

# *Inatel*

*Instituto Nacional de Telecomunicações*

Dissertação de Mestrado

## Sistemas FiWi 5G NR Baseados em *Fronthauls* de Fibra Óptica e FSO

Celso Henrique de Souza Lopes

Julho/2020



Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL

Mestrado em Telecomunicações

**Sistemas FiWi 5G NR Baseados em *Fronthauls* de Fibra Óptica e FSO**

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

AUTOR: Celso Henrique de Souza Lopes

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

Santa Rita do Sapucaí-MG  
2020



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada e aprovada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_,  
pela comissão julgadora:

---

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

INATEL

---

Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior

UFPA

---

Dr. Rafael Carvalho Figueiredo

CPQD

---

Dr. Ramon Maia Borges

INATEL

---

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

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por ter me proporcionado saúde física e mental para a elaboração desta Dissertação de Mestrado.

Agradeço aos meus pais, José Aparecido e Dalva Augusta por estarem comigo sempre, independentemente da situação me fortalecendo e incentivando a correr atrás dos meus sonhos. Aos meus irmãos Rui César e André Luis pelo apoio concedido. A minha sobrinha Helena, que chegou para iluminar a família.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior, pelas valiosas orientações na conclusão deste trabalho de Dissertação. As suas valiosas orientações fizeram com que eu evoluísse profissionalmente, de forma a buscar novos caminhos e recursos para evoluir mais ainda no âmbito profissional.

Agradeço aos meus amigos e companheiros do laboratório WOCA, que me receberam muito bem e compartilharam comigo os inúmeros desafios tornando-os mais fáceis de contornar. Obrigado pelo apoio nas disciplinas, experimentos e momentos difíceis que atravessei ao longo do Mestrado. Um agradecimento especial ao Ten. Eng. Lucas Veiga, que foi o meu parceiro de estudos e trabalhos, desde o primeiro período do Mestrado. Um agradecimento especial a todo o grupo de óptica, pois sem eles essa jornada de experimentos e compilação de resultados teria sido muito mais difícil.

Agradeço à Gisele Moreira, Secretária de Pós-graduação, por todo suporte, apoio e carinho com que me tratou durante o período de Mestrado.

Agradeço ao Instituto Nacional de Telecomunicações por ter me recebido de portas abertas. Saber que pude realizar minha Dissertação de Mestrado nesta renomada instituição é uma honra. Ao corpo docente e todos funcionários que trabalham para manter esta instituição de ensino excelente, manifesto meus agradecimentos.

Agradeço as empresas: Venturus; Rohde & Schwarz e Keysight pela parceria.

Agradeço aos órgãos de fomento à pesquisa FINATEL, CAPES, CNPq, RNP, Finep, MCTI e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

# Sumário

Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	xii
Lista de Símbolos .....	xiv
Lista de Publicações.....	xv
Resumo.....	xvii
Abstract .....	xviii
1 - Introdução .....	19
1.1 Contextualização e Motivação.....	19
1.2 Revisão Bibliográfica .....	27
1.2 Contribuições .....	30
2 - Fundamentos Teóricos.....	32
2.1 Tecnologias de Comunicação sem fio .....	32
2.1.1 LTE/LTE-A.....	32
2.1.2 5G <i>New Radio</i> .....	35
2.2 Sistemas <i>Fiber/Wireless</i> (FiWi).....	40
2.3 Sistema <i>Free Space Optical</i> (FSO) .....	46
2.4 Transceptor 5G para Áreas Remotas .....	50
3 - Implementações 5G NR com <i>Fronthauls</i> em Fibra óptica .....	58

3.1 Coexistência entre 5G NR e LTE-A em Sistemas FiWi.....	58
3.2 Sistema FiWi baseado em A-RoF para múltiplas aplicações.....	64
4 - Implementações 5G NR com <i>fronthauls</i> FSO.....	72
4.1 Investigação RoF/FSO.....	74
4.2 Investigação RoF/FSO/ <i>Wireless</i> .....	76
5 - Conclusões e Trabalhos Futuros.....	79
Referências Bibliográficas .....	83



## Lista de Figuras

<b>Figura 1. 1:</b> Evolução dos sistemas de telefonia móvel.....	22
<b>Figura 1. 2:</b> Cenários de atuação do 5G.....	22
<b>Figura 1. 3:</b> Arquiteturas de redes distribuídas (D-RAN) e centralizadas (C-RAN)...	24
<b>Figura 1. 4:</b> Tecnologias empregadas em fronthauls D-RoF e A-RoF.....	25
<b>Figura 1. 5:</b> Cenários de atuação do sistema proposto neste trabalho: BH-backhaul; FH-fronthaul; CO-central office. ....	27
<b>Figura 2. 1:</b> Evolução dos sistemas LTE. ....	33
<b>Figura 2. 2:</b> Evolução do uso do espectro para bandas licenciadas e não licenciadas.	35
<b>Figura 2. 3:</b> Conectividade dupla LTE / 5 G NR, implantação co-localizada. ....	36
<b>Figura 2. 4:</b> Utilização do espectro LTE e NR.....	38
<b>Figura 2. 5:</b> Exemplos de diagramas de constelação do padrão 5G NR.....	40
<b>Figura 2. 6:</b> Esquemático básico de transmissão rádio sobre fibra: (a) Modulação direta; (b) Modulação externa. ....	41
<b>Figura 2. 7:</b> Esquemático de um modulador óptico dual drive Mach-zehnder. ....	42
<b>Figura 2. 8:</b> Função de transferência normalizada de um modulador óptico mach-zehnder (Fonte [57]). ....	44
<b>Figura 2. 9:</b> Sistema FiWi baseado em A-RoF operando em downlink e uplink. (modificado de [57]). ....	46
<b>Figura 2. 10:</b> Sistema de comunicação FSO. ....	48
<b>Figura 2. 11:</b> Diagrama em blocos do nosso transmissor 5G.....	52
<b>Figura 2. 12:</b> Diagrama em blocos da camada MAC .....	54
<b>Figura 2. 13:</b> Diagrama em blocos da plataforma SDR.....	56
<b>Figura 2. 14:</b> O nosso transceptor 5G-RANGE.....	56
<b>Figura 2. 15:</b> (a) Taxa máxima de dados do transceptor SDR (b) Desempenho do SDR para emissão fora da faixa.....	57
<b>Figura 3. 1:</b> Diagrama em blocos do sistema FiWi proposto: AWG – Arbitrary Waveform Generator; VSG - Vector Signal Generator; VSA - Vector Signal Analyser; LD – Laser Diode; PC – Polarization Controller; DD-MZM – Dual Drive Mach-Zehnder Modulator; SMF – Single Mode Fiber; VOA – variable optical attenuator; OPM – optical power monitor; EA -Electrical Amplifier; PD - Photodetector.....	59
<b>Figura 3. 2:</b> Setup experimental do sistema FiWi proposto.....	60
<b>Figura 3. 3:</b> Análise de coexistência entre os sinais LTE-A e 5G NR, na banda de 700 MHz em função do deslocamento em frequência em um sistema RoF.....	61
<b>Figura 3. 4:</b> EVM <sub>RMS</sub> em função da potência óptica no fotodetector.....	62
<b>Figura 3. 5:</b> EVM <sub>RMS</sub> em função da potência de RF transmitida.....	63
<b>Figura 3. 6:</b> Espectro de saída do sistema FiWi proposto para transmissão de sinais 4G e 5G. ....	63

<b>Figura 3. 7:</b> Sistema FiWi proposto para operação non-standalone baseado na transmissão de rádio analógico sobre fibra (A-RoF). AWG – Arbitrary Waveforms Generator; VSG – Vector Signal Generator; DPX – Diplexer; LD – Laser Diode; SMF – Single Mode Fiber; VOA – Variable Optical Attenuator.....	65
<b>Figura 3. 8:</b> Espectro elétrico medido na saída do fotodiodo: (i) sinal F-OFDM em 778 MHz; (ii) sinais LTE-A e 5G NR. ....	67
<b>Figura 3. 9:</b> Medidas de $EVM_{RMS}$ e as respectivas constelações para os sinais LTE-A e 5G NR coexistindo em uma mesma arquitetura de rede móvel. ....	68
<b>Figura 3. 10:</b> $EVM_{RMS}$ em função da potência óptica no fotodiodo.....	69
<b>Figura 3. 11:</b> Espectro medido na recepção do Sistema FiWi proposto. ....	70
<b>Figura 3. 12:</b> Caracterização do sistema FiWi proposto: B2B – Back-to-Back; RoF – Radio Over Fiber; FiWi – Fiber-Wireless.....	71
<b>Figura 4. 1:</b> Proposta de arquitetura híbrida FiWi usando RoF e FSO: PC - Polarization Controller; AWG - Arbitrary Waveform Generator; VSG - Vector Signal Generator; LD – Laser Diode; EDFA -Erbium-doped Fiber Amplifier; VOA - Variable Optical Attenuator; PD - Photodetector; EA - Electrical Amplifier; DPX - Diplexer; VSA - Vector Signal Analyzer.....	73
<b>Figura 4. 2:</b> Desempenho digital em função da potência óptica no fotodetector do sistema RoF/FSO, para sinais F-OFDM, 5G NR e M-QAM. ....	75
<b>Figura 4. 3:</b> Análise de desempenho digital 5G NR FiWi: 3,5 GHz, empregando RoF - backhaul e FSO - fronthaul. ....	77
<b>Figura 4. 4:</b> Análise de desempenho do sinal 16-QAM FiWi: 26 GHz usando RoF - backhaul e FSO - fronthaul.....	78

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1.1:</b> Revisão bibliográfica e contribuições da Dissertação. ....	31
<b>Tabela 2. 1:</b> Características do 5G NR para diferentes numerologias. (adaptado de [33]) .....	37
<b>Tabela 2. 2:</b> Faixa de frequências e banda de operação do NR. (Adaptado de [33]) .	38
<b>Tabela 2. 3:</b> Requisitos para redes que atendam áreas remotas e rurais. ....	51

## Lista de Abreviaturas e Siglas

1G	sistema de telefonia móvel de primeira geração
2G	sistema de telefonia móvel de segunda geração
3G	sistema de telefonia móvel de terceira geração
3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
4G	sistema de telefonia móvel de quarta geração
5G	sistema de telefonia móvel de quinta geração
5G NR	<i>5G New Radio</i>
ARoF	<i>analog radio over fiber</i>
AIFoF	<i>analog intermediate frequency signal over fiber</i>
BBoF	<i>baseband over fiber</i>
BBU	<i>baseband unit</i>
BW	<i>bandwidth</i>
CA	<i>carrier aggregation</i>
CW	<i>continuous wave</i>
CPRI	<i>common public radio interface</i>
C-RAN	<i>centralized-radio access network</i>
D-RoF	<i>digital radio over fiber</i>
D-RAN	<i>distributed - radio access network</i>
DU	<i>distributed unit</i>
EDFA	<i>erbium-doped fiber amplifier</i>
EDGE	<i>enhanced data rates for GSM evolution</i>
eMBB	<i>enhanced mobile broadband</i>
EML	<i>electroabsorption-modulated laser</i>
EPC	<i>evolved packet core</i>
ESA	<i>electrical spectrum analyzer</i>
EVM	<i>error vector magnitude</i>
FDMA	<i>frequency division multiple access</i>
FMC	<i>fixed mobile convergence</i>
GSM	<i>global system for mobile communications</i>
HSPA	<i>high-speed packet access</i>
IFoF	<i>intermediate frequency-over-fiber</i>
INATEL	Instituto Nacional de Telecomunicações
IoT	<i>Internet of things</i>
LD	<i>laser diode</i>

LNA	<i>low noise amplifier</i>
LTE	<i>long term evolution</i>
MATP	<i>maximum transmission point</i>
MIMO	<i>multiple input multiple output</i>
MITP	<i>minimum transmission point</i>
mMTC	<i>massive machine type Communication</i>
MWP	<i>microwave photonics</i>
MZM	<i>electrooptic Mach–Zehnder modulator</i>
NB-IoT	<i>narrowband Internet of things</i>
NSA	<i>non-standalone mode</i>
OC	<i>optical coupler</i>
OFDM	<i>orthogonal frequency division multiplexing</i>
OPM	<i>optical power monitor</i>
PA	<i>power amplifier</i>
PC	<i>polarization controller</i>
PD	<i>photodetector</i>
QAM	<i>quadrature amplitude modulation</i>
QP	<i>quadrature point</i>
QPSK	<i>quadrature phase shift keying</i>
RAN	<i>radio access network</i>
RIN	<i>relative intensity noise</i>
RF	<i>radiofrequency</i>
RNC	<i>radio network controller</i>
RoF	<i>radio over fiber</i>
RRH	<i>remote radio head</i>
RU	<i>radio unit</i>
SDN	<i>software defined networking</i>
SMF	<i>single mode fiber</i>
SMS	<i>short message service</i>
SNR	<i>signal-to-noise ratio</i>
TDMA	<i>time division multiple access</i>
UF-OFDM	<i>universally filtered orthogonal frequency division multiplexing</i>
UMTS	<i>universal mobile telecommunication system</i>
URLL	<i>ultra-reliable low latency</i>
VOA	<i>variable optical attenuator</i>
W-CDMA	<i>wideband code division multiple access</i>
WDM	<i>wavelength division multiplexing</i>
WOCA	<i>wireless and optical convergent access</i>
WRAN	<i>wireless rural area network</i>

