

Brasil 6G

Projeto Brasil 6G

Contribuições em Tecnologias de RF e de Comunicações Ópticas para Redes 6G



Histórico de Atualizações:

Versão	Data	Autor(es)	Notas
1	24/12/2021	Arismar Cerqueira Sodré Junior Celso Henrique de Souza Lopes Eduardo Saia Lima Hugo Rodrigues Dias Filgueiras Letícia Carneiro de Souza Luiz Augusto Melo Pereira Matheus Sêda Borsato Cunha Ramon Maia Borges Tiago Henrique Brandão	Elaboração de conteúdo
2	03/02/2022	Luciano Leonel Mendes Hugo Rodrigues Dias Filgueiras Matheus Sêda Borsato Cunha	Revisão de texto

Lista de Figuras

1	Imagens retiradas de [24]. (a) Protótipo do <i>slotted-waveguide antenna array</i> (SWAA). (b) Técnica de ranhuras para aumento de ganho. (c) Ganho do SWAA em função do aumento de ranhuras.	3
2	Imagens retiradas de [26]. (a) Diagrama em blocos do <i>setup</i> de medidas. (b) Imagens do <i>setup</i> de medidas <i>indoor</i> da <i>femtocell</i> quinta geração de rede móvel celular (5G) <i>new radio</i> (NR). (c) Mapa de cobertura utilizando a modulação <i>quadrature phase-shift keying</i> (QPSK). (c) Mapa de cobertura utilizando a modulação <i>16-quadrature amplitude modulation</i> (QAM).	4
3	Imagens retiradas de [28]. (a) Modelo numérico do elemento do arranjo de antenas baseado em antena de fenda e rede alimentação em <i>substrate integrated coaxial line</i> (SICL). (b) Resultados numéricos dos parâmetros S. (c) Diagrama de irradiação normalizado. (d) Diagrama <i>three-dimensional</i> (3D) simulado de um elemento.	5
4	Imagens retiradas de [29]. (a) Modelo numérico do elemento do arranjo de antenas baseado em corneta de dupla polarização e rede de alimentação em SICL. (b) Rede de alimentação SICL (c) Resultados numéricos dos parâmetros S. (d) Diagrama de irradiação normalizado.	6
5	Imagens retiradas de [30]. (a) Modelo numérico do defasador de radiofrequência (RF), estrutura mecânica. (b) Parte interna do defasador de RF (c) Resultados numéricos da defasagem entre as portas para diferentes posições de regulagem. (d) Aplicação do defasador de RF para guiamento de feixe.	7
6	Imagens retiradas de [31]. Modelo numérico antena de baixo perfil com polarização circular e resultados numéricos da banda de operação e da razão axial (RA).	8
7	Imagens retiradas de [32]. (a) Modelo numérico da Corneta e da Plantena. (b) Campo elétrico em campo próximo na frequência de 474 THz. (c) Potência recebida normalizada para Corneta-Plantena, Plantena-Plantena, Corneta-Plantena e Corneta-Corneta.	9
8	Imagens retiradas de [33]. (a) Distribuição de carga plasma em função da frequência de ressonância para três diferentes temperaturas. (b) Distribuição espacial e carga de plasma em função da distancia para três diferentes temperaturas.	9
9	Imagens retiradas de [34] do esquemático do dispositivo proposto. (a) Visão isométrica do <i>magneto-optical MRR</i> (MORR). O <i>inset</i> ilustra a seção transversal do guia de ondas do barramento de silício (Si), com largura w_g e altura h_g . A seta dupla vertical indica as direções de magnetização possíveis. As setas curvas no plano são usadas para representar os modos <i>add/drop</i> . (b) Vista superior e parâmetros geométricos da estrutura.	11
10	Imagens retiradas de [35]. (a) Esquemático 3D do modulador proposto. (b) Vista em corte transversal mostrando os parâmetros geométricos e materiais correspondentes.	12

11	Imagens retiradas de [37]. (a) Ilustração da estrutura da composição e comprimento dos períodos para os passos da série de Fibonacci F_2 , F_3 e F_4 . (b) Vista lateral do sistema de fibra-grade mostrando o alinhamento usado neste trabalho. (c) Esquemático da vista lateral no plano xz do acoplador fibra-guia F_2 (periódico), com uma camada inferior de ouro de $0,1 \mu\text{m}$ e uma camada de revestimento superior de ar ($n_c = 1,0$). As espessuras da placa e os índices de refração das camadas de Si ($n = 3,47$) e de vidro ($n = 1,44$) correspondentes são mostradas. O comprimento do período (Λ), o núcleo da fibra, a distância (d) entre a fibra e a grade e o ângulo de inclinação da fibra (Θ) também são ilustrados.	14
12	Imagens retiradas de [38]. (a) Representação da geração de uma seção transversal circular semelhante a Sierpinski. (b) A seção transversal semelhante a Sierpinski usada na <i>surface plasmon resonance</i> (SPR)- <i>photonic-crystal fiber</i> (PCF). O <i>inset</i> é usado para mostrar a geometria do subconjunto do fractal plasmônico e para identificar os diferentes materiais considerados nas simulações. O círculo central, indicado por um círculo tracejado, corresponde ao núcleo dielétrico da fibra.	15
13	Sistema <i>optical wireless communications</i> (OWC) proposto para redes sexta geração de rede móvel celular (6G) [39].	16
14	Solução de <i>radio over fiber</i> (RoF) baseada em <i>dual-drive Mach-Zehnder modulator</i> (DD-MZM) para transmissão simultâneas de sinais de RF no <i>fronthaul</i> (FH), usando uma única portadora óptica [39].	17
15	Enlace <i>analog radio-over-fiber</i> (A-RoF) multibanda com amplificação de RF assistida por fotônica [44].	18
16	Magnitude dos sinais em vários pontos do sistema de pré-distorção em função do índice da amostra.	19
17	Cenário <i>enhanced remote area communication</i> (eRAC) auxiliado por <i>machine learning</i> (ML).	20
18	Comparação de desempenho entre <i>digital pre-distortion</i> (DPD) baseada em ML e <i>orthogonal scalar feedback linearization</i> (OSFL)	21
19	Diagrama em blocos do sistema RoF linearizado com técnicas de ML.	21
20	Comparação de desempenho entre pré- e pós-distorção implementadas usando ML	22
21	Arquitetura <i>fiber-wireless</i> (FiWi) multibanda baseada em RoF e <i>wavelength division multiplexing</i> (WDM)- <i>passive optical network</i> (PON): <i>vector signal generator</i> (VSG); <i>analog signal generator</i> (ASG); <i>media converter</i> (MC); <i>electrical amplifier</i> (EA); <i>vector signal analyzer</i> (VSA); <i>personal computer</i> (PC).	24
22	Esquemático do sistema de comunicação híbrido RoF/ <i>free space optical</i> (FSO)/sem fio implementado. <i>Polarization Controller</i> (PC); <i>arbitrary waveform generator</i> (AWG); <i>variable optical attenuator</i> (VOA); <i>diplexer</i> (DPX).	25
23	Diagrama simplificado e fotografia correspondente ao experimento <i>visible light communication</i> (VLC) 5G implementado.	27
24	Imagens retiradas de [58] do diagrama em blocos dos dois cenários do sistema RoF 5G NR, usando o <i>multiwavelength transmitter</i> (MWT). (a) Sistema WDM. (b) Sistema <i>subcarrier multiplexing</i> (SCM).	28
25	Imagem retirada de [58]. Fotografia do MWT integrado montado sobre a placa de circuito impresso (PCI).	29
26	Imagem retirada de [59]. Proposta de um sistema FiWi para transmissão do padrão 5G NR baseado em um transmissor integrado de múltiplos comprimentos de onda.	30

27	Imagens retiradas de [59]. Fotografia da implementação do sistema FiWi 5G NR. (a) Aplicação em ambiente interno. (b) Aplicação em ambiente externo. . .	30
28	Imagem retirada de [60]. Diagrama de blocos do sistema RoF/FSO.	31
29	<i>Setup</i> experimental apresentando o enlace FSO e o lado da recepção. O <i>inset</i> apresenta a fotografia da <i>central office</i> , incluindo transmissores elétricos e ópticos.	32
30	Sistema FiWi 5G/6G alimentado de forma óptica.	33
31	Diagrama em blocos do sistema FiWi 5G NR alimentado de forma óptica. . . .	34
32	Comparação de estabilidade de tensão entre o sistema <i>power-over-fiber</i> (PoF) proposto e uma fonte de tensão <i>direct current</i> (DC) convencional.	35
33	Medidas de <i>root mean square error vector magnitude</i> (EVM_{RMS}) em função da largura de banda (BW).	35

Lista de Tabelas

1	Principais parâmetros de desempenho do modulador elétrico para óptico (E/O) [35].	13
2	Resultados RoF/FSO para esquemas de modulação diferentes [60].	31

Acrônimos

3D	<i>three-dimensional</i>
3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
4G	quarta geração de rede móvel celular
5G	quinta geração de rede móvel celular
5G-RANGE	<i>Remote Area Access Network for the 5th Generation</i>
6G	sexta geração de rede móvel celular
ACLR	<i>adjacent channel leakage ratio</i>
A-RoF	<i>analog radio-over-fiber</i>
ASG	<i>analog signal generator</i>
AWG	<i>arbitrary waveform generator</i>
B5G	<i>beyond 5G</i>
BBU	<i>baseband unit</i>
BH	<i>backhaul</i>
BS-ILC	<i>beam-steered infrared light communication</i>
BW	largura de banda
Ce:YIG	<i>cerium-substituted yttrium iron garnet</i>
CMOS	<i>complementary metal-oxide-semiconductor</i>
CO	<i>central office</i>
C-RAN	<i>centralized radio access network</i>
CT	<i>cross talk</i>
DC	<i>direct current</i>
DD-MZM	<i>dual-drive Mach-Zehnder modulator</i>
DFB	<i>distributed feedback</i>
DML	<i>directly modulated laser</i>
DPD	<i>digital pre-distortion</i>
DPX	<i>diplexer</i>
D-RoF	<i>digital radio over fiber</i>
DSP	<i>digital signal processing</i>
DU	<i>distributed unit</i>
DWDM	<i>dense wavelength division multiplexing</i>
E/O	elétrico para óptico
EA	<i>electrical amplifier</i>
EDFA	<i>erbium-doped fiber amplifier</i>
eMBB	<i>enhanced mobile broadband communication</i>

ENZ (ϵ) *near-zero*
eRAC *enhanced remote area communication*
ERB *estação radiobase*
EVM_{RMS} *root mean square error vector magnitude*
FDTD *finite-difference time-domain*
FEM *finite element method*
FH *fronthaul*
FiWi *fiber-wireless*
F-OFDM *filtered orthogonal frequency division multiplexing*
FSO *free space optical*
FWM *four-wave mixing*
GFDM *generalized frequency division multiplexing*
GGG *gadolinium gallium garnet*
HetNet *heterogeneous networks*
HNLF *highly nonlinear fiber*
HPLD *high power laser diode*
IA *inteligência artificial*
IL *insertion loss*
IMWP *integrated microwave photonics*
InP *indium phosphide*
IoE *Internet of everything*
ITU *International Telecommunication Union*
ITU-T *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*
LD *laser diode*
LED *light emitting diode*
LOS *line-of-sight*
LTE-A *long-term evolution-advanced*
M2M *machine to machine*
MAC *media access control*
MC *media converter*
MH *midhaul*
ML *machine learning*
MLP *multi layer perceptron*
MMF *multimode fiber*
mMIMO *massive multiple-input multiple-output*

MMR *micro-ring resonator*
mmWaves *millimeter waves*
MO *magneto-óptico*
MORR *magneto-optical MRR*
MPA *mode power attenuation*
MWT *multiwavelength transmitter*
MZM *Mach-Zehnder modulator*
NLOS *non line-of-sight*
NMSE *normalized mean square error*
NSA *non-standalone*
NR *new radio*
O/E *óptico para elétrico*
OFDM *orthogonal frequency division multiplexing*
OOBE *out-of-band emission*
OSFL *orthogonal scalar feedback linearization*
OWC *optical wireless communications*
EA *electrical amplifier*
PAA *photonic-assisted amplification*
PC *polarization controller*
PCF *photonic-crystal fiber*
PCI *placa de circuito impresso*
PD *fotodetector*
PIC *photonic integrated circuit*
PHY *physical layer*
PML *perfectly matched layer*
PoF *power-over-fiber*
PON *passive optical network*
PPC *photovoltaic power converter*
PSD *power spectral density*
QAM *quadrature amplitude modulation*
QPSK *quadrature phase-shift keying*
RA *razão axial*
RAN *radio access network*
RAU *remote antenna unit*
RF *radiofrequência*

RGBA *red, green, blue and amber*
RoF *radio over fiber*
RRU *remote radio unit*
SCM *subcarrier multiplexing*
SDR *software defined radio*
SICL *substrate integrated coaxial line*
Si *silício*
SMF *single-mode fiber*
SPR *surface plasmon resonance*
SWAA *slotted-waveguide antenna array*
TDD *time-division duplexing*
TE *transversal electric*
TM *transversal magnetic*
THF *tremendously high frequency*
THz *tera-hertz*
TVWS *TV white spaces*
VLC *visible light communication*
VOA *variable optical attenuator*
VSA *vector signal analyzer*
VSG *vector signal generator*
WDM *wavelength division multiplexing*

Sumário

1	Introdução	1
2	Antenas aplicadas em Redes 6G	3
3	Contribuições em Dispositivos para Comunicações Ópticas	10
4	Contribuições em Sistemas Óptico-<i>Wireless</i>	16
4.1	Soluções de rádio sobre fibra	17
4.2	Soluções baseadas em <i>machine learning</i> para rádio sobre fibra	18
4.3	Soluções baseadas em fibra-rádio	22
4.4	Soluções baseadas em FSO	23
4.5	Comunicação com luz visível	25
5	Contribuições em soluções fotônica integrada	28
6	Contribuições em soluções <i>Power-over-Fiber</i>	33
7	Conclusões	36

1 Introdução

Hugo Rodrigues Dias Filgueiras, Luiz Augusto Melo Pereira
 hugo.rodrigues@inatel.br, luiz.augusto@dtel.inatel.br

A sexta geração de rede móvel celular (6G) é prevista para lançamento no mercado a partir de 2030. Espera-se que seus casos de uso exijam operações complexas, com localização de alta resolução com precisão de centímetros, sincronização entre dispositivos na ordem de μs , suporte a rede ultradensa (≈ 100 dispositivos por metro cúbico), além de vida útil da bateria de até 20 anos [1]. Os requisitos de baixa latência e confiabilidade serão muito mais restritivos na rede 6G [1,2]. Prevê-se latência máxima de apenas 1 ms e confiabilidade de pelo menos 99,9999% [1]. Quanto ao aumento de taxa de transferência do sistema, 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 [1–3]. Espera-se ainda que a faixa de frequência de tera-hertz (THz) seja explorada devido à sua enorme capacidade e largura de banda (BW) [1–3].

A banda de THz corresponde à faixa de 300 GHz a 3 THz, a qual é definida pela delimitação da *International Telecommunication Union* (ITU) quanto à região *tremendously high frequency* (THF). Entretanto, tal definição varia na literatura [4–6]. Muitos 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 [3,7–10]. Estudos iniciais propõem a utilização de *millimeter waves* (mmWaves) entre 30 GHz a 100 GHz, também consideradas para a rede de quinta geração de rede móvel celular (5G), e a faixa inicial da banda de THz, denominada de sub-THz, compreendida entre 100 GHz e 300 GHz [7,11,12].

Considerando a variedade de cenários e de requisitos, a rede de transporte também deve ser capaz de oferecer alto tráfego de dados para dar suporte a qualquer um dos casos de uso propostos [13]. Na arquitetura de rede móvel de futura geração, como exemplificado em [14], a rede central é conectada diretamente em um *central office* (CO), contendo um conjunto de *baseband units* (BBUs), por meio de um *backhaul* (BH), normalmente usando sistemas *wavelength division multiplexing* (WDM). O BH também pode conectar várias COs entre si. As COs fornecem os sinais em banda base processados para a *distributed unit* (DU) ou diretamente para a *remote radio unit* (RRU). As conexões entre BBUs e DUs são chamadas de *midhaul* (MH) e as conexões entre BBUs e RRUs são chamadas de *fronthaul* (FH). Os FHs também são usados para conectar as DUs às RRUs e MHs também são usados para fornecer alto tráfego de dados para femtocélulas [15]. Além disso, alguns FHs sem fio podem ser precedido por um MH fotônico, dando origem ao conceito de um Xhaul híbrido [14–16]. Essa arquitetura emprega um conjunto de técnicas de comunicação sem fio [17] e fotônica [18–20] a fim de aumentar a eficiência espectral e, como resultado, aumentando a capacidade de tráfego de dados em ambos MH óptico e FH sem fio. Além disso, super células operando com taxas de transferência de até 600 Mbit/s podem gerenciar um grande número de micro e femtocélulas de alta capacidade em seu raio de cobertura, criando pontos de acesso de taxa de transferência extremamente alta, atingindo até 20 Gbit/s por usuário [21–23], dando origem a uma *heterogeneous networks* (HetNet).

Neste contexto, este relatório apresenta o conjunto de contribuições dos pesquisadores do projeto Brasil 6G ao estado da arte das soluções em óptica e radiofrequência (RF) aplicadas às redes 6G. Essas contribuições englobam as pesquisas em dispositivos de RF, antenas, topologias de redes ópticas de transporte e acesso e novas topologias baseadas em soluções híbridas baseadas em *optical wireless communications* (OWC). O relatório é composto por sete seções,

sendo que a Seção 2 aborda as contribuições no desenvolvimento de antenas e dispositivos de RF, a Seção 3 traz as contribuições em dispositivos para as comunicações ópticas, a Seção 4 cobre as contribuições na área de integração *fiber-wireless* (FiWi), a Seção 5 trata das soluções aplicando dispositivos ópticos integrados, a Seção 6 apresenta os resultados relacionados a transferência de potência elétrica na fibra óptica e, por fim, as conclusões do relatório são apresentadas na Seção 7.

2 Antenas aplicadas em Redes 6G

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

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G contribuíram ativamente no desenvolvimento de antenas para redes 5G e 6G, propondo a utilização de antenas do tipo *slotted-waveguide antenna array* (SWAA) operando em mmWaves. Uma importante contribuição foi a proposta de um SWAA de baixo perfil e alto ganho para enlaces ponto-a-ponto operando em 26 GHz [24], representando uma solução potencial para aplicações de *self-backhaul*. O protótipo foi composto por 27 fendas, usinadas em uma parede de guia de ondas padrão (WR28), com seis pares de ranhuras em paralelo ao eixo do arranjo de fendas. O arranjo das fendas foi capaz de diminuir a largura do feixe no plano H para 3° e os pares de ranhuras reduziram a largura do feixe para 10° no plano E , alcançando a marca considerável de ganho de 27,7 dBi, sem a necessidade de refletores metálicos. O protótipo forneceu uma BW de 25,88 a 26,78 GHz. A Figura 1 traz uma foto do arranjo proposto, a especificação das ranhuras e o gráfico do ganho ao longo da frequência evidenciando o papel das ranhuras no aumento do desempenho [24].

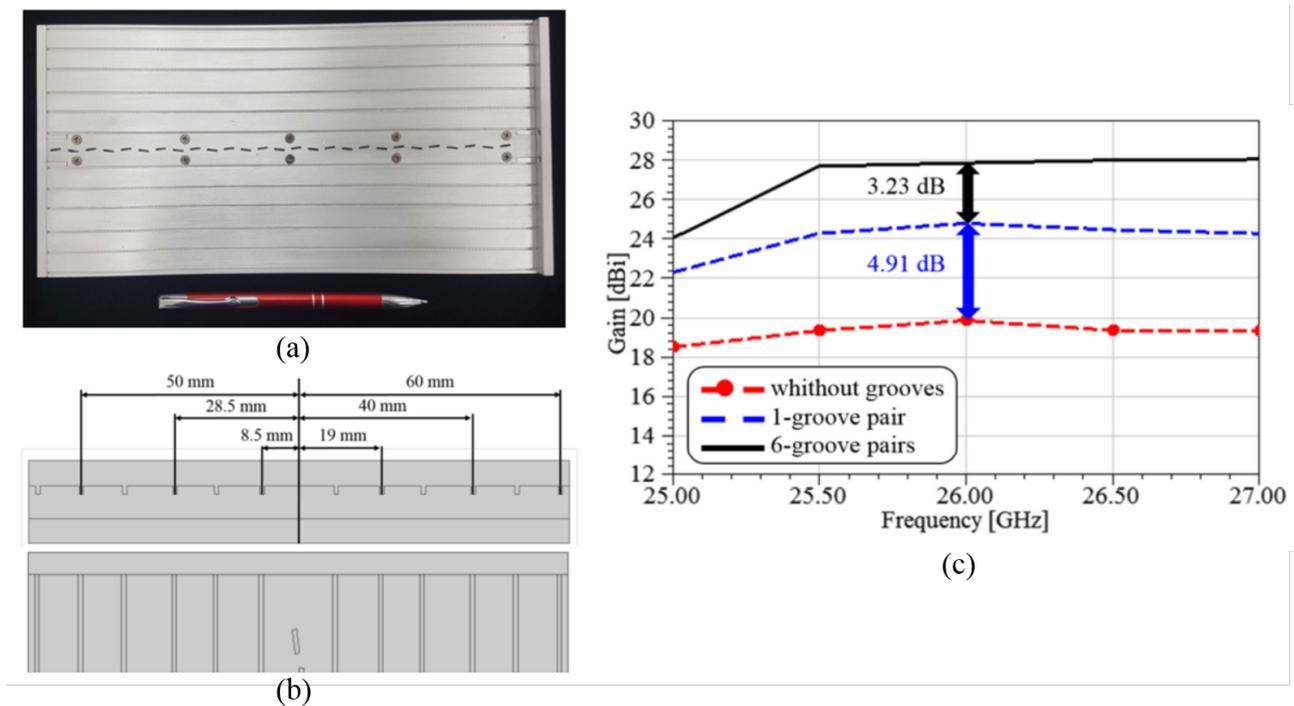


Figura 1: Imagens retiradas de [24]. (a) Protótipo do SWAA. (b) Técnica de ranhuras para aumento de ganho. (c) Ganho do SWAA em função do aumento de ranhuras.

