas OLTs são multiplexados, amplificados por um amplificador *booster* e lançados em um fibra óptica, que compõe a ODN, com extensão de até 40 km até

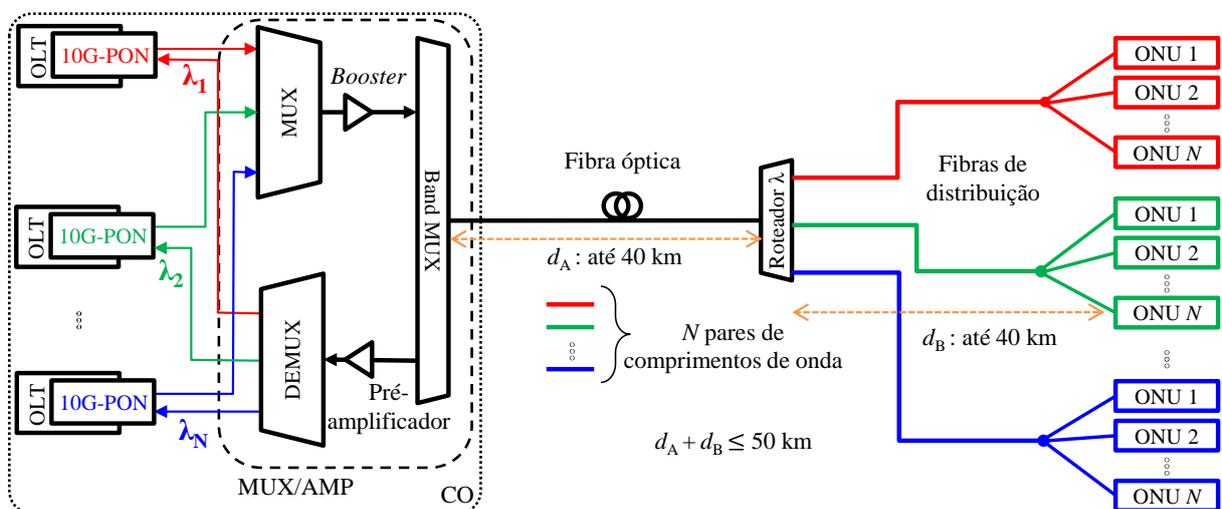


Figura 8: Arquitetura básica de uma Super-PON (adaptado de [231]).

o roteador. O roteador é responsável por direcionar cada um dos λ s, os quais passam por um divisor de potência antes de alcançar as suas respectivas ONUs. No sentido de *upstream*, a função de multiplexação é realizada pelo roteador, agrupando os comprimentos de onda das N OLTs e lançando-os na fibra óptica da ODN. Uma vez no CO, os comprimentos de onda de *upstream* são pré-amplificados demultiplexados e encaminhados para uma das N OLTs.

As Super-PONs tornam-se interessantes para o cenário voltado ao atendimento de áreas remotas. Neste cenário, a baixa densidade populacional pode desencorajar o investimento das operadoras e provedoras de serviços. Este cenário é mais evidente em países com elevada extensão territorial onde a quantidade de assinantes em áreas remotas tende a ser reduzida, devido principalmente à migração da população para os grandes centros urbanos. Neste caso, as Super-PONs podem oferecer uma solução menos dispendiosa, uma vez que reduz os custos de implementação. Além disso, existe ainda a possibilidade de utilização de CO dispostas nas periferias dos grandes centros urbanos para atender as áreas remotas ou suburbanas. Em síntese, essa tecnologia possui características atrativas para contribuir com um dos cenários previstos para redes 5G e 6G, visto que possui potencial para atender a novos usuários e cobrir áreas ainda não conectadas, favorecendo a expansão da era digital.

6 Sistemas óptico-*wireless*

Celso Henrique de Souza Lopes, Eduardo Saia Lima, Ramon Maia Borges, Arismar Cerqueira Sodré Junior

celso.lopes@mtel.inatel.br, elima@get.inatel.br, ramonmb@inatel.br, arismar@inatel.br

A convergência entre redes ópticas e sem fio, solução chave para o desenvolvimentos das redes de nova geração, dá origem aos chamados sistemas óptico-*wireless*. Tais sistemas são parte do escopo da área de estudo conhecida como fotônica de micro-ondas, e combinam vantagens das comunicações ópticas na distribuição de sinais, que são a alta capacidade, imunidade a interferência eletromagnética, baixa atenuação independentemente da frequência (0,2 dB/km), com o desejado acesso sem fio [3,8,10,21]. Esta seção descreve os principais avanços em sistemas óptico-*wireless* direcionados para redes 6G, incluindo: tecnologias *radio over fiber* (RoF), soluções baseadas em topologia FiWi, soluções baseadas em FSO e VLC. É importante ressaltar que soluções tratadas nesta seção podem também aplicar-se às redes 5G, visto que estas encontram-se em corrente desenvolvimento.

6.1 Tecnologias de rádio sobre fibra

A revisão bibliográfica sobre camada física para redes 6G aponta para o uso de C-RANs flexíveis, massivas, eficientes em energia e com divisão das funções (*slicing*) de modo customizado [232–234].

C-RANs, também indicadas como solução chave no desenvolvimento de redes 5G, visam simplificar RRUs e concentrar funções complexas de processamento na *central unit* (CU), trazendo assim vantagens como redução das despesas operacionais e de capital, aceleração da implantação da rede, escalabilidade e eficiência de energia [235,236]. Mais especificamente, a topologia C-RAN, ilustrada na Figura 9, consiste em posicionar a RRU junto à antena no site

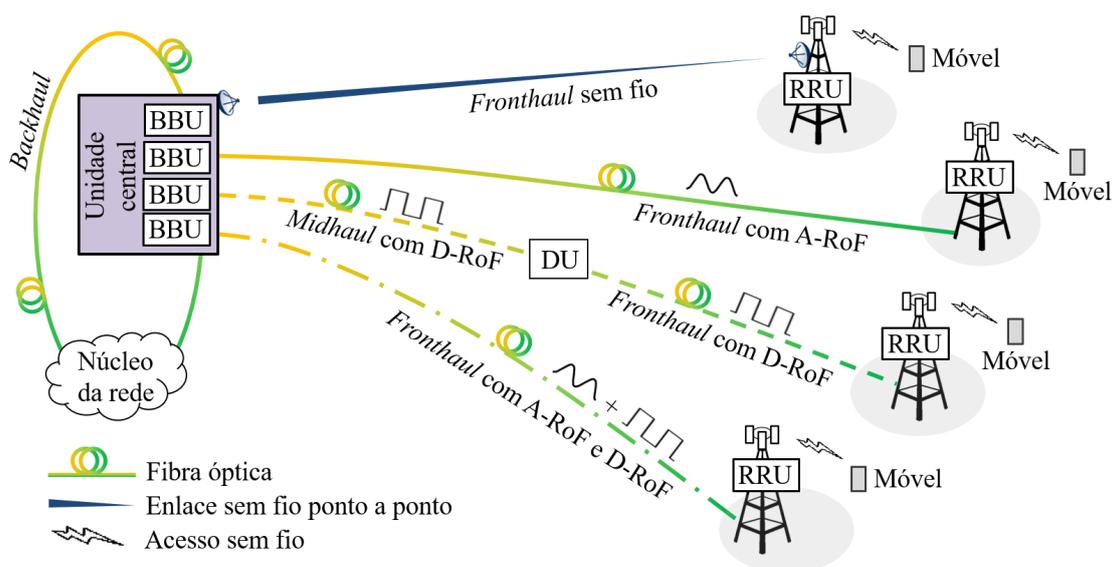


Figura 9: Rede de acesso de rádio centralizada, apta a suportar transporte e acesso de dados em uma arquitetura chamada *Xhaul*.

celular e acomodar a *baseband unit* (BBU) na CU, que pode estar a quilômetros de distância. Parte das funções da BBU podem ainda ser alocadas para uma unidade de distribuição (DU). Os enlaces físicos de conexão entre CU e núcleo da rede, CU e DU, CU e RRU ou DU e RRU são chamados *backhaul*, *midhaul* e *fronthaul*, respectivamente. A Figura 9 mostra que a topologia de rede acima descrita está apta a suportar transporte e acesso de dados em uma arquitetura chamada *Xhaul* [235]. Apesar da possibilidade de implementação do *fronthaul* com enlace sem fio, o emprego da fibra óptica como meio de transmissão é considerado potencial, dada a necessidade de enlaces banda larga para a distribuição de sinais [234]. Assim, alternativas promissoras para a implementação da rede de transporte óptica baseiam-se na tecnologia RoF, que pode ser *digital radio over fiber* (D-RoF), A-RoF ou híbrida [237–239].

6.1.1 Esquema D-RoF

Enlaces de D-RoF transportam sinais digitalizados e em conformidade com interfaces de rádio específicas, desenvolvidas por grupos de empresas e/ou grupos de padronização no setor de telecomunicações. Dentre tais interfaces, a *common public radio interface* (CPRI) obteve destaque comercial em sistemas 4G, enquanto que a *open base station architecture initiative* (OBSAI) e a *open radio equipment interface* (ORI) se apresentaram como alternativas disponíveis [235]. Para as redes 5G e 6G, versões melhoradas do CPRI têm sido propostas e desenvolvidas [240–242]. A Figura 10 apresenta um esquema D-RoF, onde os dados são lançados no *fronthaul* de fibra óptica após processamento na interface de rádio e conversão eletroóptica (E/O). O sinal óptico transportando o quadro *enhanced common public radio interface* (eCPRI), por exemplo, chega então à unidade remota de rádio, onde realiza-se a conversão optoeletrônica (O/E), o interfaceamento eCPRI seguido da *digital-to-analog conversion* (DAC), além das funções de rádio mandatórias para a transmissão no meio sem fio. Estas últimas incluem translação para a frequência de canal (*upconversion*), realizada pelo bloco *front-end* de RF, amplificação de RF e irradiação através de uma antena. A sequência descrita refere-se ao enlace de descida (*downlink*), de modo que o enlace de subida (*uplink*) requer o processo reverso [238].

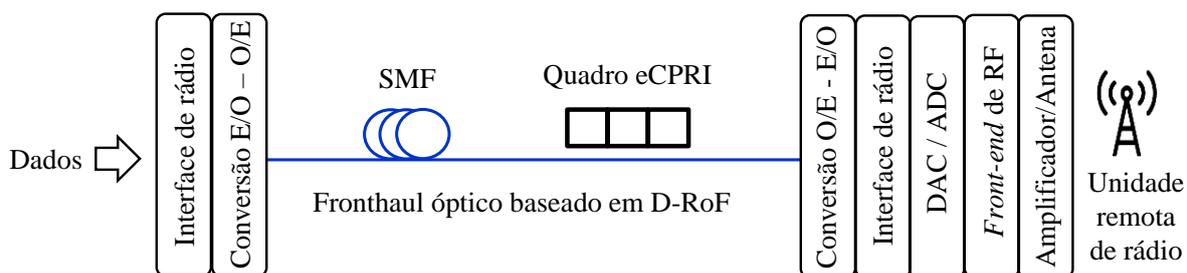


Figura 10: Esquema D-RoF.

D-RoF atrai interesse devido ao fato de que o transmissor e o receptor óptico são tipicamente integrados em um módulo transceptor *small form-factor pluggable* (SFP), apto a suportar a interface de rádio. Tais transceptores encontram-se difundidos comercialmente e podem, inclusive, favorecer implementações em redes ópticas passivas. Além disso, soluções de *fronthaul* baseadas em D-RoF dispensam preocupações com dispersão cromática no meio óptico [234,235]. Por outro lado, a necessidade de digitalização e estágios de conversão de frequência na unidade remota de rádio limita a desejada simplificação da RRU, especialmente considerando operação

em micro-ondas e ondas milimétricas. Outra desvantagem do esquema em questão refere-se à taxa de dados total imposta ao *fronthaul*, significativamente maior do que a taxa de dados efetivamente alcançada na transmissão sem fio [242,243]. Trata-se de um empecilho importante a ser amenizado para viabilizar aplicações em redes 5G e 6G apoiadas no *fronthaul* baseado em D-RoF.

Neste contexto, os avanços em D-RoF rumo às redes de nova geração podem ser divididos em duas frentes principais: desenvolvimento de módulos transceptores com capacidade da ordem de centenas de Gbit/s [244,245] e soluções técnicas para reduzir a largura de banda e taxa de dados exigida no *fronthaul* [240–243]. O desenvolvimento de módulos transceptores aptos a suportar centenas de Gbit/s visa acomodar o elevado tráfego de dados esperado no *fronthaul*, em função do processo de digitalização e enquadramento na interface de rádio. Com o uso de fotônica integrada, novos e compactos transceptores ópticos de 100 Gbit/s estão chegando ao mercado [244]. A Cisco já trabalha em transceptores de até 400 Gbit/s [245]. Quanto às soluções técnicas para reduzir a largura de banda e a taxa de dados total no *fronthaul*, estas incluem compressão de dados e uso do eCPRI como interface interna de rádio. Metodologias de compressão de dados têm empregado quantização adaptativa e menos de 15 bits por amostra no processo de digitalização, permitindo, assim, reduzir em um fator de 2 a 3 a taxa de dados exigida [241,243]. Filtros passa-baixa também têm sido utilizados para contribuir com a compressão de sinal no domínio da frequência [243]. Já a interface eCPRI abrange divisão flexível das funções entre os equipamentos de controle e de rádio (*functional split*) no *fronthaul*, além de uma rede de transporte baseada em pacotes [240]. A Figura 11 expõe uma comparação da taxa de dados total obtida no *fronthaul* com uso de eCPRI e CPRI como interface de rádio, considerando diversos casos de uso. Estes últimos compreendem sinal de RF com largura de banda entre 10

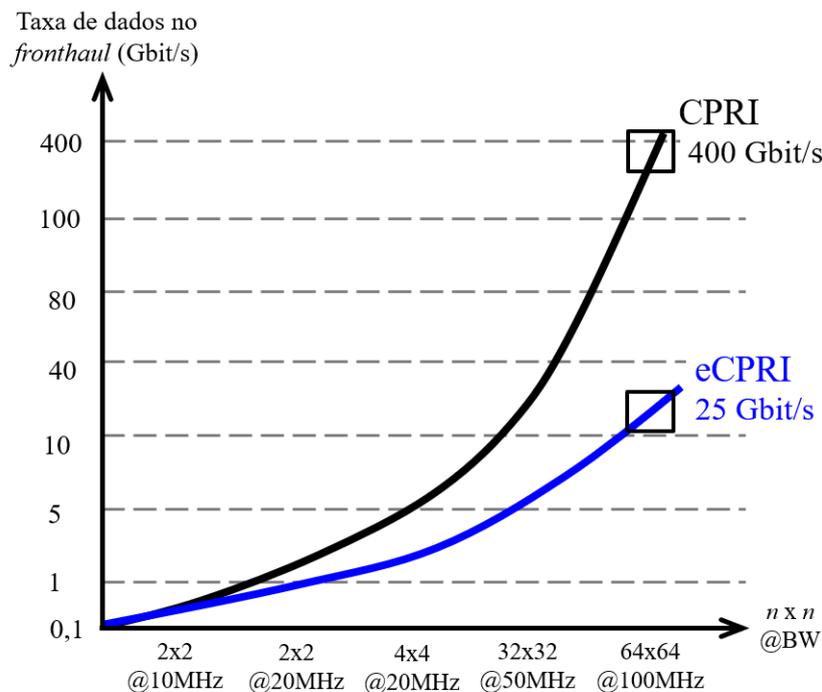


Figura 11: Taxa de dados total exigida no *fronthaul* em função da interface de rádio (eCPRI e CPRI). $n \times n$ - configuração MIMO com n antenas transmissoras e n antenas receptoras. Adaptado de [242].

e 100 MHz, assim como configurações MIMO com número de antenas variando de 2 a 64. Os resultados divulgados em [242] mostram uma redução significativa da taxa de dados exigida no *fronthaul* ao utilizar eCPRI, principalmente em configurações MIMO avançadas e à medida que se aumenta a largura de banda do sinal de RF. Nota-se assim o potencial da solução em questão para viabilizar o *fronthaul* D-RoF nas redes 5G e 6G.

6.1.2 Esquema A-RoF

Esquemas de A-RoF concentram as funções mais complexas de rádio na unidade central e distribuem sinais analógicos, tipicamente já na frequência de canal, através do *fronthaul* óptico. A Figura 12 ilustra tal abordagem, onde sinais digitais modulados com os dados de entrada são convertidos em sinais analógicos (bloco DAC) e entregues ao bloco *front-end* de RF, agora posicionado na unidade central. Após a translação para a frequência de canal e conversão E/O, o sinal analógico é transmitido no enlace de fibra óptica até a unidade remota de rádio, onde é convertido para o domínio elétrico, amplificado e irradiado no meio sem fio. É importante ressaltar que a sequência descrita refere-se ao enlace de descida (*downlink*), de modo que o enlace de subida (*uplink*) requer o processo reverso [238]. Nota-se a simplificação da RRU em comparação com o esquema D-RoF, anteriormente apresentado, visto que os processos de digitalização e translação em frequência são dispensados na referida unidade.