## Lista de Símbolos

$\varphi$	fase da portadora óptica
$\omega$	frequência angular
R	responsividade do fotodetector
$P$	potência da portadora óptica
$P_{opt}$	amplitude da portadora óptica
$RF_{out}$	sinal elétrico de saída
$E_{in}(t)$	campo elétrico de entrada
$E_{out}(t)$	campo elétrico de saída
$V_m$	amplitude do sinal de RF
$\omega_{RF}$	frequência angular do sinal de RF
$V_{bias}$	tensão de polarização do modulador
$V_\pi$	tensão de meia onda do modulador
$P(r)$	distribuição de potência na fibra
$A$	amplitude do campo óptico
$\alpha$	atenuação da fibra óptica
$f_0$	frequência original da portadora óptica

# Lista de Publicações

## Periódicos:

- [1] **C. H. S. Lopes**, E. S. Lima, L. A. M. Pereira, R. M. Borges, M. Abreu, L. L. Mendes and Arismar Cerqueira S. Jr., “Non-standalone 5G NR Fiber-Wireless System using FSO and Fiber-optics Fronthauls,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Aceito em Outubro, 2020.
- [2] 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 S. Jr., “Implementation of a Multiband 5G NR Fiber-Wireless System using Analog Radio over Fiber Technology” Optics communications, Vol. 474, 2020.
- [3] R. M. Borges, **C. H. S. Lopes**, E. S. Lima, M. A. de Oliveira, M. S. B. Cunha, L. C. Alexandre, L. G. da Silva, L. A. Melo Pereira, D. H. Spadoti, M. A. Romero and A. Cerqueira S. Jr., "Integrating Optical and Wireless Techniques towards Novel Fronthaul and Access Architectures in a Non-standalone 5G NR Framework," Submetido ao Optics Communications, Outubro, 2020.

## Congressos e Simpósios:

- [4] **C. H. S. Lopes**, L.A.M. Pereira, Arismar Cerqueira S. Jr., “Coexistência entre LTE-A e 5G NR em *Fronthaul* Móvel,” 19º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG). Aceito em Setembro, 2020.

- [5] **C. H. S. Lopes**, E. S. Lima, Arismar Cerqueira S. Jr., “Sistema Híbrido RoF/FSO para Redes 5G,” 19º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMAG - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG). Aceito em Setembro, 2020.
- [6] **C. H. S. Lopes**, L. A. M. Pereira e Arismar Cerqueira S. Jr., “Coexistência entre 5G NR e LTE-A em Sistemas *Fiber/Wireless*,” Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT). Aceito em Setembro, 2020.



# Resumo

Esta Dissertação relata implementações de sistemas *Fiber-Wireless* (FiWi) para redes celulares de quinta geração (5G), utilizando o padrão 5G *New Radio* (NR) e *fronthauls* baseados em rádio analógico sobre fibra (*Analog Radio over Fiber*, A-RoF,) e óptica do espaço livre (*Free Space Optical*, FSO). As soluções propostas perfazem três principais contribuições em relação ao Estado-da-Arte. A primeira delas refere-se à investigação e aplicação da técnica A-RoF em sistemas FiWi para transmissão simultânea de sinais LTE-A e 5G NR, coexistindo na faixa de 700 MHz, utilizando um modulador eletro-óptico de duplo estágio (*Dual Drive Mach-Zehnder modulator* DD-MZM). O seu *fronthaul* óptico cabeado é composto por 12,5 km de fibra óptica monomodo para transporte dos sinais 4G e 5G e posterior irradiação em uma femtocélula de 10 m, chegando a uma vazão de 182 Mbps.

A segunda contribuição trata de um sistema FiWi, que opera em dois cenários 5G. Inicialmente os seguintes sinais de RF são transportados, ao longo de um enlace óptico de 25 km: um sinal F-OFDM (*Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) em 700 MHz, visando atender ambientes de rede de área rural sem fio (*Wireless Rural Area Network*, WRAN); cinco sub-bandas LTE-A, explorando o modo de agregação intra-banda contígua na frequência central de 2,24 GHz; um sinal 5G NR em 2,35 GHz, para aplicações eMBB (*enhanced Mobile Broadband*). O sistema provê vazão de 1 Gbps, após a propagação nos domínios óptico e elétrico. Por fim, a terceira etapa é concernente a implementação de um sistema híbrido, utilizando RoF e FSO para prover o *fronthaul* da rede, além de uma rede de acesso sem fio. Esta proposta propõe atender ambientes WRAN externo em 700 MHz e eMBB externo e interno em 3,5 GHz e 26 GHz, respectivamente. Esta arquitetura emprega sinais F-OFDM, M-QAM (*MultiLevel Quadrature Amplitude Modulation*) e 5G NR e permite atingir uma vazão da ordem de 3 Gbps para RoF/FSO e 1,4 Gbps para RoF/FSO/*Wireless*.

**Palavras-chave:** 5G; 5G NR; Coexistência; *Fronthauls*; FSO; LTE-A.

# Abstract

This Dissertation reports the implementations of Fiber-Wireless (FiWi) systems for the fifth-generation of cellular networks (5G), utilizing the 5G New Radio (NR) standard and fronthauls based on analog radio over fiber (A-RoF) and free-space optical (FSO). The proposed technological solutions imply in three main contributions over the State-of-the-Art. The first one refers to the investigation and application of the A-RoF technique in FiWi systems for simultaneously transmitting LTE-A and 5G NR signals, coexisting in the 700 MHz band, using a *dual drive Mach-Zehnder modulator (DD-MZM)*. Its cabled fronthaul is composed by 12.5 km of single-mode fiber for transporting the 4G and 5G signals, before being radiated through a 10-m femtocell, attaining 182 Mbps throughput.

The second contribution is a regarding a FiWi system, which operates in two different 5G scenarios. Initially, the following RF signals are transported a 25-km optical link: F-OFDM (Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing) signal at 700 MHz, aiming to serve wireless rural area networks (WRAN); five LTE-A subbands, exploiting the contiguous intraband aggregation mode at 2.24 GHz; a 5G NR signal at 2.35 GHz for eMBB (enhanced Mobile Broadband) applications. The proposed system provide 1 Gbps throughput, after propagation in either of optical and electrical domains. Finally, the third step is concerning the implementation of a hybrid system using RoF and FSO for network fronthaul, beyond a wireless access network. This proposal is devoted to outdoor WRAN at 700 MHz and indoor and outdoor eMBB applications at 3.5 GHz and 26 GHz, respectively. In this architecture, F-OFDM, M-QAM (MultiLevel Quadrature Amplitude Modulation) and 5G NR signals are applied in order to reach 3 Gbps throughput using RoF/FSO and 1.4 Gbps using RoF/FSO/Wireless.

**Keywords:** 5G; 5G NR; Coexistence; Fronthauls; FSO; LTE-A.

# 1 - Introdução

Este capítulo apresenta uma visão geral desta pesquisa acadêmica. A Seção 1.1 apresenta a contextualização e motivação para o desenvolvimento deste trabalho. Já a Seção 1.2 discute a revisão bibliográfica do assunto de estudo, enquanto a Seção 1.3 destaca o foco e as contribuições da Dissertação.

## 1.1 Contextualização e Motivação

Os sistemas de comunicações móveis passaram por evoluções significativas a partir da década de 80, com o surgimento da primeira geração das comunicações móveis (1G) em 1979 no Japão [1]. Considerou-se o 1G um marco na história das telecomunicações, devido ao fato de todos os sistemas predecessores serem centralizados, com baixa capacidade de tráfego e custo elevado.

Os celulares 1G operavam com tecnologia AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), que é um sistema analógico padrão com múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA, *Frequency Division Multiple Acces*) [2]. Inicialmente, a tecnologia AMPS sofreu dificuldade de aceitação perante o mercado, por isso criaram-se diferentes padronizações entre os países. Os países nórdicos adotaram o *Nordic Mobile Telephone* (NMT), enquanto o Japão operou com o sistema *Nippon Telephone and Telegraph* (NTT). O Brasil adotou o padrão norte americano AMPS [1-3].

A preocupação com a segurança nas redes de telefonia móvel de primeira geração passou a ser um fator preponderante no final da década de 80. O 1G não

possuía criptografia e permitia a manipulação das frequências. As operadoras chegaram à conclusão que os sistemas analógicos tornaram-se inviáveis, surgindo assim, a segunda geração das comunicações móveis (2G) [4].

Houve melhoria nos aspectos técnicos e comerciais, bem como na oferta de serviços, apresentando sinais de voz livres de ruído, maior capacidade na transmissão e com possibilidade de criptografia em sua transmissão. O 2G utiliza na maioria das vezes a técnica FDMA, combinada com a técnica de múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA, *Time Division Multiple Acces*), com taxas de dados de até 22,8 kbps. Dentre os padrões 2G, o TDMA IS-136 e o GSM (*Groupe Speciale Mobile/Global System for Mobile Communications*) foram utilizados na Europa, o CDMA (*Code Division Multiple Acces*) IS-95 nos EUA e o PDC (*Japanese Personal Digital Cellular*) no Japão [5]. Além de fornecer serviços de voz, o 2G permitiu a troca de mensagens curtas (SMS, *Short Message Service*) entre os usuários de telefonia.

No final da década de 90, uma melhoria no método de acesso do GSM permitiu o surgimento do EDGE (*enhanced data rate for GSM evolution*), resultando em taxas de dados de até 240 kbps. Tal avanço atingiu sua maturidade, o que estimulou o desenvolvimento dos sistemas de telefonia móvel de terceira geração (3G) [6].

Nas redes de terceira geração, o múltiplo acesso aos recursos da rede é realizado por meio da técnica W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Acces*), a qual faz uso de múltiplas portadoras banda larga. O surgimento do 3G contribuiu significativamente para a popularização da Internet e dos serviços baseados em pacotes, o que resultou na criação de uma organização padronizadora denominada 3GPP (*3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project*), com objetivo de tornar o mercado 3G global. Tal organização fornece as especificações de sistemas de comunicações móveis em forma de *Releases*, atuando inclusive nas gerações de comunicações móveis sucessoras [5].

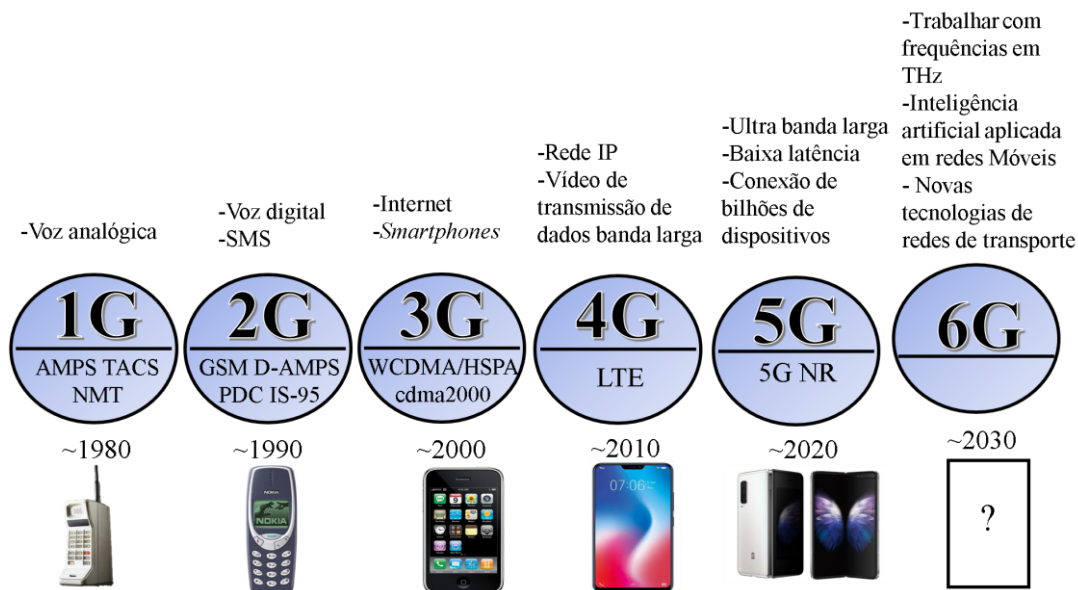
Com a popularização dos serviços de Internet, o 3G possibilitou que serviços de vídeo, televisão (TV) e aplicativos emergissem, além de estimular o aumento do número de terminais móveis. Este rápido aumento do número de dispositivos móveis, aliado ao crescente tráfego de dados da rede, impulsionou o surgimento da quarta geração das comunicações móveis (4G) [6-7]. Dentre as diversas técnicas que possibilitaram a evolução dos sistemas 3G para o 4G, vale ressaltar o uso de MIMO

(*Multiple-input Multiple-output*) o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e agregação de portadoras CA (*Carrier Aggregation*) [7].