Considerando aplicações *indoor* para criação de femtocélulas, propôs-se em [25] um SWAA omnidirecional. Sua aplicabilidade foi comprovada em [26], no qual realizou-se a instalação do protótipo proposto em uma *indoor femtocell* operando em 24,15 GHz. Uma cobertura interna de 91 m² foi demonstrada e seu mapa de cobertura estimado por medições do parâmetro *root mean square error vector magnitude* (EVM_{RMS}) em 36 pontos de recepção, especialmente distribuídos em todo o laboratório [26]. A *femtocell 5G new radio* (NR) foi configurada com BW de 50 MHz, subportadoras espaçadas de 30 kHz e 104,8 Mbit/s de taxa de transmissão,

cuja qualidade do sinal é analisada de acordo com [27]. Os cenários de propagação de *line-of-sight* (LOS) e *non line-of-sight* (NLOS) foram avaliados, implicando em variação de EVM_{RMS} de 3,13% a 19,4%. Coberturas de 94% e 89% foram obtidas quando empregando os mapeamentos *quadrature phase-shift keying* (QPSK) e *16-quadrature amplitude modulation* (QAM), respectivamente, demonstrando sua aplicabilidade em comunicações *indoor* para redes de futura geração, incluindo 5G e 6G. A Figura 2 reúne alguns dos principais resultados e a configuração do experimento, sendo possível ver o mapa de cobertura da *femtocell* 5G NR para as modulações QPSK e 16-QAM.

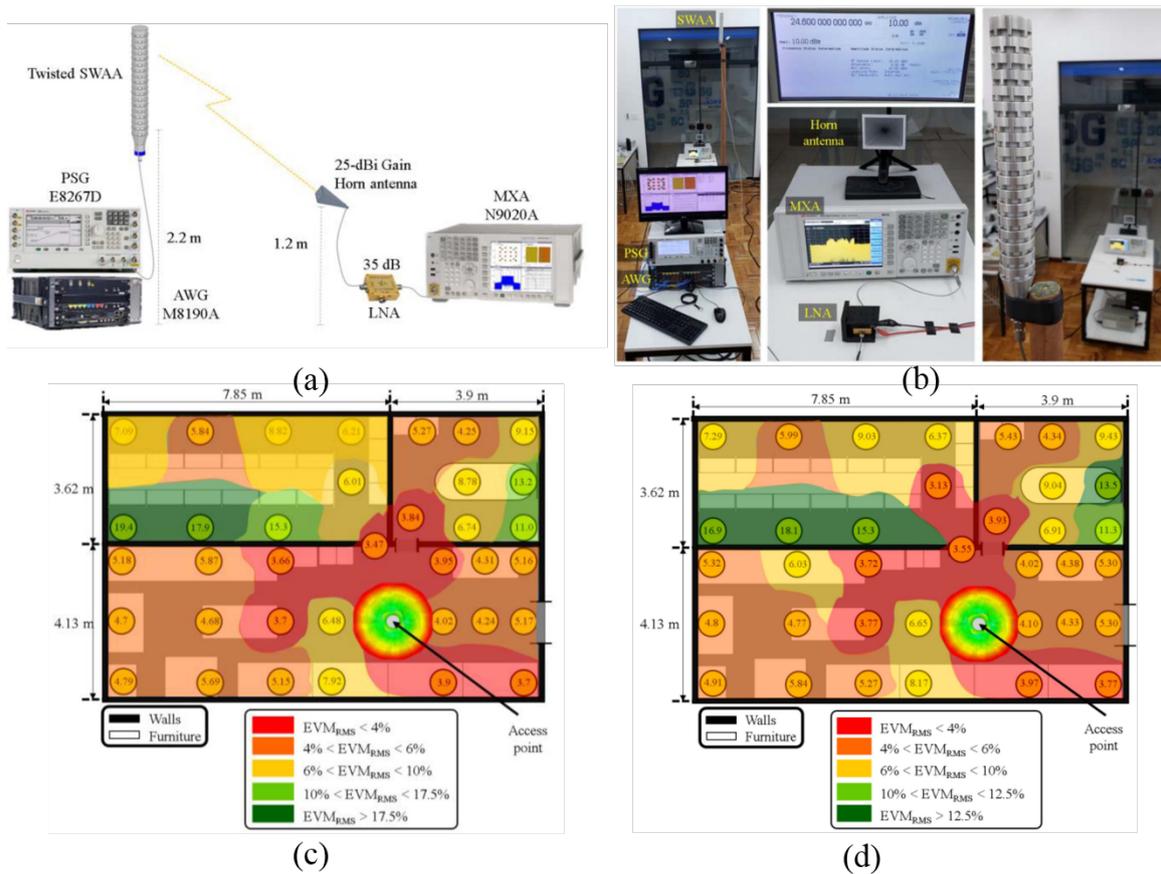


Figura 2: Imagens retiradas de [26]. (a) Diagrama em blocos do *setup* de medidas. (b) Imagens do *setup* de medidas *indoor* da *femtocell* 5G NR. (c) Mapa de cobertura utilizando a modulação QPSK. (d) Mapa de cobertura utilizando a modulação 16-QAM.

Em [28], os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram o desenvolvimento de um elemento de antena com características de baixo acoplamento para aplicações *massive multiple-input multiple-output* (mMIMO) baseadas em *time-division duplexing* (TDD). Propôs-se a utilização da técnica *substrate integrated coaxial line* (SICL) no desenvolvimento das linhas de transmissão, para excitação de elemento irradiante baseado em fenda. Cada fenda possui uma cavidade operando como refletor individual, a fim de mitigar o efeito de acoplamento mútuo que degrada significativamente o desempenho do sistema. Sua principal vantagem é a escalabilidade para arranjo de altas ordens, uma vez que sua resposta em frequência (casamento de impedância e acoplamento mútuo) se mantém inalterado independente da ordem do arranjo de antenas implementado e de sua posição na estrutura final. Em outras palavras, não é neces-

sário o desenvolvimento de um novo projeto de antenas ao se aumentar a ordem do arranjo. Cada elemento de antena provê banda de aproximadamente 1,31 GHz, centrada em 26 GHz. O acoplamento entre dois elementos adjacentes foi mantido menor que 32 dB entre 25 e 27 GHz. Por fim, em 26 GHz, a antena provê ganho de 6,4 dBi e aberturas de feixe de 70° e 80° nos planos ortogonais principais. O modelo numérico do elemento de antena e os resultados de BW, diagrama de irradiação e ganho podem ser vistos na Figura 3.

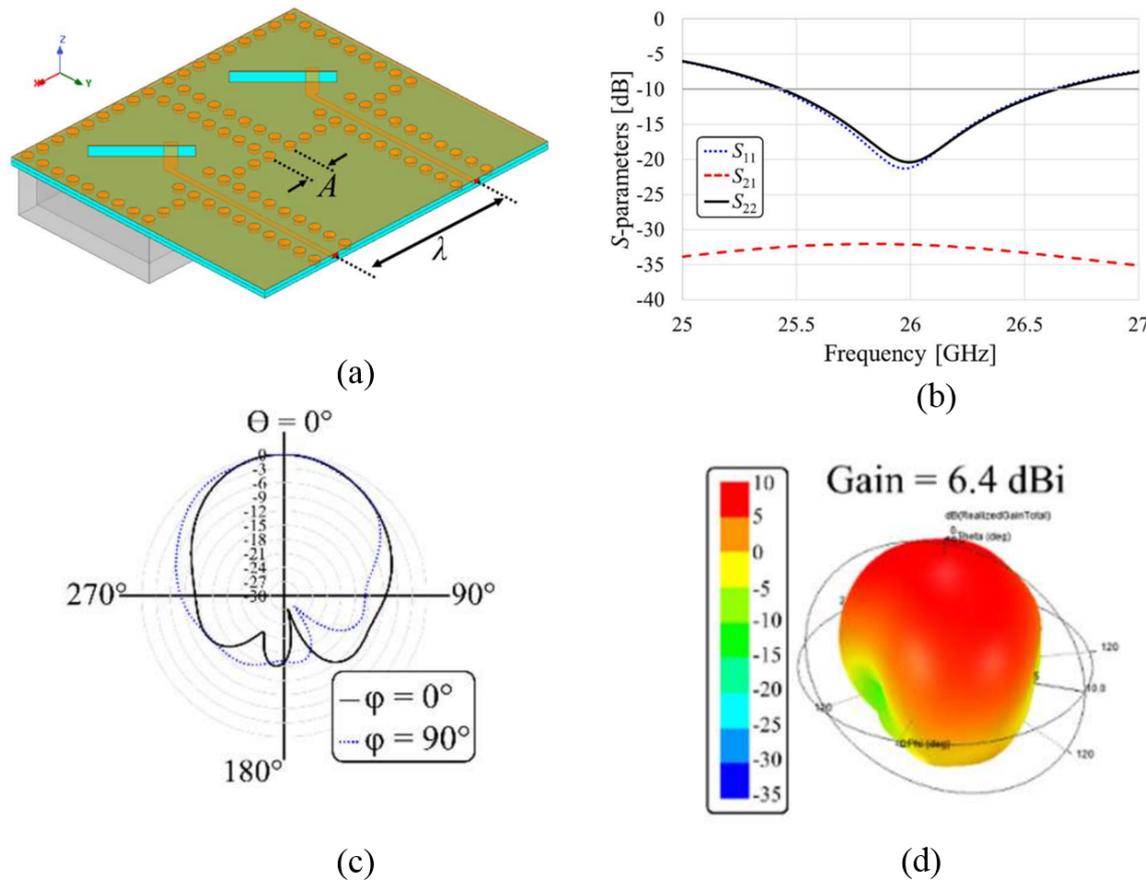


Figura 3: Imagens retiradas de [28]. (a) Modelo numérico do elemento do arranjo de antenas baseado em antena de fenda e rede alimentação em SICL. (b) Resultados numéricos dos parâmetros S. (c) Diagrama de irradiação normalizado. (d) Diagrama *three-dimensional* (3D) simulado de um elemento.

Um segundo elemento de antena, também para aplicações mMIMO baseadas em TDD, foi proposto em [29]. O elemento de antena se trata de uma corneta circular de dupla polarização que emprega uma técnica de ranhuras, similar à apresentada em [24] para aumento de ganho, e possui uma rede de alimentação baseado SICL para redução de acoplamento mútuo entre elementos. Os resultados numéricos mostraram que a antena opera de 23,74 a 27,39 GHz, ou seja, com banda de 3,65 GHz centrada em 25,5 GHz. Os autores consideraram 4 elementos de antena para avaliar o acoplamento mútuo entre estes elementos, que foi abaixo de -58 dB. A implementação de ranhuras permitiu um aumento de ganho de 1,5 dB em toda a BW. O elemento de antena resultante obteve ganho de aproximadamente 15 dBi em 26 GHz, com abertura de feixe de aproximadamente 37°. O conjunto de antenas proposto tem potencial

para ser escalonado em até 64 elementos sem comprometer os resultados alcançados. A Figura 4 apresenta o modelo numérico do elemento de antena, a rede de alimentação baseada em SICL, a proposta de 64 elementos, os resultados dos parâmetros S, o ganho por frequência e o diagrama de irradiação do elemento de antena.

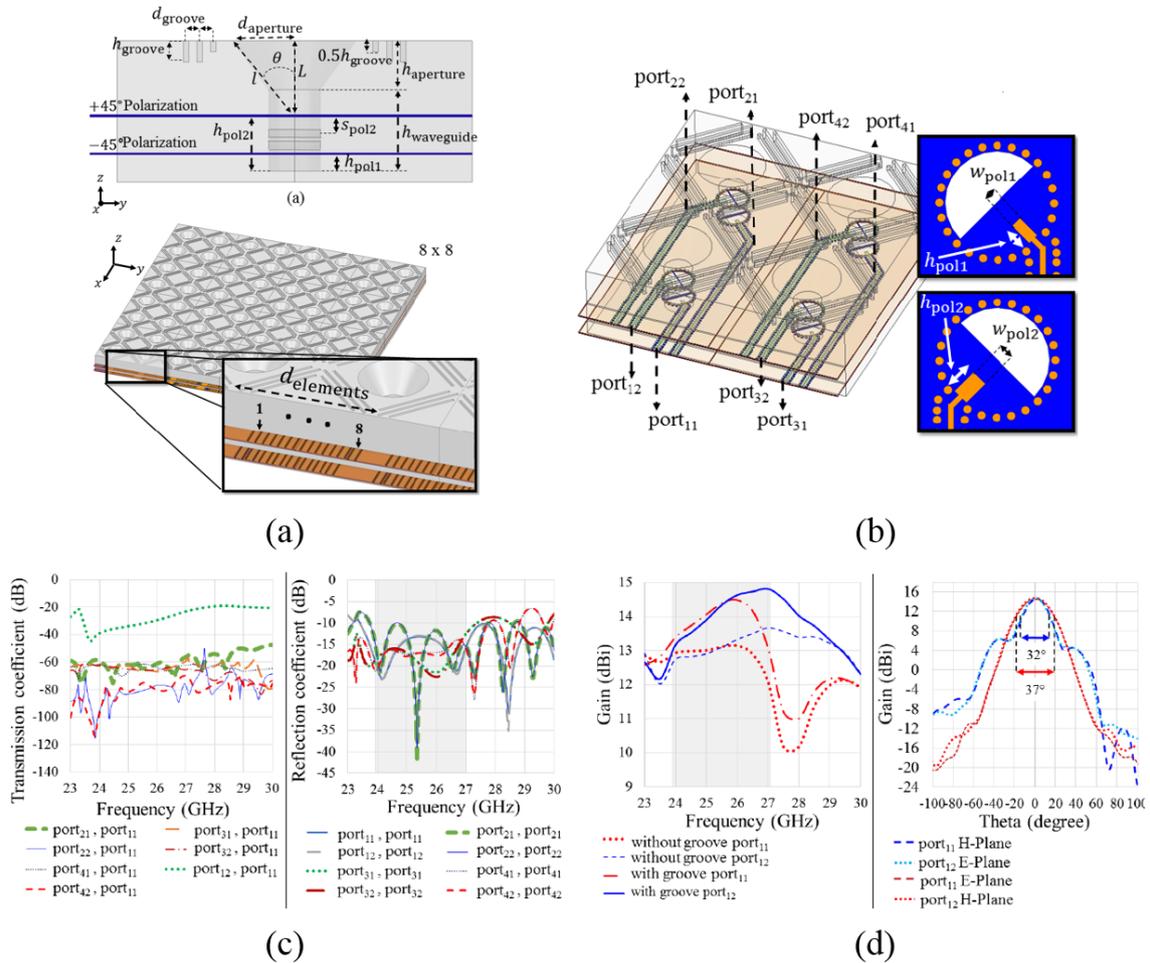


Figura 4: Imagens retiradas de [29]. (a) Modelo numérico do elemento do arranjo de antenas baseado em corneta de dupla polarização e rede de alimentação em SICL. (b) Rede de alimentação SICL (c) Resultados numéricos dos parâmetros S. (d) Diagrama de irradiação normalizado.

Além de aplicações de antenas, os pesquisadores do projeto propuseram um defasador de RF para aplicações de guiamento de feixe [30]. Os autores propuseram um divisor 1x8 com controle mecânico de defasagem entre as portas de saídas. Um divisor de potência 1x4 baseado em guia de ondas é proposto para alimentar quatro guias de onda em forma semicircular com 8 portas de saída. A posição angular de acoplamento entre o divisor de potência e os guias de onda de formato circular (γ) cria ao deslocamento de fase reconfigurável. A estrutura proposta é capaz de fornecer uma diferença de fase entre duas portas de saída consecutivas aproximadamente fixas para cada posição de acoplamento angular, além de uma variação linear e contínua de 0° a 180°. A Figura 5 engloba as contribuições do trabalho [30], na qual pode-se notar a parte mecânica do defasador de RF, o resultado da defasagem entre as portas para diferentes posições de regulagem e a aplicação do defasador de RF em um arranjo de antenas linear para guiamento de feixe.

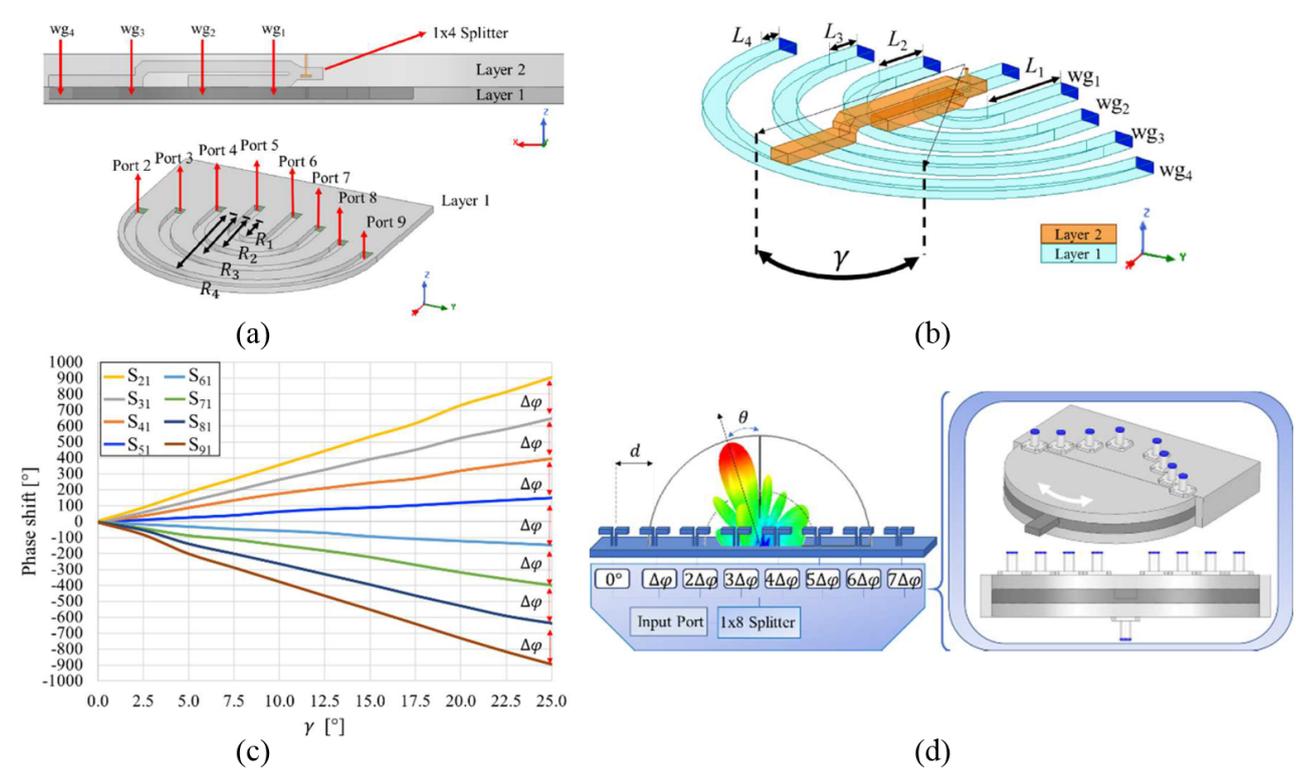


Figura 5: Imagens retiradas de [30]. (a) Modelo numérico do defasador de RF, estrutura mecânica. (b) Parte interna do defasador de RF (c) Resultados numéricos da defasagem entre as portas para diferentes posições de regulagem. (d) Aplicação do defasador de RF para guiamento de feixe.

Para transferir antenas de mmWaves de laboratórios de pesquisa para o mercado de redes móveis de sexta geração, é fundamental superar incompatibilidades e perdas de polarização. Propôs-se em [31] o projeto de uma antena de mmWaves integrada de baixo perfil com polarização circular. A antena projetada consiste em uma metassuperfície dielétrica construída com um arranjo de cilindros dielétricos 2x2 com ranhuras inclinadas no centro. Obteve-se baixo nível de razão axial (RA) < 3 dB por meio de emparelhamento de ressonâncias elétricas e magnéticas dos cilindros dielétricos e das fendas inclinadas, respectivamente, quando excitadas por uma antena *patch* elípticamente polarizada. Tal emparelhamento eletromagnético pode ser ajustado variando-se o diâmetro dos cilindros e os ângulos de inclinação e rotação das fendas inclinadas. Os resultados numéricos comprovaram banda de 22,6% (25,3–31,6 GHz) com BWs RA de 3 dB de 11,6% (26,9–30,2 GHz). A Figura 6 apresenta o modelo e seus principais resultados numéricos, incluindo banda de operação e RA ao longo da frequência.