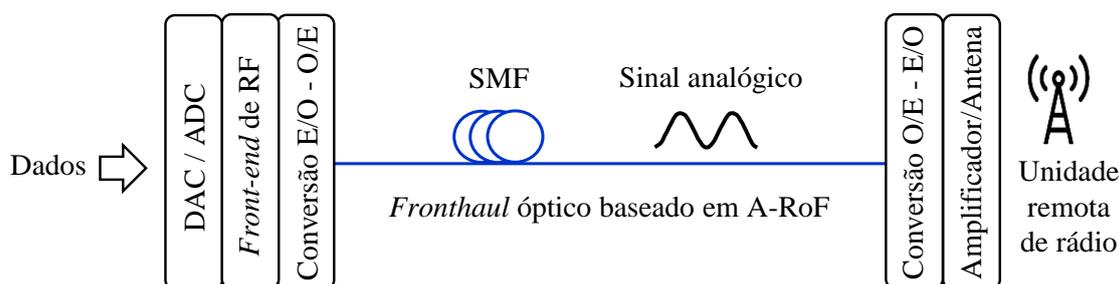


Figura 12: Esquema A-RoF.

Topologias A-RoF têm se tornado atrativas para redes 5G e 6G em função das tendências de altas taxas de dados (Gbit/s) no meio sem fio, densificação das redes com aumento do número de estações remotas e acesso em ondas milimétricas. As principais vantagens do A-RoF em relação ao D-RoF são: capacidade de transportar sinais no *fronthaul* de fibra óptica com o mínimo processamento possível, ou seja, sem a necessidade de digitalização e conversão de RF remotamente; economia de largura de banda no *fronthaul*, devido a ausência do processo de digitalização; simplificação da RRU, uma vez que seus elementos são reduzidos ao mínimo [234,246]. Empecilhos oriundos de esquemas A-RoF remetem à incompatibilidade com os difundidos SFPs e à susceptibilidade à dispersão cromática, especialmente em ondas milimétricas. Entretanto, existem soluções consolidadas e não complexas para lidar com estas questões, como utilização de módulos A-RoF comerciais e uso de fibras compensadoras de dispersão, uso de frequência intermediária para o sinal de RF na fibra ou modulação com banda lateral única [237].

Avanços em A-RoF rumo às redes de nova geração inclui técnicas para implementar sistemas multibanda com múltiplas aplicações, inclusive em ondas milimétricas. Uma das estratégias para tal é o uso de múltiplos transceptores em uma arquitetura WDM, onde cada transceptor

lida com um sinal de RF e opera em um comprimento de onda específico [238]. Outras estratégias, também com o objetivo de distribuir sinais de RF em frequências distintas no *fronthaul*, empregam uma única fonte de luz precedida por combinador de RF [247] ou seguida por modulador eletroóptico [248]. Cabe destacar o uso do *dual-drive Mach-Zehnder modulator* (DD-MZM), visto que técnicas baseadas em tal dispositivo têm permitido a transmissão simultânea de sinais abaixo de 6 GHz e acima de 20 GHz com redução de interferências [229,248]. Há ainda a possibilidade de integrar aplicações A-RoF e FTTH na mesma arquitetura de rede utilizando WDM *overlay*, como demonstrado em [229].

Avanços adicionais em sistemas A-RoF remetem ao uso de *digital pre-distortion* (DPD) para aprimorar o desempenho dos enlaces. Por exemplo, os autores apresentaram em [249] um enlace A-RoF com redução de 4,2% no EVM ao transmitir um sinal 64-QAM em 24 GHz, fruto da linearização baseada em DPD. De forma complementar, demonstrou-se em [229] o impacto positivo da DPD (redução no EVM) em um sistema A-RoF transmitindo sinais de RF em 26 GHz, com larguras de banda de até 800 MHz.

O estado da arte em soluções A-RoF traz ainda a possibilidade de promover *photonic-assisted amplification* (PAA) no enlace óptico, isto é, promover o aumento da potência elétrica fotodetectada sem uso de amplificadores elétricos. Trata-se de uma estratégia que permite explorar o enlace óptico não apenas como meio de transmissão, mas também como meio de oferecer ganho de RF em relação aos sistemas *conventional radio over fiber* (CRoF). Técnicas para PAA aplicadas a arquiteturas *Xhaul* vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas pelo grupo de pesquisa em convergência óptico-*wireless* do Inatel [114,250]. Especificamente em [250], demonstrou-se uma técnica de PAA aprimorada e aplicada em um enlace A-RoF multibanda transmitindo os seguintes sinais: um sinal *filtered orthogonal frequency division multiplexing* (F-OFDM) em 788 MHz (RF1), direcionado a aplicações móveis de longo alcance; um sinal 64-QAM em 2,7 GHz (RF2) para rede 4G; um sinal 5G NR em 3,5 GHz (RF3) para aplicações móveis em ambiente externo; um sinal 16-QAM em 26 GHz (RF4) para aplicações móveis em ambiente interno. A Figura 13 reproduz o diagrama em blocos de tal implementação.

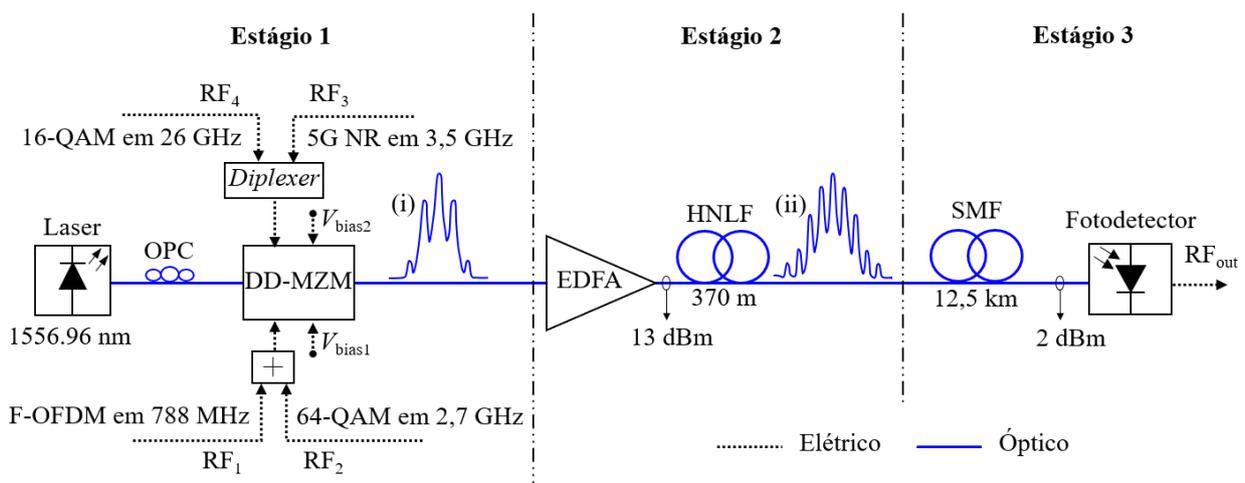


Figura 13: Enlace A-RoF multibanda com amplificação de RF assistida por fotônica [250].

O estágio 1 compõe o transmissor A-RoF com emprego do DD-MZM, onde os sinais de RF são combinados e entregues ao modulador, que recebe ainda uma portadora óptica e tensões de polarização. Obtém-se assim o campo elétrico modulado no domínio óptico ((i) na Figura 13). O estágio subsequente corresponde à técnica de PAA em questão, que inclui um EDFA e

um trecho (370 m) de *highly nonlinear fiber* (HNLF), estimulando o efeito "mistura de quatro ondas". Obtém-se na saída deste bloco um sinal óptico contendo novas componentes espectrais, como ilustra o *inset* (ii) da Figura 13. Já o estágio 3 remete à devida transmissão no *fronthaul* de fibra óptica monomodo, seguida pelo processo de fotodetecção. Os resultados publicados em [250] apontaram o aumento na potência elétrica fotodetectada em aproximadamente 15 dB, quando comparada àquela obtida com sistemas RoF convencionais (sem PAA), para todos os sinais de RF recebidos. A solução descrita trata, portanto, de uma estratégia potencial para aliviar a necessidade de amplificadores elétricos nas unidades remotas de rádio, favorecendo a simplificação destas em redes 5G e 6G.

6.1.3 Esquema híbrido de rádio sobre fibra

Esquemas de rádio sobre fibra híbrido combinam D-RoF e A-RoF na mesma arquitetura de rede, como ilustra a Figura 14, (a). O objetivo é explorar vantagens destas duas soluções, até então tratadas de forma independente, e atender demandas distintas para o *fronthaul* das redes 5G e 6G. Cabe ressaltar que até o momento não há uma padronização quanto a adoção de D-RoF ou A-RoF para as futuras gerações, de modo que empresas e grupos de pesquisa seguem aperfeiçoando tais soluções individualmente, enquanto alternativas híbridas têm sido propostas para aumentar a flexibilidade. Por exemplo, uma vez implementado o *fronthaul* híbrido, o operador poderia alternar entre a solução analógica e digital ou combiná-las no enlace de transporte, direcionando-as para unidades de rádio distintas em função das aplicações [239].

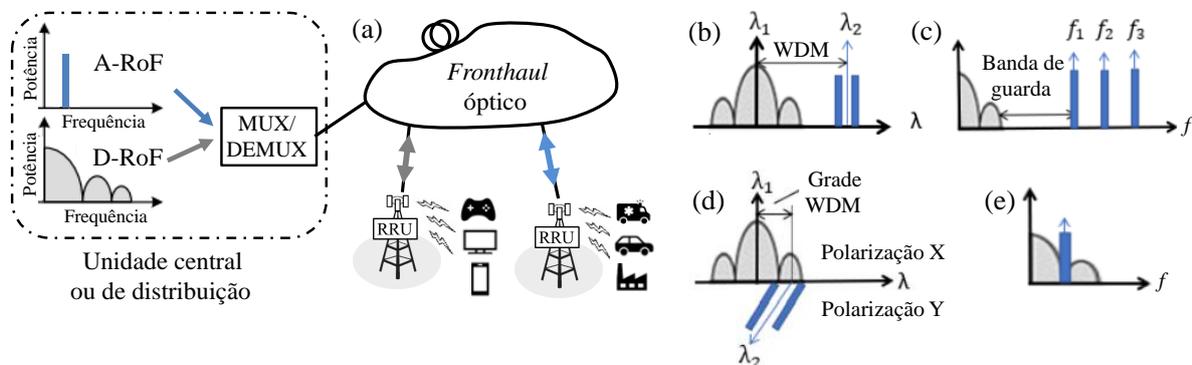


Figura 14: Rádio sobre fibra híbrido: (a) Ilustração da arquitetura; (b) Técnica baseada em WDM; (c) Técnica baseada na multiplexação no domínio elétrico, com banda de guarda; (d) Técnica baseada na multiplexação por divisão de polarização; (e) Técnica baseada na multiplexação no domínio elétrico, com sobreposição de sinais.

Diferentes técnicas têm sido consideradas para a implementação de sistemas rádio sobre fibra híbridos. A primeira delas remete naturalmente ao uso de WDM, ou seja, um comprimento de onda específico para a comunicação analógica e outro para a comunicação digital (Figura 14, (b)) [239]. Outra estratégia emprega multiplexação de sinais no domínio elétrico, inserindo filtros e banda de guarda entre a componente digital e a(s) componente(s) analógica(s), como exposto na Figura 14, (c) [251]. Uma terceira técnica, apontada como atrativa para reduzir a banda ocupada no espectro óptico, faz uso de PDM e permite sobreposição espectral, visto que os sinais analógico e digital são transmitidos nas polarizações X e Y, respectivamente (Figura 14, (d)) [252]. Há ainda a possibilidade de multiplexação no domínio elétrico com alocação do sinal

analógico nos nulos espectrais do sinal digital, como ilustra a Figura 14, (e) [253]. Esta estratégia dispensa banda de guarda, porém limita a frequência do sinal analógico em função da taxa de dados no enlace D-RoF. Recentemente em [239] divulgou-se uma evolução da referida técnica, com transmissão de sinais A-RoF fora dos nulos e dentro da faixa espectral do sinal D-RoF, mediante uso de um bloco demultiplexador com processamento de sinais.

6.2 Soluções baseadas em fibra-rádio

Sistemas de comunicações atuais e futuros tendem a explorar um conjunto de tecnologias para transporte e distribuição de sinais entre usuários e o núcleo da rede. Os sistemas FiWi se enquadram nesse conjunto de tecnologias, unindo as vantagens de sistemas ópticos e sem fio. Isto é possível graças ao aperfeiçoamento de fontes luminosas e fibras ópticas de baixas perdas em conjunto com a evolução das comunicações sem fio, que contribuem para implementação de enlaces de longas distâncias e elevada vazão de dados. No entanto, para alcançar altas taxas de transmissão nos núcleos de rede, é necessário elevar as frequências de transmissão e, em contrapartida, reduz-se a área de cobertura devido a elevadas perdas de propagação no espaço livre.

Soluções FiWi baseados na tecnologia RoF foram bastante discutidas no meio acadêmico e industrial para o emprego em redes 5G, e com bastante apelo para aplicações em redes 6G, com o intuito de favorecer a transmissão simultânea de múltiplos sinais de RF entre uma BBU centralizada e a RRU remota [246]. Tal aplicabilidade permite explorar a infraestrutura óptica existente, bem como sua capilaridade, para criar uma rede banda larga de distribuição de sinais. Para tal, aplica-se o sinal de RF modulante a uma fonte luminosa centrada em comprimentos de onda diferentes daqueles padronizados para aplicações como GPON [254]. As soluções RoFs são empregados em tais sistemas e surgem como proposta para redes 6G de acordo com a arquitetura C-RAN, para transporte de sinais analógicos (A-RoF) ou digitais (D-RoF) [255].

Notáveis estudos foram publicados nos últimos anos relacionados com sistemas baseados na topologia FiWi. As publicações tratam de diferentes aspectos tecnológicos, desde a entrega de multisserviços com base em RoF até novas formas de onda para transmissões FiWi em ondas milimétricas. A cobertura de diversas aplicações utilizando a mesma fibra foi abordada em [256], embora ainda fora do contexto da rede 6G. Os autores relataram um sistema de transporte de três sinais baseado em modulação direta e externa para fornecer serviços integrados RoF (à 6 GHz) e FTTX (banda-base). Demonstrou-se penalidade de 1 dB na potência entre as aplicações RoF e FTTX por atingir uma BER $< (10^{-5})$, após o enlace de fibra óptica de 80 km. Além disso, transmissões utilizando frequências intermediárias sobre um enlace de *fronthaul* de fibra capaz de fornecer serviços para redes 4G e 5G simultâneos e foram apresentados em [257]. Essas aplicações foram investigadas modulando diretamente uma portadora óptica com sinais *long-term evolution* (LTE) e *universal filtered orthogonal frequency multiplexing* (UF-OFDM) obtendo valores de EVM_{RMS} inferiores a 12,5% (assumindo 16-QAM). Ambos os trabalhos citados tiveram o foco em transmissões de rádio sobre fibra e não exploraram a transmissão sem fio após o processo de conversão do domínio óptico para o elétrico.

Em relação aos sistemas FiWi, investigou-se a transmissão da forma de onda F-OFDM através de um *fronthaul* óptico de 20 km, seguido por um enlace sem fio na faixa de 6 GHz [258]. Os autores relataram resultados de EVM_{RMS} com modulações 16- e 64-QAM próximos a 4% para níveis de potência óptica recebidos superiores a -23 dBm, mas não mencionaram a distância percorrida. Um sistema FiWi em 57-64 GHz, com vazão de dados na ordem de Gbit/s foi apresentado em [259], no qual um enlace de *fronthaul* de 7 km com transmissão sem fio de 5 m

foram combinados. Uma capacidade agregada de até 24 Gbit/s explorando largura de faixa de 7,2 GHz no canal FiWi foi alcançada, bem como valores de EVM_{RMS} em torno de 7,0 e 7,5% para sinais QPSK e 16-QAM, respectivamente. Além disso, demonstrou-se um sistema FiWi utilizando a técnica de *beamforming* fotônico, no qual a capacidade de múltiplos feixes transmitidos foi confirmada, fornecendo sinais de 26 e 17,6 GHz simultaneamente [260]. O EVM_{RMS} após a transmissão sem fio com ordem de modulação de 16-QAM atingiu cerca de 7% para o nível de potência óptica de -3 dBm na recepção.

Em [114] os autores propõem e relatam à implementação de um *Xhaul* multibanda FiWi amplificado fonicamente por meio do efeito óptico não linear da mistura de quatro ondas (FWM - *Four-wave mixing*) baseado em tecnologia RoF, visando aplicações para redes 5G e 6G. A abordagem de banda ultra-larga proposta permite transportar e amplificar simultaneamente sinais de RF através de links ópticos, que podem ser empregados como *backhaul*, *midhaul* ou *fronthaul* em sistemas celulares. O efeito FWM, originado da utilização de um pedaço de fibra altamente não linear de 35 m, dá origem a um ganho de RF quando comparado aos sistemas convencionais. Demonstrou-se que a técnica permite substituir dois amplificadores de RF convencionais e observou-se o aumento da vazão de dados do sistema em 2,4 vezes, atingindo 12 Gbit/s. Além disso, um *fronthaul* sem fio de banda dupla (7,5 e 28 GHz), precedido por um *midhaul* óptico de 12,5 km, compõem a arquitetura FiWi multibanda amplificado fonicamente.