O padrão de comunicações móveis 4G foi proposto em 2004 pelo 3GPP como uma evolução de longo prazo do padrão UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), daí surgiu a nomenclatura LTE (*Long-Term Evolution*). A técnica OFDM utilizada no DL (*Downlink*) do LTE permite uma melhor utilização do espectro com largura de faixa (*BW, Bandwidht*) de até 20 MHz, resultando em maior robustez contra desvanecimentos seletivos, causados por múltiplos percursos do canal [7]. O múltiplo acesso é realizado por meio da combinação das técnicas OFDMA (*Ortogonal Frequency Division Multiple Acces*) e TDMA no DL. No UP (*Uplink*), utiliza-se a técnica SC-FDE (*Single-carrier Frequency Domain Equalization*) e TDMA/FDMA para controle de acesso [7, 8].

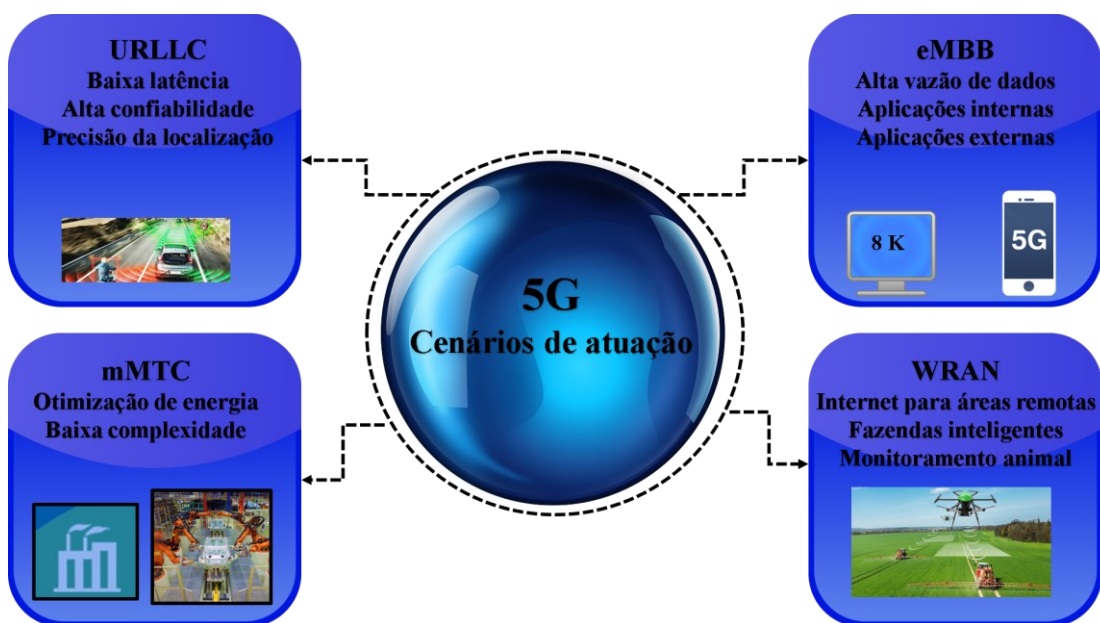
Devido ao crescente número de aplicações, as redes móveis passaram a operar com alto tráfego de informações, causando congestionamento e lentidão. A proliferação recente de dados de banda larga móvel é acelerada pelo aumento sem precedentes na assinatura de serviços multimídia, com uso intenso de largura de banda por usuários de smartphones, tablets, computadores e televisores baseados em IP (*Internet Protocol*). Com isso, criou-se um contexto para que uma nova geração de telefonia móvel fosse apresentada. Lançada comercialmente em 2020 a quinta geração das comunicações móveis (5G) visa atender diversas aplicações que exigem alta demanda por vazão de dados, confiabilidade, conexão de bilhões de dispositivos e baixa latência [8].

A figura 1.1 ilustra um resumo das evoluções das redes de comunicações móveis, destacando suas principais características. Do 1G ao 4G, têm-se tecnologias implementadas e consolidadas. Para o 5G, uma série de questões estão sendo estudados com o apoio da academia e indústria para que novas técnicas e tecnologias supram a demanda por alta vazão de dados, confiabilidade e eficiência energética empregadas as novas propostas de redes. Por fim, Para a sexta geração das comunicações móveis (6G), prevista para 2030, tópicos já vêm sendo discutidos no meio acadêmico e industrial, incluindo: operação na faixa de TeraHertz (THz); aplicação de inteligência artificial nas redes móveis, bem como novas tecnologias para a camada de transporte da rede [9].



**Figura 1. 1:** Evolução dos sistemas de telefonia móvel.

A Figura 1.2 resume os principais cenários que o 5G pretende atender. O 5G visa atender três principais cenários: URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency*), com objetivo de atender aplicações de Internet tátil, Indústria 4.0, cirurgias remotas e carros autônomos; eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) com taxas na ordem de Gbps por usuário, ambientes de realidade virtual e serviços de *streaming* de vídeo em tempo real; mMTC (*Massive Machine Type Communication*), que visa atender dispositivos



**Figura 1. 2:** Cenários de atuação do 5G.

conectados provenientes do NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) em uma rede [10–11].

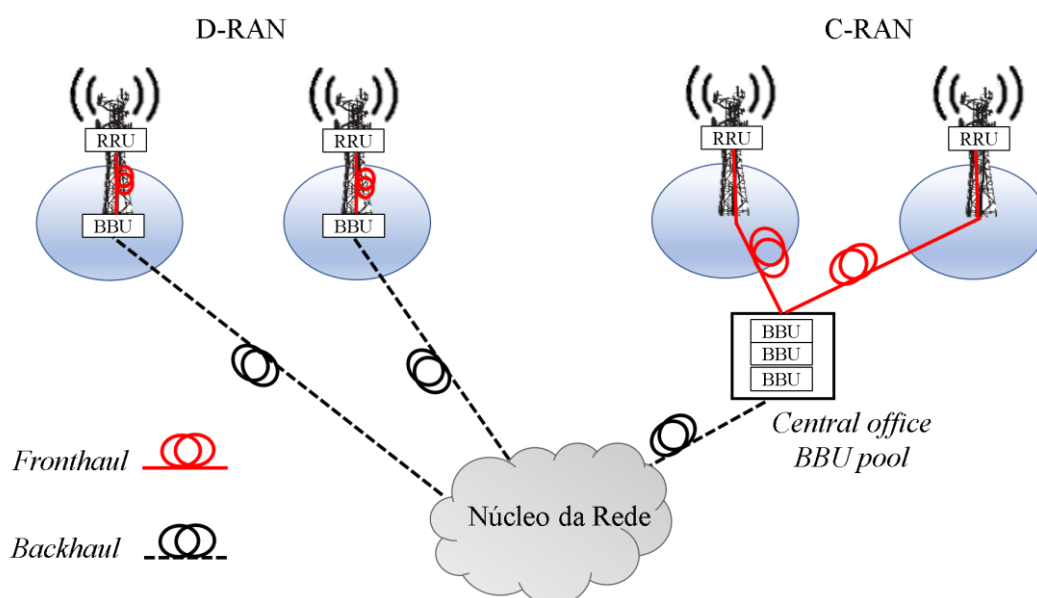
Além destes principais pilares, o 5G visa poder também ser aplicado para aumentar a área de cobertura. Neste contexto, o WRAN (*Wireless Rural Area Network*) surge com objetivo de aumentar cobertura de rede, alcançando áreas remotas, com possibilidades de atuação em fazendas inteligentes, controle contra incêndios florestais e conexão à internet em ambientes rurais.

Devido à pluralidade de aplicações e requisitos previstos para as redes 5G, as redes de acesso via rádio (*Radio Acces Network*, RAN) passam a ser um ponto ainda mais crítico da rede. O 5G deve ser compatível com diversas tecnologias de acesso via rádio, além de fazer uso do espectro de frequências de maneira eficiente, e permitir alocação dinâmica de recursos de rádio e interoperabilidade com sistemas legados já padronizados. Nesse contexto, defende-se o uso de soluções técnicas e inovadoras, tais como: 5G NR; rede definida por *software* (SDN); MIMO; virtualização e a divisão de rede [13]. Adicionalmente, a fotônica de microondas (MWP, *Microwave Photonics*) têm sido amplamente proposta como uma “solução chave” para o 5G, pois combina as vantagens das comunicações ópticas e sem fio em um único sistema [14]. A MWP engloba na geração, no processamento, na distribuição e amplificação de sinais de rádio frequência (RF) em enlaces de rádio sobre fibra (*Radio-over-Fiber*, RoF).

As redes heterogêneas (HetNets) são estratégias para o 5G pois são capazes de suportar a diversidade de serviços e requisitos [14]. Particularmente a introdução de picocélulas e femtocélulas aumentará significativamente o volume de dados nas redes, portanto a evolução das redes de acesso via rádio precisa ser complementada pela evolução das camadas de transporte. Neste contexto, a centralização da RAN (C-RAN) surge como uma solução potencial para atender as futuras redes 5G [15]. O C-RAN consiste na distribuição das unidades remotas de rádio (RRU, *remote radio units*), instaladas próximos ao local da antena, enquanto que as unidades de banda base (BBU, *base band unit*) são realocadas para uma unidade central (CO, *central office*).

A centralização da BBU traz algumas vantagens em relação a topologia D-RAN (*Distributed Radio Acces Network*), na qual, localiza fisicamente a BBU com a RRU em uma estação rádio base (ERB). A Figura 1.3 ilustra o esquemático das arquiteturas de redes D-RAN e C-RAN. As principais vantagens da C-RAN são as

seguintes [15, 16]: centralização de diversas funções das ERBs em uma única CO, possibilitando o compartilhamento das instalações; eficiência no gerenciamento, tornando o tempo de implementação de novas ERBs reduzido; comunicação mais simples e ágil entre as BBUs centralizadas, favorecendo aplicações que exigem baixa latência e a redução no consumo de energia elétrica. A entrega dos serviços de rede 5G é fortemente influenciada pela solução de transporte existente entre a CO e a RRU. Para enviar sinais com menor latência e de forma sincronizada com precisão (como digital ou analógico), a fibra óptica é frequentemente considerada para a rede de *fronthaul* [17,18].



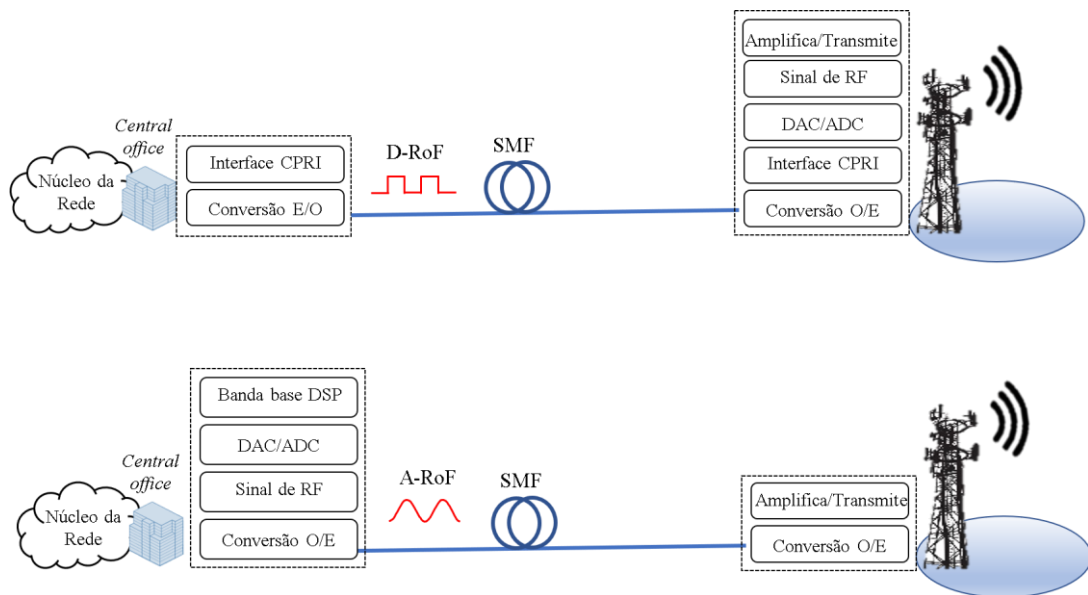
**Figura 1. 3:** Arquiteturas de redes distribuídas (D-RAN) e centralizadas (C-RAN).