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G também iniciaram as pesquisas em antenas aplicadas a THz. Em [32], os autores apresentam uma solução para comunicação intra/inter-*chip* baseado no uso conjunto de duas nanoantenas distintas, sendo uma Corneta e uma Plantena, visando aplicações para redes 6G operando em 474 THz. Simulações numéricas demonstraram a aplicabilidade da abordagem proposta, na qual nanoantenas de alto desempenho, atuando como emissores e receptores ópticos, foram projetadas para reduzir perdas de propagação óptica, reduzir o coeficiente de reflexão, além de elevar diretividade e o ganho. Quatro cenários diferentes usando antenas do tipo Corneta e Plantena foram avaliados a fim de obter a melhor configuração, visando aumentar o alcance do enlace. É importante ressaltar que a estrutura de

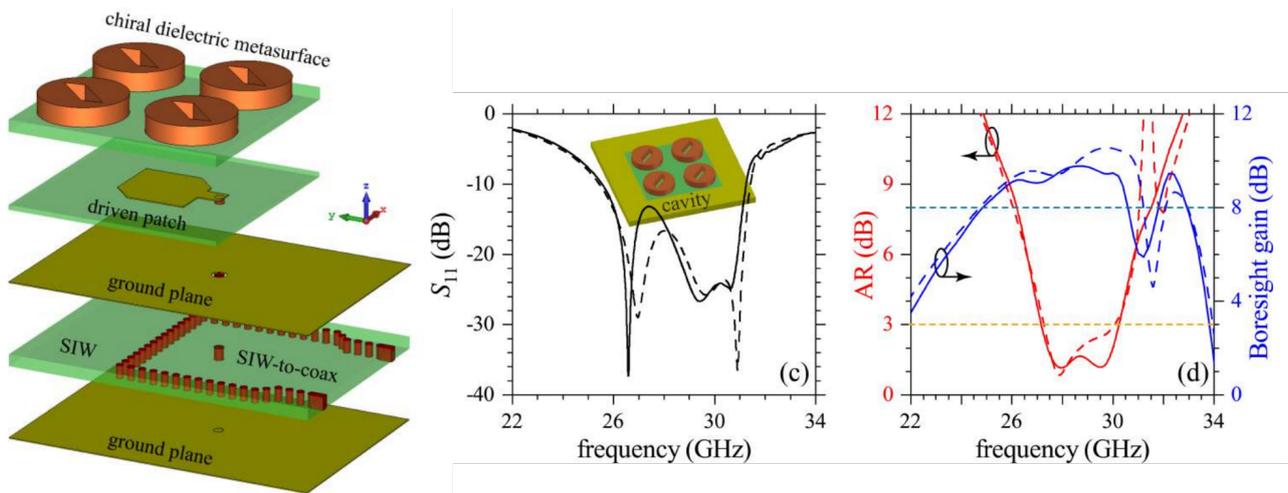


Figura 6: Imagens retiradas de [31]. Modelo numérico antenna de baixo perfil com polarização circular e resultados numéricos da banda de operação e da RA.

Plantena atuando como receptor aumentou significativamente o nível de potência recebido, por meio da excitação de ressonâncias plasmônicas de superfície localizadas, dando origem a um nano enlace óptico de 32λ e melhoria de 40 dB no *link budget*. As contribuições mais importantes de [32] são apresentadas na Figura 7. Destaca-se a distribuição de campo mais intensa no enlace intra/inter-*chip* com Plantena atuando como receptor e a Corneta como transmissor. A mesma conclusão pode ser tirada em relação a intensidade de potência na Figura 7 (c), que apresenta uma comparação da potência recebida normalizada em função da distância do enlace para diferentes combinações de elementos atuando como transmissor e receptor, Corneta-Plantena, Plantena-Plantena, Corneta-Plantena e Corneta-Corneta.

Em [33], por outro lado, buscou-se apresentar uma nova abordagem para modelagem de nanoantenas, com base na distribuição de carga plasmônica, para as redes 6G operando em THz. Os autores propuseram a aplicação de um modelo matemático sem restrições de condição de contorno e não dependente do substrato utilizado para prever adequadamente o funcionamento do dispositivo THz, bem como compreender seu comportamento físico, tanto no domínio da frequência quanto no domínio do espaço. Os resultados numéricos demonstram ressonâncias plasmônicas de até 47 THz em função da temperatura, que foi avaliada de 30 K a 300 K. Os resultados da distribuição de carga de plasma em função da frequência e da distância podem ser vistos na Figura 8 (a) e (b), respectivamente.

De maneira geral, conclui-se que ainda há diversos desafios para desenvolvimento de antenas aplicadas a comunicações em THz. Dentre estes desafio, foi possível identificar duas vertentes nas pesquisas de antenas nessa nova faixa de frequência, sendo eles: i) o desenvolvimento de antenas que são baseadas em variações das técnicas convencionais aplicadas em mmWaves e; ii) o desenvolvimento de antenas fotocondutoras para geração de sinais na faixa de THz, utilizando conceitos que relacionam comunicações ópticas, física de plasma e antenas.

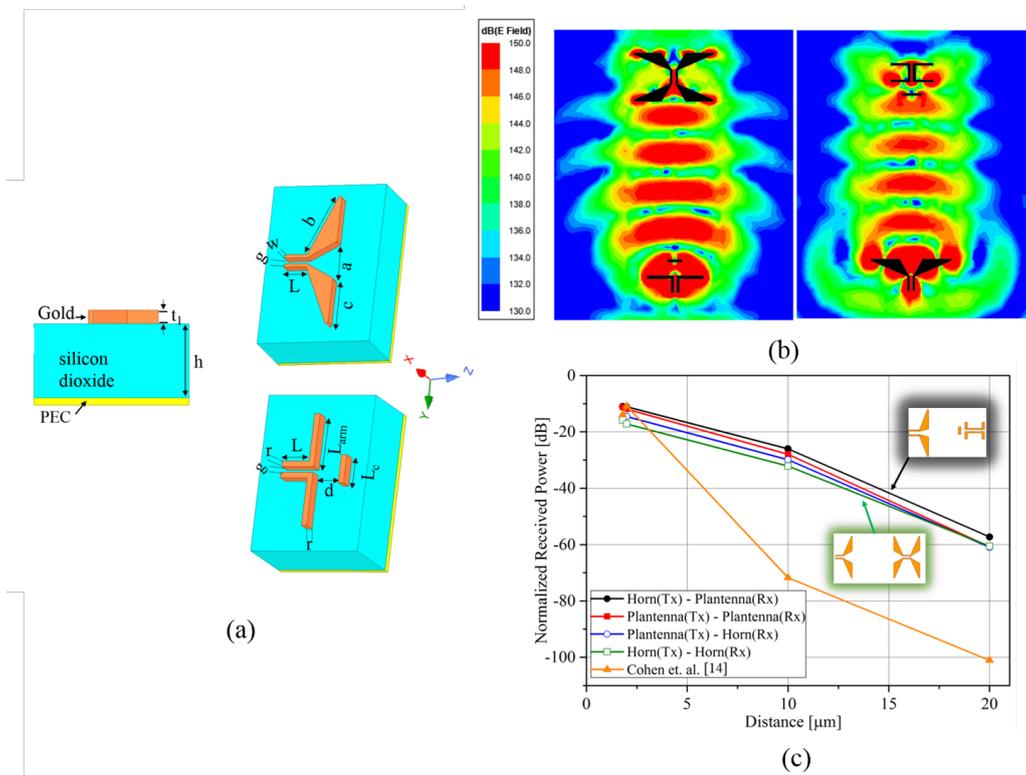


Figura 7: Imagens retiradas de [32]. (a) Modelo numérico da Corneta e da Plantena. (b) Campo elétrico em campo próximo na frequência de 474 THz. (c) Potência recebida normalizada para Corneta-Plantena, Plantena-Plantena, Corneta-Plantena e Corneta-Corneta.

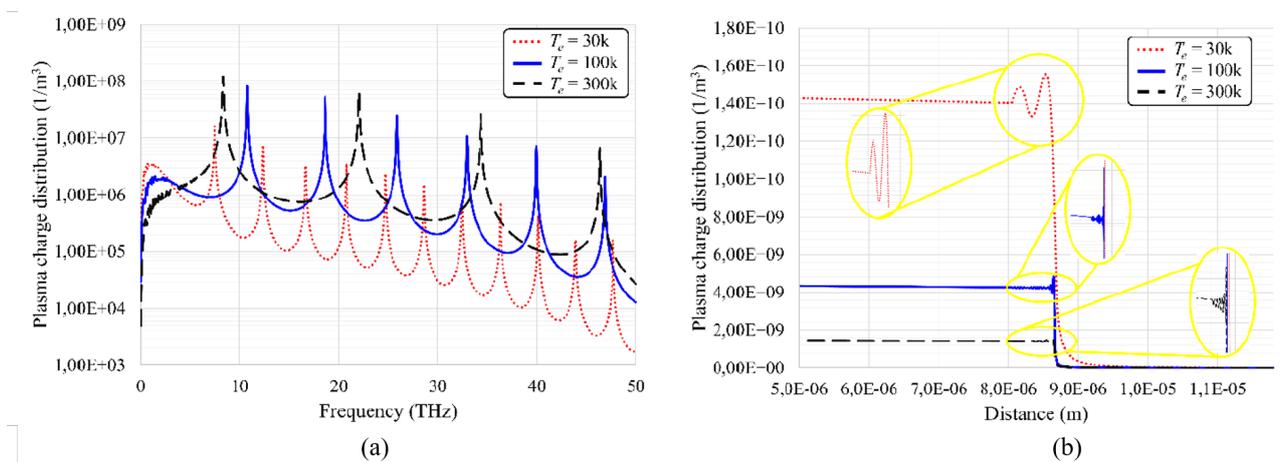


Figura 8: Imagens retiradas de [33]. (a) Distribuição de carga plasma em função da frequência de ressonância para três diferentes temperaturas. (b) Distribuição espacial e carga de plasma em função da distancia para três diferentes temperaturas.

3 Contribuições em Dispositivos para Comunicações Ópticas

Matheus Sêda Borsato Cunnha
matheus.seda@inatel.br

As redes 6G irão demandar uma grande quantidade de dados que precisam ser eficientemente transmitidos empregando a estrutura de fibras ópticas. Neste cenário, o uso de *dense wavelength division multiplexing* (DWDM) é essencial e soluções que maximizam a capacidade deste sistema estão sendo pesquisados intensamente hoje em dia. Dentre esses diversos avanços, os *micro-ring resonators* (MMRs) merecem destaque pois têm sido o foco de várias pesquisas recentes em função da sua ampla gama de aplicações relacionadas a sensores ópticos em circuitos fotônicos integrados, espectômetros, isoladores, filtros, interruptores e multiplexadores/demultiplexadores. Os MMRs surgiram como um caminho favorável para aumentar a capacidade de BW em redes de acesso ópticas através de aplicações de DWDM. Essa técnica divide o espectro óptico de uma *single-mode fiber* (SMF) em uma série de comprimentos de onda, com um pequeno espaçamento entre eles, a fim de serem distribuídos entre vários usuários. Porém, algumas estruturas têm um número limitado de canais que podem ser usados para comunicações e necessitam de técnicas de fabricação sofisticadas e sintonia elétrica precisa das ressonâncias. No entanto, os efeitos magnetoplasmáticos em MMRs têm recebido atenção nos últimos anos, devido a magnetoplasmônica mesclar as funcionalidades plasmônicas e magnéticas a fim de possibilitar o controle de dispositivos plasmônicos ativos através de campos magnéticos aplicados externamente. Um ponto de destaque desta tecnologia é o pequeno intervalo de tempo necessário para a reversão de magnetização empregando campos ópticos, os quais são promissores para o desenvolvimento de dispositivos de chaveamento extremamente mais rápidos que seus equivalentes eletro-ópticos e termo-ópticos.

A partir desta motivação, os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram em [34] um *magneto-optical* MRR (MORR) para ajuste dinâmico de canais *add/drop* em aplicações DWDM. A proposta visa melhorar a densidade de integração e beneficiar vários sistemas ópticos *on-chip* para a próxima geração de interconexões fotônicas ultrarrápidas e de alta densidade de BW. O sistema foi projetado para operar na Banda C de telecomunicações no domínio óptico, para comprimentos de onda de $\lambda = 1530$ nm a $\lambda = 1560$ nm. A microestrutura consiste em um MMR, com um disco magneto-óptico (MO) dielétrico interno, acoplado lateralmente com dois guias de onda, conforme mostra a Figura 9. Considerou-se o MMR e os guias de onda feitos de silício (Si), com permissividade $\epsilon_{\text{Si}} = 12,159$, para integração ideal com a fotônica convencional de Si. A permissividade do disco MO foi usada de acordo com os valores experimentais para o material dielétrico de *cerium-substituted yttrium iron garnet* (Ce:YIG), o qual pode ser monoliticamente integrado com circuitos fotônicos baseados em Si. O material *gadolinium gallium garnet* (GGG), com permissividade $\epsilon_{\text{GGG}} = 3,8025$, foi utilizado para o substrato devido à alta compatibilidade com Si e Ce:YIG. O sistema foi analisado por meio de simulações numéricas considerando a abordagem proposta rodeada de ar, com permissividade $\epsilon_{\text{ar}} = 1$.

Os resultados neste trabalho foram obtidos usando a recomendação *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) G.694.1 para comunicações ópticas. Primeiramente, foi analisado o espectro de transmitância entre entrada e saída, e observou-se que metade dos canais DWDM na Banda C são retirados na porta de *drop*. O perfil do campo magnético normalizado também foi analisado nas condições de ressonância e fora dela, observados em uma vista superior e inferior do sistema de guias de onda MORR.

Além disso, o ajuste MO dos modos ópticos ressonantes foi estudado através da observação do espectro óptico e, por fim, o *cross talk* (CT) entre os modos guiados foi calculado. Através dessas análises, chegou-se a conclusão que foi possível obter um chaveamento MO *add/drop* de alto desempenho, invertendo a magnetização do disco, seja para canais DWDM pares ou ímpares, com espaçamento de 100 GHz.

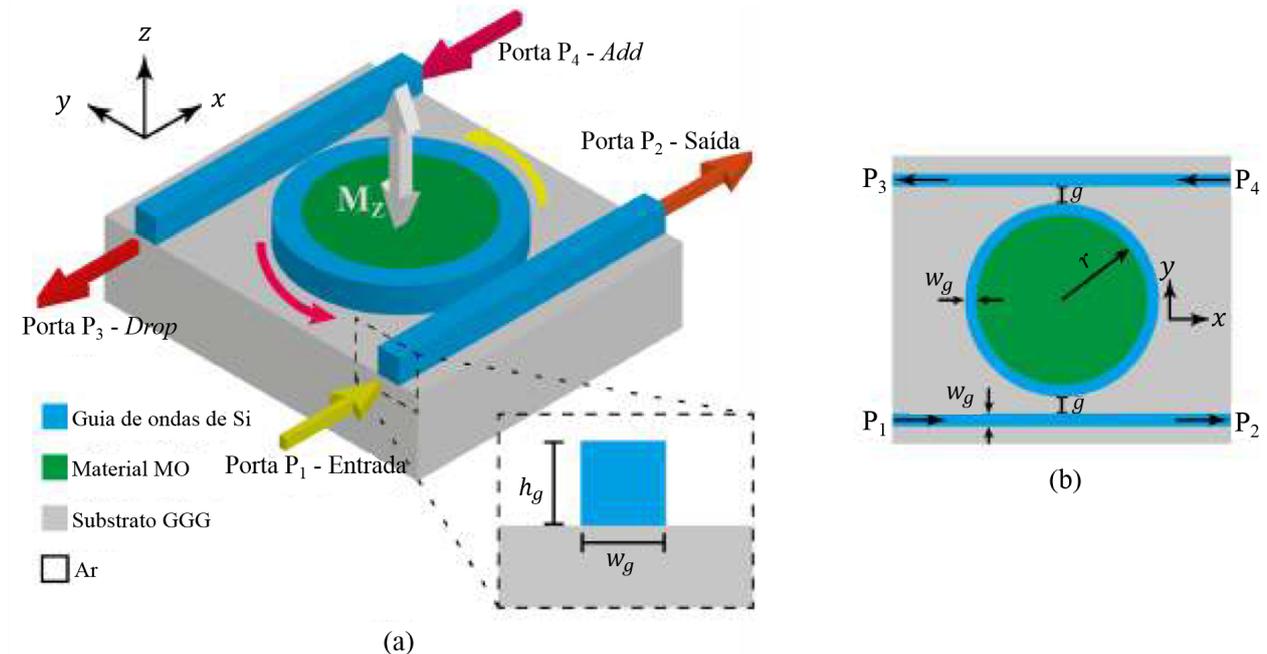


Figura 9: Imagens retiradas de [34] do esquemático do dispositivo proposto. (a) Visão isométrica do MORR. O *inset* ilustra a seção transversal do guia de ondas do barramento de Si, com largura w_g e altura h_g . A seta dupla vertical indica as direções de magnetização possíveis. As setas curvas no plano são usadas para representar os modos *add/drop*. (b) Vista superior e parâmetros geométricos da estrutura.

Os moduladores ópticos têm o potencial de integrar funções fotônicas e nanoeletrônicas em um circuito integrado, a fim de superar as perdas ôhmicas, a dispersão e as limitações de CT das interconexões convencionais baseadas em cobre. Além disso, as vantagens intrínsecas das soluções fotônicas integradas prometem atender à demanda por BWs de frequências mais amplas e taxas de dados mais altas para evitar gargalos de comunicação. O efeito elétrico para óptico (E/O) atraiu atenção particular devido à alta velocidade de modulação e maior BW, dentre os princípios físicos que podem ser usados para a modulação óptica. O efeito E/O tem sido explorado principalmente com dispositivos nanofotônicos baseados em Si, o que permite alta compatibilidade com os dispositivos baseado em *complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS). Entretanto, grandes *footprints* e alto consumo de energia dificultam as aplicações, devido ao fraco efeito E/O do Si. Por outro lado, as propriedades únicas e incomuns do grafeno, como a relação de dispersão de energia/momento linear, permitem aplicações nas bandas de ultravioleta a infravermelho e em faixas de frequência de THz. Além disso, o grafeno exibe um efeito E/O intenso, surgindo recentemente como uma solução para superar as desvantagens dos moduladores totalmente baseados em Si. Porém, a permissividade anisotrópica desse material torna as propostas à base de grafeno fortemente dependentes da polarização, dificultando o desenvolvimento de dispositivos eficientes em termos de energia e custo-benefício.

Dessa forma, em [35] foi demonstrado numericamente uma modulação óptica insensível à polarização, a qual pôde ser alcançada otimizando a geometria da seção transversal retangular dos guias de onda ópticos. Ou seja, foi imposta a mesma influência para os modos *transversal electric* (TE) e *transversal magnetic* (TM). Os autores apresentaram o projeto de um modulador óptico híbrido de grafeno-silício, composto por uma única camada de grafeno depositada em um guia de ondas retangular de Si. O dispositivo foi projetado para operar em regime de permissividade (ϵ) *near-zero* (ENZ), a qual corresponde à região onde o grafeno muda de comportamento dielétrico ($\epsilon > 0$) para metálico ($\epsilon < 0$). A utilização dessa técnica favorece o desenvolvimento de moduladores ultracompactos e de alto desempenho através da exploração de campos ópticos locais aprimorados e aumento das perdas de material em regime ENZ.

Como prova de conceito, os autores de [35] projetaram um modulador ultra-compacto, apresentado na Figura 10. O dispositivo possui comprimento mínimo (L_{\min}) de $5,22 \mu\text{m}$, proporcionando uma profundidade de modulação de 3 dB ao operar no centro da Banda C de comunicações ópticas ($\lambda = 1550 \text{ nm}$). O desenvolvimento e os resultados numéricos foram obtidos pelo *finite element method* (FEM), através do *software* comercial COMSOL Multiphysics. Na configuração da simulação, foram usadas *perfectly matched layers* (PMLs) e condições de contorno de espalhamento para evitar reflexões indesejadas dos limites da estrutura. O tamanho da malha foi otimizado e refinado em torno dos limites do guia de ondas óptico para fins de precisão. A Tabela 1 resume as análises de desempenho correspondentes para $\lambda = 1530 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$ e $\lambda = 1565 \text{ nm}$. Os parâmetros analisados foram: E_f^{ON} e E_f^{OFF} , os quais representam os níveis de Fermi do grafeno para a menor e maior amplitude da *mode power attenuation* (MPA), em torno e ao centro da região ENZ, respectivamente; L_{\min} e *insertion loss* (IL), que são o comprimento mínimo e a perda de inserção do dispositivo; E_{bit} é o parâmetro referente a energia por *bit* para estimativa do consumo de energia; $\Delta\text{MPA}_{\text{OFF}}$, que representa a subtração entre o MPA para o modo TE e o MPA para o modo TM, o qual deve assumir valores próximo a zero para caracterizar o dispositivo como insensível a polarização; e, $f_{3 \text{ dB}}$, que é a BW do modulador.