O Release 15 [261], do 3GPP definiu que as primeiras implementações das redes 5G irão operar no modo não autônomo (NSA - *non-standalone*), ou seja, o núcleo da rede 4G será compartilhada com a rede 5G em sua fase inicial. Nesse contexto, dois trabalhos implementaram uma arquitetura que opera em modo não autônomo, para transmissão simultânea de sinais das redes 4G e 5G por meio de um sistema FiWi baseados em RoF. A primeira arquitetura transmite três sinais simultâneos ao longo de um enlace óptico de 25 km. Posteriormente, transmitiu-se os sinais a uma distância de 105 m em um enlace sem fio, provendo uma vazão de dados na ordem de Gbit/s e atendendo ambientes eMMBB e eRAC [247]. Ainda considerando o NSA apresentou-se em [262] um novo sistema multibanda FiWi 5G NR não autônomo usando um transmissor integrado de múltiplos comprimentos de onda com modulação direta. Neste sistema, três sinais de RF (4G e 5G) são simultaneamente transmitidos por um enlace óptico de 12,5 km de comprimento. São demonstradas as transmissões sem fio por meio de um enlace de 10 m em ambientes internos e um enlace de 115 m em ambientes externos. Os resultados experimentais demonstraram uma vazão de dados total de 1,36 Gbit/s e 230 Mbit/s nos cenários de 10 m e 115 m, respectivamente.

Com o objetivo de atender aos requisitos de serviços e aplicações previstos para as redes pós-5G e 6G, os esforços de pesquisa estão caminhando para a convergência de tecnologias para oferecer suporte à ampla variedade de novos aplicativos que demandam esforços computacionais sensíveis à latência no contexto da Internet Tátil. Neste contexto, algoritmos de IA tendem a ser promissores para o controle efetivo e dinâmico dos inúmeros parâmetros das redes, cada vez mais densas e heterogêneas. Em [263] propõe-se o uso de computação evolutiva para reduzir as degradações dos sistemas RoF, visando atender redes 6G. Em [264], estudou-se a alocação de recursos e a associação de usuários com diferentes requisitos de atraso em uma H-CRAN, tema este bastante discutido para as redes 6G. Os resultados mostram que esta abordagem supera a tradicional em termos de atraso médio e consumo de energia, alcançando até 80% de melhoria no atraso médio em cenários de alta carga.

Diversos trabalhos são propostos na literatura para endereçar a crescente demanda de dados imposta a cada nova geração de redes móveis. Em [265], os autores demonstraram experimen-

talmente um sistema de comunicação auxiliado por fotônica na banda W (75 GHz a 110 GHz). Para superar a perda de potência induzida pela largura de banda limitada dos dispositivos foto-elétricos, adotou-se o OFDM com QAM. Além disso, utilizou-se uma técnica de modelagem de constelação probabilística, que é usada para melhorar ainda mais a capacidade do sistema. No processamento de sinal digital, um equalizador não linear no domínio do tempo com estrutura MIMO pode compensar a não linearidade durante a transmissão FiWi. Com a ajuda de modulações avançadas e equalização de domínio da frequência e tempo, sinais OFDM em 92,5 GHz podem ser transmitidos com sucesso por um enlace sem fio de 1 m, cuja taxa de transmissão bruta é 208,4 Gbit/s.

Um novo esquema para mitigar as deficiências devido as não linearidades em uma transmissão RoF é proposto por um equalizador baseado em J-DNN - *joint deep neuron network*. O esquema de equalização proposto é baseado principalmente no algoritmo BP - *back-propagation* e no algoritmo CMMA - *cascaded multi-modulus algorithm*. A geração e transmissão de um sinal à 135 GHz com vazão de 60 Gbit/s em um enlace óptico de 10 km seguido por um enlace sem fio de 3 m foi demonstrada em [266]. Para o processamento digital do sinal na recepção, comparações entre equalizadores CMMA, e J-DNN são investigados. Os resultados indicam que o equalizador J-DNN tem um melhor desempenho em termos de BER em relação ao receptor utilizando CMMA tradicional, e uma melhora na sensibilidade do receptor de até 1 dB pode ser alcançada, quando comparados com equalizadores DNN.

6.3 Soluções baseadas em óptica no espaço livre

Os sistemas FSO - *Free Space Optical* surgem como um dos sistemas de comunicações proeminentes para atender a nova geração de redes móveis [9]. Em termos de serviço de comunicação de banda larga, o FSO vêm sendo considerado como um candidato adequado para oferecer este serviço aos usuários finais, com demanda específica de conexão ponto-a-ponto, em ambiente atmosférico claro entre transmissor e receptor. A transmissão empregando FSO assemelha-se com a transmissão por fibra, pois, basicamente, a saída do transmissor FSO é colimada e transmitida pela atmosfera, enquanto a transmissão por fibra óptica terá sua saída acoplada na própria fibra [267]. Os sistemas FSO surgem como uma alternativa em comparação com as tecnologias atuais, e podem atender à demanda exponencialmente crescente por alta vazão de dados.

Os sistemas baseados em FSO assemelham-se aos sistemas de comunicações por radio-frequência em termos de processamento de dados, modulação, transmissão e recepção [268]. Em geral, são operações ponto-a-ponto compostas por transceptores ópticos alinhados em visada direta sem obstáculo ao longo do percurso. A Figura 15 ilustra um esquema de enlace de comunicações ópticas pelo espaço aberto. O transmissor é responsável por gerar o sinal óptico, introduzir a modulação e adaptar o feixe para a transmissão na atmosfera. É constituído por uma fonte óptica, geralmente um diodo laser (LD - *Laser Diode*) ou um diodo emissor de luz (LED - *Light Emitting Diode*), por um conjunto de lentes para concentrar o feixe de luz, tornando-o mais adequado à propagação no meio. Essa focalização reduz a possibilidade de obstrução do feixe por objetos no ambiente de propagação e minimiza os efeitos de turbulência [269]. A modulação pode ser de forma direta, com o sinal da mensagem atuando na corrente da fonte óptica, ou externa, com uso de moduladores eletro-ópticos, como os que utilizam o modulador Mach-Zehnder [270].

Os cabos de fibra óptica podem ser substituídos por sistemas FSO em cenários onde a instalação requer altas despesas de capital (CAPEX - *Capital Expenditure*) como regiões mon-

tanhosas, travessias de lagos ou rios ou até mesmo comunicação entre dois edifícios separados por uma avenida em grandes centros urbanos [271]. Os sistemas FSO têm a capacidade de operar com vazão de dados superiores à 1 Gbit/s, podendo atuar como meio de transporte de dados e possibilitando instalações rápidas e temporárias, como na cobertura de eventos de curta duração. Dentre algumas vantagens na utilização do FSO, destacam-se: não necessita de licenciamento de espectro; permite a transmissão em grandes larguras de faixa; facilidade na instalação; imunidade a interferências eletromagnéticas e; é considerado uma boa alternativa onde ocorra interrupção da comunicação por rompimento dos cabos ópticos [272]. No entanto, uma transmissão FSO está sujeita às condições meteorológicas instáveis. Em outras palavras, os sistemas FSO são suscetíveis a chuva, névoa, neblina e poeira [273], que introduzem atenuação para a fonte de luz ou mesmo bloqueiam a propagação do feixe. Portanto, o desempenho de sistemas FSO deve ser investigado exaustivamente considerando as condições meteorológicas. Muitos estudos estão sendo realizados considerando diferentes condições ambientais e seu impacto relativo no desempenho do sistema FSO [274]. Soluções para minimizar os efeitos estão disponíveis na literatura, como por exemplo, o uso do sistema FSO de múltiplos feixes em conjunto com o WDM [275], bem como uma topologia híbrida RF/FSO proposta por [276], onde os autores propuseram uma estratégia promissora para atender à demanda por comunicações de alta capacidade. A proposta apresentada em [276] basicamente consistiu em aumentar a malha da rede sem fio MCMR baseada em RF por meio de um enlace FSO.

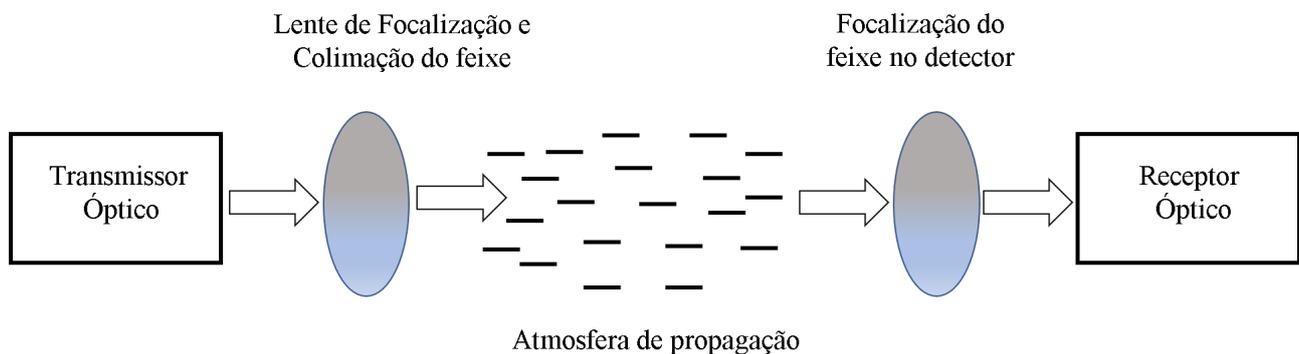


Figura 15: Diagrama Simplificado de um sistema de comunicação FSO.

O receptor tem as funções de detectar o feixe óptico modulado, processar e recuperar o sinal elétrico. Utiliza um sistema de lentes, fotodetector e o circuito eletrônico para demodular o sinal recuperado pelo fotodetector. A lente capta a energia da onda incidente e concentra-a no conjunto de acoplamento ao fotodetector. A corrente fotogerada é proporcional à potência óptica incidente, garantindo que o sinal elétrico recuperado tenha mesmo formato do sinal de modulação recebido [277]. A representação de um transceptor óptico em um sistema FSO é apresentada na Figura 16.

Os sistemas de comunicação via FSO têm sido tema de bastante interesse perante a indústria e a academia na última década. Com base nas localizações dos transmissores e receptores ópticos e no alcance da rede de qualquer sistema FSO [278], as redes FSO podem ser categorizadas em três tipos principais:

- *Optical Wireless Satellite Networks* (OWSNs): As OWSNs são projetadas de tal forma que forneçam um acesso de rede sem fio óptica com alta largura de banda aos usuários finais, fazendo uso de satélites, que cobrem grandes áreas da Terra [278–280]. Essas redes

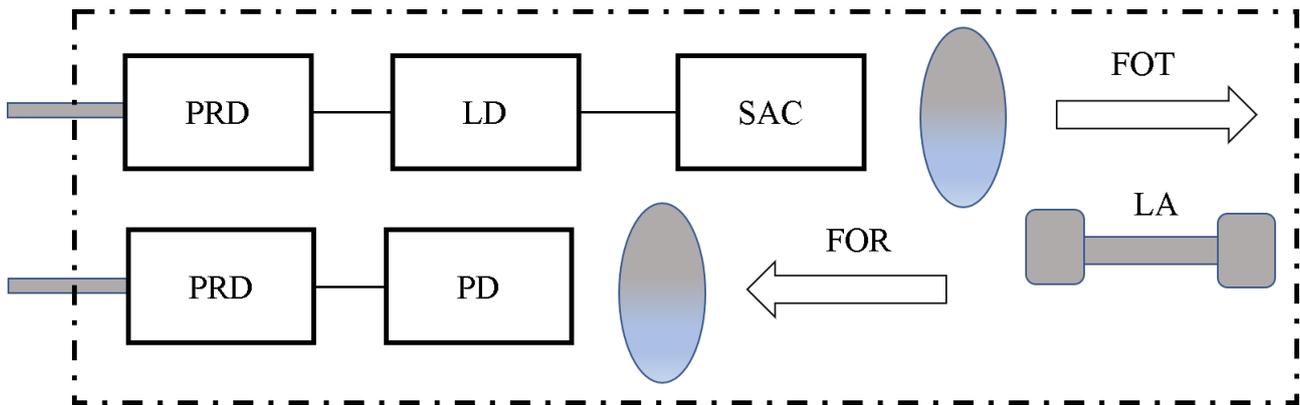


Figura 16: Diagrama em blocos de um transceptor óptico. PRD - Processamento de dados; LD - Diodo Laser; SAC - Sistema de Acoplamento; FOT – Feixe Óptico Transmitido; FOR – Feixe Óptico Recebido; PD – Fotodetector; LA - Lente de Alinhamento.

fornece uma rede de *backbone* espacial global com enlaces ópticos, independentemente das limitações topográficas, desde que tenha linha de visada entre transmissor e receptor. Como resultado, as OWSNs oferecem serviços de dados de alta qualidade, mesmo para áreas remotas. As OWSNs consistem em diferentes tipos de enlaces FSO, incluindo enlaces ópticos inter-satélite e satélite-superfície.

- *Optical Wireless Terrestrial Networks (OWTNs)*: As OWTNs são conhecidas como redes FSO externas, que estabelecem uma conexão sem fio óptica ponto-a-ponto com linha de visada direta entre dois transceptores FSO através da atmosfera [281–283]. Devido à LOS do sistema FSO, a distância percorrida pela propagação da luz do laser através da atmosfera pode atingir centenas de metros até dezenas de quilômetros. Este esquema FSO tem um enorme potencial para comunicações sem fio da próxima geração e estão se tornando um meio importante de acesso à Internet em banda larga.
- *Optical Wireless Home Network (OWHNs)*: OWHNs, também conhecidas como redes FSO internas, são empregadas para comunicações de banda larga sem fio em ambientes internos. OWHNs são usados para criar uma rede local composta de células, onde cada célula é um dos espaços divididos do edifício [284,285]. Cada célula óptica sem fio óptica é confinada em uma sala e esta conectada a uma infraestrutura de *backbone* de banda larga. Esse arranjo faz com que não haja interferência entre as células.

FSO para transmissão simultânea de sinais para redes 4G e 5G foi demonstrado em [286], onde os pesquisadores propuseram e avaliaram experimentalmente uma arquitetura com rede de acesso óptica híbrida utilizando RoF/FSO como *fronthaul* da rede. Os sinais foram transmitidos na faixa de 3,5 GHz em um link de fibra óptica de 8 km em cascata com um enlace FSO de 55 metros. Resultados experimentais demonstraram e apresentaram métricas de avaliação de desempenho dos sinais recebidos abaixo dos valores estipulados pelo órgão padronizador. Para redes pós 5G, a ideia de integrar diferentes tecnologias em uma única arquitetura de rede vêm sendo bastante discutida. Por exemplo, em [287], um sistema híbrido FiWi/FSO oferece serviços de alta velocidade em *hotspots* específicos e cobre lacunas espaciais entre as células por meio da transmissão de sinais Wi-Fi, equilibrando os requisitos entre capacidade, cobertura e custo. Este sistema alcança vazão de 10 Gbit/s em transmissões híbridas, enquanto que 80 Mbit/s é alcançado para sistemas WiFi.

O estado-da-arte em soluções que utilizam a tecnologia FSO como parte da camada física da rede para atender as próximas gerações de redes móveis iniciou-se com [288], onde os autores propuseram um solução híbrida com o emprego de RoF/FSO como parte do *fronthaul* da rede, enquanto que o acesso ao usuário foi na faixa de ondas milimétricas (24-26 GHz). Os autores emularam turbulências atmosféricas em ambientes de laboratório com objetivo de avaliar o desempenho do enlace RoF/FSO. Transmitiu-se um sinal modulado em 64-QAM e uma vazão de dados de 10 Gbit/s foi obtida. Maged *et al.* [289] investigaram e analisaram experimentalmente o desempenho de enlaces FSO que podem suportar condições severas de poeira. A análise considerou primeiramente o desempenho de um enlace FSO transportando um sinal com largura de faixa de 1 GHz modulado em 16-QAM. Em seguida, investigou-se os efeitos da poeira em enlaces RoF/FSO híbridos paralelos e, posteriormente analisou-se o desempenho de um enlace RoF/FSO híbrido em cascata transmitindo o mesmo sinal.

Como relatado anteriormente, o erro de desempenho do enlace FSO sofre os efeitos da turbulência atmosférica e erros de apontamento. Para mitigar interferências nas transmissões FSO, os autores em [290] propuseram algoritmos baseados em ML, incluindo DNN. Os resultados experimentais demonstraram uma melhoria de desempenho do método proposto em relação aos métodos convencionais.