Tipicamente, o transporte de sinais no *fronthaul* utiliza a técnica D-RoF (*Digital Radio-over-fiber*). Os padrões comumente transmitidos são [19, 20]: CPRI (*Common Public Radio Interface*); eCPRI (*evolved CPRI*); OBSAI (*Open Base Station Architecture Initiative*) e ORI (*Open Radio Equipment Interface*). No entanto, os benefícios da implementação do D-RoF usando a CPRI herdada são prejudicados pelos requisitos rigorosos de alta taxa de bits, latência e escalabilidade que o CPRI impõe no *fronthaul*. Portanto, é necessário investigar outras soluções de transporte como



alternativa ao uso do CPRI. Nesse contexto, repensar CPRI levou ao desenvolvimento do CPRI evoluído (eCPRI) [21,23].

Paralelamente, aumentou-se o interesse em soluções de rádio analógico sobre fibra (A-RoF, *Analog Radio-over-fiber*), aplicado à camada de transporte da rede [20]. A transmissão A-RoF surge como um potencial candidato ao transporte de sinais com alta eficiência espectral e reduzida latência da rede, além de simplificar as RRUs concentrando todo processamento digital na CO [22]. A Figura 1.4 sintetiza a arquitetura de rede centralizada utilizando as técnicas D-RoF e A-RoF aplicado a topologia C-RAN. Além das vantagens descritas acima o A-RoF aplicado a topologia C-RAN oferece uma redução significativa nos custos de capital (CAPEX) e operacional (OPEX), uma vez que o gerenciamento da rede é simplificado e a sua escalabilidade é aprimorada [22-23].



**Figura 1. 4:** Tecnologias empregadas em fronthauls D-RoF e A-RoF.

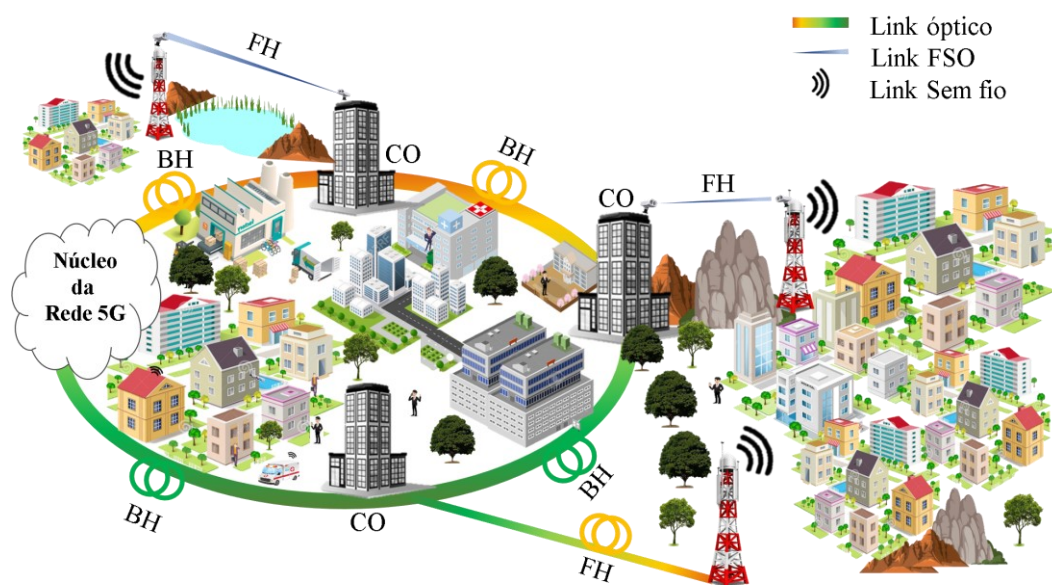
Complementando às soluções de *fronthaul* baseado em fibra óptica, o advento do 5G trouxe a necessidade de aplicar novas tecnologias de transporte de alta capacidade. Para facilitar as comunicações de baixa latência previstas para redes 5G propõe-se o uso de frequências portadoras mais altas, incluindo ondas milimétricas (30-300 GHz) [24] e THz (0,1-10 THz) [25]. No entanto, esses novos paradigmas de

transmissão trazem um conjunto de desafios em termos de custo e complexidade. Por exemplo, comunicações em THz requer amplificadores de baixo ruído, *mixers* de RF e antenas faixa larga, que implicam em custos muito altos. Como alternativa, recentemente foram propostas as comunicações ópticas sem fio (OWC, *Optical Wireless Communications*) por infravermelho no espaço livre (FSO, *free space optical*) [26]. Essa tecnologia opera em frequências portadoras extremamente altas na ordem de centenas de THz permitindo assim vazão de bits sem precedentes. Além disso, apresenta vantagens adicionais, como: o uso de espectro não licenciado; operação simples e de baixo custo; suporte à transmissão full-duplex; resistência à interferência eletromagnética e segurança na transmissão [27].

O FSO também pode ser uma solução atraente em regiões onde a fibra não pode ser implantada (terrenos montanhosos, desastres naturais, problemas de licenciamento), representando uma alternativa de banda larga e de baixo custo na linha de frente. Apesar da dependência de desempenho das condições atmosféricas [28,29], as comunicações do FSO têm atraído enorme atenção para uma ampla gama de aplicações. Um exemplo de ampla divulgação ocorreu após o atentado ao *World Trade Center*, em 11 de setembro de 2001. A estrutura responsável pela comunicação local com o cabeamento óptico foi totalmente destruída, incluindo as redes principais. Várias empresas ficaram sem comunicação e, como alternativa rápida e eficiente, foi instalado um sistema FSO, restabelecendo-se as comunicações entre empresas, as suas filiais e com outros terminais [30, 31]

A Figura 1.5 ilustra alguns cenários onde a nossa proposta de sistema FiWi baseado em *fronthauls* via fibra e FSO podem atuar. O 3GPP em seu *Release 15* [32-33] padronizou que a implementação inicial do 5G será no modo não autônomo (NSA, *non-standalone*), em outras palavras, a tecnologia 5G terá que ser implementada utilizando a mesma arquitetura de rede do 4G ativa, tendo em vista redução de custos e uma transição suave entre as tecnologias. Tendo em vista a contextualização apresentada, propomos algumas soluções utilizando A-RoF em arquiteturas C-RAN visando atender a primeira fase de implementação do 5G. O objetivo do emprego destas tecnologias é simplificar e diminuir os custos de implementação da rede. A Figura 1.5 ilustra os cenários que pretendemos atuar utilizando diferentes tecnologias empregados no *fronthaul* da rede. Nesta arquitetura o *backhaul* (BH) da rede interliga

a *Central office* (CO) por meio de um *link* de fibra óptica. Como proposta de *fronthaul* propusemos a utilização de fibra óptica e de FSO para interligar a CO às ERBs. Desta maneira vislumbra-se atender os cenários WRAN e eMBB.



**Figura 1. 5:** Cenários de atuação do sistema proposto neste trabalho: BH-backhaul; FH-fronthaul; CO-central office.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

A academia e a indústria têm atuado intensamente nos últimos anos no desenvolvimento de soluções que atendam as redes 5G. Delmade *et al.* [34] demonstraram experimentalmente uma transmissão simultânea de sinais em um link óptico baseado em modulação e detecção direta, contendo sinais LTE e formas de onda candidatas para o 5G: GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) e UF-OFDM (*Universally Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Os sinais foram transmitidos em um *fronthaul* de 25 km utilizando a tecnologia AIFoF (*Analog Intermediate Frequency Signal over Fiber*), de forma que 75 canais com banda de 20 MHz fossem alocados para o LTE e 10 canais com banda de 201 MHz para as formas de onda do 5G. Os resultados relataram a coexistência de diferentes serviços sem fio com diferentes taxas de transmissão operando no mesmo *fronthaul* móvel. Em [35] aplicou-se IFOF para implementação de um protótipo 5G, baseado em ondas

milimétricas de 28 GHz para prover serviços de banda larga móvel na ordem de gigabits.

Particularmente, nosso grupo de pesquisa WOCA (*Wireless and Optical Convergent Acces*) do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) propôs o conceito e relatou a integração e a análise de desempenho experimental de um transceptor 5G baseado em GFDM em uma rede óptica passiva gigabit (Gigabit Passive Optical Network, GPON), utilizando a tecnologia RoF [36]. A arquitetura proposta permitiu o transporte simultâneo de dois sinais RF candidatos ao 5G, ao longo de uma rede GPON ativa. Um sinal foi gerado por um transceptor 5G baseado em GFDM com frequência de portadora de 735 MHz, enquanto o segundo sinal foi sintetizado por um gerador de sinal vetorial à 26 GHz. Um modulador Mach-Zehnder de acionamento duplo foi utilizado para modular os dois sinais de RF, com o objetivo de minimizar a interferência. Por fim, as medições de latência e vazão de dados do sinal em banda base originalmente executado sobre o GPON, não sofreram penalidades significativas.

Kim *et al.* [37], demonstraram uma proposta de rede móvel 5G interna baseada em ondas milimétricas suportada por MIMO 4x4, baseada em um sistema de antena distribuída (DAS), que possui interface *over-the-air* (OTA), para receber o sinal sem fio de banda larga da RRH do *fronthaul* móvel. Explorou-se a tecnologia RoF e alcançou uma vazão de 4 Gbps para o usuário final, onde a latência adicional induzida pela rede DAS é de apenas algumas centenas de nanosegundos.

Sung e colaboradores, relataram e demonstraram a implementação bem-sucedida de uma RAN baseada em IFoF para comunicação móvel 5G na faixa de 28 GHz [38]. Para aumentar a cobertura das redes 5G baseadas em mm-Wave, foi proposto um sistema DAS, MIMO 2x2. Uma demonstração em um ambiente sem fio foi realizada para verificar a viabilidade técnica do *fronthaul* 5G, e os resultados comprovaram que ao mover o terminal 5G entre RRUs a uma velocidade inferior a 60 km/h, os serviços de banda larga móvel podem ser oferecidos com uma vazão de dados superior a 9 Gbps.

Soluções híbridas para as redes móveis 5G buscam integrar os benefícios da fibra óptica, FSO e redes de acesso sem fio na mesma arquitetura de rede [39, 40, 42]. Com a possibilidade de atender serviços que necessitam de alta vazão de dados, estes

sistemas vêm sendo estudados para soluções onde a implantação da fibra óptica torna-se mais trabalhosa, como travessias de regiões montanhosas ou aquáticas. Modos de operação NSA proposto pelo 3GPP foi abordado seguindo a padronização de sinais 4G e 5G em [42].

Por fim o grupo WOCA [41], relatou a implementação e a investigação experimental de desempenho de um sistema FiWi para aplicações WRAN e eMBB. A solução consiste em um *fronthaul* baseada em A-RoF utilizando uma infraestrutura WDM-PON, de um provedor comercial de serviços de Internet para permitir a operação 5G em várias bandas de frequência, incluindo: 788 MHz para GFDM; Sinais 5G NR a 3,5 ou 26 GHz; um sinal *M*-QAM em 26 GHz com largura de banda de até 800 MHz. Os resultados experimentais demonstram uma vazão total de 4,41 Gbps no ar, de acordo com os requisitos 3GPP, bem como aplicações M2M (*Machine-to-Machine*), baseado no padrão PROFINET. Foi Proposto e implementado técnicas de ópticas não-linear para atender redes X-HAUL. A abordagem permite transportar simultaneamente e amplificar múltiplos sinais de radiofrequência (RF) através de links ópticos, que podem ser empregados como *backhaul*, *midhaul* ou *fronthaul* de sistemas celulares de 5G. Demonstrou-se que a técnica utilizada permite substituir dois amplificadores de RF convencionais, aumentando significativamente a vazão de dados do sistema em 2,4 vezes, atingindo 12 Gbps. Além disso, um *fronthaul* sem fio de banda dupla operando em 7,5 e 28,0 GHz, precedido por um *midhaul* óptico de 12,5 km, foi aplicado ao sistema FiWi para atender redes Xhaul [43].

A partir desta revisão bibliográfica foi possível identificar algumas áreas-chaves de estudo referentes a implementação inicial do 5G NR. Desta forma, soluções que utilizam A-RoF, diferentes modos de transmissão e soluções híbridas RoF/FSO/*Wireless* foram investigadas e propostas para atender a esta fase inicial.