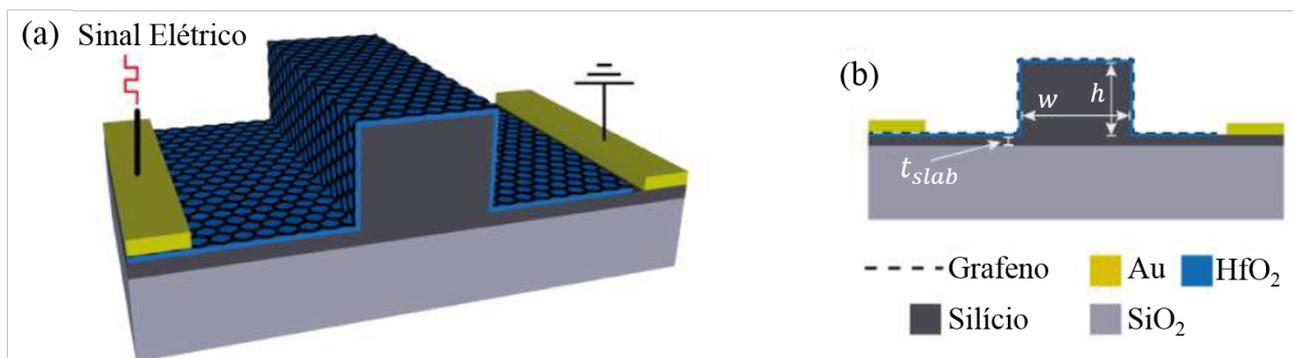


Figura 10: Imagens retiradas de [35]. (a) Esquemático 3D do modulador proposto. (b) Vista em corte transversal mostrando os parâmetros geométricos e materiais correspondentes.

Tabela 1: Principais parâmetros de desempenho do modulador E/O [35].

λ (nm)	E_f^{ON} (eV)	E_f^{OFF} (eV)	$L_{\text{mín}}$ (μm)	IL (dB)	E_{bit} (fJ)	$\Delta\text{MPA}_{\text{OFF}}$ (dB)	$f_{3\text{dB}}$ (GHz)
1530	0,5016	0,5133	5,45	0,054	0,8656	0,1601	12,626
1550	0,4950	0,5065	5,22	0,052	0,7933	0,0085	12,626
1565	0,4894	0,5014	5,39	0,053	0,8561	0,0935	12,626

O acoplamento entre fibra e guias de ondas ópticos baseado em grades de Si tem despertado interesse na comunidade científica devido ao processo de fabricação simplificado e alta capacidade de integração a circuitos fotônicos. Entretanto, as grades de Si podem ser limitadas a uma faixa estreita de comprimento de onda e acoplamento modal de fibra de comprimento de onda único. A limitação em banda estreita é decorrente das propriedades dispersivas da estrutura periódica, a qual permite apenas um acoplamento eficiente sob a condição de casamento de fase. As tentativas para superar esta desvantagem com estruturas bidimensionais apodizadas e com foco curvado envolvem estratégias de fabricação mais complexas comparadas as estruturas unidimensionais e são limitadas a eficiências de acoplamento abaixo de 30%.

Neste contexto, os pesquisadores do projeto Brasil 6G apresentaram em [36] e [37] um modelo de grades do tipo Fibonacci para acopladores fibra-guias de onda, ilustrado na Figura 11. A pesquisa visa estimular mais estudos experimentais e teóricos sobre este conceito a fim de explorar o potencial de sistemas quasi-periódicos em infraestruturas de comunicação óptica. O acoplador de grade quasi-periódica completamente dielétrico foi projetado com reforços retangulares de Si em um substrato de SiO_2 . A estrutura é composta por dez períodos construídos por alternância entre camadas de Si e camadas de ar, de acordo com o passo F_4 da série de Fibonacci. As espessuras das camadas de ar e Si foram consideradas de 315 nm, com comprimento total para a célula unitária de 1575 nm. Foi utilizada a técnica *finite-difference time-domain* (FDTD) para obter os dados numéricos dentro do *software* de simulação. Os estudos foram limitados ao modo fundamental, para o qual as portas de excitação e recepção foram configuradas no algoritmo. Em contraste com os sistemas periódicos convencionais, nos quais apenas uma ressonância pode ser observada dentro de uma faixa estreita de frequências, a quasiperiodicidade leva a várias ressonâncias próximas devido à quebra de simetria de curto alcance.

Os resultados avaliaram a eficiência de acoplamento entre fibra e guia de ondas ópticos visando otimizá-la. O parâmetro mencionado foi caracterizado em função do ângulo de inclinação da fibra em relação ao guia, da profundidade de corrosão e da distribuição das camadas de material (ar-Si ou Si-ar). A eficiência de acoplamento dependem fortemente desses fatores. Além disso, todos os resultados foram apresentados para o modo de campo TE do guia de ondas integrado. Múltiplos picos de eficiência de acoplamento foram observados devido aos efeitos de auto-similaridade. Adicionalmente, os autores mostraram numericamente que os comprimentos de onda ideais e as amplitudes de eficiência de acoplamento podem ser ajustados variando a profundidade de corrosão nas camadas e o ângulo de incidência da fibra óptica. Isso tornou a proposta relevante para circuitos optoeletrônicos de banda larga que precisam ser mais eficientes.

Os estudos focados em *surface plasmon resonances* (SPRs) vêm sendo aprofundado nos últimos anos devido a variedade de aplicações em dispositivos nanofotônicos de sub-difração para sistemas de comunicação, captação de energia, sensoriamento e imageamento. Além disso, filtros e divisores de polarização de alto desempenho podem ser projetados e desenvolvidos com

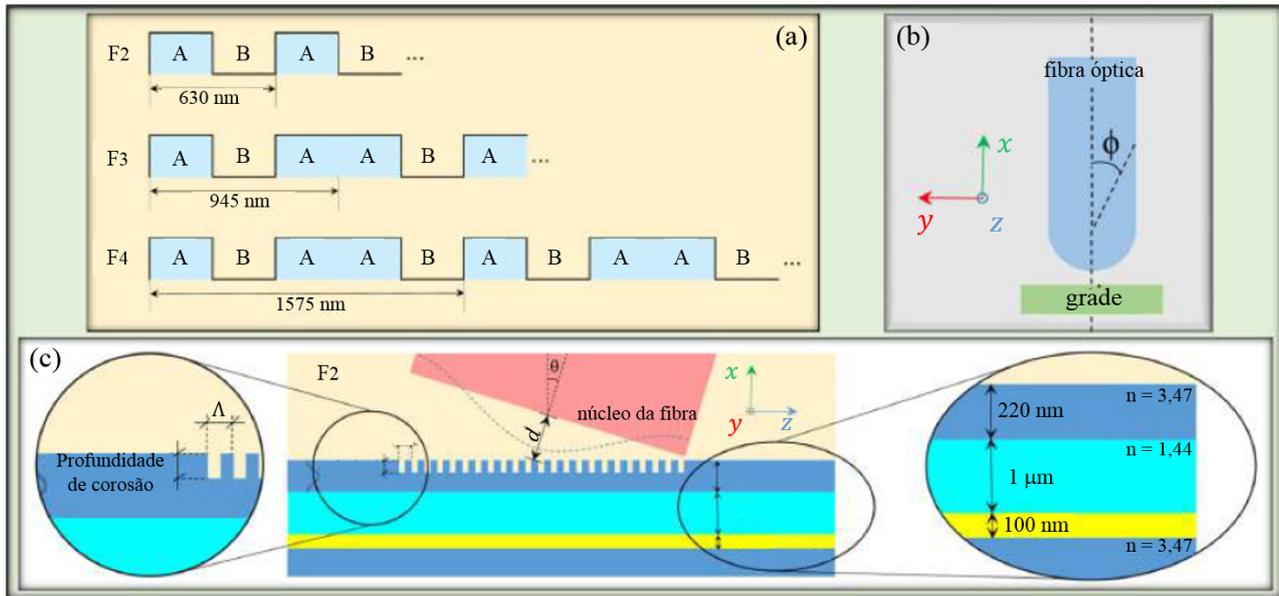


Figura 11: Imagens retiradas de [37]. (a) Ilustração da estrutura da composição e comprimento dos períodos para os passos da série de Fibonacci F_2 , F_3 e F_4 . (b) Vista lateral do sistema de fibra-grade mostrando o alinhamento usado neste trabalho. (c) Esquemático da vista lateral no plano xz do acoplador fibra-guia F_2 (periódico), com uma camada inferior de ouro de $0,1 \mu\text{m}$ e uma camada de revestimento superior de ar ($n_c = 1,0$). As espessuras da placa e os índices de refração das camadas de Si ($n = 3,47$) e de vidro ($n = 1,44$) correspondentes são mostradas. O comprimento do período (Λ), o núcleo da fibra, a distância (d) entre a fibra e a grade e o ângulo de inclinação da fibra (Θ) também são ilustrados.

base no princípio de excitação das SPRs visando os sistemas de comunicação e optoeletrônicos atuais. SPRs são campos eletromagnéticos aprimorados limitados a interfaces metal/dielétrico através de excitações ópticas e eletrônicas acopladas em ressonância. Entre as estratégias para excitação SPR, destacam-se as *photonic-crystal fibers* (PCFs) devido a suas características, como alta flexibilidade, birrefringência, ampla faixa de sintonia, boa estabilidade de temperatura e um tratamento adequado dos campos evanescentes. A seção transversal das SPR-PCFs é geralmente feita por arranjos periódicos de orifícios de ar, e alguns desses são preenchidos ou revestidos com componentes metálicos, contornando um ou mais núcleos. Porém, a estreita faixa de frequência para excitação SPR constitui um obstáculo para aplicações práticas em sensores e divisores e filtros de polarização multibanda, por exemplo. Uma solução para este problema, é avaliar o uso de geometrias fractais, as quais tem sido exploradas para o desenvolvimento de antenas compactas multibanda de alto desempenho.

Desse modo, os pesquisadores do projeto Brasil 6G demonstraram em [38] a excitação de múltiplas SPRs em PCFs com o projeto de seção transversal fractal, como apresentado na Figura 12. A geometria utilizada é do tipo Sierpinski para a seção transversal circular correspondente da fibra, na qual um dos subconjuntos da geometria fractal foi considerado com inserções metálicas. O projeto de esquematização da seção transversal da PCF foi feito através do FEM utilizando o *software* COMSOL Multiphysics. Um círculo sólido é usado como a etapa de iteração 0, o qual é dividido em 9 sub-círculos com diâmetro fracionário distribuído como um círculo central rodeado por oito círculos idênticos. O círculo central é removido na etapa de iteração 1 e, o mesmo procedimento é aplicado recursivamente aos oito sub-círculos sólidos

restantes e assim por diante até a etapa de iteração 3. Os efeitos plasmônicos são introduzidos no sistema considerando que um desses subconjuntos fractais possui componentes metálicos. Em particular, foi considerado um subconjunto fractal que consiste em um orifício revestido de ouro cercado por nanofios de ouro.

Os autores avaliaram o comportamento plasmônico da PCF fractal, com seção transversal circular tipo Sierpinski, e suas aplicações voltadas a detecção do índice de refração e filtros de polarização multibanda com os resultados numéricos obtidos através do *software* mencionado acima. Um conjunto de 34 SPRs foi identificado na faixa de comprimento de onda de $\lambda = 630$ nm a $\lambda = 1700$ nm. Como consequência de simetrias semelhantes dos modos de SPR, foram observados subconjuntos de ressonâncias próximas. Os recursos de filtragem de polarização foram mostrados numericamente nas janelas de telecomunicações da Banda O para a Banda L. Nas análises de detecção do índice de refração, foi usado o método de interrogação de comprimento de onda na faixa de $\lambda = 630$ nm a $\lambda = 790$ nm, na qual o sistema exibiu uma sensibilidade de $S(\lambda) = 1951,43$ nm por unidade de índice de refração. Portanto, visando atender a demanda dos dispositivos que consomem BWs cada vez maiores, espera-se um maior desenvolvimento de infraestruturas de comunicação óptica de BW ultralarga, assim como a solução apresentada.

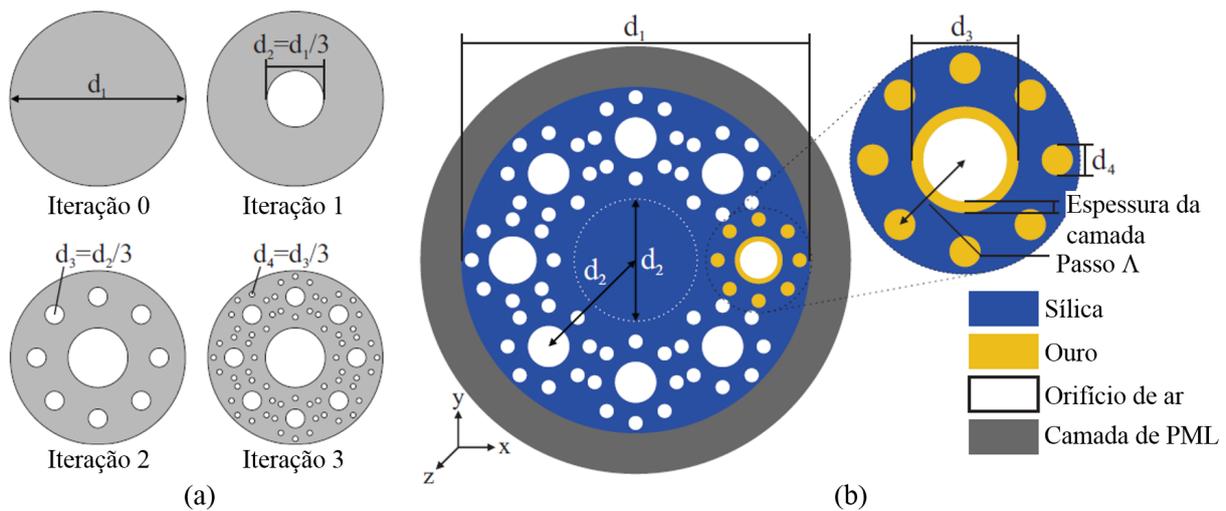


Figura 12: Imagens retiradas de [38]. (a) Representação da geração de uma seção transversal circular semelhante a Sierpinski. (b) A seção transversal semelhante a Sierpinski usada na SPR-PCF. O *inset* é usado para mostrar a geometria do subconjunto do fractal plasmônico e para identificar os diferentes materiais considerados nas simulações. O círculo central, indicado por um círculo tracejado, corresponde ao núcleo dielétrico da fibra.

4 Contribuições em Sistemas Óptico-*Wireless*

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

celso.henrique@dtel.inatel.br, elima@get.inatel.br, luiz.augusto@dtel.inatel.br,
ramonmb@inatel.br, arismar@inatel.br

Esta seção descreve os principais avanços alcançados pelos pesquisadores do projeto Brasil 6G em sistemas OWC direcionados para as futuras rede de comunicação móvel. Dentre estes avanços, merecem destaque o desenvolvimento de técnicas voltadas para *radio over fiber* (RoF), soluções baseadas em topologia FiWi, soluções baseadas em *free space optical* (FSO) e contribuições voltadas para *visible light communication* (VLC).

A Figura 13 ilustra o sistema OWC proposto para redes 6G, onde a rede de acesso de rádio integra enlaces RoF, FSO e de micro-ondas e mmWaves [39]. O acesso sem fio ao usuário final é proporcionado com RF ou VLC, dependendo da aplicação. Por exemplo, acesso a dados móveis por RF pode ser proporcionado em um *site* remoto, conectado ao núcleo da rede por meio de RoF, enlace em mmWaves e/ou FSO. Em paralelo, o acesso a dados por VLC, após rede de transporte baseada em fibra óptica ou enlace de micro-ondas, pode ser implementado em ambientes internos como sala de reuniões, hospitais e aeronaves. Esta proposta visa atender diversas aplicações, sendo que uma dada infraestrutura de comunicação pode ser integrada de acordo com os requisitos das aplicações que serão suportadas. É importante ressaltar que soluções tratadas nesta seção também podem ser aplicadas em redes 5G.

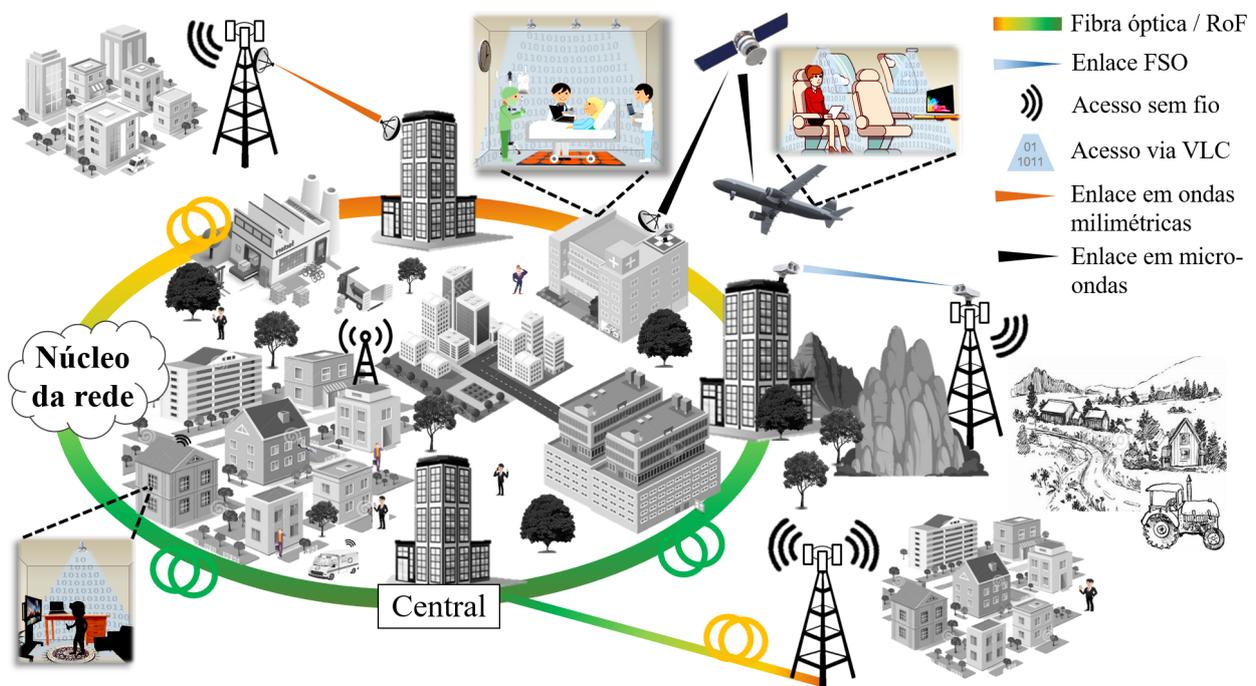


Figura 13: Sistema OWC proposto para redes 6G [39].

4.1 Soluções de rádio sobre fibra

Soluções de RoF para *centralized radio access network* (C-RAN) podem ser do tipo *analog radio-over-fiber* (A-RoF) ou do tipo *digital radio over fiber* (D-RoF) [19,40]. As contribuições dos pesquisadores do projeto Brasil 6G nesta área focam em soluções para A-RoF, uma vez que esta abordagem simplifica as unidades remotas de rádio e a economia de BW no FH óptico.

Uma das soluções propostas e validadas experimentalmente remete ao uso de modulação externa, baseada no emprego do *dual-drive Mach-Zehnder modulator* (DD-MZM) para a transmissão simultânea de sinais de RF no FH, ainda que oriundos de tecnologias diferentes e operando em frequências próximas. A Figura 14 mostra o diagrama em blocos da montagem para a prova de conceito, que leva em consideração a distribuição de sinais 5G NR na banda de 700 MHz, juntamente com a distribuição de sinais provenientes da quarta geração de rede móvel celular (4G), também na banda de 700 MHz [39]. Trata-se, portanto, de uma distribuição de sinais 5G NR coexistindo com a tecnologia 4G no FH. Como o DD-MZM possui duas entradas elétricas independentes, cada um dos sinais de RF é entregue a uma destas entradas, o que reduz interferências [41]. Ambos os sinais elétricos modulam então a portadora óptica proveniente do *laser diode* (LD), após esta passar pelo *polarization controller* (PC) e ser entregue à entrada óptica do modulador. O sinal óptico modulado na saída do DD-MZM é lançado no FH composto por uma SMF e chega ao fotodetector (PD), que faz a conversão de óptico para elétrico (O/E) e disponibiliza os sinais de RF no domínio elétrico. É importante ressaltar que os sinais 5G e 4G, com BW igual a 20 MHz e centrados em 759 MHz e 788 MHz, respectivamente, respeitam um espaçamento mínimo de 19 MHz entre as frequências de portadora para viabilizar uma coexistência sem degradações. O EVM_{RMS} obtido foi de aproximadamente 2% para os dois sinais modulados em 64-QAM, o que atende com margem de 6% o limite de EVM_{RMS} estabelecidos pela *3rd generation partnership project* (3GPP) para esta ordem de modulação. Esta margem alcançada confirma a viabilidade de irradiar os sinais em questão para acesso sem fio, após distribuí-los concomitantemente no FH usando um mesmo comprimento de onda óptico.