6.4 Comunicação por luz visível

A *optical wireless communications* (OWC) é uma alternativa aos tradicionais sistemas de RF para suprir as crescentes demandas de transmissão de dados em redes 5G e 6G, sem abrir mão da mobilidade. Nesse tipo de comunicação, as informações são incorporadas no feixe de luz e, transmitidas no espaço livre. Algumas vantagens dos sistemas OWC em relação aos tradicionais sistemas de RF são: i) não exige licenciamento com os órgãos de regulamentação; ii) permite operação em áreas restritivas para comunicação de RF, como hospitais e aeronaves; iii) maior faixa de espectro disponível para exploração; iv) maior segurança contra espionagem, pois o confinamento do feixe de luz em um determinado ambiente impede a interceptação do mesmo por um dispositivo fora do mesmo ambiente; v) imunidade à interferência eletromagnética causadas pelas fontes de RF [291,292].

Entre as tecnologias OWC emergentes, destaca-se o VLC que emprega *light emitting diode* (LED). Esta tecnologia permite alcançar taxas de transmissão na ordem de Gbit/s, utilizando dispositivos de baixo custo e com a possibilidade de utilizar a mesma fonte de iluminação do ambiente para transmitir dados. Ademais, a divergência do feixe de luz permite cobrir uma área determinada a alguns metros de distância. Essas peculiaridades tornam o uso dos LEDs oportuno para a transmissão de dados em ambientes internos, nos quais o transmissor está localizado relativamente próximo do receptor. Em virtude dessas características, os enlaces VLC baseados em LEDs representam uma atraente alternativa para suprir as demandas de dados e conectividade das redes 5G e 6G, principalmente em relação aos enlaces de RF. Além disso, o uso dessa tecnologia também é considerado promissor para comunicação entre veículos devido à presença cada vez maior de LEDs nos automóveis [291,292]. Adicionalmente, lasers em luz visível também têm sido empregados como fonte transmissoras VLC. Neste caso, maiores taxas de dados e maior alcance são atingidos devido a maior largura de banda e maior coerência da luz transmitida em relação ao LED. Por exemplo, os autores em [293] relataram a transmissão de 6,9 Gbit/s utilizando um laser de fósforo com luz branca. Adicionalmente, os autores em [294] relataram taxas de até 20 Gbit/s em um cenário VLC interno, empregando *optical beam steering* e *delay adaptation techniques* (DAT) para aumentar a SNR e mitigar a *inter-symbol*

interference (ISI).

A Figura 17 apresenta o diagrama simplificado de um sistema VLC. Tipicamente, os dados são adequados à forma de onda de transmissão, representada pelo bloco modulador. O sinal elétrico modulado é combinado com um nível DC por meio de um *bias tee*. Vale ressaltar que o nível DC é responsável por fornecer alimentação ao LED. Por conseguinte, ocorre a emissão do feixe de luz, tipicamente com comprimentos de onda entre 380 e 750 nm. Na recepção, um colimador concentra a luz na entrada do fotodetector. O filtro é utilizado em aplicações que utilizam múltiplos LEDs transmissores em diferentes cores, assim, permitindo eliminar os sinais de frequências indesejadas, reduzindo o nível de ruído no fotodetector. Após o processo de conversão O/E, o sinal é amplificado e demodulado, entregando os dados recebidos ao usuário final.

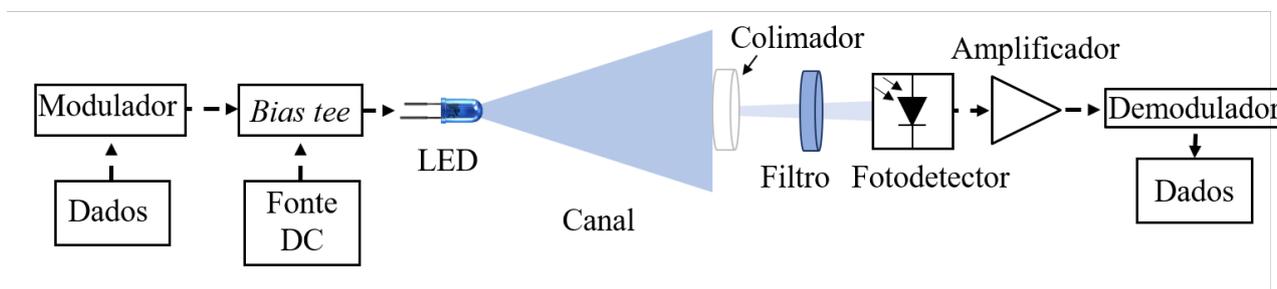


Figura 17: Diagrama simplificado de um sistema de comunicação em luz visível.

Apesar das diversas vantagens, o sistema VLC enfrenta vários desafios de implementação tanto para cenários externos quanto internos. Diversos trabalhos focam em otimizar tais peculiaridades dos sistemas VLC para utilização comercial do sistema em redes 6G. Por exemplo, a largura de banda disponível para modulação nos LEDs comerciais é limitada, sendo a banda de 3 dB correspondente a algumas dezenas de MHz [295]. É necessário aumentar a largura de banda dos LEDs e, conseqüentemente, a taxa de dados do sistema. Alguns trabalhos relatam técnicas para linearizar e compensar a resposta do LED em função da frequência, utilizando principalmente pré-distorção ou equalização [296]. Por exemplo, os autores de [297] propuseram a utilização de um equalizador em cascata com um filtro azul, ampliando a banda disponível para modulação de 17 MHz para 366 MHz.

Tipicamente, a maioria dos trabalhos relacionados a VLC focam em comunicações *downlink*. Entretanto, o *uplink* é essencial para estabelecer comunicação. Além disso, o sistema VLC deve prover mobilidade em toda área de cobertura, dado que o sistema depende de comunicações com LOS, assim, o movimento do receptor pode resultar em obstrução do enlace e tal situação deve ser levada em consideração durante o dimensionamento do sistema. Neste contexto, os autores de [298] propuseram um sistema bidirecional usando luz visível, distribuindo as frequências mais altas para *downlink* (verde, azul, índigo e violeta) enquanto as frequências mais baixas (vermelho, laranja e amarelo) foram utilizadas para *uplink*. Outra solução interessante é o uso de uma abordagem híbrida pode ser utilizada para enlaces VLC bidirecionais com VLC para *downlink* e RF ou infravermelho para *uplink*, combinando as vantagens de cada tecnologia. Por exemplo, os autores em [299] relataram um sistema híbrido baseado em *non-orthogonal multiple access* (NOMA) sobre o RF para *uplink*, enquanto que os autores de [300] utilizaram Wifi.

Os sistemas VLC podem apresentar cintilação, que é a flutuação na intensidade da luz ou brilho perceptível pelos olhos humanos. Isso pode causar desconforto e riscos à saúde em alguns casos [301]. A cintilação depende da modulação, frequência de operação, codificação, taxa de

dados, brilho dentre outros fatores. Os riscos à saúde podem ser imediatos, causando dores de cabeça, mal-estar, visão embaçada e até ataques epiléticos. Os sistemas devem operar dentro do máximo período de cintilação (MFTP - *Maximum Flickering Time Period*), que é o máximo período em que a intensidade da luz pode flutuar sem que o olho humano identifique. Dessa forma, uma oscilação de frequência maior que 200 Hz ou MFTP menor que 5 ms garantem um ambiente VLC seguro [302]. O padrão IEEE 802.15.7 define alguns métodos para mitigar a cintilação *intra-frame* e *inter-frame* [303]. A norma propôs o emprego de códigos (RLL - *run length limited*) como Manchester, 4B6B ou 8B10, que apresentam número iguais de 1s e 0s. Além disso, a utilização de sinais OFDM com envoltória constante foi proposta em [304] para regular os requisitos de oscilação. Os autores demonstraram experimentalmente que a técnicas de redução na PAPR podem ser usadas para realizar a especificação de cintilação em sistemas VLC.

A emissão de luz proveniente do sol e de fontes de luz artificiais, como lâmpadas fluorescentes e incandescentes causam interferência nos sinais transmitidos em um enlace VLC, visto que essa potência não modulada no receptor causa ruído adicional, degradando o desempenho geral do VLC. A Figura. 18 mostra a distribuição da densidade espectral emitida pelas lâmpadas incandescentes e fluorescentes e a emissão da radiação solar em função do comprimento de onda. A luz solar emite em toda a faixa de frequências e tem o pico de emissão em torno de 500 nm. Da mesma forma, as lâmpada incandescentes emitem em uma ampla faixa de frequência com pico em torno de 850 nm. Por outro lado, a lâmpada fluorescente não emite em toda a faixa, apresentando picos em torno de 450 nm, 550 nm e 580 nm. Diversas técnicas e componentes foram propostos para superar as penalidades de desempenho impostas pela emissão de luz não desejada. Em [305] os autores aplicaram filtros ópticos e filtros de RF passa-faixa. Assim, o ruído de disparo foi reduzido, visto que este depende diretamente da potência óptica incidente e da largura de faixa do fotodetector.

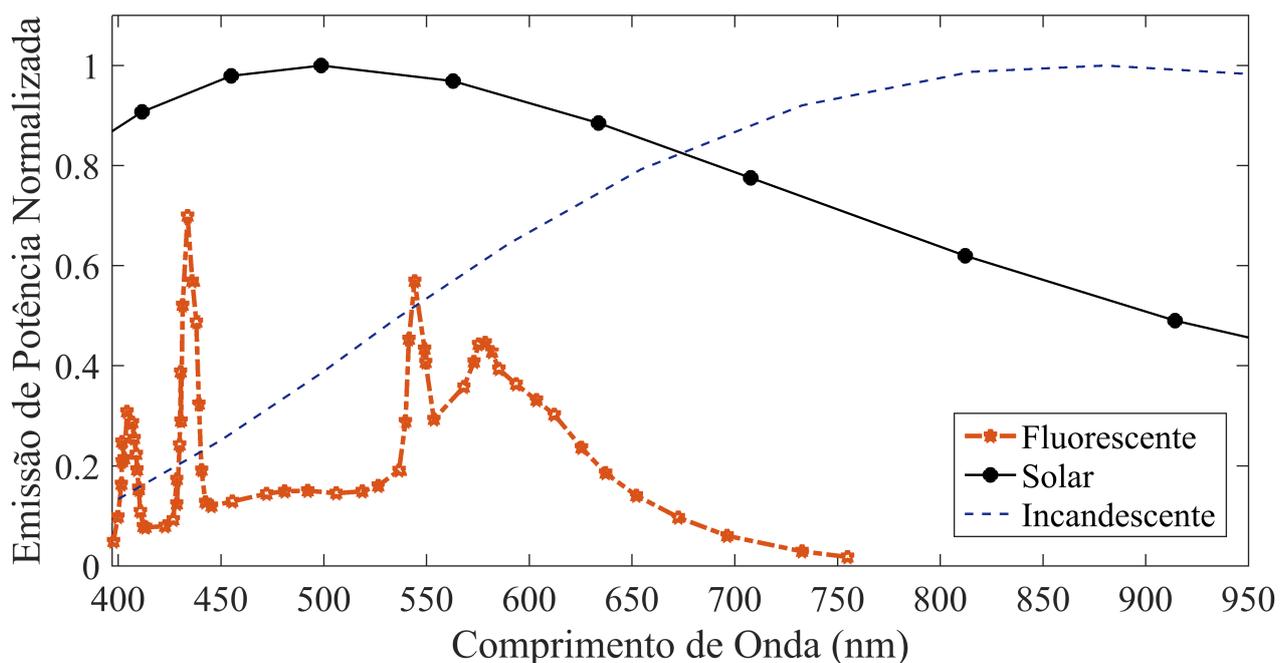


Figura 18: Distribuição da densidade espectral de lâmpadas incandescentes e fluorescentes e emissão de radiação solar em função do comprimento de onda.

7 Conclusões

Em síntese, este relatório apresentou uma revisão bibliográfica detalhada e descreveu as principais tecnologias de RF e de comunicações ópticas para redes 6G, cobrindo os seguintes tópicos: dispositivos de radiofrequência; antenas; modelagem do canal sem fio; evolução das redes ópticas e sistemas óptico-*wireless*.

No que tange os dispositivos de RF, o relatório cobriu tanto amplificadores de RF quanto moduladores e filtros de RF. Na área de amplificadores de RF para altas frequências relatou-se o uso de diversas tecnologias de fabricação, que possibilitam atingir P_{sat} maiores que 15 dBm para frequências superiores a 100 GHz. Em relação a f_{op} , nota-se que os PAs baseados em GaAs e InP são os que tipicamente alcançam maiores frequências, apesar da degradação na potência de saturação. A técnica de neutralização foi capaz de prover ganho da ordem de 20 dB para 480 GHz. Quanto aos LNAs, a degradação está na NF devido ao desempenho limitado em função do ruído dos semicondutores; sendo esse um fator que limita a distância do enlace conforme aumenta-se a frequência. LNAs com largura de faixa de até 315 GHz, utilizando tecnologia mHEMT de 35 nm baseada em InGaAs, foram apresentados.

Os mais recentes avanços no desenvolvimento de novas categorias de moduladores e filtros de RF, que permitirão a integração de sinais na banda de THz com sistemas de comunicações ópticas, foram apresentados. Particular ênfase foi dada às capacidades dos moduladores plasmônicos para conversão de sinais ópticos-para-THz e de THz-para-ópticos que, integrados a sistemas de transmissão de sinais, permitiram desenvolver um enlace sem fio de 16 m de alcance. Estes avanços permitirão superar os obstáculos na implementação das futuras redes 6G.

Na rede 6G, com a evolução requisitos e cenários propostos, a comunicação em THz se apresenta como uma interessante solução para explorar ampla vazão de dados, alta resolução e miniaturização de dispositivos e antenas. A revisão bibliográfica de antenas operando em THz incluiu as faixas de frequência potenciais e as suas tecnologias de fabricação. Identificou-se que o desenvolvimento das antenas em THz é baseado em variações das técnicas convencionais aplicadas em mmWaves. Outros trabalhos focam no desenvolvimento de antenas fotocondutoras para geração de sinais contínuos na faixa de THz, utilizando conceitos que relacionam comunicações ópticas e física de plasma. Conclui-se que, no campo das antenas para a rede 6G, muito ainda pode ser explorando tanto empregando as técnicas convencionais de antenas para a faixa de THz, quanto no desenvolvimento de antenas fotocondutoras. A demanda das aplicações previstas para a rede 6G impulsionará cada vez mais as pesquisas em antenas, incluindo as técnicas de fabricação e estudo de materiais, a fim de suprir as desafiadoras exigências.

O estudo do canal de comunicação para redes 6G é um tema de fundamental importância e sujeito à discussão devido aos diferentes cenários, aplicações, tecnologias e faixas de frequências possíveis. Análises estatísticas obtidas por meio de campanhas de medidas em conjunto com os modelos teóricos são ferramentas essenciais na caracterização do canal, como também dos diferentes fenômenos de propagação, auxiliando no planejamento e no desenvolvimento das futuras redes 6G.

O aumento da taxa de dados nos sistemas de comunicações móveis está diretamente relacionado com a evolução da capacidade de dados dos enlaces ópticos, os quais oferecem suporte a uma ampla gama de serviços, incluindo as redes de acesso, redes residenciais e redes metropolitanas. Além disso, a rede 5G e o surgimento da rede 6G trazem novos requisitos de taxa e latência para as redes ópticas. Dessa forma, a otimização das fibras SMF atuais para atender os requisitos da rede 6G concentra-se em aumentar a área efetiva e na diminuição da atenua-

ção da fibras, especialmente com a utilização de fibras ópticas com núcleo de sílica pura. Por outro lado, o aumento da capacidade dos enlaces ópticos aponta para utilização de fibras com múltiplos núcleos, sendo o atual recorde mundial de taxa de dados x distância de 172 Tbit/s ao longo de 2040 km. Adicionalmente, a utilização de fibras de núcleo oco têm ganhado atenção para aplicações de baixa latência, demonstrando latência 31% menor, quando comparadas com cabos de fibras ópticas de núcleo sólido.

Em relação às topologias de redes ópticas, notou-se um crescente interesse em novas arquiteturas para prover acesso tanto para redes urbanas densas quanto para áreas remotas. Este último cenário possui um enorme apelo tecnológico, comercial e social, visto que espera-se prover conectividade à áreas desfavorecidas, contribuindo com a inclusão das pessoas à era digital. Considerando os novos cenários de uso das redes 5G e 6G, a integração de serviços de transporte e distribuição de sinais de comunicações móveis celulares tornou-se imprescindível, com potencial de impactar positivamente diversas verticais de mercado. Dessa forma, o desenvolvimento de novas topologias de redes ópticas tornou-se uma solução chave para auxiliar as redes 5G e 6G a atingirem todo o potencial previsto em suas respectivas concepções.

Os sistemas óptico-*wireless*, fruto da convergência entre redes ópticas e sem fio, representam solução chave para o desenvolvimentos das redes de nova geração. Tais sistemas são parte do escopo da área de estudo conhecida como fotônica de micro-ondas e combinam vantagens das comunicações ópticas na distribuição de sinais com o desejado acesso sem fio. Os principais avanços em sistemas óptico-*wireless* direcionados às redes 5G e 6G têm apontado para: tecnologia RoF, que pode ser digital, analógica ou híbrida; soluções baseadas em topologia FiWi; soluções baseadas em FSO e VLC.