## 1.2 Contribuições

Apresentam-se como principais contribuições deste trabalho a proposta de implementação de arquiteturas de redes móveis para aplicações 5G. As propostas são baseadas na tecnologia A-RoF e FSO de acordo com o padrão C-RAN. Sistemas FiWi propostos surgem como solução para atender o modelo NSA definido pelo 3GPP onde tecnologias 5G deverão coexistir em uma mesma infraestrutura de rede móvel com as tecnologias legadas do 4G. A Tabela 1.1 apresenta uma comparação do “estado-da-arte” com as principais contribuições apresentadas neste trabalho, as quais estão listadas da seguinte forma:

- i. Implementação e análise do modo de operação não-autônomo (*non-standalone*, NSA), definido pelo 3GPP para que redes móveis operem simultaneamente com tecnologias 4G e 5G NR em uma mesma arquitetura de rede;
- ii. Implementação de diferentes modos de transmissão simultâneas de sinais 4G e 5G em *fronthauls* ópticos baseados em sistemas RoF e topologia C-RAN, incluindo:
  - Modulação direta;
  - Modulação externa com modulador de acionamento duplo.
- iii. Análise de coexistência entre sinais LTE-A e 5G NR em sistemas de rádio sobre fibra para diferentes cenários de aplicações;
- iv. Implementação de uma arquitetura 5G híbrida RoF/FSO/*Wireless* operando em FR1 e FR2;
- v. Atuação em três ambientes estipulados 5G, tais como: WRAN em 700 MHz, eMBB em ambientes internos (3,5 GHz) e externos (26 GHz) simultaneamente em uma mesma arquitetura de rede utilizando uma portadora óptica.
- vi. Análise de desempenho digital dos sistemas, levando em consideração a coexistência entre tecnologias, bem como os requisitos de  $EVM_{RMS}$  padronizados pelo *Release 15* do 3GPP [32].

**Tabela 1.1:** Revisão bibliográfica e contribuições da Dissertação.

Ref.	Tecnologia	Padrão da forma de onda	Frequência de Transmissão	Tipo de <i>Fronthaul</i>	Rede de acesso sem fio	Vazão de dados
[34]	RoF	OFDM GFDM UF-OFDM	de 696 MHz a 938 MHz de 1,06 GHz a 2,16 GHz	Fibra Óptica	Não	5,7 Gbps
[35]	FiWi	OFDM	28 GHz	Fibra Óptica	Sim	1,5 Gbps
[36]	RoF	GFDM 16-QAM	735 MHz 26 GHz	Fibra Óptica	Não	100 Mbps 1 Gbps
[37]	FiWi	OFDM	de 27,5 a 28,3 GHz	Fibra Óptica	Sim	4 Gbps
[38]	FiWi	64-QAM	28 GHz	Fibra Óptica	Sim	9 Gbps
[39]	FSO/FiWi	64-QAM	de 24 a 26 GHz	Fibra Óptica	Sim	10 Gbps
[40]	FSO/ <i>Wireless</i>	16-QAM	28 GHz	FSO	Sim	4 Gbps
[41]	FiWi	F-OFDM GFDM OFDM 16- and 64-QAM Standard 5G NR	Banda base 788 MHz 3,5 GHz 26 GHz	Fibra Óptica	Sim	4,41 Gbps
[42]	RoF/FSO/ <i>Wireless</i>	Standard LTE-A Standard 5G NR	1.8 GHz 3,5 GHz	Fibra Óptica	Sim	---
[43]	FiWi	16- and 64-QAM	7,5 GHz 28 GHz	Fibra Óptica	Sim	10 Gbps
Este trabalho	FiWi RoF/FSO/ <i>Wireless</i>	F-OFDM Standard LTE-A Standard 5G NR 16-QAM	778 MHz 788 MHz de 2,2 a 2,28 GHz 2,35 GHz 3,5 GHz 26 GHz	Fibra Óptica FSO	Sim	182,8 Mbps 1 Gbps 2,3 Gbps 1,4 Gbps

## 2 - Fundamentos Teóricos

Este capítulo têm por objetivo apresentar a fundamentação teórica básica dos sistemas FiWi 5G NR para compreender as contribuições desta Dissertação de Mestrado. Destacam-se descrições técnicas dos sistemas LTE-A e 5G NR, além de uma abordagem sucinta para conceitos teóricos a respeito dos sistemas FiWi e FSO.

### 2.1 Tecnologias de Comunicação sem fio

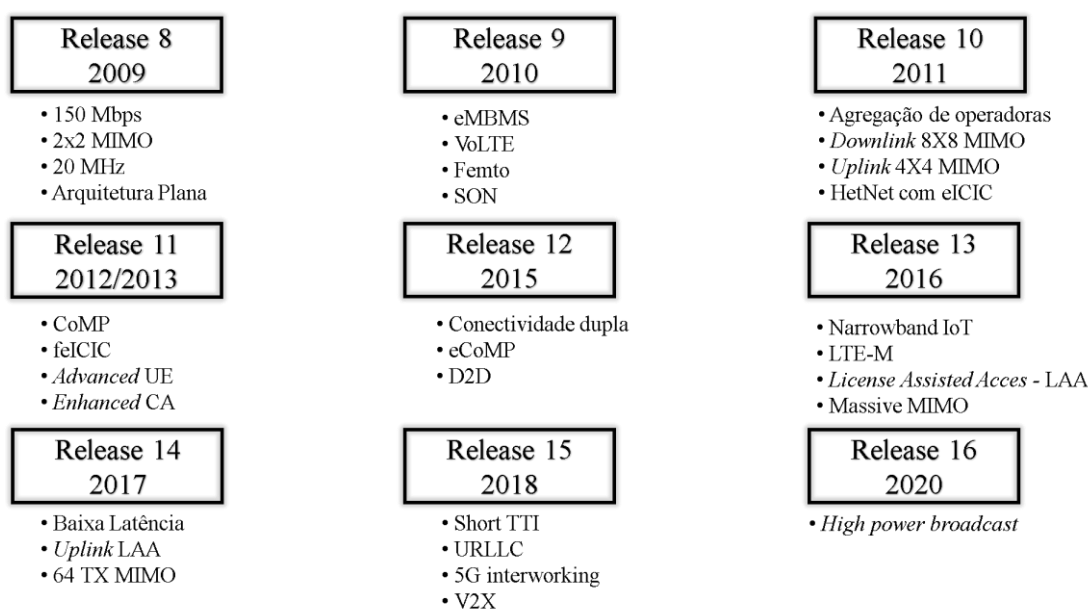
#### 2.1.1 LTE/LTE-A

A história do LTE iniciou-se em 2004, por meio do primeiro workshop 3<sup>rd</sup> *Generation Partnership Project* (3GPP), com objetivo de fornecer uma nova tecnologia de acesso via rádio focada apenas em dados comutados por pacotes [44]. A primeira versão das especificações LTE foram definidas no *Release 8* do 3GPP em março de 2009 e a primeira rede comercial LTE foi implementada em dezembro de 2009, já com o *Release 9* adicionando alguns recursos a sua predecessora [45]. As versões subsequentes do LTE, introduziram funcionalidades e capacidades adicionais em diferentes áreas, fornecendo dados de banda larga móvel e *Voice over LTE* (VoLTE). A primeira rede comercial LTE foi lançada pela Teliasonera, seguida por um grande número de outras redes durante o período 2010-2011.

Os principais recursos LTE de cada *Release* estão resumidos na Figura 2.1. A versão 8 foi muito importante, incluindo a implementação de uma nova rede de rádio completa. A versão 8 atingiu vazão de dados de 150 Mbps com largura de banda de 20 MHz e MIMO  $2 \times 2$  [46]. Todos esses recursos foram aprimoramentos em comparação com as redes de terceira geração. A versão 9 trouxe algumas adições, incluindo o aprimoramento do sistema de transmissão múltipla em multimídia



(eMBMS, *enhanced Multimedia Broadcast Multicast System*), chamadas de emergência (VoLTE, *emergency calls*), femtocélulas e redes de organização automática (SONs, *self-organizing networks*) [46,47]. A versão 10 aprimorou os recursos de rádio com agregação de operadora e MIMO com múltiplas antenas, aumentando a taxa de pico superior à 1 Gbps. A versão 10 também incluiu uma melhor coordenação de interferência entre células (eICIC, *improved Inter-Cell Interference Coordination*) para otimização de redes heterogêneas (HetNet, *Heterogeneous Network*) e o eICIC foi aprimorado ainda mais na versão 11 (feICIC, *further enhanced*) [44].



**Figura 2. 1:** Evolução dos sistemas LTE.

A versão 11 aprimorou a funcionalidade de agregação de operadora, trouxe multiponto coordenado (CoMP, *Coordinated Multipoint*) e adicionou receptores avançados ao equipamento do usuário (EU, *user equipment*) com cancelamento de interferência [44]. Os principais tópicos da versão 12 são: conectividade dupla; CoMP aprimorado (eCoMP); otimização de IoT e conectividade dispositivo a dispositivo (D2D, *device-to-device*) [45].

A versão 13 forneceu: operação de *downlink* LTE nas bandas não licenciadas, também conhecida como acesso assistido por licença (LAA, *License Assisted Access*);

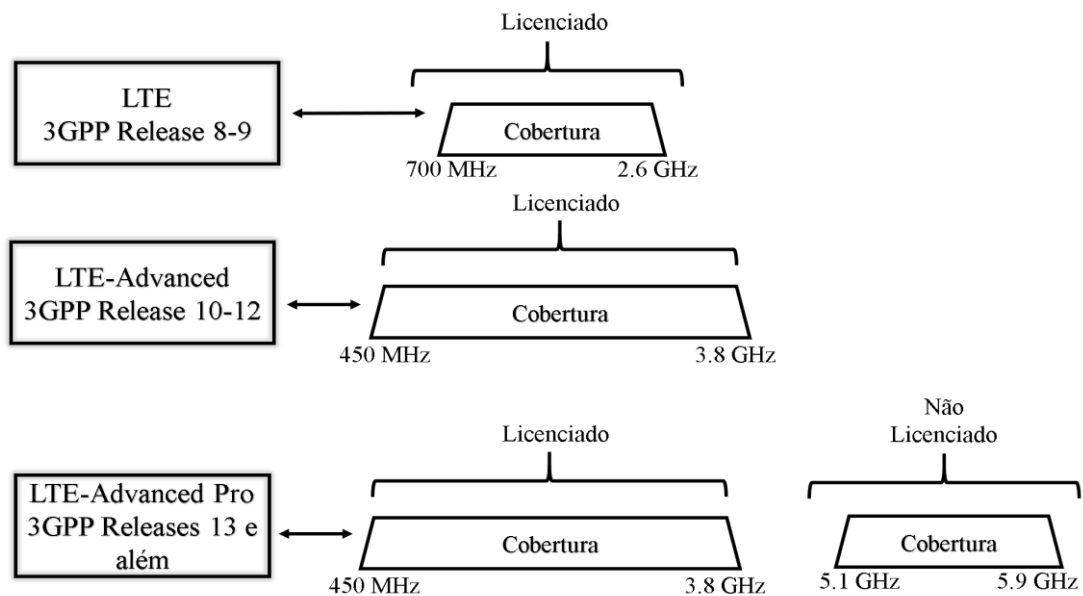
agregação de portadora aprimorada além de 100 MHz; formação de feixe tridimensional (3D) e suporte para comunicações do tipo máquina (MTC, *Machine Type Communications*) com LTE-M e IoT de banda estreita (NB-IoT, *narrowband-IoT*) [45]. A versão 14 trouxe operação de latência muito baixa, além de LAA de ligação ascendente [44,45].

A versão 15 é considerada a última versão principal do LTE e fornece vários recursos, tais como: pequeno intervalo de tempo de transmissão (TTI, *Transmission Time Interval*); comunicação de baixa latência ultra-confiável (URLLC, *Ultra-Reliable Low Latency Communication*); suporte a *time Division Duplex* (TDD) para NB-IoT; aprimoramentos adicionais no MTC, V2X e muitos outros [47-48]. A versão 16 trouxe a solução de transmissão de alta potência para o LTE.

A evolução do uso do espectro LTE de acordo com os *Releases* é mostrada na Figura 2.2. As redes LTE foram inicialmente implantadas usando espectro licenciado entre 700 a 2600 MHz [48]. A utilização de bandas não licenciadas, em conjunto com as bandas licenciadas, permitiu melhorias na capacidade e na taxa de transmissão de dados da tecnologia LTE-A Pro. Na banda não licenciada de 5 GHz, há espectro disponível, principalmente para implantações de pequenas células. Esse grande conjunto de espectros permite que as operadoras de banda larga móvel aproveitem a evolução da agregação de operadora fornecida pelo LTE-A Pro [47, 48].

Todo o espectro entre 700 e 2600MHz pode ser utilizado em conjunto com a agregação de portadora. A agregação dos vários blocos de espectro ajuda a fornecer maior capacidade e vazão de dados. Além disso, a banda de 3,5 GHz é utilizada para (TD-LTE, *Time-Division Long-Term Evolution*) em alguns países, com objetivo de alcançar locais remotos [47, 48]. As bandas não licenciadas à 5 GHz podem ser utilizadas nas células pequenas para obter mais espectro.

A tecnologia LTE tornou-se ainda melhor com seus aprimoramentos nas versões 13-15 do 3GPP. Os recursos de rádio aprimorados tornaram os serviços de banda larga móvel mais eficientes, oferecendo maior qualidade e possibilitando novos conjuntos de serviços nas redes LTE. Esses recursos são conhecidos como o padrão 4.9 G [49, 50]. O LTE-A Pro permite ao mundo conexões com bilhões de dispositivos IoT, comunicação veicular para sistemas de tráfego inteligentes (ITS, *Intelligent Traffic Systems*) e comunicações críticas de segurança pública [50].