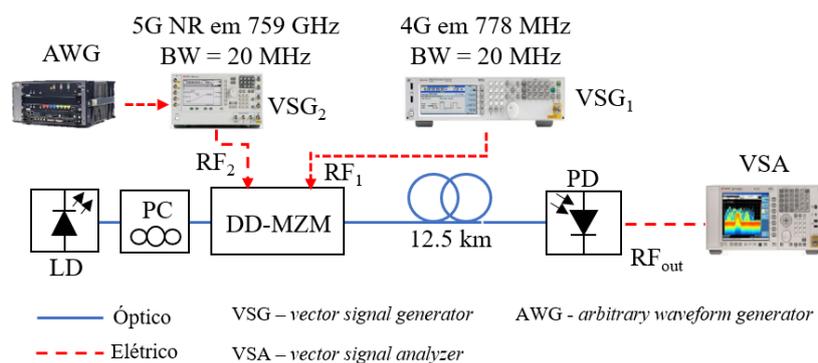


Figura 14: Solução de RoF baseada em DD-MZM para transmissão simultâneas de sinais de RF no FH, usando uma única portadora óptica [39].

Outra solução proposta e validada experimentalmente possibilita amplificação de sinais de RF assistida por fotônica. Esse procedimento, definido como *photonic-assisted amplification* (PAA) no enlace óptico, promove 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 a sistemas RoF convencionais. Técnicas para PAA aplicadas a arquiteturas *Xhaul* vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas pelos pesquisadores do projeto Brasil 6G, resultando em diversas publicações [42–44]. Em [44], os pesquisadores do projeto propuseram uma técnica de PAA aprimorada que é aplicada em um enlace A-RoF multibanda transmitindo sinais *filtered orthogonal frequency division multiplexing* (F-OFDM) em 788 MHz (RF_1), direcionado a aplicações móveis de longo alcance; um sinal 64-QAM em 2,7 GHz (RF_2) para 4G; um sinal 5G NR em 3,5 GHz (RF_3) para aplicações móveis em ambiente externo; um sinal 16-QAM em 26 GHz (RF_4) para aplicações móveis em ambiente interno. A Figura 15 reproduz o diagrama em blocos de tal implementação.

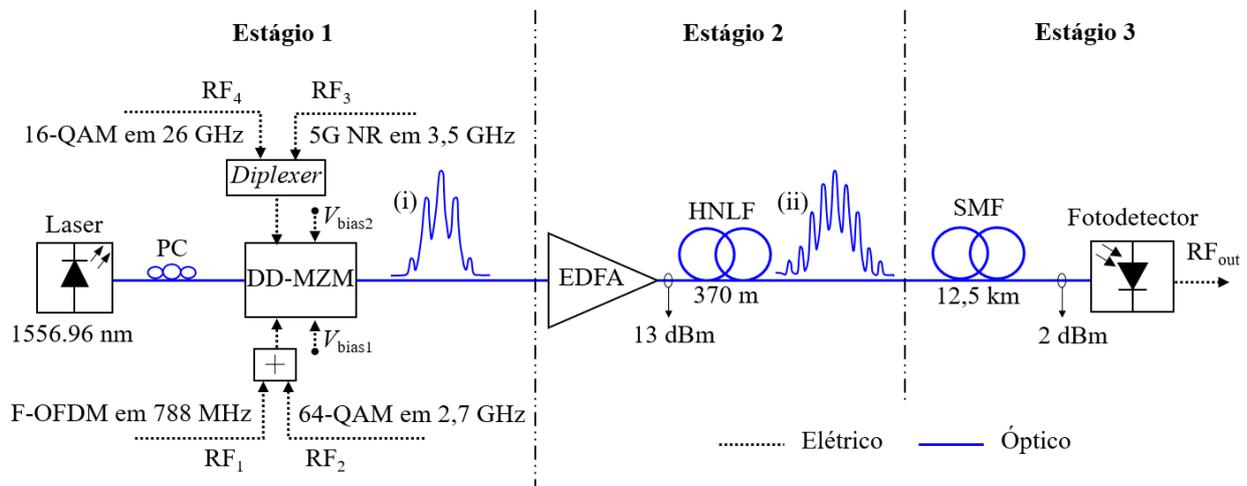


Figura 15: Enlace A-RoF multibanda com amplificação de RF assistida por fotônica [44].

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 (*inset* (i)). O estágio subsequente corresponde à técnica de PAA em questão, que inclui um *erbium-doped fiber amplifier* (EDFA) e um trecho (370 m) de *highly nonlinear fiber* (HNFLF), estimulando o efeito *four-wave mixing* (FWM). Obtém-se na saída deste bloco um sinal óptico contendo novas componentes espectrais, como ilustra o *inset* (ii). Já o estágio 3 consiste na transmissão no FH de SMF, seguida pelo processo de fotodetecção. Os resultados publicados em [44] apontam o aumento na potência elétrica fotodetectada em aproximadamente 15 dB, quando comparada àquela obtida com sistemas RoF sem PAA, para todos os sinais de RF recebidos.

Os resultados alcançados com as pesquisas realizadas no projeto Brasil 6G mostram que o esquema baseado em PAA pode reduzir a demanda de ganho nos amplificadores elétricos nas unidades remotas de rádio, favorecendo a simplificação de equipamentos para as futuras redes 5G e 6G.

4.2 Soluções baseadas em *machine learning* para rádio sobre fibra

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G estão propondo esquemas de linearização de sistemas RoF baseados em *machine learning* (ML). Uma importante contribuição foi a proposta de um esquema de *digital pre-distortion* (DPD) implementado via rede neural *multi layer perceptron* (MLP) [45]. O referido esquema foi desenvolvido especialmente para atender cenários de

operação *enhanced remote area communication* (eRAC). Nesse cenário, novos modelos de negócios e soluções econômicas são necessárias. Algumas iniciativas como o projeto *Remote Area Access Network for the 5th Generation* (5G-RANGE) estão sendo propostas visando oferecer conectividade à uma grande parcela desconectada da população, as quais estão localizadas em áreas rurais e remotas. Esta iniciativa propõe explorar *TV white spaces* (TVWS) para comunicações 5G [46]. O uso de TVWS exige uma forma de onda de baixa *out-of-band emission* (OOBE), o que significa que a razão entre a potência fora da banda de interesse e dentro da banda de interesse deve ser mantida tão baixa quanto possível. A métrica que permite avaliar tal característica é a *adjacent channel leakage ratio* (ACLR).

Neste contexto, a tecnologia RoF pode desempenhar um papel importante em trazer conectividade para regiões não servidas ou mal servidas, uma vez que pode ser eficientemente integrada em arquiteturas de rede C-RAN. A modulação externa é tipicamente utilizada na implementação de sistemas A-RoF de elevada vazão. Um desafio nesta abordagem é lidar com as não linearidades introduzidas pelo Mach-Zehnder *modulator* (MZM), as quais tornam-se significativas com o aumento do nível de potência elétrica do sinal de RF. Dependendo deste nível, indesejáveis níveis de OOBE são produzidos devido a resposta não linear do MZM. A OOBE é resultado da intermodulação do sinal de RF, produzida nas proximidades da frequência central e podem dificultar a exploração de TVWS. Portanto, uma potência de entrada limitada deve ser aplicada à entrada MZM ou uma técnica de linearização deve ser empregada a fim de minimizar a distorção do sinal [47]. Contudo, em comunicações eRAC é interessante operar com potências de RF flexíveis para cobrir regiões remotas distintas, o que definitivamente demandará técnicas de linearização. Uma das principais abordagens para alcançar a linearização consiste em usar uma técnica DPD antes de transmitir o sinal de RF para a RRU. A resposta de potência da DPD é a recíproca da resposta de potência do MZM. Portanto, a resposta de potência combinada de DPD e MZM produz um cancelamento das distorções do sinal, conforme ilustra a Figura 16.

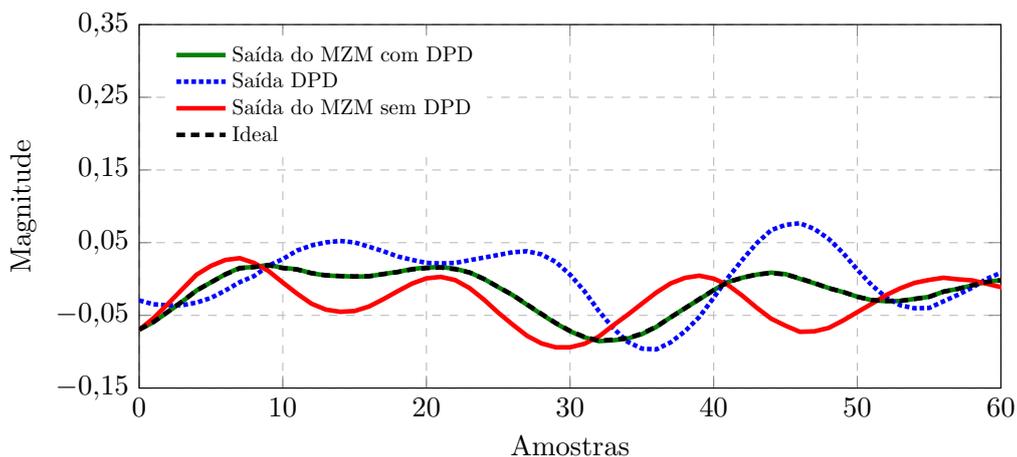


Figura 16: Magnitude dos sinais em vários pontos do sistema de pré-distorção em função do índice da amostra.

O cenário de operação acima mencionado é ilustrado na Figura 17, na qual o núcleo da rede é conectado a CO por um enlace BH utilizando fibra óptica. Utiliza-se *software defined radio* (SDR) para implementar todas as funções da *physical layer* (PHY) e *media access control* (MAC) de cada estação radiobase (ERB), que rodam em um servidor presente na CO. Será assumido que as ERBs serão utilizadas para fornecer conectividade para áreas remotas usando

eRAC, o que significa que uma baixa OOBE é necessária [48]. O sinal da ERB é pré-distorcido utilizando a DPD baseada em ML proposta, na sequência o sinal é então aplicado ao MZM. Cada CO utiliza um comprimento de onda específico de um sistema WDM. Uma SMF é utilizada para distribuir o sinal para todos os *sites* eRAC, onde um PD faz a conversão O/E e a RRU o irradia, caracterizando um sistema FiWi. A RRU também é responsável por receber os sinais dos usuários móveis, os quais serão convertidos para o domínio óptico para serem transmitidos.

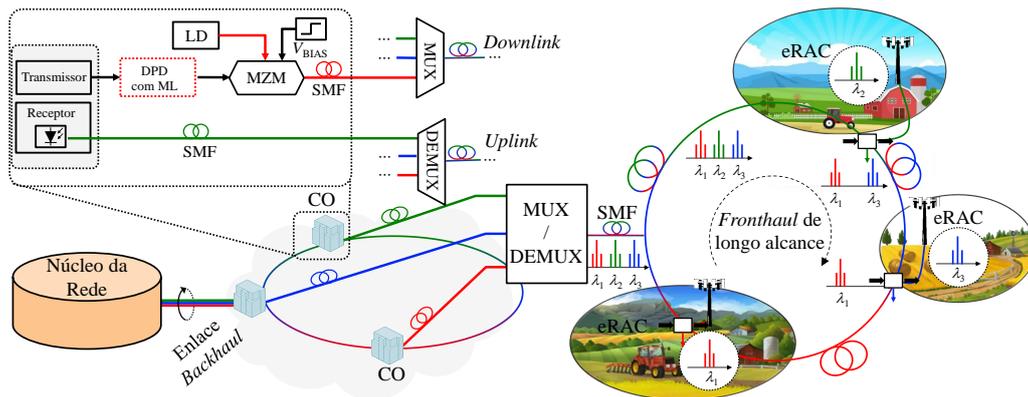
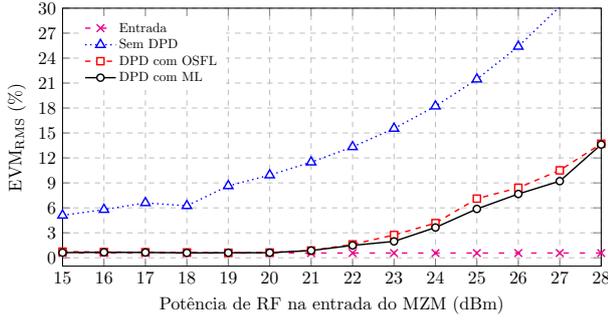


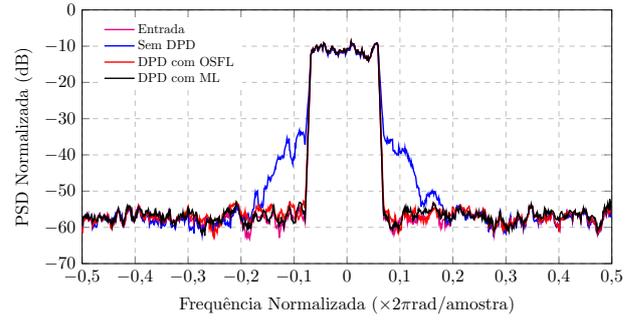
Figura 17: Cenário eRAC auxiliado por ML.

O esquema de DPD baseado em ML proposto foi aplicado em dois cenários distintos, considerando sistemas RoF com resposta de potência invariante e variante no tempo. Além disso, comparou-se o desempenho do esquema proposto com um algoritmo de DPD do estado da arte. Tal algoritmo é conhecido como *orthogonal scalar feedback linearization* (OSFL), proposto em [49]. A Figura 18 (a) apresenta o EVM_{RMS} em função da potência elétrica na entrada do MZM para o sistema invariante no tempo. Nota-se que tanto o esquema baseado em ML e o OSFL, reduziram consideravelmente o EVM_{RMS} em comparação com os resultados sem DPD. A Figura 18 (b) ilustra o efeito da DPD em termos da *power spectral density* (PSD) para o sistema invariante no tempo. Percebe-se que ambos os esquemas de DPD reduziram significativamente a OOBE, contudo o esquema baseado em ML apresenta menor complexidade computacional quando comparada ao OSFL.

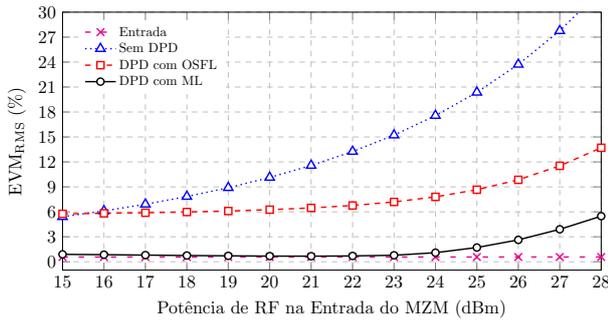
A variação da resposta de potência ao longo do tempo pode ser causada principalmente pela variação natural da resposta dos componentes devido ao envelhecimento e variações de temperatura. Além disso, a substituição de componentes do sistema RoF e/ou flutuações na tensão de polarização do MZM, também podem resultar na variação da resposta de potência. As Figuras 18 (c) e (d) apresentam os resultados em termos de EVM_{RMS} e PSD, respectivamente, para o sistema RoF variante no tempo. Percebe-se, avaliando ambas as métricas, que o esquema baseado em ML absorve as variações do sistema ao longo do tempo, ao contrário do algoritmo OSFL, o qual necessita de novo processo de treinamento e recalibração, a medida que a resposta não linear do sistema se altera. A principal vantagem do esquema de DPD proposto consiste na capacidade de generalizar possíveis variações dos parâmetros do MZM, habilitando uma solução de DPD que dispensa recalibração. Ou seja, o esquema de linearização proposto não exige novas campanhas de treinamento quando os parâmetros do MZM mudam ao longo do tempo, promovendo robustez contra variações temporais na resposta de potência do MZM.



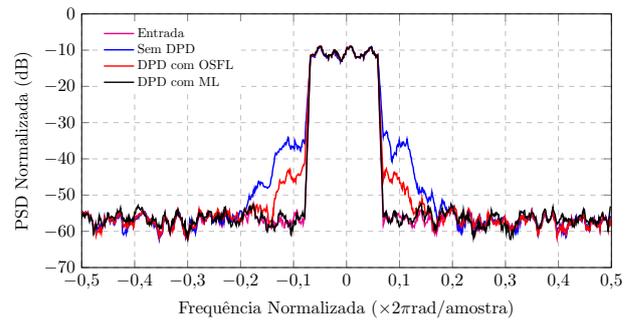
(a) EVM_{RMS} para o RoF invariante no tempo



(b) PSD para o RoF invariante no tempo



(c) EVM_{RMS} para o RoF variante no tempo



(d) PSD para o RoF variante no tempo

Figura 18: Comparação de desempenho entre DPD baseada em ML e OSFL

Considerando apenas esquemas de linearização baseadas em ML, os pesquisadores do projeto Brasil 6G propuseram em [50] duas soluções concorrentes para obter-se a linearização de sistemas RoF. O diagrama em blocos apresentado na Figura 19 ilustra os dois esquemas de linearização propostos, os quais promovem a linearização de sinais em sistemas RoF ao aplicar a pré- ou pós-distorção do sinal de RF. No caso de aplicação de pré-distorção, as chaves s_1 e s_2 são conectadas às posições 1 e 0, respectivamente. O sinal na saída do bloco de pré-distorção (v_n) é aplicado ao MZM. O sinal y_n na saída do sistema RoF é transportado em um enlace FH, até estação rádio base remota. Na estação rádio base remota, um PD é utilizado para converter o sinal do domínio óptico para o elétrico. Finalmente o sinal linearizado z_n é irradiado para fornecer conectividade às áreas remotas, dando origem a um sistema de FiWi. Alternativamente, o sinal pode ser linearizado utilizando pós-distorção. Isto é realizado alternando as posições das chaves s_1 e s_2 para as posições 0 e 1, respectivamente, o que resulta no sinal linearizado u_n .

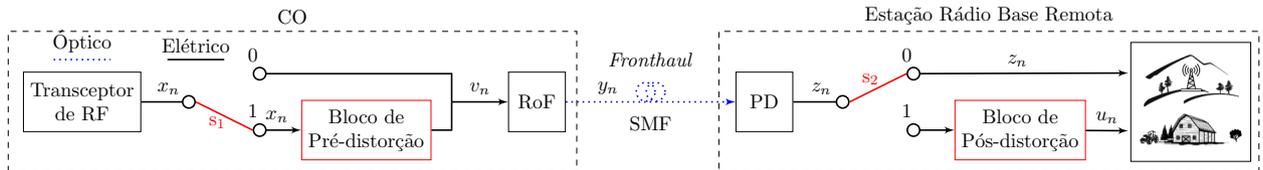
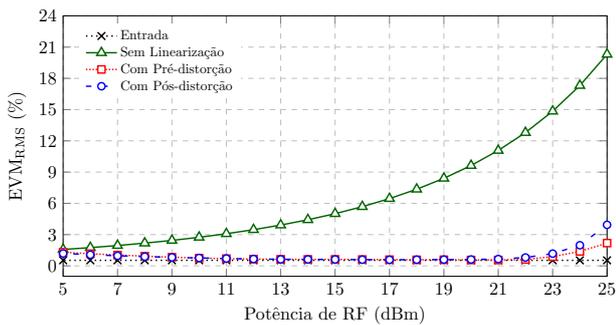


Figura 19: Diagrama em blocos do sistema RoF linearizado com técnicas de ML.

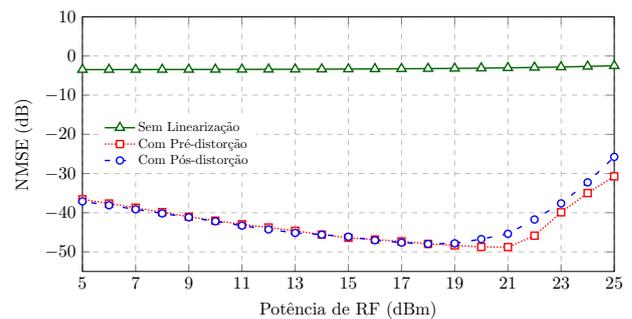
A Figura 20 (a) apresenta os resultados de EVM_{RMS} em função da potência de RF na entrada do MZM para os esquemas de pré- e pós-distorção propostos. Nota-se que o esquema de pré-distorção supera ligeiramente a pós-distorção, no entanto, ambos os esquemas apresentam um excelente desempenho, com valores de EVM_{RMS} tão baixos quanto 3% para quase toda a faixa de potência de RF analisada. Já na Figura 20 (b) apresenta-se os resultados em termos

do *normalized mean square error* (NMSE). A métrica NMSE permite mensurar o nível de similaridade entre dois sinais ao longo tempo. É possível observar que o NMSE é mínimo em 19 dBm. Além disso, para quase toda a faixa de potência de RF analisada, o NMSE foi mantido abaixo de -30 dB, o que pode ser considerado uma excelente capacidade de generalização da rede neural.

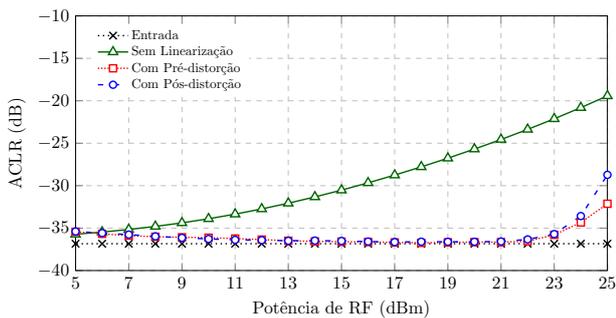
Investigou-se também o desempenho de esquemas de linearização no domínio da frequência, visando aplicações de TVWS considerando aplicações eRAC. A Figura 20 (c) relata os resultados da avaliação de desempenho do esquemas de linearização propostos em termos de ACLR. Ambos os esquemas de linearização produziram uma redução significativa na ACLR quando comparada à saída não linearizada, atingindo valores -35 dB para quase toda a faixa de potência de RF analisada. A redução na ACLR também pode ser vista na Figura 20 (d), que ilustra a PSD dos sinais. Observa-se que o sinal não linearizado exibe elevada OOB, a qual pode se tornar proibitiva considerando aplicações de TVWS. Já quando aplica-se os esquemas de pré- ou pós-distorção, a OOB é reduzida drasticamente, comprovando a eficiência de linearização dos métodos propostos baseados em ML. Como resultado, os esquemas de linearização habilitam a coexistência de sinais de RoF com sistemas legados, isto é, TV digital em aplicações TVWS.