Com o objetivo de atender aos requisitos de serviços e aplicações previstos para as futuras redes móveis, os esforços de pesquisa estão convergindo para o emprego de tecnologias para oferecer suporte à ampla variedade de novas aplicações que demandam esforços computacionais sensíveis à latência. Neste contexto, algoritmos baseados em IA tendem a ser promissores para o controle efetivo e dinâmico dos inúmeros parâmetros das redes, cada vez mais densas e heterogêneas.

Nos sistemas OWC, destacam-se as comunicações baseados em óptica no espaço livre. Por oferecer serviços de comunicações de banda larga, o FSO vêm sendo considerado como um candidato adequado para atender serviços ponto-a-ponto para os usuários finais. No entanto, uma transmissão FSO está sujeita às condições não ideais de transmissão devido condições meteorológicas instáveis. Em outras palavras, os sistemas FSO são suscetíveis às condições climáticas, que causam uma atenuação ou mesmo bloqueiam a propagação do feixe.

Trabalhos utilizando FSO para transmissão simultânea de sinais para redes 4G e 5G propõe o emprego do FSO na comunicação de última milha, ou seja, no *fronthaul* da rede. Para redes pós 5G a ideia de integrar diferentes tecnologias em uma única arquitetura de rede vêm sendo bastante discutida. Por exemplo, sistemas híbridos utilizando FiWi/FSO, oferecem serviços de alta velocidade em *hotspots* específicos cobrindo assim lacunas espaciais entre as células por meio da transmissão de sinais Wi-Fi.

A tecnologia VLC é uma alternativa aos tradicionais sistemas de RF para atender as elevadas taxas de transmissão provenientes das redes 5G e 6G. Destaca-se como vantagens da utilização do VLC: a operação em áreas sensíveis a interferência eletromagnética e a elevada largura de banda disponível sem exigir licenciamento. Apesar dos diversos benefícios da comunicação em luz visível, o sistema VLC ainda apresenta desafios de implementação prática, tanto para cenários externos quanto internos. A estreita banda disponível para modulação dos LEDs comerciais, o estabelecimento do *uplink*, os enlaces sem visada direta, a cintilação na intensidade

da luz, são alguns dos desafios que devem ser satisfeitos para que a VLC seja parte integrante das futuras redes 6G.

Referências

- [1] 3GPP TS 23.501, version 15.5.0, Release 15, *System architecture for the 5G System (5GS)*, Apr 2019. [Online]. Available: <http://www.etsi.org>
- [2] Matti Latva-aho and Kari Leppänen, *Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence*, Spt 2019. [Online]. Available: <http://urn.fi/urn:isbn:9789526223544>
- [3] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, 2019.
- [4] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78 729–78 757, 2019.
- [5] C. de Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto *et al.*, “White Paper on RF Enabling 6G – Opportunities and Challenges from Technology to Spectrum,” *6G Research Visions*, 2020, [Online; acessado em 30 de junho de 2021].
- [6] S. Cherry, “Edholm’s law of bandwidth,” *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 7, pp. 58–60, 2004.
- [7] T. Kürner and S. Priebe, “Towards THz Communications - Status in Research, Standardization and Regulation,” *J Infrared Milli Terahz Waves*, vol. 35, pp. 53–62, 2014.
- [8] L. Bariah, L. Mohjazi, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios, G. K. Kurt, H. Yanikomeroğlu, and O. A. Dobre, “A Prospective Look: Key Enabling Technologies, Applications and Open Research Topics in 6G Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 174 792–174 820, 2020.
- [9] S. A. Al-Gailani, M. F. M. Salleh, A. A. Salem, R. Q. Shaddad, U. U. Sheikh, N. A. Algeelani, and T. A. Almohamad, “A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks,” *IEEE Access*, 2020.
- [10] S. Dang, O. Amin, B. Shilada, and M.-S. Alouini, “What should 6G be?” *Nature Electronics*, vol. 3, pp. 20–29, 2020.
- [11] S. Tripathi, N. V. Sabu, A. K. Gupta, and H. S. Dhillon, “Millimeter-wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless,” in *6G Mobile Wireless Networks*, 2021, [Online; acessado em 07 de julho de 2021].
- [12] “Article 2.1: Frequency and wavelength band,” https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/reg/R-REG-RR-2016-ZPF-E.zip, 2016, [Online; acessado em 14 de julho de 2021].
- [13] G. A. Jones, D. H. Layer, and T. G. Osenkowsky, *National Association of Broadcasters Engineering Handbook: NAB Engineering Handbook*. Taylor and Francis, 2007.
- [14] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, “TeraNets: ultra-broadband communication networks in the terahertz band,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 4, pp. 130–135, 2014.

- [15] J. F. O'Hara, S. Ekin, W. Choi, and I. Song, "A perspective on terahertz next-generation wireless communications," *Technologies*, vol. 7, no. 2, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7080/7/2/43>
- [16] T. Wild, V. Braun, and H. Viswanathan, "Joint Design of Communication and Sensing for Beyond 5G and 6G Systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 30 845–30 857, 2021.
- [17] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, "Communications in the 6G era," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 063–57 074, 2020.
- [18] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What Will 5G Be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [19] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [20] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619–3647, 2018.
- [21] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [22] H. Sardeddeen, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, "An Overview of Signal Processing Techniques for Terahertz Communications," 2021.
- [23] J. Webber, A. Oshiro, S. Iwamatsu, Y. Nishida, M. Fujita, and T. Nagatsuma, "48-Gbit/s 8K video-transmission using resonant tunnelling diodes in 300-GHz band," *Electronics Letters*, vol. n/a, no. n/a, 2021. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/ell2.12219>
- [24] A. J. Seeds, H. Shams, M. J. Fice, and C. C. Renaud, "TeraHertz Photonics for Wireless Communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 579–587, 2015.
- [25] Q. Lu, D. Wu, S. Sengupta, S. Slivken, and M. Razeghi, "Room temperature continuous wave, monolithic tunable THz sources based on highly efficient mid-infrared quantum cascade lasers," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 23595, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/srep23595>
- [26] A. Nikpaik, A. H. Masnadi Shirazi, A. Nabavi, S. Mirabbasi, and S. Shekhar, "A 219-to-231 GHz Frequency-Multiplier-Based VCO With 3% Peak DC-to-RF Efficiency in 65-nm CMOS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 2, pp. 389–403, 2018.
- [27] K. Sengupta, T. Nagatsuma, and D. M. Mittleman, "Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonic systems," *Nature Electronics*, vol. 1, no. 12, pp. 622–635, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0173-2>

- [28] J. V. Siles, K. B. Cooper, C. Lee, R. H. Lin, G. Chattopadhyay, and I. Mehdi, “A New Generation of Room-Temperature Frequency-Multiplied Sources With up to 10x Higher Output Power in the 160-GHz-1.6-THz Range,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 596–604, 2018.
- [29] M. M. Esmael, M. A. Abdalla, and I. A. Eshrah, “A 19-43 GHz Linear Power Amplifier in 28nm Bulk CMOS for 5G Phased Array,” in *2019 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR)*, 2019, pp. 1–3.
- [30] K. Dasgupta, S. Daneshgar, C. Thakkar, J. Jaussi, and B. Casper, “A 26 dBm 39 GHz Power Amplifier with 26.6% PAE for 5G Applications in 28nm bulk CMOS,” in *2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, 2019, pp. 235–238.
- [31] K.-C. Chiang, T.-C. Tsai, I. Huang, J.-H. Tsai, and T.-W. Huang, “A 27-GHz Transformer Based Power Amplifier with 513.8-mW/mm² Output Power Density and 40.7% Peak PAE in 1-V 28-nm CMOS,” in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2019, pp. 1283–1286.
- [32] D. Manente, F. Padovan, D. Seebacher, M. Bassi, and A. Bevilacqua, “A 28-GHz Stacked Power Amplifier with 20.7-dBm Output P_{1dB} in 28-nm Bulk CMOS,” *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 3, pp. 170–173, 2020.
- [33] S. Daneshgar, K. Dasgupta, C. Thakkar, A. Chakrabarti, C. S. Levy, J. E. Jaussi, and B. Casper, “High-Power Generation for mm-Wave 5G Power Amplifiers in Deep Submicrometer Planar and FinFET Bulk CMOS,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 6, pp. 2041–2056, 2020.
- [34] C. de Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto *et al.*, “6G White Paper on Localization and Sensing,” *6G Research Visions*, 2020, [Online; acessado em 21 de junho de 2021].
- [35] P. M. Asbeck, N. Rostomyan, M. Özen, B. Rabet, and J. A. Jayamon, “Power Amplifiers for mm-Wave 5G Applications: Technology Comparisons and CMOS-SOI Demonstration Circuits,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 3099–3109, 2019.
- [36] M. Cui, C. Carta, and F. Ellinger, “A 21-dBm 3.7 W/mm² 28.7% PAE 64-GHz Power Amplifier in 22-nm FD-SOI,” *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 3, pp. 386–389, 2020.
- [37] R. Bagger and H. Sjöland, “A 20-GHz Bandwidth Power Amplifier for Phased Array 5G New Radio Transmitters,” *IEEE Solid-State Circuits Letters*, vol. 3, pp. 302–305, 2020.
- [38] A. A. Nawaz, J. D. Albrecht, and A. Çağrı Ulusoy, “A 28-/60-GHz Band-Switchable Bidirectional Amplifier for Reconfigurable mm-Wave Transceivers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 7, pp. 3197–3205, 2020.
- [39] J.-A. Han, X. Cheng, X.-H. Luo, L. Zhang, F.-J. Chen, X.-L. Xia, Z.-C. Zhao, K.-F. Chen, B.-B. Cheng, and X.-J. Deng, “A Sandwiched-Slab-Transformer-Based SiGe Power Amplifier Operating at W- and D-Bands,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 597–600, 2020.

- [40] P. Stärke, C. Carta, and F. Ellinger, “High-Linearity 19-dB Power Amplifier for 140–220 GHz, Saturated at 15 dBm, in 130-nm SiGe,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 403–406, 2020.
- [41] W. Wang, F. Guo, T. Chen, and K. Wang, “24.8 A W-Band Power Amplifier with Distributed Common-Source GaN HEMT and 4-Way Wilkinson-Lange Combiner Achieving 6W Output Power and 18% PAE at 95GHz,” in *2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, 2020, pp. 376–378.
- [42] M. Ćwikliński, P. Brückner, S. Leone, C. Friesicke, H. Maßler, R. Lozar, S. Wagner, R. Quay, and O. Ambacher, “D-Band and G-Band High-Performance GaN Power Amplifier MMICs,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 12, pp. 5080–5089, 2019.
- [43] M. Ćwikliński, P. Brückner, S. Leone, S. Krause, C. Friesicke, H. Maßler, R. Quay, and O. Ambacher, “First Demonstration of G-Band Broadband GaN Power Amplifier MMICs Operating Beyond 200 GHz,” in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 1117–1120.
- [44] A. B. Amado-Rey, Y. Campos-Roca, C. Friesicke, S. Wagner, and O. Ambacher, “GCPW GaAs Broadside Couplers at H-Band and Application to Balanced Power Amplifiers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 1, pp. 78–85, 2019.
- [45] B. Schoch, A. Tessmann, A. Leuther, S. Wagner, and I. Kallfass, “300 GHz broadband power amplifier with 508 GHz gain-bandwidth product and 8 dBm output power,” in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2019, pp. 1249–1252.
- [46] L. John, A. Tessmann, A. Leuther, P. Neining, and T. Zwick, “Investigation of Compact Power Amplifier Cells at THz Frequencies using InGaAs mHEMT Technology,” in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2019, pp. 1261–1264.
- [47] B. Gashi, L. John, D. Meier, M. Rösch, A. Tessmann, A. Leuther, H. Massler, M. Schlechtweg, and O. Ambacher, “Broadband and High-Gain 400-GHz InGaAs mHEMT Medium-Power Amplifier S-MMIC,” in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 484–487.
- [48] B.-Z. Lu, Y.-C. Wu, C.-C. Chiong, and H. Wang, “A 78-93 GHz Power Amplifier with 19.6-dBm P_{sat} and 12.8% PAE_{peak} in 0.1- μm GaAs pHEMT for Radio Astronomical Receiver System,” in *2019 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*, 2019, pp. 1–3.
- [49] N. L. K. Nguyen, N. S. Killeen, D. P. Nguyen, A. N. Stameroff, and A.-V. Pham, “A Wideband Gain-Enhancement Technique for Distributed Amplifiers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 9, pp. 3697–3708, 2020.
- [50] Z. Griffith, M. Urteaga, P. Rowell, and L. Tran, “A 160-183 GHz 0.24-W (7.5% PAE) PA and 0.14-W (9.5% PAE) PA, High-Gain, G-band Power Amplifier MMICs in 250-nm InP HBT,” in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 488–491.

- [51] Z. Griffith, M. Urteaga, P. Rowell, L. Tran, and B. Brar, “50 – 250 GHz High-Gain Power Amplifier MMICs in 250-nm InP HBT,” in *2019 IEEE BiCMOS and Compound semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, 2019, pp. 1–6.
- [52] H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama, and H. Nosaka, “300-GHz-Band 120-Gb/s Wireless Front-End Based on InP-HEMT PAs and Mixers,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, pp. 2316–2335, 2020.
- [53] H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, H. Sugiyama, and H. Nosaka, “475-GHz 20-dB-Gain InP-HEMT Power Amplifier Using Neutralized Common-Source Architecture,” in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 1121–1124.
- [54] D. Parveg, M. Varonen, D. Karaca, A. Vahdati, M. Kantanen, and K. A. I. Halonen, “Design of a D-Band CMOS Amplifier Utilizing Coupled Slow-Wave Coplanar Waveguides,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 3, pp. 1359–1373, 2018.
- [55] A. Hamani, A. Siligaris, B. Blampey, C. Dehos, and J. L. Gonzalez Jimenez, “A 125.5-157 GHz 8 dB NF and 16 dB of Gain D-band Low Noise Amplifier in CMOS SOI 45 nm,” in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020, pp. 197–200.
- [56] K. Ryyänen, K. Stadius, A. Hammer, M. Varonen, H. Forsten, T. Kiuru, V. Viikari, and J. Ryyänen, “A Compact Low-Power 140-GHz Low-Noise Amplifier with 19-dB Gain and 7-dB NF,” in *2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2021, pp. 1–5.
- [57] H. Li, J. Chen, D. Hou, Z. Li, P. Zhou, and W. Hong, “A 230-GHz SiGe Amplifier With 21.8-dB Gain and 3-dBm Output Power for Sub-THz Receivers,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, pp. 1–1, 2021.
- [58] I. Dan, C. M. Grötsch, B. Schoch, S. Wagner, L. John, A. Tessmann, and I. Kallfass, “A 300GHz Quadrature Down-Converter S-MMIC for Future Terahertz Communication,” in *2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*, 2019, pp. 1–6.
- [59] C. M. Grötsch, I. Dan, L. John, S. Wagner, and I. Kallfass, “A Compact 281–319 GHz Low-Power Downconverter MMIC for Superheterodyne Communication Receivers,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 231–239, 2021.
- [60] X. Zhang, R. Tan, Z. Zheng, X. Li, Z. Zhang, J. Sun, Y. Zhou, L. Lü, B. Zhang, and H. Qin, “Terahertz filters based on frequency selective surfaces for high-speed terahertz switch,” *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 1, p. 014504, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4773341>
- [61] Z. Han, K. Kohno, H. Fujita, K. Hirakawa, and H. Toshiyoshi, “Tunable Terahertz Filter and Modulator Based on Electrostatic MEMS Reconfigurable SRR Array,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 114–122, 2015.
- [62] J. M. Woo, D.-S. Kim, D.-J. Kim, and J.-H. Jang, “Terahertz filter integrated with a subwavelength structured antireflection coating,” *AIP Advances*, vol. 5, no. 12, p. 127238, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4939571>