**Figura 2. 2:** Evolução do uso do espectro para bandas licenciadas e não licenciadas.

### 2.1.2 5G New Radio

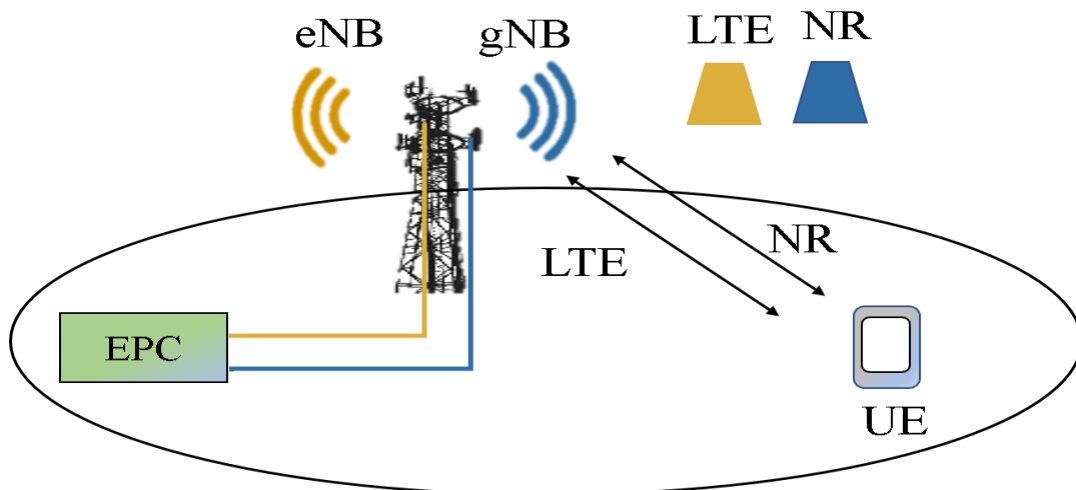
A padronização do 5G NR teve início em 2016 com o *Release 14* do 3GPP. O trabalho continuou com o acréscimo de alguns itens no *Release 15*, resultando na primeira versão das especificações do 5G NR disponíveis em 2018. O objetivo do *Release 15*, é atender aos requisitos comerciais nas implantações iniciais das redes 5G [50]. O *Release 15* do 3GPP estabelece o que é considerada a primeira fase para a implementação do 5G, ou também denominado *New Radio Phase 1*, cujo o foco é aplicações eMBB e URLLC. Para mMTC, tecnologias baseadas em LTE, como eMTC e NB-IoT podem ser usadas e demonstraram excelentes resultados [50, 51].

Comparado ao LTE, o NR oferece alguns benefícios e os principais são [50]:

- Uso de bandas de frequência muito mais altas como forma de obter espectros adicionais para suportar larguras de banda de transmissão muito amplas e altas taxas de dados associadas;
- Design simples para melhorar o desempenho energético da rede e reduzir interferências;

- Compatibilidade direta para se preparar para futuros casos de uso e tecnologias ainda desconhecidos;
- eMBB: alta taxa de dados e larga área de cobertura: taxa de pico > 10 Gb/s;
- URLLC: requisitos de latência e confiabilidade para comunicações de missão crítica, como por exemplo cirurgias remotas, veículos autônomos e Internet Táctil (latência < 1ms).

A primeira especificação de dezembro de 2017, que é o foco desta dissertação, limita-se ao modo NSA, o que implica que os dispositivos de NR utilizarão a arquitetura LTE existente para acesso e implementações iniciais [52]. As especificações finais da versão 15 também suportam operações de NR independentes (AS, *standalone*). A Figura 2.3 ilustra a aplicação NSA com conectividade dupla. Explorando-se os cenários de conectividade do 5G NR na definição do padrão, resultando em maior flexibilidade de topologias as quais a rede pode ser interconectada permitindo uma transição mais eficiente entre as tecnologias.



**Figura 2. 3:** Conectividade dupla LTE / 5 G NR, implantação co-localizada.

O modo *non-standalone* utiliza-se da infraestrutura já existente do padrão LTE quanto às questões de sinalização e controle. Nesse contexto, esta configuração indica todas as premissas de conectividade e de interfaceamento com o núcleo da rede utilizando os procedimentos do 4G. A partir da efetivação desta conexão, é verificada

a existência de canal optativo do 5G com o usuário, como também sua praticabilidade. Este modo de operação permitiu com que a implementação da tecnologia 5G operasse em sua fase inicial de maneira rápida e econômica, tendo em vista que não acarretaria na implementação de uma nova infraestrutura de rede própria. É possível conectar à rede de acesso via rádio NR também à rede LTE herdada, conhecida como *Evolved Packet Core* (EPC). De fato, esse é o caso ao operar o NR no modo NSA, em que o LTE e o EPC lidam com funcionalidades como configuração de conexão e paginação, enquanto o NR provê um aumento na vazão de dados e na capacidade. Versões posteriores irão introduzir operação SA com o NR conectando-se ao núcleo 5G [50-52]. Assim como o LTE [32, 52], o NR, neste Release 15, utiliza a forma de onda OFDM. Em [53] é definido que, tanto a forma de onda CP-OFDM quanto a forma de onda DFT-S-OFDM, são mandatórias para o equipamento de usuário (UE). Dentre elas, destacam-se novas numerologias que permitem diferentes configurações de espaçamento de subportadoras OFDM, não se limitando ao espaçamento fixo do LTE que é de 15 kHz [32, 33, 52]. A Tabela 2.1, resume as diferentes características do sinal 5G NR para diferentes numerologias. Os espaçamentos entre as subportadoras agora operam em 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz e 240 kHz.

**Tabela 2. 1:** Características do 5G NR para diferentes numerologias. (adaptado de [33])

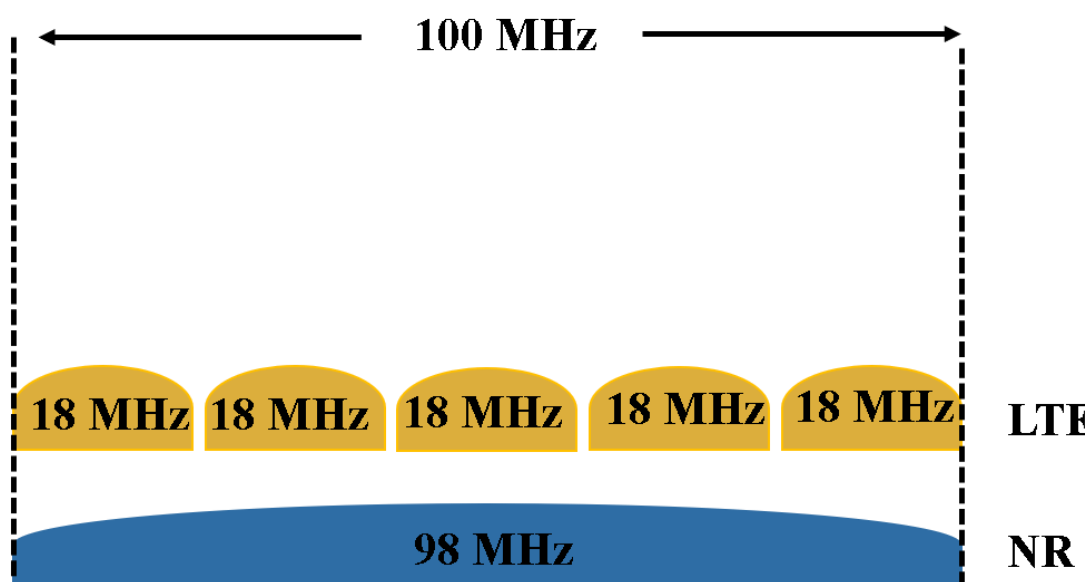
Espaçamento de Subportadora	15 kHz	30kHz	60 kHz	120 kHz	240 kHz
Duração do CP (µs)	Normal 4,7	Normal 2,3	Estendido 1,2 /4,13	Normal 0,59	Normal 0,29
Máxima largura de faixa (MHz)	50	100	100/200	400	400
Símbolos por slot	14	14	14/12	14	14
Slots por sub quadro	1	2	4	8	16
Slots por quadro	10	20	40	80	160

O NR trabalha com diferentes larguras de faixas, a depender da frequência em que está operando. O 5G NR opera em FR1 e FR2. Conforme descrito na Tabela 2.2, as larguras de faixas dependente das frequências de utilização.

**Tabela 2. 2:** Faixa de frequências e banda de operação do NR. (Adaptado de [33])

	<b>FR1</b>	<b>FR2</b>
Frequências (MHz)	450 a 7125	24250 a 52600
Largura de Faixas (MHz)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 e 100	50, 100, 200 e 400

Um dos objetivos na definição do NR é o aumento da eficiência espectral suprimindo os intervalos de guarda utilizados no LTE. O fator proposto para o NR é de 98%, enquanto que no LTE o fator é de 90%. A Figura 2.4 ilustra esta aplicação.



**Figura 2. 4:** Utilização do espectro LTE e NR.

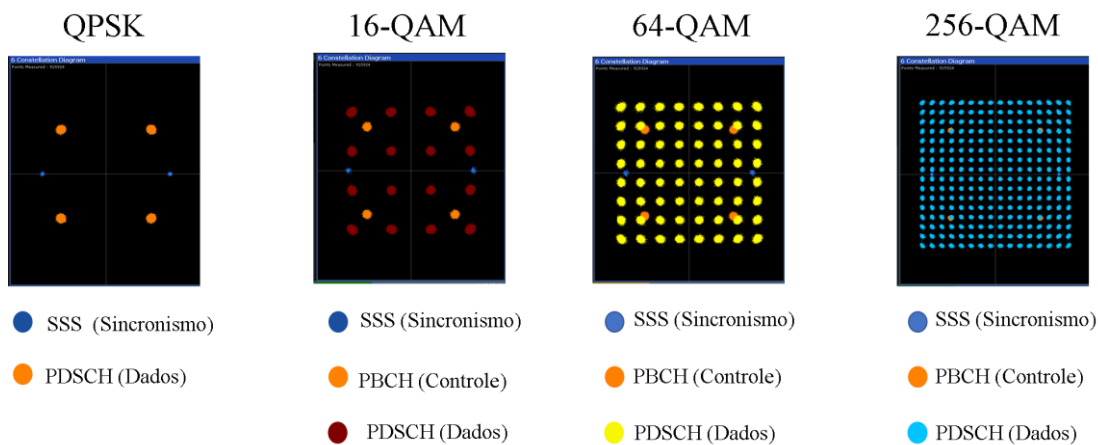
As gNB ao transmitirem periodicamente sinais de sincronismo para os UEs e a partir destes sinais, os UEs têm a capacidade de encontrar, identificar e sincronizar-se com a rede. Em conjunto, o sinal primário de sincronização (PSS, *Primary Synchronization Signal*) e o sinal secundário de sincronização (SSS, *Secondary Synchronization Signal*) transmite-se um canal de transmissão física (PBCH, *Physical Broadcast Channel*) contendo informações dos sistemas necessários para aquisição e seleção de células da rede.

Semelhante ao LTE, as transmissões de dados são agendadas pelas ERBs, de acordo com as condições em que o canal se encontra, dando prioridade de tráfego e qualidade de serviço. Tais informações são fornecidas por dispositivos de usuários por meio do canal de controle físico de ligação ascendente (PUCCH, *physical uplink control channel*). A partir destas informações as estações rádio base enviam para os UEs as informações de controle de *downlink* (DCI, *downlink control information*). Tais informações são transmitidas do canal de controle físico de *downlink* (PDCCH, *physical downlink control channel*) por meio da modulação QPSK (*quadrature phase shift keying*) [50].

As possibilidades que o NR proporciona para transmissões *downlink* é a capacidade de mapear os dados por meio do canal compartilhado de *downlink* físico (PDSCH, *physical downlink shared channel*) e para *uplink* por meio do canal compartilhado de ligação física (PUSCH, *physical uplink shared channel*).

Existe ainda a possibilidade de estimar o canal auxiliando a demodulação e compensando ruídos de fase, principalmente quando se trabalha em ondas milimétricas. Dentre os sinais de referência, tem-se: sinal de referência de demodulação (DMRS, *demodulation reference signal*); sinal de referência de rastreamento de fase (PTRS, *phase-tracking reference signal*) e o sinal de referência de informações do estado do canal (CSI-RS, *channel state information reference signal*) [21]. Alguns destes parâmetros dos canais 5G NR citados anteriormente são representados por meio de diagramas de constelações em análises de eficiência na recepção dos sinais. É definido pelo Release 15 que métricas de avaliação de desempenho podem ser feitas a partir da medição da magnitude do  $EVM_{RMS}$  (*root mean square error vector magnitude*), que estabelece valores limites para que o sinal chegue em condições de demodulação [32]. Os limites impostos pelo release são: 17,5 %; 12,5 %; 8 % e 3,5 % para ordens de modulação de QPSK, 16-, 64-, e 256-QAM respectivamente.