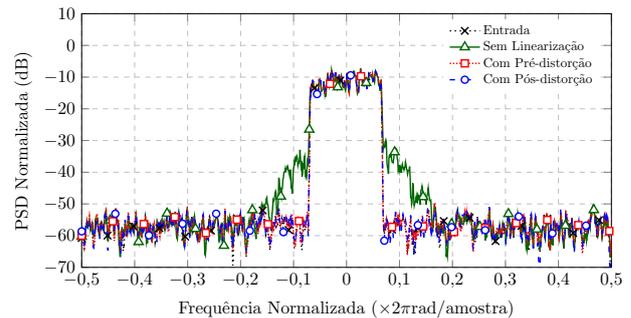
(a) Desempenho dos esquemas de linearização em termos de EVM_{RMS}



(b) Desempenho dos esquemas de linearização em termos de NMSE



(c) Desempenho dos esquemas de linearização em termos de ACLR



(d) Desempenho dos esquemas de linearização em termos de PSD

Figura 20: Comparação de desempenho entre pré- e pós-distorção implementadas usando ML

4.3 Soluções baseadas em fibra-rádio

Sistemas de comunicações *beyond 5G* (B5G) tendem a explorar um conjunto de tecnologias para o transporte e a distribuição de sinais entre usuários e o núcleo da rede. Soluções FiWi baseadas na tecnologia RoF vêm sendo discutidas no meio acadêmico e industrial para o emprego

em soluções de redes móveis para redes 6G. 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.

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G estão propondo novas soluções em sistemas FiWi para atender as demandas das futuras redes de comunicações. Um dos principais trabalhos publicados foi [41], onde relatou-se a implementação de um novo sistema FiWi 5G NR multibanda, utilizando-se da tecnologia de RoF. Esta abordagem emprega um FH óptico de 12,5 km para transportar sinais 5G NR até uma RRU, a partir da qual transmissões sem fio de 10 m foram realizadas visando aplicações *enhanced mobile broadband communication* (eMBB) internas. Os sinais 5G NR foram transmitidos em 26 GHz com BW de 400 MHz e um sinal com a forma de onda flexível à 3,5 GHz proveniente do transceptor 5G, que pode ser definido como *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM), F-OFDM ou *generalized frequency division multiplexing* (GFDM).

O Release 15 do 3GPP, definiu que as primeiras implementações das redes 5G irão operar no modo *non-standalone* (NSA), 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 NSA, 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 eMBB e eRAC [51].

Em [42], os autores propõem e relatam a implementação de um Xhaul multibanda FiWi amplificado fonicamente por meio do efeito óptico não linear FWM. Visando aplicações para redes 6G, a abordagem de banda ultra-larga proposta permite transportar e amplificar simultaneamente os sinais de RF através de enlaces ópticos, que podem ser empregados como BH, MH ou FH em redes móveis. O efeito FWM, originado da utilização de um pedaço HNLF de 35 m, dá origem a um ganho de RF, quando comparado aos sistemas RoF convencionais. Demonstrou-se que a técnica permite substituir dois amplificadores de RF convencionais atingindo uma vazão de dados do sistema de 12 Gbit/s. Além disso, um FH sem fio de banda dupla (7,5 e 28 GHz), precedido por um MH óptico de 12,5 km, compõem a arquitetura FiWi multibanda amplificado fonicamente.

Com objetivo de atender múltiplas aplicações em diferentes cenários propostos, relatou-se a implementação e a investigação experimental de um sistema FiWi flexível para cenários eMBB e novas aplicações para diferentes verticais [20]. Esta solução de FH baseada em RoF usa uma infraestrutura WDM-*passive optical network* (PON), de um provedor de serviços de Internet comercial, para permitir a operação da rede em várias bandas de frequência. A funcionalidade baseada em *digital signal processing* (DSP) fornece DPD, além da geração da forma de onda em tempo real. Resultados experimentais demonstraram uma vazão de dados total de 4,41 Gbit/s na interface aérea, bem como uma aplicação *machine to machine* (M2M) de baixa latência baseada no padrão PROFINET. A Figura 21 apresenta a arquitetura proposta.

4.4 Soluções baseadas em FSO

Os sistemas de comunicações baseados em FSO surgem como um potencial candidato para atender a nova geração de redes móveis [52], principalmente devido ao seu baixo custo, fácil implantação, alta BW disponível e alta segurança. Em termos de serviço de comunicação de

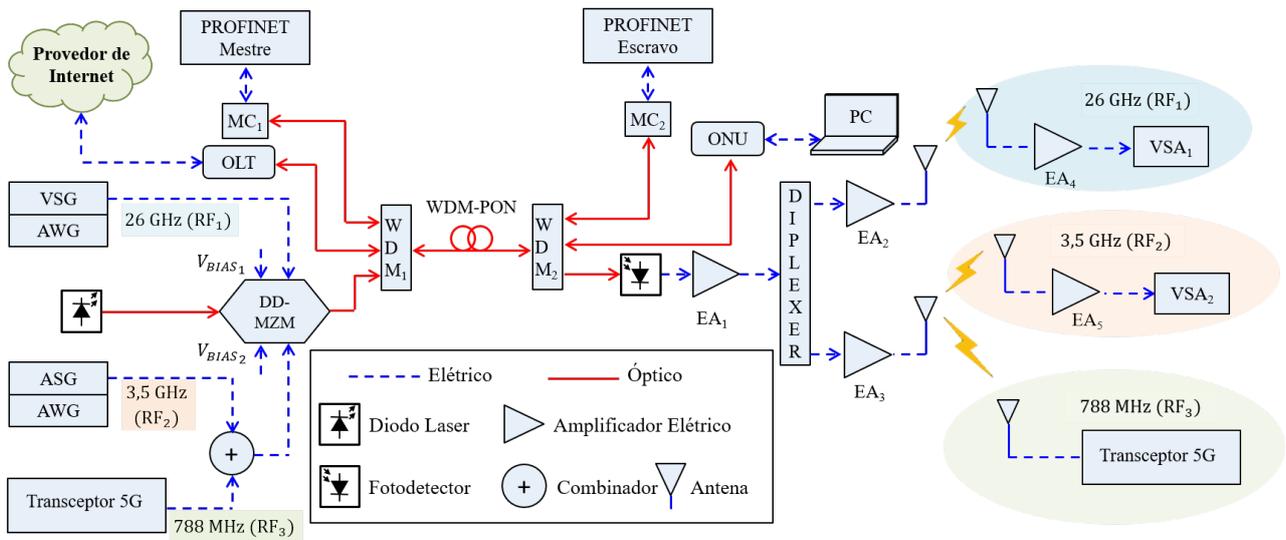


Figura 21: Arquitetura FiWi multibanda baseada em RoF e WDM-PON: *vector signal generator* (VSG); *analog signal generator* (ASG); *media converter* (MC); *electrical amplifier* (EA); *vector signal analyzer* (VSA); *personal computer* (PC).

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. Em comparação com a transmissão por fibra óptica, as tecnologias FSO assemelham-se, onde 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 [53]. Neste contexto os sistemas FSO surgem como uma alternativa em comparação com as tecnologias atuais, que podem atender à demanda exponencialmente crescente por alta vazão de dados.

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G, vêm contribuindo com pesquisas relacionadas com transmissões FSO. Avaliou-se experimentalmente uma arquitetura híbrida para redes móveis em [54]. Essa arquitetura emprega RoF em um enlace óptico de 1 km seguido por um enlace FSO de 20 m como FH. Um sinal *M*-QAM com BW de 10 MHz à 700 MHz foi transmitido, permitindo assim a possibilidade de atender aplicações sem fio de longo alcance.

Os autores em [51], relataram e avaliaram experimentalmente uma proposta de arquitetura de rede híbrida que atende três cenários de atuação a saber: eRAC e eMBB em ambientes externos e internos. A Figura 22 ilustra a arquitetura e segue resumida como: Um link RoF de 12,5 km seguido por um enlace FSO e ambos atuando como FH da rede. O objetivo era explorar diferentes tecnologias trabalhando em conjunto para aliar os benefícios de ambas e empregar em novas topologias propostas de redes móveis futuras. Na última configuração, transmitiu-se um sinal 5G NR padronizado a 3,5 GHz, um sinal F-OFDM a 788 MHz e um sinal *M*-QAM a 26 GHz para explorar vazão de dados e cobrir os três cenários propostos. A vazão de dados alcançada foi de 1,4 Gbit/s demonstrando que a solução híbrida surge como potencial para aumentar a flexibilidade das redes de acesso via rádio, permitindo cobertura em áreas de difícil acesso.

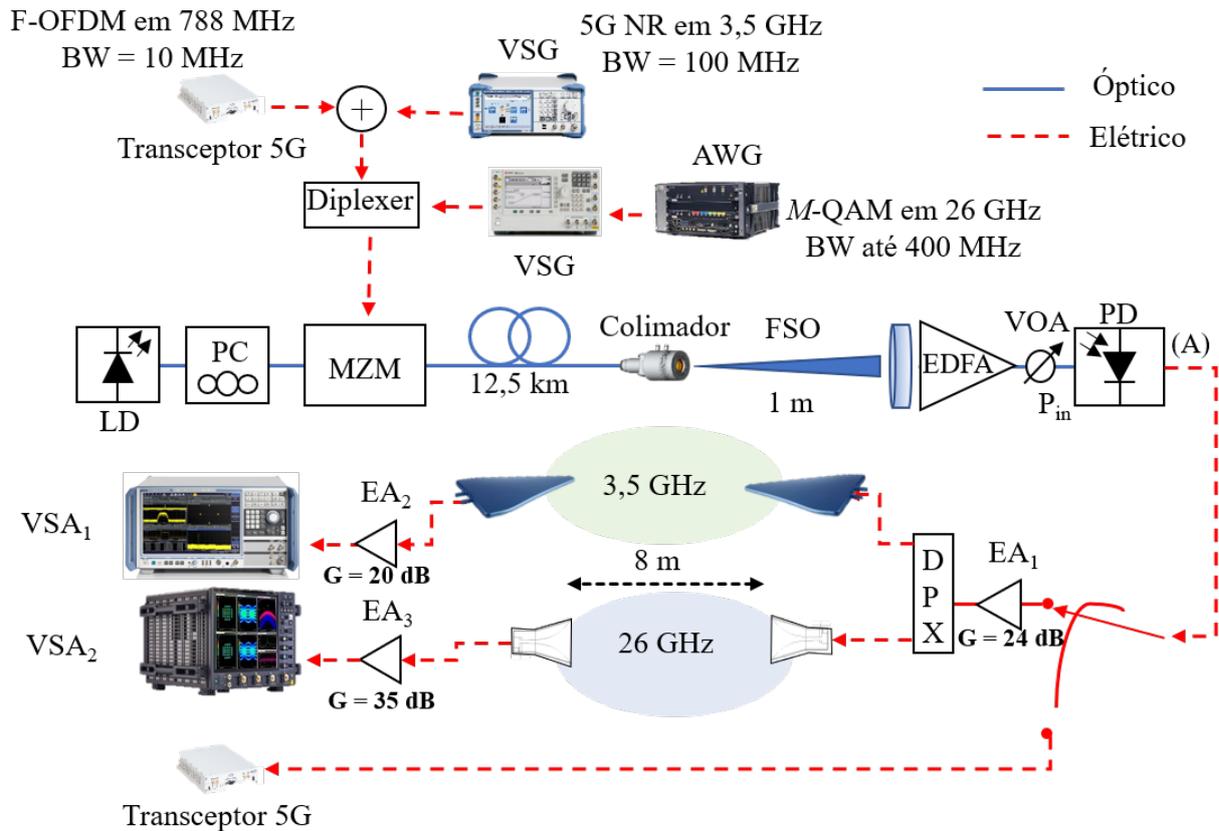


Figura 22: Esquemático do sistema de comunicação híbrido RoF/FSO/sem fio implementado. *Polarization Controller* (PC); *arbitrary waveform generator* (AWG); *variable optical attenuator* (VOA); *diplexer* (DPX).

4.5 Comunicação com luz visível

A 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 [55,56]:

- não exige licenciamento para o uso do espectro eletromagnético por parte dos órgãos de regulamentação;
- permite operação em áreas com restrições de emissão de sinais de RF, como hospitais e aeronaves;
- maior faixa de espectro disponível;
- 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;
- imunidade à interferência eletromagnética causadas pelas fontes de RF.

Entre as tecnologias OWC emergentes, destaca-se sistemas VLC que empregam transmissores ópticos no espectro de luz visível. 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, no caso do uso de *light emitting diodes* (LEDs) como emissores. 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 [55,56]. Adicionalmente, *lasers* em luz visível também têm sido empregados como fonte transmissoras para VLC.

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G têm contribuído em pesquisas relacionadas com VLC, sendo a implementação de um sistema VLC operando simultaneamente em várias cores utilizando o padrão 5G NR [57] merece destaque. Nesta iniciativa, utilizou-se um LED *red, green, blue and amber* (RGBA) para prover WDM e geração da luz branca. As análises de desempenho foram realizadas em tempo real em termos de EVM_{RMS} , seguindo as especificações técnicas do 3GPP em função da corrente de polarização do LED, distância do enlace e vazão efetiva. Além disso, o sistema empregou a técnica de DPD em um sinal *M-QAM* visando compensar a resposta não linear do LED e dos amplificadores elétricos utilizados no enlace VLC WDM. Dessa forma, o sistema VLC propiciou uma vazão de 872 Mbit/s com o sinal 5G NR e 1,92 Gbit/s com o sinal *M-QAM* assistido por DPD. A Figura 23 apresenta o diagrama utilizado no sistema VLC 5G além da fotografia do arranjo experimental.

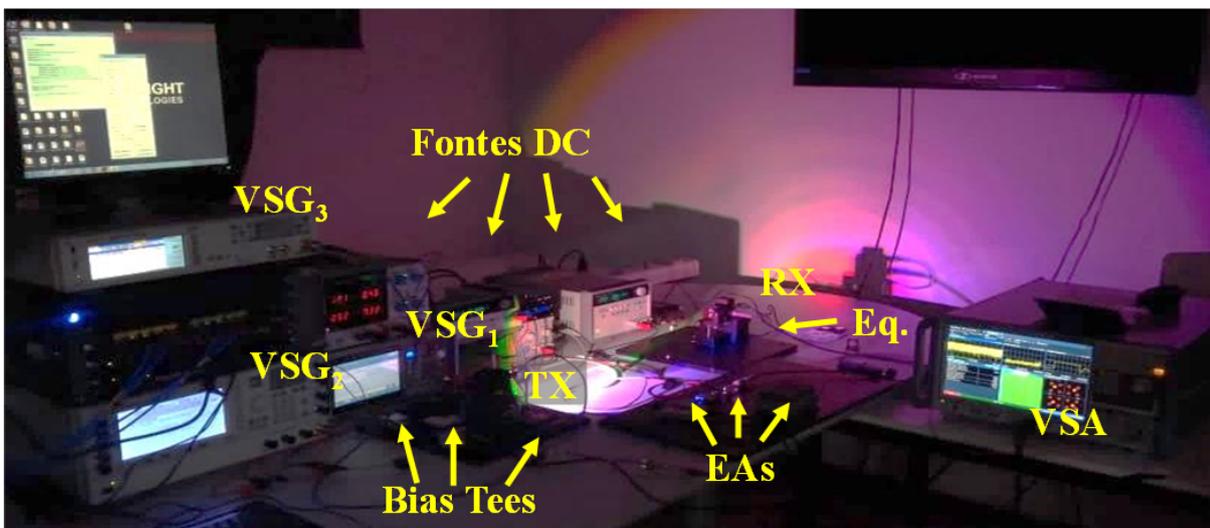
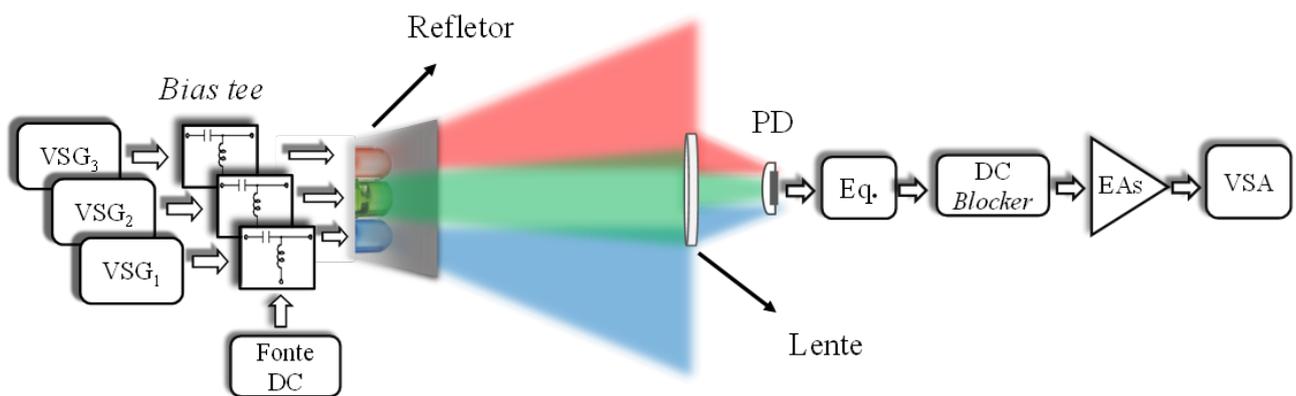


Figura 23: Diagrama simplificado e fotografia correspondente ao experimento VLC 5G implementado.

5 Contribuições em soluções fotônica integrada

Matheus Sêda Borsato Cunha, Arismar Cerqueira Sodré Junior
 matheus.seda@inatel.br, arismar@inatel.br

A implantação das redes 6G prevê serviços disponíveis ao usuário em qualquer lugar que ele esteja de forma integrada, com conectividade sem fio, serviços e aplicativos inteligentes. As aplicações emergentes na área de inteligência artificial (IA), robótica, indústria 4.0 e *Internet of everything* (IoE) irão proporcionar um aumento extremamente elevado dos dados gerados por dispositivos móveis. Além disso, as arquiteturas das *radio access networks* (RANs) estão evoluindo a fim de suportar as demandas das redes B5G, as quais apontam para convergência FiWi, HetNets e C-RAN. Espera-se que um grande número de pequenas células seja implantado para os futuros sistemas de telecomunicações suportarem o crescimento massivo dos dados móveis. Neste contexto, *integrated microwave photonics* (IMWP) proporciona aplicações generalizadas nas áreas de radares, redes de acesso sem fio banda larga, processamento óptico, e também em áreas emergentes como, convergência FiWi, sistemas em Terahertz para imagens médicas, redes de área pessoal (*wireless-body*), entre outras. Dessa forma, a integração monolítica de diversos dispositivos fotônicos em um mesmo circuito integrado óptico pode levar ao desenvolvimento de *photonic integrated circuits* (PICs) compactos e funcionais. O menor *footprint* e o menor custo das soluções baseadas em PIC são particularmente importantes para futuras redes de comunicações móveis, aumentando a possibilidade de expandir ainda mais a cobertura de rede a partir de uma mesma CO. Além disso, o requisito de operação com menor potência óptica garante maior durabilidade e confiabilidade dos dispositivos quando integrados.

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G têm contribuído em soluções baseadas em IMWP, propondo arquiteturas de redes de transporte e de acesso incorporando os PICs em pontos determinados do sistema. Em [58], foi apresentada a caracterização, implementação e aplicação de um *multiwavelength transmitter* (MWT) monoliticamente integrado em uma plataforma de *indium phosphide* (InP) para um sistema RoF *dual-band* transmitindo o padrão 5G NR, usando ordens de modulação de até 256-QAM. Dois sinais 5G NR em 738 MHz e 10 GHz, e um sinal *long-term evolution-advanced* (LTE-A) em 790 MHz foram avaliados em dois cenários distintos, em função do EVM_{RMS} , de acordo com os requisitos do 3GPP *Release 15*. No primeiro, três portadoras ópticas na banda C são moduladas de forma independente, cada uma com um dos sinais de RF mencionados caracterizando um WDM, enquanto a *subcarrier multiplexing* (SCM) é aplicada ao segundo cenário para modular conjuntamente os três sinais de RF uma única portadora óptica, como ilustra a Figura 24.