- [63] Z. T. Ma, Z. X. Geng, Z. Y. Fan, J. Liu, and H. D. Chen, “Modulators for Terahertz Communication: The Current State of the Art,” *Research*, vol. 2019, p. 6482975, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.34133/2019/6482975>
- [64] Y. Huang, K. Nakamura, Y. Takida, H. Minamide, K. Hane, and Y. Kanamori, “Actively tunable THz filter based on an electromagnetically induced transparency analog hybridized with a MEMS metamaterial,” *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 20807, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77922-1>
- [65] L. Gingras, A. Jaber, A. Maleki, O. Reshef, K. Dolgaleva, R. W. Boyd, and J.-M. M enard, “Ultrafast modulation of the spectral filtering properties of a THz metasurface,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 14, pp. 20 296–20 304, Jul 2020. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-28-14-20296>
- [66] K. Jia, L. Fan, and Z. Cao, “THz narrow band-pass filter based on stopband modulation in corrugated parallel plate waveguides,” *Optics Communications*, vol. 465, p. 125604, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401820301991>
- [67] S. Guo, J. Ye, and P. Zhang, “A Differential Modulation Scheme for Metasurface-Based Terahertz Communications,” *Frontiers in Communications and Networks*, vol. 2, p. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/frcmn.2021.687233>
- [68] A. Singh, M. Andrello, N. Thawdar, and J. M. Jornet, “Design and Operation of a Graphene-Based Plasmonic Nano-Antenna Array for Communication in the Terahertz Band,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 9, pp. 2104–2117, 2020.
- [69] M. Shalaby, M. Peccianti, Y. Ozturk, I. Al-Naib, C. P. Hauri, and R. Morandotti, “Terahertz magnetic modulator based on magnetically clustered nanoparticles,” *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 15, p. 151108, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4898095>
- [70] X. Liu, L. Xiong, X. Yu, S. He, B. Zhang, and J. Shen, “Magnetically controlled terahertz modulator based on Fe₃O₄ nanoparticle ferrofluids,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 51, no. 10, p. 105003, feb 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaab97>
- [71] S. Ummethala, T. Harter, K. Koehnle, Z. Li, S. Muehlbrandt, Y. Kutuvantavida, J. Kemal, P. Marin-Palomo, J. Schaefer, A. Tessmann, S. K. Garlapati, A. Bacher, L. Hahn, M. Walther, T. Zwick, S. Randel, W. Freude, and C. Koos, “THz-to-optical conversion in wireless communications using an ultra-broadband plasmonic modulator,” *Nature Photonics*, vol. 13, no. 8, pp. 519–524, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0475-6>
- [72] M. Burla, C. Hoessbacher, W. Heni, C. Haffner, Y. Fedoryshyn, D. Werner, T. Watanabe, H. Massler, D. L. Elder, L. R. Dalton, and J. Leuthold, “500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics,” *APL Photonics*, vol. 4, no. 5, p. 056106, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.5086868>

- [73] Y. Salamin, B. Baeuerle, W. Heni, F. C. Abrecht, A. Josten, Y. Fedoryshyn, C. Haffner, R. Bonjour, T. Watanabe, M. Burla, D. L. Elder, L. R. Dalton, and J. Leuthold, “Microwave plasmonic mixer in a transparent fibre-wireless link,” *Nature Photonics*, vol. 12, no. 12, pp. 749–753, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0281-6>
- [74] V. H. M. Donald, “Advanced mobile phone service: The cellular concept,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 58, no. 1, pp. 15–41, 1979.
- [75] K.-M. L. Zhi Ning Chen, *Antennas for Base Stations in Wireless Communications*. McGraw-Hill Education, 2009.
- [76] W. C.-Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*. New York: J Wiley, 1993, vol. 2nd.
- [77] P. v. B. Henrik Asplund, David Astely, *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments*. Elsevier, 2020.
- [78] R. Hansen, “Array pattern control and synthesis,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 141–151, 1992.
- [79] H. Dam, M. Berg, S. Andersson, R. Bormann, M. Frerich, F. Ahrens, and T. Henss, “Performance evaluation of adaptive antenna base stations in a commercial gsm network,” in *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324)*, vol. 1, 1999, pp. 47–51 vol.1.
- [80] S. Anderson, B. Hagerman, H. Dam, U. Forsen, J. Karlsson, F. Kronstedt, S. Mazur, and K. Molnar, “Adaptive antennas for GSM and TDMA systems,” *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 74–86, 1999.
- [81] G. T. . version 0.2.1 Release 10, *Overview of 3GPP Release 10 V0.2.1 (2014-06)*, Jun 2014.
- [82] V. H. M. Donald, “Advanced mobile phone service: The cellular concept,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 58, no. 1, pp. 15–41, 1979.
- [83] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, “Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [84] J.-S. Park, J.-B. Ko, H.-K. Kwon, B.-S. Kang, B. Park, and D. Kim, “A Tilted Combined Beam Antenna for 5G Communications Using a 28-GHz Band,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1685–1688, 2016.
- [85] Y. Yashchyshyn, K. Derzakowski, G. Bogdan, K. Godziszewski, D. Nyzovets, C. H. Kim, and B. Park, “28 GHz Switched-Beam Antenna Based on S-PIN Diodes for 5G Mobile Communications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 225–228, 2018.

- [86] C.-X. Mao, M. Khalily, P. Xiao, T. W. C. Brown, and S. Gao, “Planar Sub-Millimeter-Wave Array Antenna With Enhanced Gain and Reduced Sidelobes for 5G Broadcast Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 1, pp. 160–168, 2019.
- [87] Y. Zhang, J.-Y. Deng, M.-J. Li, D. Sun, and L.-X. Guo, “A MIMO Dielectric Resonator Antenna With Improved Isolation for 5G mm-Wave Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 747–751, 2019.
- [88] X. Wang, Y. Cheng, and Y. Dong, “A Wideband PCB-Stacked Air-Filled Luneburg Lens Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 327–331, 2021.
- [89] M. Xue, W. Wan, Q. Wang, and L. Cao, “Low-profile millimeter-wave broadband metasurface antenna with four resonances,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 463–467, 2021.
- [90] F. Xu and K. Wu, “Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 1, pp. 66–73, 2005.
- [91] D. Deslandes and K. Wu, “Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 6, pp. 2516–2526, 2006.
- [92] L. Yan, W. Hong, G. Hua, J. Chen, K. Wu, and T. J. Cui, “Simulation and experiment on SIW slot array antennas,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 9, pp. 446–448, 2004.
- [93] J. Liu, D. R. Jackson, and Y. Long, “Substrate Integrated Waveguide (SIW) Leaky-Wave Antenna With Transverse Slots,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 1, pp. 20–29, 2012.
- [94] E. Rajo-Iglesias and P. Kildal, “Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides,” *Iet Microwaves Antennas & Propagation*, vol. 5, pp. 282–289, 2011.
- [95] P. Kildal, A. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, “Design and experimental verification of ridge gap waveguide in bed of nails for parallel-plate mode suppression,” *Iet Microwaves Antennas & Propagation*, vol. 5, pp. 262–270, 2011.
- [96] H. Raza, J. Yang, P. Kildal, and E. Alfonso, “Resemblance between gap waveguides and hollow waveguides,” *Iet Microwaves Antennas & Propagation*, vol. 7, pp. 1221–1227, 2013.
- [97] F. Gatti, M. Bozzi, L. Perregrini, K. Wu, and R. G. Bosisio, “A Novel Substrate Integrated Coaxial Line (SICL) for Wide-Band Applications,” in *2006 European Microwave Conference*, 2006, pp. 1614–1617.
- [98] F. Zhu, W. Hong, J.-X. Chen, and K. Wu, “Ultra-wideband single and dual baluns based on substrate integrated coaxial line technology,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 10, pp. 3062–3070, 2012.

- [99] A. Belenguer, A. L. Borja, H. Esteban, and V. E. Boria, “High-performance coplanar waveguide to empty substrate integrated coaxial line transition,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 12, pp. 4027–4034, 2015.
- [100] Y. Shao, X.-C. Li, L.-S. Wu, and J.-F. Mao, “A wideband millimeter-wave substrate integrated coaxial line array for high-speed data transmission,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 8, pp. 2789–2800, 2017.
- [101] A. Li and K.-M. Luk, “Millimeter-wave end-fire magneto-electric dipole antenna and arrays with asymmetrical substrate integrated coaxial line feed,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 62–71, 2021.
- [102] Y. Gao, R. Ma, Y. Wang, Q. Zhang, and C. Parini, “Stacked Patch Antenna With Dual-Polarization and Low Mutual Coupling for Massive MIMO,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4544–4549, 2016.
- [103] M. V. Komandla, G. Mishra, and S. K. Sharma, “Investigations on Dual Slant Polarized Cavity-Backed Massive MIMO Antenna Panel With Beamforming,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6794–6799, 2017.
- [104] X. Yang, W. Lu, N. Wang, K. Nieman, C.-K. Wen, C. Zhang, S. Jin, X. Mu, I. Wong, Y. Huang, and X. You, “Design and implementation of a tdd-based 128-antenna massive MIMO prototype system,” *China Communications*, vol. 14, no. 12, pp. 162–187, 2017.
- [105] Y. Hu, W. Hong, C. Yu, Y. Yu, H. Zhang, Z. Yu, and N. Zhang, “A Digital Multibeam Array With Wide Scanning Angle and Enhanced Beam Gain for Millimeter-Wave Massive MIMO Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 11, pp. 5827–5837, 2018.
- [106] S. Li, Z. N. Chen, T. Li, F. H. Lin, and X. Yin, “Characterization of Metasurface Lens Antenna for Sub-6 GHz Dual-Polarization Full-Dimension Massive MIMO and Multibeam Systems,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1366–1377, 2020.
- [107] M. Temiz, E. Alsusa, L. Danoon, and Y. Zhang, “On the Impact of Antenna Array Geometry on Indoor Wideband Massive MIMO Networks,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 1, pp. 406–416, 2021.
- [108] Y. Aslan, A. Roederer, and A. Yarovoy, “System Advantages of Using Large-Scale Aperiodic Array Topologies in Future mm-Wave 5G/6G Base Stations: An Interdisciplinary Look,” *IEEE Systems Journal*, pp. 1–10, 2021.
- [109] I. F. da Costa, A. Cerqueira S., D. H. Spadoti, L. G. da Silva, J. A. J. Ribeiro, and S. E. Barbin, “Optically Controlled Reconfigurable Antenna Array for mm-Wave Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2142–2145, 2017.
- [110] A. C. Sodré, I. F. da Costa, R. A. dos Santos, H. R. D. Filgueiras, and D. H. Spadoti, “Waveguide-Based Antenna Arrays for 5G Networks,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, pp. 1–10, 2018.

- [111] E. C. Vilas Boas, H. R. D. Filgueiras, I. Feliciano da Costa, J. A. J. Ribeiro, and A. C. Sodre Jr, “Dual-band switched-beam antenna array for MIMO systems,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 14, no. 1, pp. 82–87, 2020.
- [112] H. R. D. Filgueiras, R. M. Borges, M. Caldano Melo, T. H. Brandão, and A. Cerqueira Sodr , “Dual-Band Wireless Fronthaul Using a FSS-Based Focal-Point/Cassegrain Antenna Assisted by an Optical Midhaul,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 112 578–112 587, 2019.
- [113] T. H. Brandão, F. Scotti, H. R. D. Filgueiras, A. A. d. C. Alves, D. Onori, S. Melo, A. Bogoni, and A. Cerqueira Sodr  Jr., “Coherent dual-band radar system based on a unique antenna and a photonics-based transceiver,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 13, no. 4, pp. 505–511, 2019.
- [114] E. S. Lima, R. M. Borges, L. A. M. Pereira, H. R. D. Filgueiras, A. M. Alberti, and A. C. Sodr , “Multiband and photonically amplified fiber-wireless xhaul,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44 381–44 390, 2020.
- [115] H. R. D. Filgueiras, J. R. Kelly, P. Xiao, I. da Costa, and A. Cerqueira Sodr , “Wide-band Omnidirectional Slotted-Waveguide Antenna Array Based on Trapezoidal Slots,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, pp. 1–8, 2019.
- [116] L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, “6G Wireless Systems: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147 029–147 044, 2020.
- [117] L. Bariah, L. Mohjazi, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu, and O. A. Dobre, “A Prospective Look: Key Enabling Technologies, Applications and Open Research Topics in 6G Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 174 792–174 820, 2020.
- [118] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, “6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 133 995–134 030, 2020.
- [119] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [120] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, “The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, 2019.
- [121] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, “6G wireless communications: Vision and potential techniques,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, 2019.
- [122] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, “6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, 2019.
- [123] E. Calvanese Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, and C. Dehos, “6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 42–50, 2019.

- [124] N. Rajatheva, I. Atzeni, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, J.-B. Dore, S. Erkucuk, M. Fuentes, K. Guan, Y. Hu *et al.*, “White paper on broadband connectivity in 6G,” *6G Research Visions*, 2020, [Online; acessado em 21 de junho de 2021].
- [125] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2020.
- [126] N. Rajatheva, I. Atzeni, S. Bicaïs, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, C. D’Andrea, J.-B. Dore, S. Erkucuk, M. Fuentes *et al.*, “Scoring the terabit/s goal: Broadband connectivity in 6G,” *submitted to IEEE Access*, 2020, [Online; acessado em 21 de junho de 2021].
- [127] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, “Terahertz band: Next frontier for wireless communications,” *Physical Communication*, vol. 12, pp. 16–32, 2014. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490714000238>
- [128] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, “Terahertz Band: The Last Piece of RF Spectrum Puzzle for Communication Systems,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 1–32, 2020.
- [129] V. Petrov, A. Pyattaev, D. Moltchanov, and Y. Koucheryavy, “Terahertz band communications: Applications, research challenges, and standardization activities,” in *2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2016, pp. 183–190.
- [130] K. Tekbıyık, A. R. Ekti, G. K. Kurt, and A. Görçin, “Terahertz band communication systems: Challenges, novelties and standardization efforts,” *Physical Communication*, vol. 35, p. 100700, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490718307766>
- [131] “Attenuation Due to Clouds and Fog, document ITU Recommendation ITU-R P.676-11,” <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en>, 2016, [Online; acessado em 21 de junho de 2021].
- [132] Y. Huo, X. Dong, W. Xu, and M. Yuen, “Enabling Multi-Functional 5G and Beyond User Equipment: A Survey and Tutorial,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 975–117 008, 2019.
- [133] R. Piesiewicz, C. Jansen, S. Wietzke, D. Mittleman, M. Koch, and T. Kürner, “Properties of building and plastic materials in the THz range,” *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 28, no. 5, pp. 363–371, 2007.
- [134] C. D. Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, and M. Liyanage, “Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836–886, 2021.
- [135] J. M. C. Brito, L. L. Mendes, and J. G. S. Gontijo, “Brazil 6G Project - An Approach to Build a National-wise Framework for 6G Networks,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [136] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, “The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, 2019.

- [137] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, 2019.
- [138] R. Xu, S. Gao, B. S. Izquierdo, C. Gu, P. Reynaert, A. Standaert, G. J. Gibbons, W. Bösch, M. E. Gadringer, and D. Li, “A review of broadband low-cost and high-gain low-terahertz antennas for wireless communications applications,” *Ieee Access*, vol. 8, pp. 57 615–57 629, 2020.
- [139] M. Tonouchi, “Cutting-edge Terahertz Technology,” *Nature Photon*, vol. 1, pp. 97–105, 2007.
- [140] D. Saeedkia, *Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications*. Woodhead, 2013, vol. 1nd.
- [141] B. B. Hu and M. C. Nuss, “Imaging with terahertz waves,” *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 16, pp. 1716–1718, Aug 1995.
- [142] M. Nagel, F. Richter, P. Bolivar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Buttner, “Integrated THz biomolecular sensors for DNA,” in *Proceedings, IEEE Tenth International Conference on Terahertz Electronics*, 2002, pp. 70–73.
- [143] I. Mehdi, J. V. Siles, C. Lee, and E. Schlecht, “THz Diode Technology: Status, Prospects, and Applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 6, pp. 990–1007, 2017.
- [144] Z.-W. Miao, Z.-C. Hao, G. Q. Luo, L. Gao, J. Wang, X. Wang, and W. Hong, “140 GHz high-gain LTCC-integrated transmit-array antenna using a wideband SIW aperture-coupling phase delay structure,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 182–190, 2017.
- [145] K. Dhvaj, Y. Zhao, R. Al Hadi, X. Li, F. M.-C. Chang, and T. Itoh, “A 0.55 THz on-chip substrate integrated waveguide antenna,” in *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. IEEE, 2018, pp. 1–2.
- [146] C. Gu, S. Gao, V. Fusco, G. Gibbons, B. Sanz-Izquierdo, A. Standaert, P. Reynaert, W. Bösch, M. Gadringer, R. Xu *et al.*, “A D-band 3D-printed antenna,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 433–442, 2020.
- [147] D. Zarifi, A. Farahbakhsh, and A. U. Zaman, “A D-Band Center-Feed Linear Slot Array Antenna Based on Gap Waveguide,” in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [148] A. Kosogor and Y. Tikhov, “A 220-300 GHz Offset Dual-Reflector Antenna for Point-to-Point Radio,” in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2020, pp. 1–3.
- [149] A. Gomez-Torrent, M. Garcia-Vigueras, L. Le Coq, A. Mahmoud, M. Ettorre, R. Sauleau, and J. Oberhammer, “A low-profile and high-gain frequency beam steering subterahertz antenna enabled by silicon micromachining,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 2, pp. 672–682, 2019.