A Figura 2.5 ilustra exemplos de constelações do padrão NR para modulações QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM.



**Figura 2. 5:** Exemplos de diagramas de constelação do padrão 5G NR.

## 2.2 Sistemas *Fiber/Wireless* (FiWi)

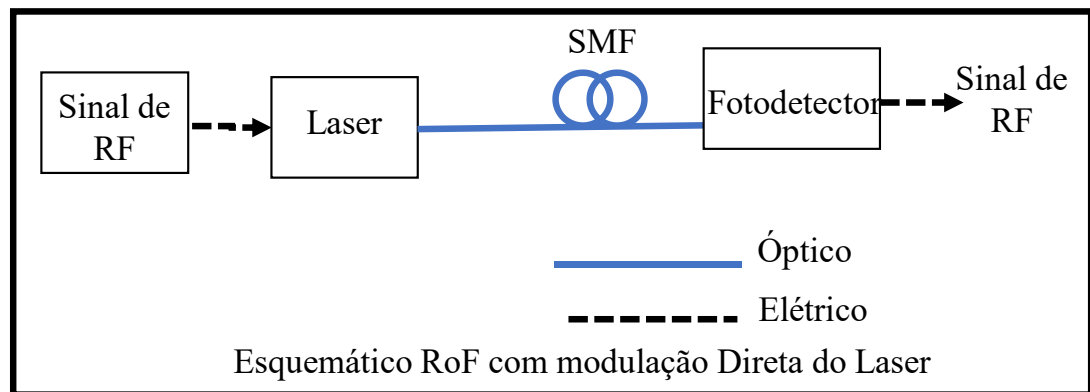
Esta seção descreve os principais elementos de um sistema FiWi baseados em RoF e como suas características influenciam o transporte de sinais de rádio para comunicações sem fio. Sistemas de comunicação atuais exploram uma infinidade de tecnologias para transportar e transmitir sinais entre os usuários e o núcleo da rede. Dentre esta infinidade de tecnologias, o FiWi é amplamente utilizado devido as vantagens encontradas na convergência entre sistemas ópticos e sem fio. Nesse contexto, a MWP desempenha um papel importante na integração de sistemas de fibra sem fio para atender as redes de telefonia móvel [54].

A modulação óptica por RF pode ser feita modulando diretamente a fonte óptica ou modulando externamente o portador óptico após a geração. A operação de uma fonte luminosa baseia-se em emissão espontânea ou estimulada, as quais ocorrem quando um átomo excitado retorna à quantidade básica de energia. As principais fontes ópticas utilizadas em aplicações RoF são o LED (*light-emitting diodes*) e o Laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Existem vantagens e desvantagens em cada uma dessas abordagens. Devido os sistemas ópticos atuais demandarem a utilização de fontes luminosas com larguras espectrais estreitas, com objetivo de alcançar uma modulação com elevada vazão de bits e pequena dispersão, os Laseres

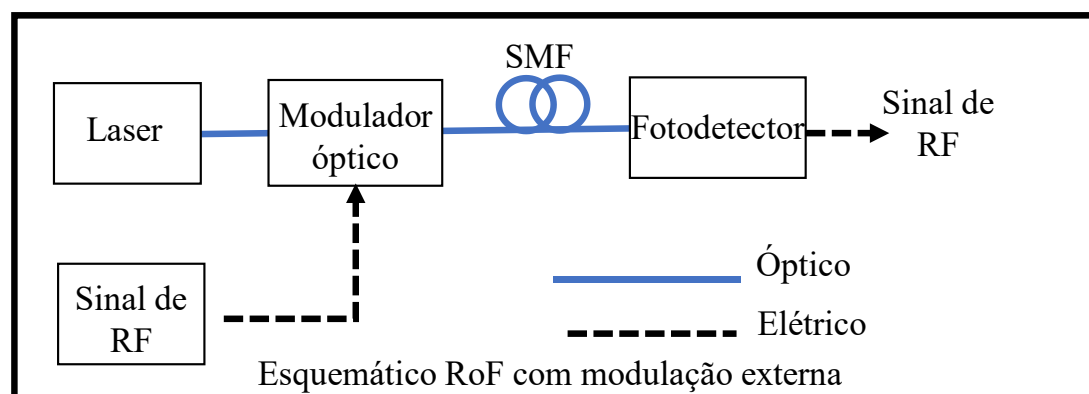


cumprem estas demandas de forma mais eficiente se comparados com os LEDs, consequentemente sendo mais utilizados para transmissão da portadora óptica [54, 55].

A figura 2.6 apresenta o esquema básico de transmissão de um sistema A-RoF com modulação direta (a) e modulação externa (b). Na modulação direta, a corrente de acionamento da fonte óptica varia diretamente de acordo com o sinal RF modulado, resultando em geração e modulação de luz ocorrendo em uma única etapa. Este método é menos complexo, menos robusto e mais econômico. Oferece desempenho adequado quando a frequência de rádio é de apenas alguns GHz. Esta limitação é imposta principalmente pelo tempo de resposta do Laser e o *chirp*, causado pela variação de fase da portadora óptica ao longo do tempo [56].



(a)

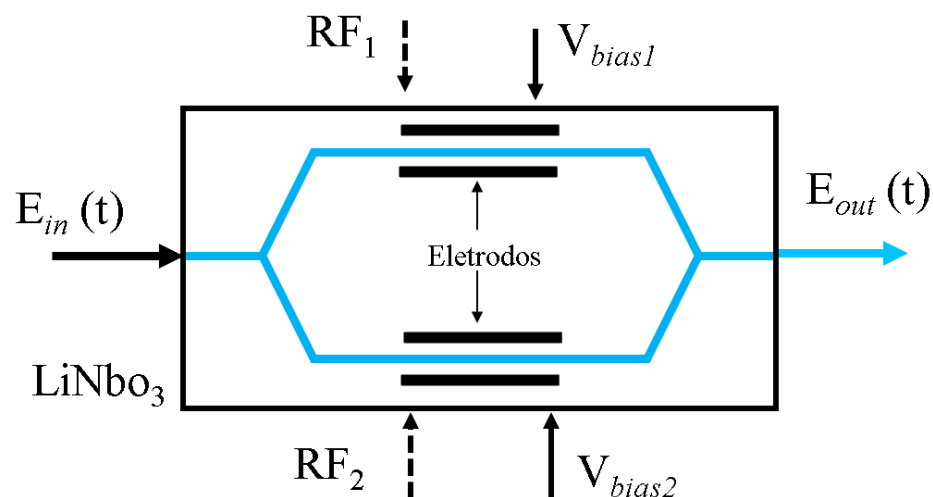


(b)

**Figura 2. 6:** Esquemático básico de transmissão rádio sobre fibra: (a) Modulação direta; (b) Modulação externa.

A modulação externa se aplica a esquemas de modulação em que a fonte de luz é acionada por uma corrente de polarização constante superior ao limite atual. Essa corrente de polarização geralmente é otimizada para obter o melhor desempenho do laser. Sob essa condição, diz-se que o diodo laser está operando no modo CW, o que significa que emite uma saída de luz constante. O viés constante elimina problemas como *chirp* do laser, saturação e problemas de instabilidade. Essa luz constante é então modulada com um modulador óptico externo [55]. Os moduladores externos são capazes de fornecer larguras de banda muito altas (acima de 100 GHz) e um orçamento de energia significativamente melhor (baixa perda) em comparação com links diretamente modulados. Tipicamente emprega-se um modulador óptico com guias de onda de Niobato de Lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ) [56].

A modulação externa utiliza o efeito eletro-óptico linear em determinados materiais, para prover vantagens em relação à modulação direta. O modulador amplamente utilizado para transmissão via modulação externa é o (MZM, *Mach-Zehnder Modulator*). Capaz de combinar as propriedades de um modulador de fase com princípios da interferometria, a fim de proporcionar uma modulação em intensidade ou amplitude [57]. A figura 2.7 apresenta a estrutura de MZM de estágio duplo (*Dual-Drive MZM*).



**Figura 2. 7:** Esquemático de um modulador óptico dual drive Mach-zehnder.

A intensidade de campo elétrico de entrada  $E_{in}(t)$  é dividido em dois guias ópticos de mesmo comprimento por meio da junção Y, frequentemente denominados de “braços”, possibilitando o controle de fase com intuito de provocar uma variação

do campo elétrico na portadora óptica [56, 57]. O sinal de saída  $E_{out}(t)$  pode ser combinado construtivamente ou destrutivamente por meio da junção Y, semelhante a utilizada na divisão do sinal de entrada. O deslocamento de fase entre os sinais ópticos combinados se interferem, provocando mudanças na intensidade da portadora óptica. De tal forma, o sinal de saída  $E_{out}(t)$  pode ser descrito por [55, 56]:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left[ e^{-i\phi_1} + e^{-i\phi_2} \right], \quad (2.1)$$

em que  $\phi_1$  e  $\phi_2$  representam as fases resultantes da aplicação das tensões de polarização  $V_{bias1}$  e  $V_{bias2}$ , respectivamente e podem ser expressas por ,

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2V_\pi} V_{e1}, \quad \phi_2 = \frac{\pi}{2V_\pi} V_{e2}, \quad (2.2)$$

sendo  $V_\pi$  a tensão de meia onda do modulador,  $V_{e1}$  e  $V_{e2}$  representa as tensões de modulação aplicadas aos eletrodos superiores e inferiores do braço, ao qual associa-se diretamente com os sinais de RF<sub>1</sub> e RF<sub>2</sub> e as tensões de polarização segue de acordo

$$V_{e1} = V_{m1} \cos(\omega_{RF1}t) + V_{bias1}, \quad V_{e2} = V_{m2} \cos(\omega_{RF2}t) + V_{bias2}, \quad (2.3)$$

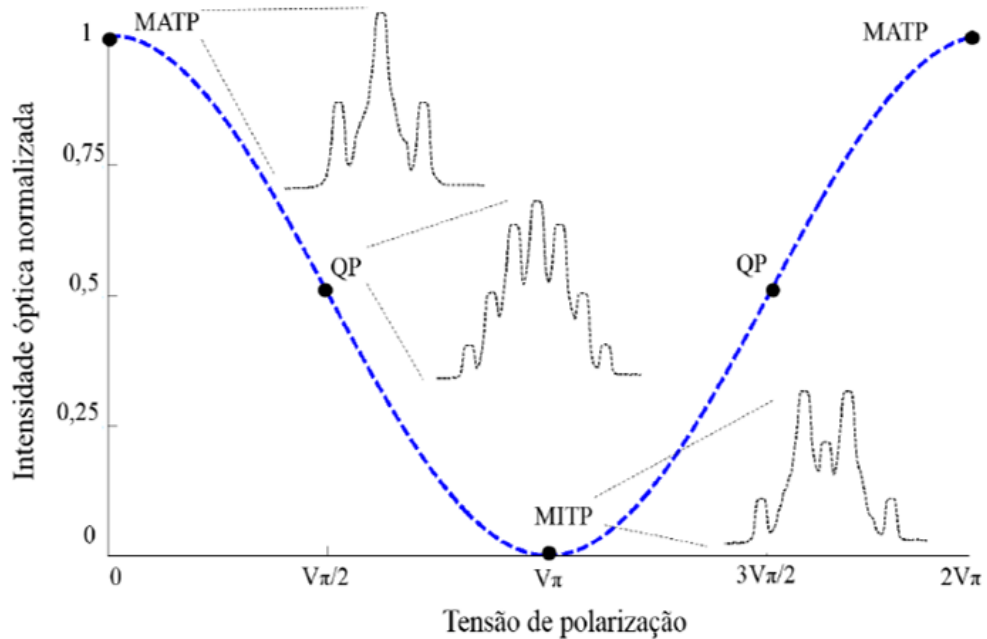
Por fim, substituindo (2.2) e (2.3) em (2.1) temos obtêm-se (2.4) que corresponde o sinal  $E_{out}(t)$  [33, 58]:

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left[ e^{-i\left(\frac{\pi}{2V_{\pi 1}} V_{m1} \cos(\omega_{RF1}t) + V_{bias1}\right)} + e^{-i\left(\frac{\pi}{2V_{\pi 2}} V_{m2} \cos(\omega_{RF2}t) + V_{bias2}\right)} \right]. \quad (2.4)$$

As variáveis  $V_{m1}$ ,  $V_{m2}$ ,  $\omega_{RF1}$  e  $\omega_{RF2}$  representam a amplitude e a frequência angular dos sinais de RF de entrada no modulador, respectivamente. A variável  $V_{bias}$  corresponde a tensão de polarização do modulador e por fim,  $V_\pi$  é a tensão de meia onda aplicado no modulador.

Os termos  $V_m$ ,  $\omega_{RF}$  e  $V_{bias}$ , alteram o modo de operação do MZM, fazendo com que o mesmo atue em três diferentes pontos de operação: ponto máximo de transmissão ( MATP, *maximum transmission point*); ponto de quadratura (QP,

quadrature point) e ponto mínimo de transmissão (MITP, *minimum transmission point*) [57,58], visto na Figura 2.8.