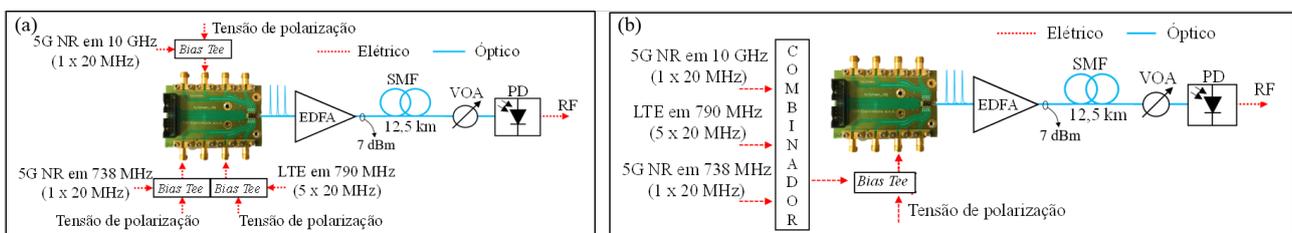


Figura 24: Imagens retiradas de [58] do diagrama em blocos dos dois cenários do sistema RoF 5G NR, usando o MWT. (a) Sistema WDM. (b) Sistema SCM.

O PIC do MWT integra oito *directly modulated laser* (DML) do tipo *distributed feedback* (DFB) e sintonizáveis em comprimento de onda, visando reduzir a complexidade e dimensões

do transmissor, permitindo soluções compactas, de alto desempenho e menor custo para as redes 5G e futuras. A Figura 25 apresenta uma fotografia do MWT integrado, na qual se pode observar o PIC fixado à placa de circuito impresso (PCI), juntamente com as ligações dos fios de ouro. A placa é montada em um dissipador de calor, com a finalidade de melhorar a estabilidade mecânica e a dissipação térmica.

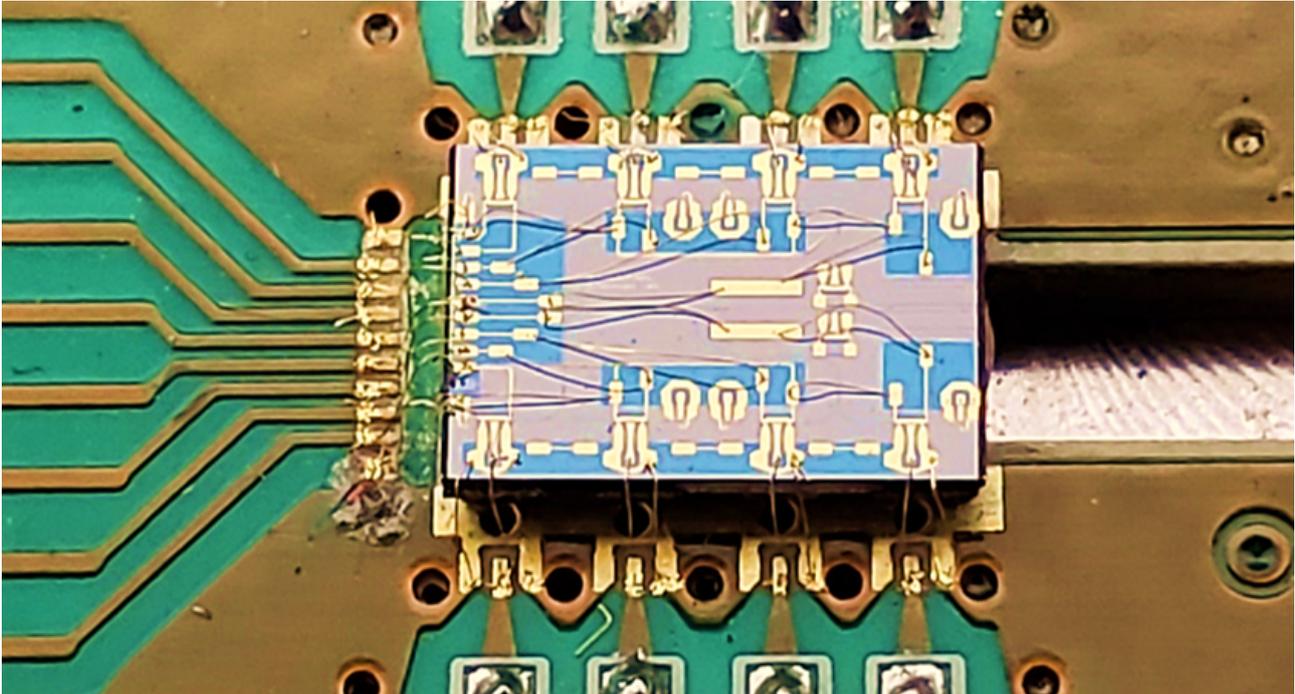


Figura 25: Imagem retirada de [58]. Fotografia do MWT integrado montado sobre a PCI.

O PIC foi caracterizado para avaliação da sintonia do comprimento de onda em função da variação da tensão de polarização. Observou-se uma tendência linear em termos de tensão de polarização e sintonia em torno de 4 nm para cada um dos oito *lasers* do MWT, resultando em uma eficiência de sintonia de aproximadamente 0,8 nm/V. Quanto ao desempenho dos sinais de RF transmitidos pelo sistema, foram avaliados para cada cenário, em função do EVM_{RMS} , de acordo com os requisitos do 3GPP *Release 15*. Dessa forma, considerando os três sinais de RF, o sistema RoF proposto baseado em um MWT integrado monoliticamente forneceu uma taxa de transferência de dados total de 1,04 Gbit/s de acordo com as recomendações 3GPP [58].

Como continuação do trabalho anterior, em [59] foi proposto uma arquitetura de rede móvel de futura geração aplicando os conceitos de 5G-Xhaul e abordando a convergência FiWi. A estrutura de redes ópticas é utilizada nos enlaces de BH e MH e, através da IMWP, a configuração abordada pôde ser favorecida com o uso do MWT alojado na CO. A Figura 26 mostra a estrutura proposta e os enlaces sem fio como FH e acesso proporcionando várias aplicações possíveis visando os diferentes cenários das redes 5G e considerando algumas frequências de operação estabelecidas, e além disso, podendo ser expandida para aplicações e frequências previstas para as redes 6G.

Neste sistema, os três sinais de RF, nos padrões do 4G/5G, foram simultaneamente transportados por um enlace RoF de 12,5 km de comprimento no cenário WDM apenas, antes de serem amplificados e irradiados. As transmissões sem fio foram demonstradas por meio de um enlace em ambiente interno de 10 m de comprimento semelhante a uma picocélula e um enlace externo realista de 115 m de comprimento. A Figura 27 apresenta fotografias dos experimentos

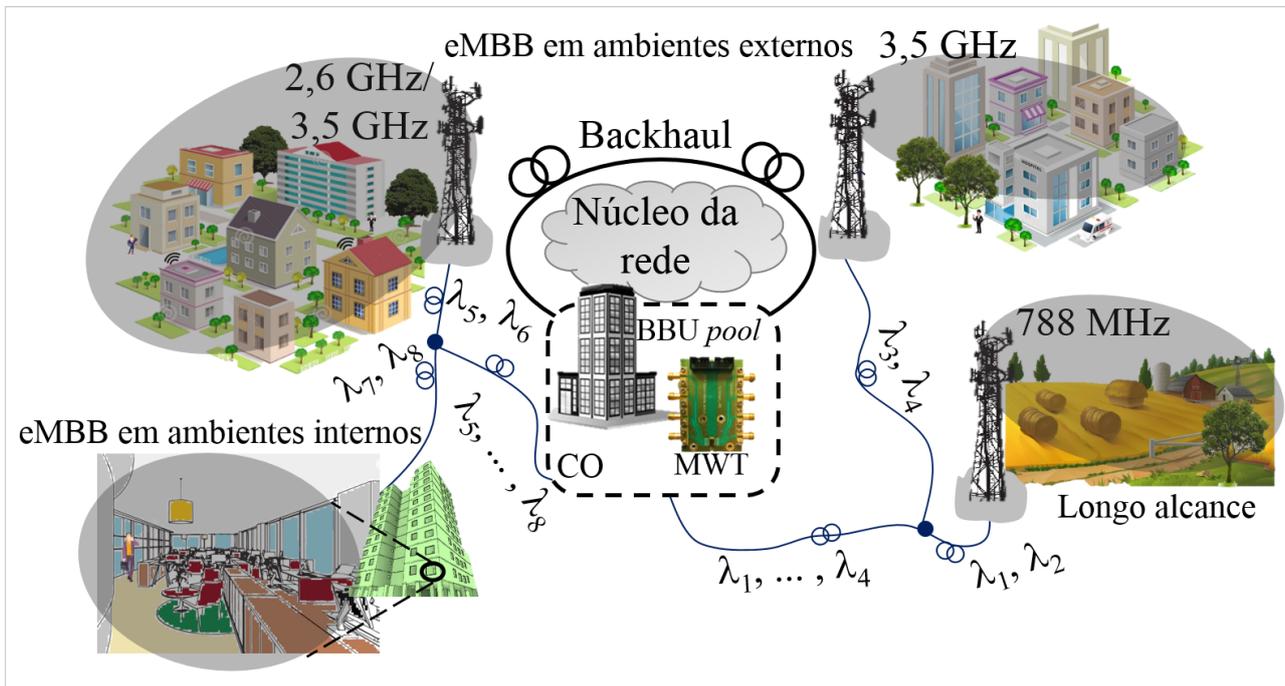


Figura 26: Imagem retirada de [59]. Proposta de um sistema FiWi para transmissão do padrão 5G NR baseado em um transmissor integrado de múltiplos comprimentos de onda.

realizados em ambiente interno e em ambiente externo. Os sinais recebidos foram avaliados de acordo com os requisitos do 3GPP *Release 15*, em termos de EVM_{RMS} , os quais estiveram em conformidade com as exigências. Os resultados experimentais demonstraram uma taxa de transferência total de 1,32 Gbit/s e 230 Mbit/s nos cenários de 10 m e 115 m, respectivamente.

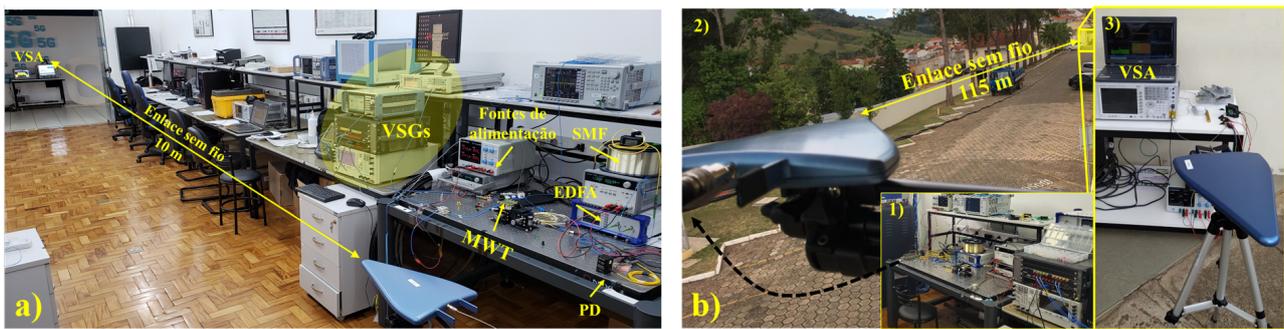


Figura 27: Imagens retiradas de [59]. Fotografia da implementação do sistema FiWi 5G NR. (a) Aplicação em ambiente interno. (b) Aplicação em ambiente externo.

Uma terceira proposta de arquitetura de rede incorporando o PIC do MWT é apresentado em [60]. O objetivo desse trabalho foi envolver a tecnologia OWC aplicadas em cenários de ambientes internos através da *beam-steered infrared light communication (BS-ILC)*. A principal característica do BS-ILC é a comunicação direcionada a um usuário específico por meio de um feixe óptico na faixa do infravermelho, possibilitando a transmissão de múltiplos feixes independentes para vários usuários em um mesmo ambiente. Dessa forma, como prova de conceito, foi proposto e implementado um FH de fibra óptica seguido de um enlace FSO, caracterizando um sistema RoF/FSO. Somente um canal do MWT foi utilizado a fim de

transmitir o sinal de RF centrado em 550 MHz, com base nos esquemas de modulação QPSK, 16-, 64- e 256-QAM com BW de 20 MHz. A transmissão ocorreu através de um enlace de SMF de 12,5 km, seguido por um enlace de acesso FSO de 1,5 m com o objetivo de alcançar o usuário final. O diagrama do sistema proposto é ilustrado na Figura 28.

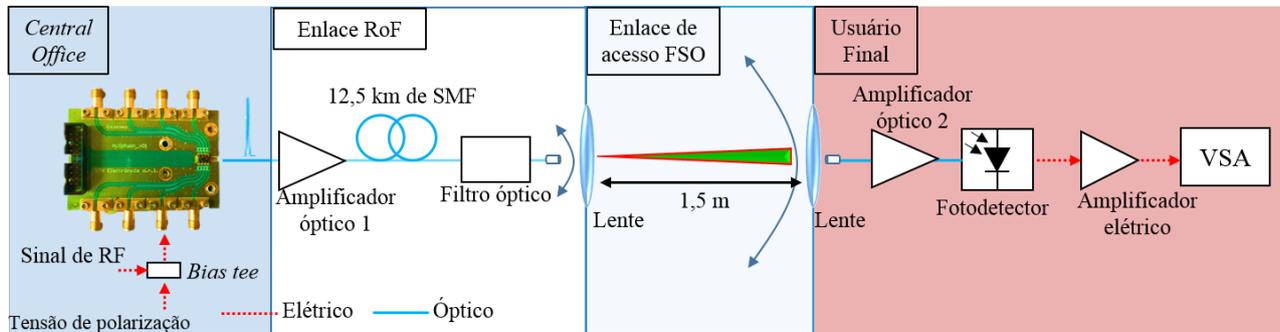


Figura 28: Imagem retirada de [60]. Diagrama de blocos do sistema RoF/FSO.

A Figura 29 apresenta um conjunto de fotografias do experimento realizado em ambiente de laboratório. A análise de desempenho foi conduzida em termos do EVM_{RMS} , constelação e espectros medidos. O desempenho do sistema RoF/FSO sempre foi compatível com os requisitos 3GPP para todas as medições, atingindo uma taxa de transferência máxima de 160 Mbit/s usando apenas 20 MHz de BW com melhor ponto de operação para uma potência óptica recebida de -9 dBm. A Tabela 2 resume os resultados obtidos empregando o melhor ponto de operação, abrangendo a BW do sinal, o esquema de modulação, a taxa de transferência de dados e o valor do EVM_{RMS} .

Tabela 2: Resultados RoF/FSO para esquemas de modulação diferentes [60].

BW (MHz)	Esquema de modulação	Taxa de dados (Mbit/s)	EVM_{RMS} (%)
20	QPSK	40	2,9
20	16-QAM	80	2,4
20	64-QAM	120	2,3
20	256-QAM	160	2,2

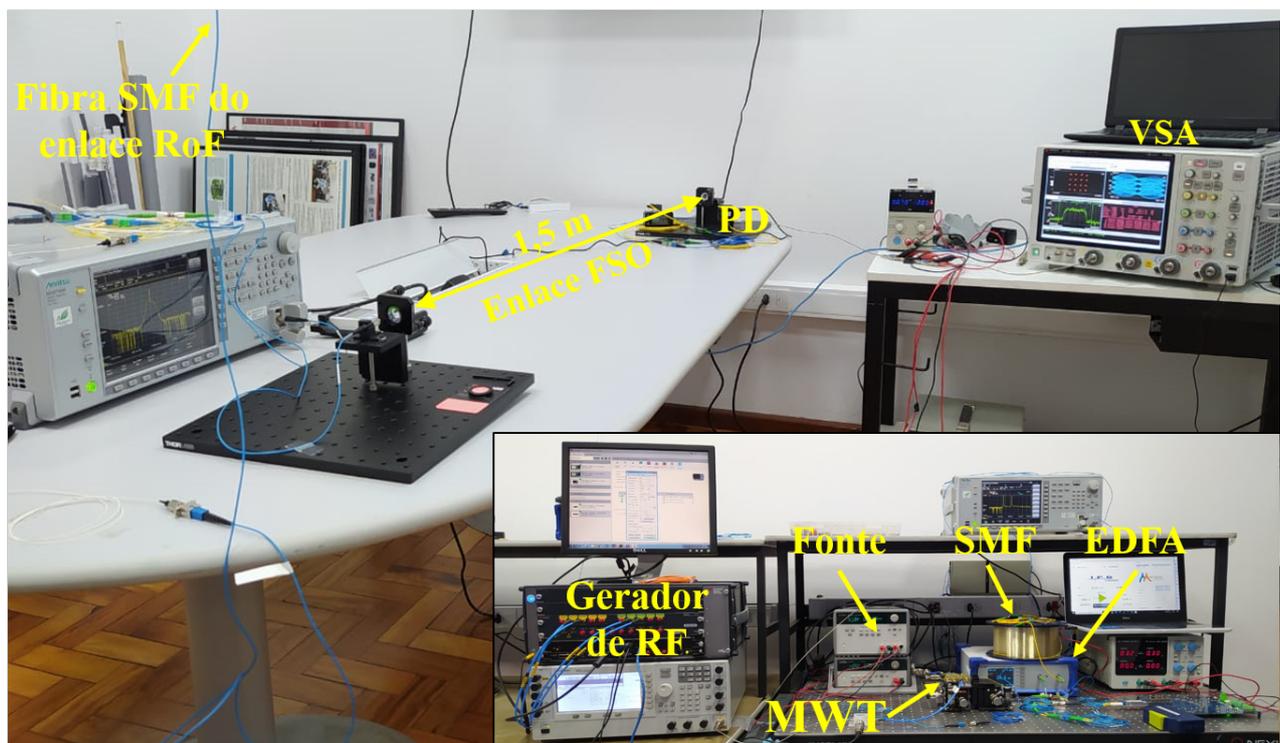


Figura 29: *Setup* experimental apresentando o enlace FSO e o lado da recepção. O *inset* apresenta a fotografia da *central office*, incluindo transmissores elétricos e ópticos.

6 Contribuições em soluções *Power-over-Fiber*

Letícia Carneiro de Souza, Arismar Cerqueira Sodré Junior
 leticiacarneiro@get.inatel.br, arismar@inatel.br

As redes 6G irão demandar soluções de distribuição de energia elétrica flexíveis para ERBs, a fim de se diminuir o consumo de potência das redes móveis de celular. Neste contexto, a tecnologia *power-over-fiber* (PoF) tem sido amplamente utilizada para prover energia para *remote antenna units* (RAUs) com o objetivo de se maximizar a eficiência energética das ERBs. Essa técnica basicamente consiste na transmissão de energia por meio de uma fibra óptica. As principais vantagens dessa tecnologia estão relacionadas às características inerentes à fibra óptica, como: isolamento elétrico; imunidade a interferências eletromagnéticas, raios e curtos-circuitos; resistência a corrosão e umidade; além de serem mais leves do que os cabos metálicos. A arquitetura típica de um sistema PoF é composta por uma fonte luminosa, tipicamente um *high power laser diode* (HPLD), um enlace de fibra óptica e um *photovoltaic power converter* (PPC), que é responsável pela conversão da energia óptica para energia elétrica em *direct current* (DC).

Os pesquisadores do projeto Brasil 6G contribuíram ativamente no desenvolvimento de soluções PoF para sistemas de comunicações móveis, sendo a contribuição mais importante relacionada à sistemas FiWi 5G e 6G baseados na tecnologia RoF e arquitetura C-RAN, como ilustrado na Figura 30. Nesta iniciativa, apresentou-se uma RAU 5G, composta de um foto-detector e um amplificador de RF, totalmente alimentada de forma óptica por meio de um sistema PoF.

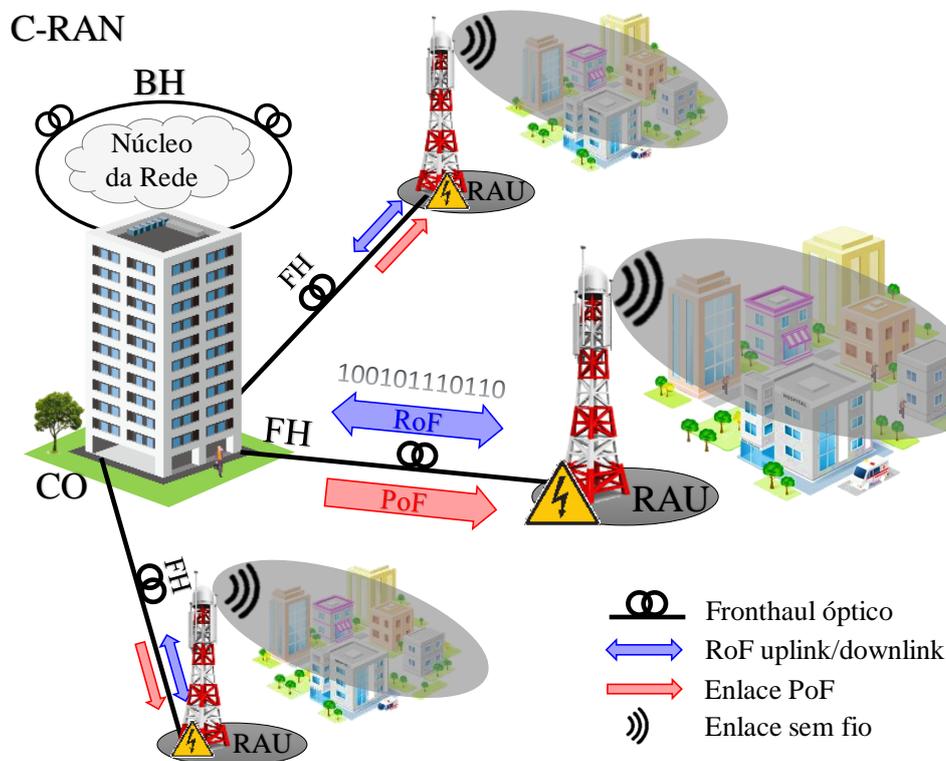


Figura 30: Sistema FiWi 5G/6G alimentado de forma óptica.