- [150] Z.-W. Miao, Z.-C. Hao, Y. Wang, B.-B. Jin, J.-B. Wu, and W. Hong, “A 400-GHz high-gain quartz-based single layered folded reflectarray antenna for terahertz applications,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 78–88, 2018.
- [151] Y.-W. Wu, Z. Jiang, and Z.-C. Hao, “A 400-GHz Low Cost Planar Leaky-Wave Antenna With Low Sidelobe Level and Low Cross-Polarization Level,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 427–430, 2020.
- [152] X. Li, L. Lin, L.-S. Wu, W.-Y. Yin, and J.-F. Mao, “A bandpass graphene frequency selective surface with tunable polarization rotation for THz applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 662–672, 2016.
- [153] K.-M. Luk, S.-F. Zhou, Y. Li, F. Wu, K.-B. Ng, C.-H. Chan, and S. Pang, “A micro-fabricated low-profile wideband antenna array for Terahertz communications,” *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2017.
- [154] Y. He, Y. Chen, L. Zhang, S.-W. Wong, and Z. N. Chen, “An overview of terahertz antennas,” *China Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 124–165, 2020.
- [155] M. C. Lemme, T. J. Echtermeyer, M. Baus, and H. Kurz, “A graphene field-effect device,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 28, no. 4, pp. 282–284, 2007.
- [156] E. W. Hill, A. Vijayaraghavan, and K. Novoselov, “Graphene sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 12, pp. 3161–3170, 2011.
- [157] M. Esquius-Morote, J. S. Gómez-Dí, J. Perruisseau-Carrier *et al.*, “Sinusoidally modulated graphene leaky-wave antenna for electronic beamsweeping at THz,” *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 116–122, 2014.
- [158] G. Oliveri, D. H. Werner, and A. Massa, “Reconfigurable electromagnetics through metamaterials—a review,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 7, pp. 1034–1056, 2015.
- [159] D. Saeedkia, A. H. Majedi, S. Safavi-Naeini, and R. R. Mansour, “Analysis and design of a photoconductive integrated photomixer/antenna for terahertz applications,” *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 41, no. 2, pp. 234–241, 2005.
- [160] J. Hao, M. Mukherjee, J. Zhou, and J. Lloret, “Channel modeling and characteristics for 6G wireless communications,” *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 1, pp. 296–303, 2021.
- [161] X. Cheng, Z. Huang, and S. Chen, “Vehicular communication channel measurement, modelling, and application for beyond 5G and 6G,” *IET Commun.*, vol. 14, no. 19, pp. 3303–3311, 2020.
- [162] C.-X. Wang *et al.*, “6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 22–32, 2020.
- [163] C. Stefanovic, S. Panic, V. Bhatia, and N. Kumar, “On second-order statistics of the composite channel models for UAV-to-ground communications with UAV selection,” *IEEE Open J. of the Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 534–544, 2021.

- [164] S. Ju, Y. Xing, O. Kanhere, and T. S. Rappaport, “Millimeter wave and sub-Terahertz spatial statistical channel model for an indoor office building,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1561–1575, 2021.
- [165] H. Chong and Y. Chen, “Propagation modeling for wireless communications in the Terahertz band,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, pp. 96–101, 2018.
- [166] S. Zelenbaba *et al.*, “Multi-link vehicular wireless channel modelling: Impact of large obstructing vehicles.” [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2103.06790.pdf>
- [167] Z. Huang and X. Cheng, “A general 3D space-time-frequency non-stationary model for 6G channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 535–548, 2021.
- [168] J. Zhang *et al.*, “Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook,” *Front. Inform. Technol. Electron.*, vol. 21, no. 6, pp. 39–61, 2020.
- [169] A. Al-Saman, M. Mohamed, M. Cheffena, and A. Moldsvor, “Wideband channel characterization for 6G networks in industrial environments,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, 2021.
- [170] Y. Sun, C.-X. Wang, J. Huang, and J. Wang, “A 3D non-stationary channel model for 6G wireless systems employing intelligent reflecting surface,” in *2020 Internat. Conf. on Wirel. Commun. and Sig. Process. (WCSP)*, 2020, pp. 19–25.
- [171] I. Yildirim, A. Uyrus, and E. Basar, “Modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces for indoor and outdoor applications in future wireless networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 69, no. 2, pp. 1290–1301, 2021.
- [172] H. Zhang, X. Huang, J. Andrew, and Y. J. Guo, “Adaptive transmission based on MMSE equalization over fast fading channels,” in *2020 IEEE 92nd Veh. Tech. Conf. (VTC2020-Fall)*, 2020, pp. 1–5.
- [173] M. H. Alsharif *et al.*, “Sixth generation 6G wireless networks: Vision, research activities, challenges and potential solutions,” *Symmetry*, vol. 12, no. 4, 2020.
- [174] J. Reig, M.-T. Martínez-Inglés, L. Rubio, V.-M. Rodrigo-Penarrocha, and J.-M. Molina-García-Pardo, “Fading evaluation in the 60 GHz band in line-of-sight conditions,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, p. 12, 2014.
- [175] J. Blumenstein, T. Mikulasek, T. Zemen, C. Mecklenbräuker, R. Marsalek, and A. Prokes, “In-vehicle mm-wave channel model and measurement,” in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, 2014, pp. 1–5.
- [176] J. Blumenstein, A. Prokes, A. Chandra, T. Mikulasek, R. Marsalek, T. Zemen, and C. Mecklenbräuker, “In-vehicle channel measurement, characterization, and spatial consistency comparison of 30–11 GHz and 55–65 GHz frequency bands,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 3526–3537, 2017.
- [177] M. D. Yacoub, “The α - η - κ - μ fading model,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 8, pp. 3597–3610, Aug. 2016.

- [178] T. R. R. Marins, A. A. D. Anjos, C. R. N. D. Silva, V. M. R. Peñarrocha, L. Rubio, J. Reig, R. A. A. De Souza, and M. D. Yacoub, “Fading evaluation in standardized 5G millimeter-wave band,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67 268–67 280, 2021.
- [179] A. A. Dos Anjos, T. R. R. Marins, C. R. Nogueira Da Silva, V. M. Rodrigo Peñarrocha, L. Rubio, J. Reig, R. A. A. De Souza, and M. D. Yacoub, “Higher order statistics in a mmwave propagation environment,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 103 876–103 892, 2019.
- [180] F. Hamaoka, K. Minoguchi, T. Sasai, A. Matsushita, M. Nakamura, S. Okamoto, E. Yamazaki, and Y. Kisaka, “150.3-Tb/s Ultra-Wideband (S, C, and L Bands) Single-Mode Fibre Transmission over 40-km Using $>519\text{Gb/s/A}$ PDM-128QAM Signals,” in *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2018, pp. 1–3.
- [181] X. Liu, “Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era,” *Iscience*, vol. 22, pp. 489–506, 2019.
- [182] M.-J. Li and T. Hayashi, “Advances in low-loss, large-area, and multicore fibers,” in *Optical Fiber Telecommunications VII*. Elsevier, 2020, pp. 3–50.
- [183] R.-J. Essiambre and R. W. Tkach, “Capacity trends and limits of optical communication networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 5, pp. 1035–1055, 2012.
- [184] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson, “Space-division multiplexing in optical fibres,” *Nature photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 354–362, 2013.
- [185] S. Makovejs, C. C. Roberts, F. Palacios, H. B. Matthews, D. A. Lewis, D. T. Smith, P. G. Diehl, J. J. Johnson, J. D. Patterson, C. R. Towery, and S. Y. Ten, “Record-low (0.1460 dB/km) attenuation ultra-large aeoff optical fiber for submarine applications,” in *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2015, pp. 1–3.
- [186] M. Li and H. Chen, “Novel optical fibers for high-capacity transmission system,” *Telecommunications Science*, vol. 30, no. 6, p. 1, 2014.
- [187] M. Tateda, M. Ohashi, K. Tajima, and K. Shiraki, “Design of viscosity-matched optical fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, no. 9, pp. 1023–1025, 1992.
- [188] H. Kakiuchida, E. H. Sekiya, K. Saito, and A. J. Ikushima, “Effect of chlorine on rayleigh scattering reduction in silica glass,” *Japanese journal of applied physics*, vol. 42, no. 12B, p. L1526, 2003.
- [189] Y. Tamura, H. Sakuma, K. Morita, M. Suzuki, Y. Yamamoto, K. Shimada, Y. Honma, K. Sohma, T. Fujii, and T. Hasegawa, “Lowest-ever 0.1419-dB/km loss optical fiber,” in *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2017, pp. 1–3.
- [190] S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, T. Kuroha, and Y. Nishimura, “Multicore optical fiber,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 1979, p. WB1.
- [191] A. M. Ortiz and R. L. Sáez, “Multi-core optical fibers: Theory applications and opportunities,” *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications*, 2017.

- [192] I. Ishida, T. Akamatsu, Z. Wang, Y. Sasaki, K. Takenaga, and S. Matsuo, “Possibility of stack and draw process as fabrication technology for multi-core fiber,” in *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*. IEEE, 2013, pp. 1–3.
- [193] V. Demir, M. Akbulut, D. Nguyen, Y. Kaneda, M. Neifeld, and N. Peyghambarian, “Injection-locked, single frequency, multi-core yb-doped phosphate fiber laser,” *Scientific reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [194] K. S. Abedin, J. M. Fini, T. F. Thierry, V. Supradeepa, B. Zhu, M. F. Yan, L. Bansal, E. M. Monberg, and D. J. DiGiovanni, “Multicore erbium doped fiber amplifiers for space division multiplexing systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 16, pp. 2800–2808, 2014.
- [195] G. Rademacher, R. S. Luís, B. J. Puttnam, R. Ryf, S. van der Heide, T. A. Eriksson, N. K. Fontaine, H. Chen, R.-J. Essiambre, Y. Awaji *et al.*, “172 Tb/s C+ L band transmission over 2040 km strongly coupled 3-core fiber,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2020, pp. Th4C–5.
- [196] M. Morant, A. Trinidad, E. Tangdiongga, T. Koonen, and R. Llórente, “5G NR Multi-Beam Steering Employing a Photonic TTD Chip Assisted by Multi-Core Fiber,” in *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2019, pp. 1–3.
- [197] S. Rommel, E. Grivas, B. Cimoli, D. Dodane, A. Morales, E. Pikasis, J. Bourderionnet, G. Feugnet, J. B. Carvalho, M. Katsikis *et al.*, “Real-time high-bandwidth mm-wave 5G NR signal transmission with analog radio-over-fiber fronthaul over multi-core fiber,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2021, no. 1, pp. 1–20, 2021.
- [198] T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. de Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, R. Nagase, Y. Albe, S. Aozasa, Y. Wakayama, H. Takeshita, T. Tsuritani, H. Ono, T. Sakamoto, I. Morita, Y. Miyamoto, and K. Nakajima, “118.5 Tbit/s transmission over 316 km-long multi-core fiber with standard cladding diameter,” in *2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC)*, 2017, pp. 1–2.
- [199] K.-i. Kitayama and N.-P. Diamantopoulos, “Few-mode optical fibers: Original motivation and recent progress,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 163–169, 2017.
- [200] J. van Weerdenburg, R. Ryf, J. C. Alvarado-Zacarias, R. A. Alvarez-Aguirre, N. K. Fontaine, H. Chen, R. Amezcua-Correa, Y. Sun, L. Grüner-Nielsen, R. V. Jensen *et al.*, “138-Tb/s mode-and wavelength-multiplexed transmission over six-mode graded-index fiber,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 6, pp. 1369–1374, 2018.
- [201] K. Zeb, X. Zhang, and Z. Lu, “High capacity mode division multiplexing based MIMO enabled all-optical analog millimeter-wave over fiber fronthaul architecture for 5G and beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 89 522–89 533, 2019.
- [202] G. Rademacher, R. S. Luís, B. J. Puttnam, T. A. Eriksson, R. Ryf, E. Agrell, R. Maruyama, K. Aikawa, Y. Awaji, H. Furukawa *et al.*, “High capacity transmission with few-mode fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 425–432, 2018.

- [203] M. Komanec, D. Dousek, D. Suslov, and S. Zvanovec, “Hollow-core optical fibers,” *Radiation Engineering*, vol. 29, no. 3, p. 417, 2020.
- [204] T. Hidaka, T. Morikawa, and J. Shimada, “Hollow-core oxide-glass cladding optical fibers for middle-infrared region,” *Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 7, pp. 4467–4471, 1981.
- [205] P. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. Mangan, D. Williams, L. Farr, M. Mason, A. Tomlinson, T. Birks, J. Knight *et al.*, “Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres,” *Optics express*, vol. 13, no. 1, pp. 236–244, 2005.
- [206] G. T. Jasion, T. D. Bradley, K. Harrington, H. Sakr, Y. Chen, E. N. Fokoua, I. A. Davidson, A. Taranta, J. R. Hayes, D. J. Richardson *et al.*, “Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2020, pp. Th4B–4.
- [207] C. Wu, J. Song, Z. Zhang, and N. Song, “High strength fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fiber and single-mode fiber,” in *Australian Conference on Optical Fibre Technology*. Optical Society of America, 2016, pp. AW4C–7.
- [208] S. Gao, Y. Wang, C. Tian, and P. Wang, “Splice loss optimization of a photonic bandgap fiber via a high V-number fiber,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 21, pp. 2134–2137, 2014.
- [209] M. Komanec, D. Suslov, S. Zvanovec, Y. Chen, T. Bradley, S. R. Sandoghchi, E. N. Fokoua, G. Jasion, M. Petrovich, F. Poletti *et al.*, “Low-loss and low-back-reflection hollow-core to standard fiber interconnection,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 10, pp. 723–726, 2019.
- [210] Z. Liu, L. Galdino, J. R. Hayes, D. Lavery, B. Karanov, D. J. Elson, K. Shi, B. C. Thomsen, M. N. Petrovich, D. J. Richardson *et al.*, “Record high capacity (6.8 Tbit/s) WDM coherent transmission in hollow-core antiresonant fiber,” in *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, 2017, pp. 1–3.
- [211] H. Sakr, T. D. Bradley, Y. Hong, G. T. Jasion, J. R. Hayes, H. Kim, I. A. Davidson, E. N. Fokoua, Y. Chen, K. R. Bottrill *et al.*, “Ultrawide bandwidth hollow core fiber for interband short reach data transmission,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2019, pp. Th4A–1.
- [212] B. Zhu, B. J. Mangan, T. Kremp, G. S. Puc, V. Mikhailov, K. Dube, Y. Dulashko, M. Cortes, K. Marceau, B. Violette *et al.*, “First demonstration of hollow-core-fiber cable for low latency data transmission,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2020, pp. Th4B–3.
- [213] A. Nespola, S. Straullu, T. D. Bradley, K. Harrington, H. Sakr, G. T. Jasion, E. N. Fokoua, Y. Jung, Y. Chen, J. R. Hayes *et al.*, “Transmission of 61 C-band channels with l-band interferers over record 618km of hollow-core-fiber,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2020, pp. Th4B–5.
- [214] L. G. Kazovsky, W.-T. Shaw, D. Gutierrez, N. Cheng, and S.-W. Wong, “Next-generation optical access networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 11, pp. 3428–3442, 2007.

- [215] J.-i. Kani, “Enabling technologies for future scalable and flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON systems,” *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1290–1297, 2009.
- [216] K. Grobe and J.-P. Elbers, “PON in adolescence: from TDMA to WDM-PON,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 1, pp. 26–34, 2008.
- [217] T. Kodama, Y. Tanaka, S. Yoshima, N. Kataoka, J.-i. Nakagawa, S. Shimizu, N. Wada, and K.-i. Kitayama, “Scaling the System Capacity and Reach of a 10G-TDM-OCDM-PON System Without an En/Decoder at an ONU,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 2, pp. 134–143, 2013.
- [218] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma, “Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2),” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 587–593, 2013.
- [219] S. Biswas and S. Adak, “OFDMA-PON: High Speed PON Access System,” *International Journal of Soft Computing*, vol. 1, 2010.
- [220] H. S. Abbas and M. A. Gregory, “The next generation of passive optical networks: A review,” *Journal of network and computer applications*, vol. 67, pp. 53–74, 2016.
- [221] L. Chen, S. Dahlfort, and D. Hood, “Evolution of PON: 10G-PON and WDM-PON,” in *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*. IEEE, 2010, pp. 709–711.
- [222] J. V. Olmos, J. Sugawa, H. Ikeda, and K. Sakamoto, “GPON and 10G-EPON coexisting systems and filtering issues at the OLT,” in *16th Opto-Electronics and Communications Conference*. IEEE, 2011, pp. 828–829.
- [223] Y. Luo, X. Yan, and F. Effenberger, “Next generation passive optical network offering 40Gb/s or more bandwidth,” in *2012 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. IEEE, 2012, pp. 1–3.
- [224] Y. Nakayama and D. Hisano, “Wavelength and Bandwidth Allocation for Mobile Fronthaul in TWDM-PON,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 11, pp. 7642–7655, 2019.
- [225] J. Zhang, Y. Xiao, D. Song, L. Bai, and Y. Ji, “Joint Wavelength, Antenna, and Radio Resource Block Allocation for Massive MIMO Enabled Beamforming in a TWDM-PON Based Fronthaul,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 1396–1407, 2019.
- [226] Z. Tan, C. Yang, and Z. Wang, “Energy Consume Analysis for Ring-Topology TWDM-PON Front-Haul Enabled Cloud RAN,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 20, pp. 4526–4534, 2017.
- [227] N. Cheng, “Flexible TWDM PON with WDM overlay for converged services,” *Optical Fiber Technology*, vol. 26, pp. 21–30, 2015.

- [228] A. Shahpari, R. M. Ferreira, F. P. Guiomar, S. B. Amado, S. Ziaie, C. Rodrigues, J. D. Reis, A. N. Pinto, and A. L. Teixeira, “Real-Time Bidirectional Coherent Nyquist UDWDM-PON Coexisting With Multiple Deployed Systems in Field-Trial,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 7, pp. 1643–1650, 2016.
- [229] R. M. Borges, L. A. M. Pereira, H. R. D. Filgueiras, A. C. Ferreira, M. S. B. Cunha, E. R. Neto, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and A. Cerqueira, “DSP-based flexible-waveform and multi-application 5G fiber-wireless system,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642–653, 2019.
- [230] ITU-T, “40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification,” *Recommendation ITU-T G.989.2*, pp. 1–115, 2019.
- [231] C. DeSanti, L. Du, J. Guarin, J. Bone, and C. F. Lam, “Super-PON: an evolution for access networks [Invited],” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 10, pp. D66–D77, 2020.
- [232] Y. L. Lee, D. Qin, L.-C. Wang, and G. H. Sim, “6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges,” *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 2, pp. 54–66, 2021.
- [233] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G Era,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 063–57 074, 2020.
- [234] L. Yu, J. Wu, A. Zhou, E. G. Larsson, and P. Fan, “Massively Distributed Antenna Systems With Nonideal Optical Fiber Fronthauls: A Promising Technology for 6G Wireless Communication Systems,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 43–51, 2020.
- [235] C.-L. I, H. Li, J. Korhonen, J. Huang, and L. Han, “RAN Revolution With NGFI (xhaul) for 5G,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 541–550, 2018.
- [236] I. A. Alimi, A. L. Teixeira, and P. P. Monteiro, “Toward an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 708–769, 2018.
- [237] C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera, T. A. Nirmalathas, E. Wong, and K.-L. Lee, “Evolution of radio-over-fiber technology,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1647–1656, 2019.
- [238] C. Liu, J. Wang, L. Cheng, M. Zhu, and G.-K. Chang, “Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3452–3460, 2014.
- [239] S. Yao, Y.-W. Chen, S.-J. Su, Y. Alfadhli, S. Shen, R. Zhang, Q. Zhou, and G.-K. Chang, “Non-Orthogonal Uplink Services Through Co-Transport of D-RoF/A-RoF in Mobile Fronthaul,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 14, pp. 3637–3643, 2020.
- [240] Ericsson, Huawei, NEC, and Nokia, “Common Public Radio Interface: eCPRI Interface Specification,” *eCPRI Specification V2.0*, pp. 1–109, 2019.

- [241] L. Li, M. Bi, H. Xin, Y. Zhang, Y. Fu, X. Miao, A. M. Mikaeil, and W. Hu, “Enabling Flexible Link Capacity for eCPRI-Based Fronthaul With Load-Adaptive Quantization Resolution,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102 174–102 185, 2019.
- [242] X. Liu and N. Deng, “Emerging optical communication technologies for 5G,” in *Optical fiber telecommunications VII*. Elsevier, 2020, pp. 751–783.
- [243] J. G. Santos, “Radio over fibre techniques for backhaul and fronthaul,” *Ph.D. thesis, Technischen Universität Berlin, Berlin*, 2017.
- [244] Mellanox, “100GbE CPRI QSFP28 MMF Transceiver,” *MMA1B00- C100C datasheet*, 2018.
- [245] Intel, “Intel silicon photonics update,” in *Interconnect Day* (<https://www.servethehome.com/intel-silicon-photonics-update-at-interconnect-day-2019/>), 2019.
- [246] G. Kalfas, C. Vagionas, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, A. Mesodiakaki, S. Papaioannou, P. Maniotis, J. S. Vardakas, C. Verikoukis, and N. Pleros, “Next generation fiber-wireless fronthaul for 5G mmWave networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 3, pp. 138–144, 2019.
- [247] C. H. de Souza Lopes, E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges, A. C. Ferreira, M. Abreu, W. D. Dias, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and A. C. S. Junior, “Non-Standalone 5G NR Fiber-Wireless System Using FSO and Fiber-Optics Fronthauls,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 2, pp. 406–417, 2020.
- [248] L. Pereira, C. Lopes, R. Borges, E. Lima, A. Ferreira, M. Abreu, L. Mendes, and A. C. S. Jr., “Implementation of a multiband 5G NR fiber-wireless system using analog radio over fiber technology,” *Optics Communications*, vol. 474, p. 126112, 2020.
- [249] M. Noweir, Q. Zhou, A. Kwan, R. Valivarathi, M. Helaoui, W. Tittel, and F. M. Ghannouchi, “Digitally linearized radio-over fiber transmitter architecture for cloud radio access network’s downlink,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp. 3564–3574, 2018.
- [250] R. M. Borges, E. S. Lima, A. C. Ferreira, D. H. Spadoti, M. Abreu, L. L. Mendes, and A. C. Sodré Jr., “Multiband 5G NR system with photonic-assisted RF amplification,” *Optics Letters*, vol. 45, no. 6, pp. 1539–1542, 2020.
- [251] X. Hu, C. Ye, and K. Zhang, “Converged mobile fronthaul and passive optical network based on hybrid analog-digital transmission scheme,” in *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2016, pp. 1–3.
- [252] S. Shen, J.-H. Yan, P.-C. Peng, C.-W. Hsu, Q. Zhou, S. Liu, S. Yao, R. Zhang, K.-M. Feng, J. Finkelstein, and G.-K. Chang, “Polarization-Tracking-Free PDM Supporting Hybrid Digital-Analog Transport for Fixed-Mobile Systems,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 54–57, 2019.

- [253] C. Browning, A. Farhang, A. Saljoghei, N. Marchetti, V. Vujicic, L. E. Doyle, and L. P. Barry, “5G wireless and wired convergence in a passive optical network using UF-OFDM and GFDM,” in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2017, pp. 386–392.
- [254] D. Novak, R. B. Waterhouse, A. Nirmalathas, C. Lim, P. A. Gamage, T. R. Clark, M. L. Dennis, and J. A. Nanzer, “Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 1–11, 2015.
- [255] D. Wake, A. Nkansah, and N. J. Gomes, “Radio over fiber link design for next generation wireless systems,” *Journal of lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, pp. 2456–2464, 2010.
- [256] W.-J. Ho, H.-C. Peng, H.-H. Lu, C.-L. Ying, and C.-Y. Li, “Novel ROF/FTTX/CATV hybrid three-band transport system,” *Optics express*, vol. 19, no. 7, pp. 6980–6989, 2011.
- [257] A. Delmade, C. Browning, A. Farhang, N. Marchetti, L. E. Doyle, R. D. Koilpillai, L. P. Barry, and D. Venkitesh, “Performance analysis of analog IF over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 174–182, 2018.
- [258] M. Bi, W. Jia, L. Li, X. Miao, and W. Hu, “Investigation of F-OFDM in 5G fronthaul networks for seamless carrier-aggregation and asynchronous transmission,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2017, pp. W1C–6.
- [259] N. Argyris, G. Giannoulis, K. Kanta, N. Iliadis, C. Vagionas, S. Papaioannou, G. Kalfas, D. Apostolopoulos, C. Caillaud, H. Debrégeas *et al.*, “A 5G mmWave fiber-wireless IFoF analog mobile fronthaul link with up to 24-Gb/s multiband wireless capacity,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 2883–2891, 2019.
- [260] M. Morant, A. Trinidad, E. Tangdiongga, T. Koonen, and R. Llorente, “Experimental demonstration of mm-wave 5G NR photonic beamforming based on ORRs and multicore fiber,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 2928–2935, 2019.
- [261] L. Bonati, M. Polese, S. D’Oro, S. Basagni, and T. Melodia, “Open, programmable, and virtualized 5G networks: State-of-the-art and the road ahead,” *Computer Networks*, vol. 182, p. 107516, 2020.
- [262] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, G. Contestabile, and A. Cerqueira, “Non-Standalone 5G NR FiWi System Based on a Photonic Integrated Multi-Wavelength Transmitter,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 1001–1004, 2021.
- [263] A. C. S. Junior, L. A. M. Pereira, P. H. F. Santos, R. M. Borges, L. L. Mendes, and C. J. A. Bastos Filho, “Sistema Rádio sobre Fibra assistido por Inteligência Artificial para aplicações 5G/6G/Artificial Intelligence-assisted Radio over Fiber System for 5G/6G applications,” *Brazilian Journal of Development*, vol. 7, no. 5, pp. 48 948–48 958, 2021.
- [264] G. O. Pérez, A. Ebrahimzadeh, M. Maier, J. A. Hernández, D. L. López, and M. F. Veiga, “Decentralized Coordination of Converged Tactile Internet and MEC Services in H-CRAN Fiber Wireless Networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 18, pp. 4935–4947, 2020.

- [265] K. Wang, L. Zhao, and J. Yu, “200 Gbit/s Photonics-Aided MMW PS-OFDM Signals Transmission at W-Band Enabled by Hybrid Time-Frequency Domain Equalization,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 10, pp. 3137–3144, 2021.
- [266] W. Zhou, L. Zhao, J. Zhang, K. Wang, J. Yu, Y.-W. Chen, S. Shen, R.-K. Shiu, and G.-K. Chang, “135-GHz D-Band 60-Gbps PAM-8 Wireless Transmission Employing a Joint DNN Equalizer With BP and CMMA,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 14, pp. 3592–3601, 2020.
- [267] H. Weichel, *Laser beam propagation in the atmosphere*. SPIE press, 1990, vol. 10319.
- [268] M. Ijaz, “Experimental characterisation and modelling of atmospheric fog and turbulence in FSO,” Ph.D. dissertation, Northumbria University, 2013.
- [269] V. N. H. Silva *et al.*, “Desenvolvimento experimental de uma nova técnica para a medição da turbulência atmosférica, em enlaces ópticos horizontais no espaço livre,” *Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações*, 2009.
- [270] G. Keiser, *Comunicações por Fibras Ópticas-4*. AMGH Editora, 2014.
- [271] A. Jabeena, T. Jayabarathi, R. Aggarwal, and L. Singh, “Review on optimization of wireless optical communication system,” *Trends in Opto-Electro & Optical Communication*, vol. 4, no. 2, pp. 9–19, 2014.
- [272] S. Al-Gailani, A. Mohammad, and R. Shaddad, “Enhancement of free space optical link in heavy rain attenuation using multiple beam concept,” *Optik*, vol. 124, no. 21, pp. 4798–4801, 2013.
- [273] A. Gupta, P. Anand, R. Khajuria, S. Bhagat, and R. K. Jha, “A survey of free space optical communication network channel over optical fiber cable communication,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 105, no. 10, 2014.
- [274] J. P. de Carvalho, H. Veiga, P. Gomes, C. F. R. Pacheco, and A. Reis, “Experimental performance study of a very high speed free space optics link at the university of beira interior campus: a case study,” in *2008 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*. IEEE, 2008, pp. 154–157.
- [275] S. A. Al-Gailani, A. B. Mohammad, R. Q. Shaddad, U. U. Sheikh, and M. A. Elmagzoub, “Hybrid WDM/multibeam free-space optics for multigigabit access network,” *Photonic Network Communications*, vol. 29, no. 2, pp. 138–145, 2015.
- [276] Y. Zhao, W. Shi, H. Shi, W. Liu, Z. Wang, and J. Zhang, “Resource Allocation for Hybrid RF/FSO Multi-Channel Multi-Radio Wireless Mesh Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9358–9370, 2020.
- [277] Z. Mohammad, M. Anuar, S. Aljunid, A. Rahman, C. Rashidi, and A. Bakar, “Performance analysis of FSO with haze attenuation consequence acclimatize in tropical rain-forest environment,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 3, pp. 1332–1337, 2015.
- [278] I. K. Son and S. Mao, “A survey of free space optical networks,” *Digital communications and networks*, vol. 3, no. 2, pp. 67–77, 2017.

- [279] N. Karafolas, “11 optical satellite networking: The concept of a global satellite optical transport network,” *Near-Earth Laser Communications*, vol. 1, p. 141, 2018.
- [280] V. W. Chan, “Optical satellite networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 11, p. 2811, 2003.
- [281] A. S. Hamza, J. S. Deogun, and D. R. Alexander, “Classification framework for free space optical communication links and systems,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1346–1382, 2018.
- [282] C. C. Davis, I. I. Smolyaninov, and S. D. Milner, “Flexible optical wireless links and networks,” *IEEE Communications magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 51–57, 2003.
- [283] A. Gupta, R. Goyal *et al.*, “Channel performance evaluation of wireless communication networks,” in *2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. IEEE, 2018, pp. 165–170.
- [284] A. Al-Kinani, C.-X. Wang, L. Zhou, and W. Zhang, “Optical wireless communication channel measurements and models,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1939–1962, 2018.
- [285] I. K. Son and S. Mao, “Optical networks, digital communications and networks,” Tech. Rep, Tech. Rep., 2016.
- [286] A. O. Mufutau, F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, A. Lorences-Riesgo, A. Oliveira, and P. P. Monteiro, “Demonstration of a hybrid optical fiber–wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 72–78, 2020.
- [287] J.-Y. Sung, E. Tangdiongga, and T. Koonen, “A hybrid radio-optical wireless system with efficient sub-centimeter localization for full-coverage indoor services,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 8, pp. 2368–2375, 2021.
- [288] J. Bohata, M. Komanec, J. Spáčil, Z. Ghassemlooy, S. Zvánovec, and R. Slavík, “24–26 GHz radio-over-fiber and free-space optics for fifth-generation systems,” *Optics letters*, vol. 43, no. 5, pp. 1035–1038, 2018.
- [289] M. A. Esmail, A. M. Ragheb, H. A. Fathallah, M. Altamimi, and S. A. Alshebeili, “5G-28 GHz signal transmission over hybrid all-optical FSO/RF link in dusty weather conditions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24 404–24 410, 2019.
- [290] Y. Li, T. Geng, R. Tian, and S. Gao, “Machine-Learning Based Equalizers for Mitigating the Interference in Asynchronous MIMO OWC Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 9, pp. 2800–2808, 2021.
- [291] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, “Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 2015.
- [292] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, “Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26–32, 2013.

- [293] L.-Y. Wei, Y. Liu, C.-W. Chow, G.-H. Chen, C.-W. Peng, P.-C. Guo, J.-F. Tsai, and C.-H. Yeh, “6.915-Gbit/s white-light phosphor laser diode-based DCO-OFDM visible light communication (VLC) system with functional transmission distance,” *Electronics Letters*, vol. 56, no. 18, pp. 945–947, 2020.
- [294] A. T. Hussein, M. T. Alresheedi, and J. M. Elmirghani, “20 Gb/s mobile indoor visible light communication system employing beam steering and computer generated holograms,” *Journal of lightwave technology*, vol. 33, no. 24, pp. 5242–5260, 2015.
- [295] N. Chi, *LED-based visible light Communications*. Springer, 2018.
- [296] M. de Oliveira, E. Lima, M. Cunha, M. Abreu, and A. C. S Jr, “RGB-based VLC system using 5G NR standard,” *Optics Communications*, vol. 481, p. 126542, 2021.
- [297] X. Huang, Z. Wang, J. Shi, Y. Wang, and N. Chi, “1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver,” *Optics express*, vol. 23, no. 17, pp. 22 034–22 042, 2015.
- [298] M. Umer and M. Riaz, “Full Duplex VLC System Using Visible Spectrum,” *Red*, vol. 435, no. 495, pp. 685–605, 2016.
- [299] G. Pan, H. Lei, Z. Ding, and Q. Ni, “3-D hybrid VLC-RF indoor IoT systems with light energy harvesting,” *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 3, no. 3, pp. 853–865, 2019.
- [300] S. Shao, A. Khreishah, M. Ayyash, M. B. Rahaim, H. Elgala, V. Jungnickel, D. Schulz, T. D. Little, J. Hilt, and R. Freund, “Design and analysis of a visible-light-communication enhanced wifi system,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 10, pp. 960–973, 2015.
- [301] A. Wilkins, J. Veitch, and B. Lehman, “LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update,” in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010, pp. 171–178.
- [302] S. Vappangi and V. Mani, “Concurrent illumination and communication: A survey on visible light communication,” *Physical Communication*, vol. 33, pp. 90–114, 2019.
- [303] S. Hranilovic and F. R. Kschischang, “Short-range wireless optical communication using pixilated transmitters and imaging receivers,” in *2004 IEEE International Conference on Communications (IEEE Cat. No. 04CH37577)*, vol. 2. IEEE, 2004, pp. 891–895.
- [304] K. M. vd Zwaag, J. L. Neves, H. R. Rocha, M. E. Segatto, and J. A. Silva, “Adaptation to the LEDs flicker requirement in visible light communication systems through CE-OFDM signals,” *Optics Communications*, vol. 441, pp. 14–20, 2019.
- [305] C.-C. Chang, Y.-J. Su, U. Kurokawa, and B. I. Choi, “Interference Rejection Using Filter-Based Sensor Array in VLC Systems,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1025–1032, 2012.