A Figura 31 ilustra um diagrama em blocos do arranjo experimental proposto baseado nas tecnologias RoF, PoF e no padrão 5G NR. Um sinal 5G NR centrado em 3,5 GHz com BW de até 100 MHz é gerado por meio de um AWG e VSG. O módulo RoF transmissor amplifica o sinal de RF gerado, realiza a conversão E/O e gera uma portadora óptica por meio de modulação direta. A portadora óptica é então transmitida através de um enlace de SMF de 12,5 km. Em seguida, o módulo RoF receptor realiza a conversão O/E por meio de detecção direta utilizando um fotodetector e amplifica o sinal de RF com o auxílio de um amplificador elétrico integrado. O sinal de RF é então transmitido através de um enlace sem fio *indoor* de 10 m, sob condição de linha de visada, utilizando uma antena com 5 dBi de ganho. Na recepção, utiliza-se outro amplificador e um VSA para a amplificação e análise do sinal 5G NR.

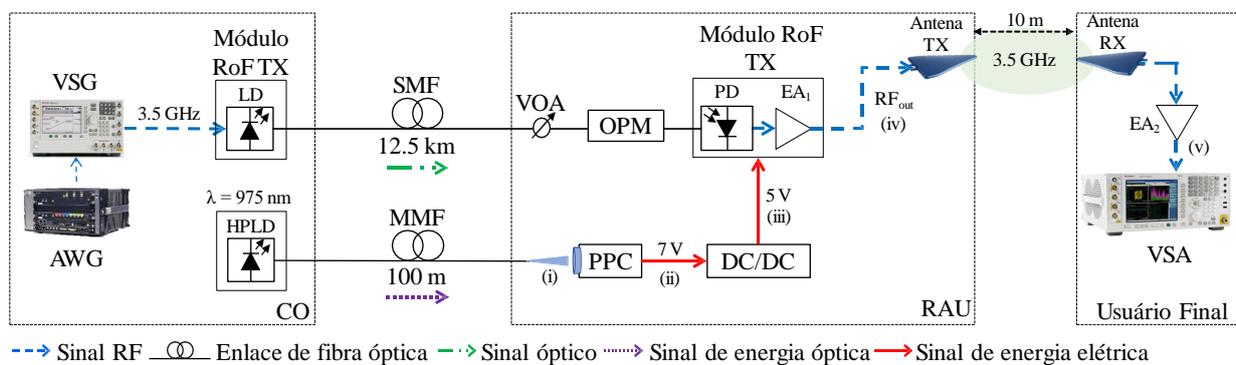


Figura 31: Diagrama em blocos do sistema FiWi 5G NR alimentado de forma óptica.

O sistema PoF proposto tem como principal objetivo alimentar uma RAU de baixa potência utilizada em enlaces de FH de curto-alcance. Neste contexto, implementou-se uma topologia dedicada, na qual dados e energia são transmitidos individualmente por meio de fibras separadas, como demonstrado na Figura 31. Utilizou-se um HPLD de 30 W centrado em 975 nm e transmitiu-se um sinal de energia óptica de 2,2 W por meio de um enlace de *multimode fiber* (MMF) de 100 m com diâmetros de núcleo e casca de 100 μm e 140 μm , respectivamente. Em seguida, dois micro-posicionadores foram utilizados para acoplar a energia óptica ao PPC. Além disso, utilizou-se um conversor DC/DC para regular e reduzir a tensão de saída do PPC (7 V), já que o módulo RoF opera em 5 V. Mais de 1,7 W foram entregues ao PPC, o qual apresenta uma eficiência de conversão de aproximadamente 30%. Considerando as perdas do conversor DC/DC utilizado, a potência elétrica entregue ao módulo RoF foi 475 mW. Consequentemente, a eficiência de transmissão de energia do sistema PoF proposto, a qual é definida pela razão entre a potência de saída do HPLD e potência elétrica total entregue pelo PPC, resultou em 23,5%.

A Figura 32 apresenta uma análise de estabilidade de tensão, na qual comparou-se a tensão gerada pelo sistema PoF com a tensão de saída de uma fonte de tensão DC convencional. Nota-se que os valores de tensão gerados pelo sistema PoF são semelhantes às medidas realizadas com a fonte convencional. Além disso, não se observa flutuações de tensão significativas, o que significa que o sistema PoF é capaz de prover tensão estável ao módulo RoF. Avaliou-se também o desempenho do sistema FiWi baseado nas tecnologias PoF e RoF em função de valores de EVM_{RMS} . A Figura 33 apresenta as medidas de EVM_{RMS} para sinais 5G NR centrados em 3,5 GHz com BW de 50 e 100 MHz, a fim de se avaliar o desempenho dos sistemas RoF e FiWi propostos. Observa-se que os sistemas RoF e FiWi atendem as especificações do

3GPP com margens de 4% e 5%, respectivamente, considerando modulação 64-QAM e BW de 100 MHz. Além disso, o sistema FiWi proposto provê taxa de dados de 500 Mbps empregando a modulação 64-QAM e sem utilizar amplificação óptica. Dessa forma, conclui-se que o sistema FiWi alimentado de forma óptica tem grande potencial para integrar as redes 6G.

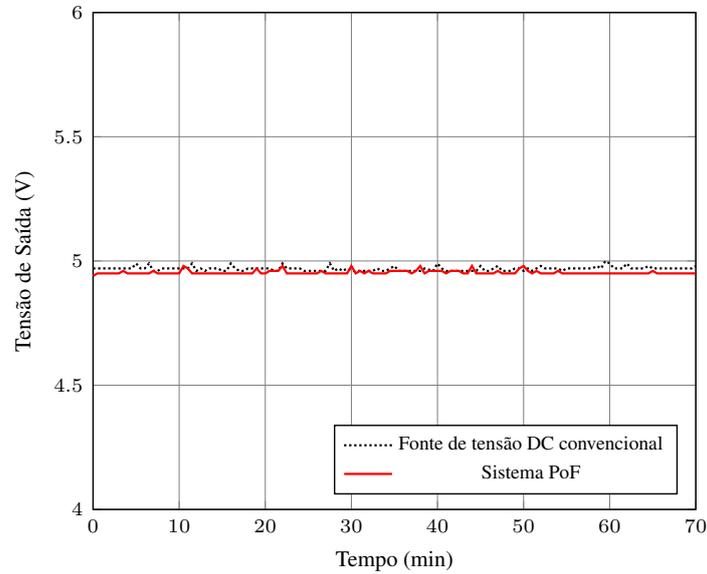


Figura 32: Comparação de estabilidade de tensão entre o sistema PoF proposto e uma fonte de tensão DC convencional.

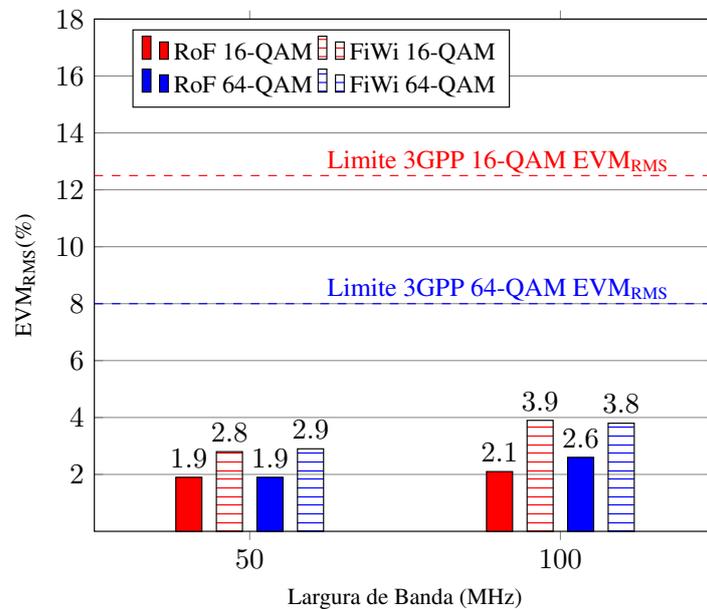


Figura 33: Medidas de EVM_{RMS} em função da BW.

7 Conclusões

Hugo Rodrigues Dias Filgueiras, Matheus Sêda Borsato Cunha, Arismar Cerqueira Sodré Junior

hugo.rodrigues@inatel, matheus.seda@inatel.br, arismar@inatel

Em síntese, este relatório apresentou um compilado de artigos frutos do projeto Brasil 6G. Mais especificamente, destacou-se as contribuições relacionadas às tecnologias de RF e de comunicações ópticas para as redes 6G. Particularmente, versou-se sobre os seguintes tópicos: antenas; dispositivos aplicados às comunicações ópticas; sistemas OWC; fotônica integrada; PoF.

Os resultados obtidos pelo time de pesquisadores multi-institucional e multi-disciplinar do projeto Brasil 6G são de grande importância no desenvolvimento e evolução das futuras redes de comunicações móveis. Dispositivos ópticos, incluindo ressonadores em Banda C (1530 a 1560 nm), moduladores ópticos em 1550 nm, acopladores de fibra/guia de onda óptico e PICs compactos, podem ser aplicados nas BBUs de sexta geração como emissores de luz e transmissores de altíssima vazão. Os sinais podem ser distribuídos na rede de transporte baseadas em topologias ópticas, *wireless* e híbridas. Diversas topologias de sistemas OWC foram apresentadas a fim de viabilizar uma comunicação confiável e de alta vazão em uma ampla faixa de frequência, incluindo RoF, FiWi e FSO. Além disso, visto o crescente interesse em algoritmos de ML aplicado às redes móveis, os pesquisadores do projeto Brasil 6G já propuseram soluções de utilização de ML para aplicação de DPD em sistemas RoF aplicados em ambientes eRAC. Por fim, demonstrou-se a aplicabilidade da tecnologia PoF em sistemas FiWi alimentando-se uma RAU, composta de um fotodetector e um amplificador de RF. O sistema se mostra como uma solução potencial para as redes 6G cuja eficiência energética deve ser maximizada de forma sem precedentes, principalmente devido à quantidade de sensores e atuadores autônomos previstos na rede de sexta geração.

A rede de acesso também prevê diversas mudanças, incluindo um aumento de frequência de operação atingindo a marca de THz. Toda topologia de transporte apresentada pelos pesquisadores do projeto Brasil 6G poderá alimentar um complexo sistema irradiante na rede de acesso. Os resultados demonstraram a possibilidade de desenvolvimento de antenas em mmWaves para enlaces ponto-a-ponto, implementação de femtocélulas omnidirecionais e arranjo de antenas para mMIMO. Além disso, visando aplicações de comutação de feixe, propôs-se também a confecção de um divisor de potência com controle de defasagem entre as saídas, a fim de viabilizar a configuração do apontamento do feixe principal de um sub-arranjo. Por fim, propostas para a faixa de THz e sub-THz incluíram desenvolvimento de nanoantenas para aplicações de comunicação intra/inter-chip e modelamento de antenas fotocondutoras para geração de sinais em THz com base na distribuição plasmônica, utilizando conceitos que relacionam comunicações ópticas, física de plasma e antenas. Complementarmente, acesso a dados por VLC e BS-ILC, após rede de transporte baseada em fibra óptica ou enlace de micro-ondas, podem ser implementados em ambientes internos como sala de reuniões, hospitais e aeronaves utilizando técnicas de DWDM para viabilizar alta vazão aos usuários finais.

Os resultados apresentados neste relatório comprovam o alto impacto científico obtidos pelos pesquisadores do Projeto Brasil 6G em diversas áreas distintas na camada física das redes móveis. De maneira geral, espera-se que a o conhecimento agregado em comunicações móveis, mais especificamente em comunicações ópticas e sem fio, além do desenvolvimento de antenas, contribuam de forma significativa com o desenvolvimento e futura implementação das Redes 6G.

Referências

- [1] 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>
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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].
- [5] “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].
- [6] G. A. Jones, D. H. Layer, and T. G. Osenkowsky, *National Association of Broadcasters Engineering Handbook: NAB Engineering Handbook*. Taylor and Francis, 2007.
- [7] S. Dang, O. Amin, B. Shilada, and M.-S. Alouini, “What should 6G be?” *Nature Electronics*, vol. 3, pp. 20–29, 2020.
- [8] 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].
- [9] 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.
- [10] 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>
- [11] 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.
- [12] H. Viswanathan and P. E. Mogensen, “Communications in the 6G era,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 063–57 074, 2020.
- [13] A. De La Oliva, X. C. Pérez, A. Azcorra, A. Di Giglio, F. Cavaliere, D. Tiegelbekkers, J. Lessmann, T. Haustein, A. Mourad, and P. Iovanna, “Xhaul: toward an integrated fronthaul/backhaul architecture in 5G networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 32–40, 2015.

- [14] 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.
- [15] A. Tzanakaki, M. Anastasopoulos, I. Berberana, D. Syrivelis, P. Flegkas, T. Korakis, D. C. Mur, I. Demirkol, J. Gutiérrez, E. Grass *et al.*, “Wireless-optical network convergence: enabling the 5G architecture to support operational and end-user services,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 184–192, 2017.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] R. M. Borges, T. R. R. Marins, M. S. B. Cunha, H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, R. N. da Silva, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and A. C. Sodr , “Integration of a GFDM-based 5G transceiver in a GPON using radio over fiber technology,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468–4477, 2018.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] G. Brown and H. Reading, “Exploring the potential of mmWave for 5G mobile access,” *Qualcomm White paper*, 2016.
- [22] C. Wallace, “Bringing 5G networks indoors,” *Ericsson White paper*, 2019.
- [23] G. [HKT and Huawei, “Indoor 5G Scenario Oriented White Paper,” *Huawei White paper*, 2019.
- [24] E. C. Vilas Boas, R. Mittra, and A. Cerqueira Sodre, “A Low-Profile High-Gain Slotted Waveguide Antenna Array With Grooved Structures,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2107–2111, 2020.
- [25] H. R. D. Filgueiras, J. R. Kelly, P. Xiao, I. da Costa, and A. Cerqueira Sodr , “Wideband Omnidirectional Slotted-Waveguide Antenna Array Based on Trapezoidal Slots,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, pp. 1–8, 2019.
- [26] H. R. D. Filgueiras, E. S. Lima, T. H. Brandão, and A. Cerqueira S., “5G NR FR2 Femtocell Coverage Map Using an Omnidirectional Twisted SWAA,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2, pp. 72–78, 2021.

- [27] 3GPP, *3GPP-Summary of Rel-15 Work Items*. TR 21.915 V15.0.0 (2019-09), 2019.
- [28] H. R. D. Filgueiras and A. C. S. Junior, “SICL-based Antenna Array for 5G Massive MIMO Applications in mm-waves,” in *43rd Annual Meeting and Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*. AMTA, 2021, pp. 1–5.
- [29] T. H. Brandão, H. Filgueiras, and S. Arismar Cerqueira, “Low-Coupling and Dual-Polarized Horn-based Antenna Array aimed to Massive MIMO Applications,” in *2021 European Microwave Conference (EuMC)*, 2021.
- [30] T. H. Brandão, H. R. D. Filgueiras, and A. C. S. Junior, “Mechanically Reconfigurable Phase Shifter for Switched-Beam Applications in mm-Waves,” in *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2021, pp. 1–3.
- [31] B. Ferreira-Gomes, O. N. Oliveira, and J. R. Mejía-Salazar, “Chiral Dielectric Metasurfaces for Highly Integrated, Broadband Circularly Polarized Antenna,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 2071, 2021.
- [32] A. Alves, M. Melo, J. Siqueira, F. Zanella, J. R. Mejía-Salazar, and C. S. Arismar, “Plasmonic Nanoantennas for 6G Intra/Inter-Chip Optical-Wireless Communications,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [33] F. Zanella, H. R. D. Filgueiras, G. Valério, C. Dartora, A. A. Mariano, and S. A. Cerqueira, “Nano-Antenna Modelling Based on Plasmonic Charge Distribution for THz-based 6G Applications,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [34] W. O. F. Carvalho and J. R. Mejía-Salazar, “Magneto-optical micro-ring resonators for dynamic tuning of add/drop channels in dense wavelength division multiplexing applications,” *Opt. Lett.*, vol. 46, no. 10, pp. 2396–2399, May 2021. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-46-10-2396>
- [35] W. O. F. Carvalho, B. N. O. Andrade, and J. R. Mejía-Salazar, “Polarization-insensitive optical modulators based on single ENZ-graphene layers,” in *Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVIII*, B. Panchapakesan, A.-J. Attias, and W. Park, Eds., vol. 11802, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2021, pp. 164 – 171. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.2595908>
- [36] O. J. Picin, F. R. Gómez, E. R. Gómez, O. N. d. Oliveira Junior, and J. R. Mejía-Salazar, “Fibonacci-like gratings for fibers to waveguide couplers,” in *Optics and Photonics*. International Society for Optical Engineering - SPIE, 2020.
- [37] O. J. Picin, F. Reyes Gómez, E. Reyes-Gómez, O. N. Oliveira, and J. R. Mejía-Salazar, “Quasiperiodic Dielectric Gratings for Multiband Fiber-To-Chip Couplers,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1–10, 2020.
- [38] W. Carvalho and J. Mejía-Salazar, “Surface plasmon resonances in sierpinski-like photonic crystal fibers: Polarization filters and sensing applications,” *Molecules*, vol. 25, p. 4654, 10 2020.

- [39] R. M. Borges, C. H. de Souza Lopes, E. S. Lima, M. A. de Oliveira, M. S. B. Cunha, L. C. Alexandre, L. G. da Silva, L. A. M. Pereira, D. H. Spadoti, M. A. Romero, and A. C. Sodr  Junior, “Integrating optical and wireless techniques towards novel fronthaul and access architectures in a 5G NR framework,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, 2021.
- [40] 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.
- [41] L. A. M. Pereira, C. H. S. Lopes, R. M. Borges, E. S. Lima, A. C. Ferreira, M. Abreu, L. L. Mendes, and Arismar Cerqueira Sodr  Jr, “Implementation of a Multiband 5G NR Fiber-wireless System Using Analog Radio over Fiber Technology,” *Optics Communications*, vol. 474, p. 126112, 2020.
- [42] E. S. Lima, R. M. Borges, L. A. M. Pereira, H. R. D. Filgueiras, A. M. Alberti, and A. C. Sodr , “Multiband and photonicallly amplified fiber-wireless xhaul,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44 381–44 390, 2020.
- [43] E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges, and A. C. Sodr  Jr., “5G new radio photonicallly-amplified Xhaul,” *Optical Fiber Technology*, vol. 60, p. 102358, 2020.
- [44] R. M. Borges, E. S. Lima, A. C. Ferreira, D. H. Spadoti, M. Abreu, L. L. Mendes, and A. C. Sodr  Jr., “Multiband 5G NR system with photonic-assisted RF amplification,” *Optics Letters*, vol. 45, no. 6, pp. 1539–1542, 2020.
- [45] L. A. M. Pereira, L. L. Mendes, C. J. A. Bastos-Filho, and Arismar Cerqueira Sodr  Jr, “Machine Learning-based Linearization Schemes for Radio over Fiber Systems,” *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, em processo de submiss o.
- [46] W. Dias, D. Gaspar, L. Mendes, M. Chaffi, M. Matth , P. Neuhaus, and G. Fettweis, “Performance Analysis of a 5G Transceiver Implementation for Remote Areas Scenarios,” in *2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE, 2018, pp. 363–367.
- [47] J. Wang, C. Liu, M. Zhu, A. Yi, L. Cheng, and G.-K. Chang, “Investigation of Data-dependent Channel Cross-modulation in Multiband Radio-over-Fiber Systems,” *Journal of lightwave technology*, vol. 32, no. 10, pp. 1861–1871, 2014.
- [48] L. L. Mendes, C. S. Moreno, M. V. Marquezini, A. M. Cavalcante, P. Neuhaus, J. Seki, N. F. T. Aniceto, H. Karvonen, I. Vidal, F. Valera *et al.*, “Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and Beyond 5G Networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 219 859–219 880, 2020.
- [49] H. D. Rodrigues, T. C. Pimenta, R. A. A. de Souza, and L. L. Mendes, “Orthogonal Scalar Feedback Digital Pre-distortion Linearization,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, pp. 319–330, 2017.
- [50] L. A. M. Pereira, L. L. Mendes, C. J. A. Bastos-Filho, and Arismar Cerqueira Sodr  Jr, “Linearization Schemes for Radio over Fiber Systems Based on Machine Learning Algorithms,” *Photonics Technology Letters*, 2021, em processo de submiss o.

- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] H. Weichel, *Laser beam propagation in the atmosphere*. SPIE press, 1990, vol. 10319.
- [54] C. H. de Souza Lopes, E. Saia Lima, and A. C. Sodré Junior, “RoF/FSO-based Fronthaul for 5G Systems and Beyond,” in *2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2021, pp. 1–3.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, G. Contestabile, and A. Cerqueira, “5G NR RoF System Based on a Monolithically Integrated Multi-Wavelength Transmitter,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 1–8, 2021.
- [59] —, “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.
- [60] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, F. B. Fidèles, G. Contestabile, J. Oliveira, and A. C. S., “Rof/fso system based on a monolithically integrated multi-wavelength transmitter,” in *2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, 2021, pp. 1–4.