**Figura 2. 8:** Função de transferência normalizada de um modulador óptico mach-zehnder (Fonte [57]).

A caracterização do MATP ocorre na ausência da tensão de polarização, onde os campos elétricos da portadora óptica sofrem deslocamentos de fase iguais nos dois braços do modulador e se combinando construtivamente na saída do dispositivo. Ao aplicar uma tensão  $V_{\pi}$  ocorre o MITP, ao qual ocorre um deslocamento de fase igual a  $180^{\circ}$  entre os braços do modulador, resultando em uma combinação destrutiva e consequentemente atenuando o sinal de RF na frequência de interesse [58].

A fibra óptica, responsável por transmitir o sinal de RF pode ser considerado um dos elementos vitais de um sistema FiWi [56]. A fibra é considerada um dos melhores canais de comunicação disponíveis para transmissão de sinal de RF por possuir ampla largura de banda e baixa atenuação [54]. A fibra óptica pode ser categorizada com base no modo de propagação. A fibra monomodo (SMF, *single mode fiber*) foi projetada para permitir a propagação de apenas um único modo (o modo eletromagnético mais fundamental do sinal da onda de luz). Ele permite vários

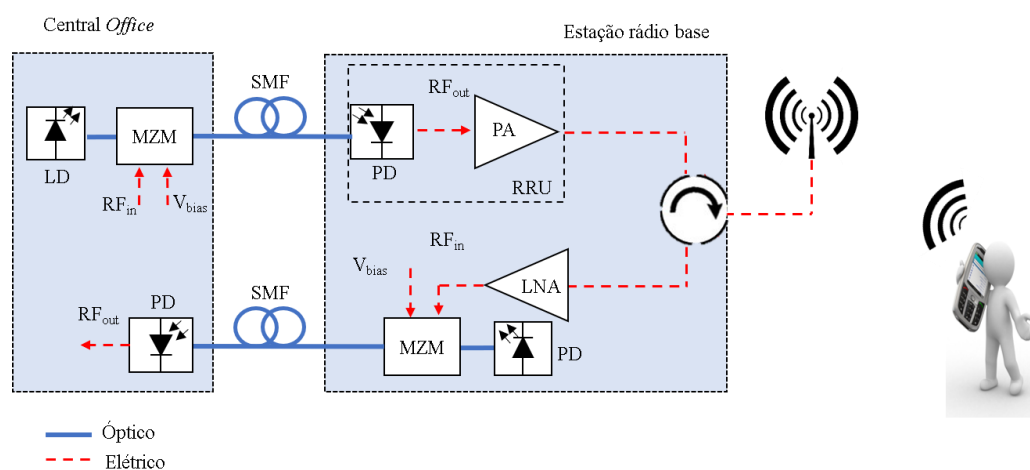
comprimentos de onda, mas apenas o modo básico de cada comprimento de onda, daí o nome. Por outro lado, a fibra multimodo (MMF) é projetada para permitir a propagação de múltiplos modos eletromagnéticos do mesmo sinal de luz de comprimento de onda. Portanto, possui uma dispersão modal relativamente grande. Possui uma área central relativamente grande. Portanto, um MMF pode trabalhar com transmissores LED de baixa potência em aplicações de curto alcance e fornecer soluções de baixo custo e baixa largura de banda em geral.

Após percorrer a extensão da fibra, o feixe óptico modulado com sinal de RF é convertido para o domínio elétrico por meio de um fotodetector. A operação de conversão O/E no receptor óptico é a terceira operação importante em um link ROF [54]. O papel de um receptor óptico é converter o sinal óptico de volta à forma elétrica e recuperar os dados transmitidos pelo sistema de onda luminosa. O seu principal componente é um fotodetector, que converte luz em eletricidade por meio do efeito fotoelétrico. O receptor óptico deve possuir as seguintes características: alta sensibilidade; resposta rápida; baixo ruído; baixo custo e alta confiabilidade. Além disso, suas dimensões devem ser compatíveis com as do núcleo da fibra. Tais requisitos são mais bem atendidos por fotodetectores feitos de materiais semicondutores. O mecanismo fundamental responsável pelo processo de fotodeteção é a absorção óptica.

O quarto estágio de um sistema FiWi é a transmissão sem fio e pode ser dividida em ambientes internos ou externos. Ambientes internos têm recursos especiais. Eles trabalham com distâncias menores do que nos ambientes externos. As condições podem variar amplamente de portas abertas ou fechadas, posição da antena, recursos de construção, espessura da parede, material de construção etc. A propagação ao ar livre pode variar significativamente, dependendo do ambiente - urbano, suburbano, rural, terreno aberto ou sobre a água. Muitos modelos estão disponíveis. Os fatores importantes a serem considerados são as alturas e a separação das antenas transmissoras e receptoras, as correções das antenas e a faixa de validade da frequência.

A Figura 2.9 ilustra o esquemático de um sistema FiWi operando tanto em *dowlink* quanto em *uplink* considerando o modo de transmissão por modulação externa e rádio analógico sobre fibra. Na central *office* concentra-se o *pool* de *BBU* ao qual o

sinal de RF modula uma portadora óptica e é transmitido ao longo do enlace de fibra SMF. Na estação rádio base a RRU concentra o receptor óptico (fotodetector), este por sua vez faz a conversão O/E e o sinal então é amplificado passando por um circulador e então irradiado por uma antena caracterizando o processo de *downlink*. O *uplink* faz o caminho reverso. O sinal do UE é transmitido para antena ao qual passa pelo circulador e chega com um nível de potência muito baixo, sendo necessário amplificar para então modular a portadora óptica de retorno. Na central *office* o fotodetector converte o sinal óptico para elétrico para ser então processado.



**Figura 2. 9:** Sistema FiWi baseado em A-RoF operando em *downlink* e *uplink*. (modificado de [57]).

## 2.3 Sistema *Free Space Optical* (FSO)

A fibra óptica é considerada como alternativa para transmissões que demandam alta vazão de dados, com valores superiores a 10 Gbps atingindo distâncias de dezenas de quilômetros sem necessidade do uso de repetidores. Tecnologias que utilizam dos benefícios da fibra óptica incluem: redes de longa distância (WAN, *wide área networks*); redes metropolitanas (MAN, *metropolitan área networks*) e redes locais (LAN, *local área network*). Entretanto, a implementação dos sistemas com fibra óptica exige atenção especial, sobretudo devido aos altos custos empregados nas instalações dos cabos. [53]

Certas aplicações de relevância utilizam-se de transmissões em ambientes abertos, como na atmosfera terrestre. Redes de acesso, redes locais, redes metropolitanas dentre outras, além de regiões montanhosas, travessias de rios ou lagos impõe certas dificuldades na instalação dos cabos ópticos. Neste contexto, a necessidade de desenvolver e aplicar um sistema que ofereça flexibilidade, rapidez para instalação e que ofereçam vantagens semelhantes aos sistemas tradicionais com fibras ópticas torna-se necessário. Um sistema que vêm atraindo interesse tanto da indústria quanto da academia é a proposta de utilização de comunicações ópticas via espaço livre (FSO) [54].

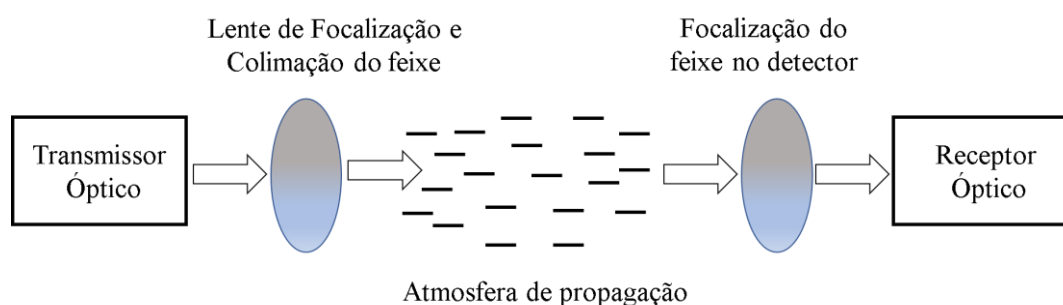
Os sistemas FSO têm a capacidade de operar com vazão de dados superiores a 1 Gbps. Podendo atuar como meio de transporte de dados, voz e vídeo com a possibilidade de instalações rápidas e temporárias, onde situações como, por exemplo, na cobertura de eventos de curta duração. Dentre algumas vantagens na utilização do FSO destaca-se: não necessita de licenciamento de espectro, como nas comunicações de RF; permite a transmissão em grandes larguras de faixa; facilidade na instalação; imunidade eletromagnética e é considerado uma boa alternativa onde ocorra interrupção da comunicação por rompimento dos cabos ópticos.

Por outro lado, as comunicações via FSO possui algumas desvantagens na sua utilização devido às alterações na atmosfera, devido ao canal atmosférico não ser estável. Ainda assim, a composição do ambiente, particularmente a névoa, fumaça, e detritos tem distribuições de tamanho de partícula semelhantes quando comparadas aos comprimentos de onda ópticos do FSO. Isso pode resultar potencialmente na quebra e absorção de feixes visíveis, degradando o desempenho do link [59-60]. Radiações advindas do espaço exterior, se manifestam em forma de ruído, com maiores efeitos causados por emissões do sol [9].

Em comprimentos de onda (em torno de 1300nm ou 1550nm) que interessam comunicações via FSO, a intensidade da radiação solar que propaga na atmosfera é aproximadamente 20% do valor máximo na faixa de luz visível. Portanto, chega no fotodetector como forma de ruído interferente do feixe óptico desejado, e ambos influirão no processo de conversão do sinal para o domínio elétrico, necessitando de filtros nos receptores para eliminar efeitos indesejados na entrega da mensagem [55].

Os sistemas FSO operam de forma semelhante aos sistemas por radiofrequência em termos de modulação, transmissão, recepção e processamento de dados [56]. Atuam em links ponto-a-ponto por meio de transceptores ópticos alinhados em visada direta sem obstáculo ao longo do percurso. A Figura 2.10 ilustra um esquema de enlace FSO.

O transmissor gera o feixe óptico, introduz a modulação e adapta o feixe para transmissão na atmosfera. Constituído geralmente por um diodo laser (LD) ou um diodo emissor de luz (LED), por um conjunto de lentes com objetivo de concentrar o feixe de luz, tornando-o mais adequado para propagação no meio atmosférico. Essa colimação do feixe por meio das lentes reduz a possibilidade de obstrução do feixe por objetos no ambiente atmosférico e minimiza os efeitos de turbulência [57, 58]. A modulação pode ser direta, com o sinal atuando na corrente da fonte óptica, ou externa, com uso de moduladores Mach-Zehnder [48].



**Figura 2. 10:** Sistema de comunicação FSO.

Na recepção do sistema utiliza-se lentes, fotodetector e o circuito eletrônico responsável por demodular o sinal recuperado. O objetivo da lente é de captar a energia do feixe incidente e concentra-lo no conjunto de acoplamento ao fotodetector fazendo com que a corrente fotogerada tenha maior proporcionalidade com a potência óptica incidente, garantindo com que o sinal elétrico recuperado tenha níveis semelhantes ao do sinal de modulação recebido.

Na propagação do feixe, os principais causadores de atenuação são os climas atmosféricos que são divididos em camadas. As camadas atmosféricas são a homosfera, troposfera, estratosfera e mesosfera [59]. Essas camadas são separadas



pelo gradiente de temperatura em relação à altura. Na comunicação do FSO, estamos preocupados com a troposfera, porque é aqui que a maioria dos fenômenos climáticos ocorre, e os links do FSO operam na porção inferior desta camada [60]. A troposfera é composta principalmente de nitrogênio (N<sub>2</sub>, 78%), oxigênio (O<sub>2</sub>, 21%) e argônio (Ar, 1%), mas também existem vários outros fatores, como a água (H<sub>2</sub>O, 0 a 7%) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, 0,01 a 0,1%), presente em menor medida. Além destes, existem outras pequenas partículas também, como neblina e poeira do solo [61] que contribuíram para a constituição do ar. As características de propagação do FSO através da atmosfera mudam drasticamente devido ao ambiente de comunicação, especialmente, o efeito das condições climáticas. Os principais efeitos na comunicação óptica sem fio são absorvidos, fragmentados e cintilados [60, 61].

Os principais fenômenos atmosféricos que podem denegrir o link FSO são listados como: o nevoeiro que pode ser descrito como um enxame de pequenas moléculas de água; fumaça; vidro ou uma combinação delas perto da superfície da Terra, dispersando assim a luz incidente e diminuindo a visibilidade [62]. O nevoeiro é o fator de atenuação mais crítico entre todos os fatores de atenuação do FSO. O espalhamento Mie é usado para calcular a atenuação em caso de gotículas de neblina. No entanto, requer informações de vários parâmetros de neblina, como distribuição de tamanho da partícula, índice de refração, tamanho da partícula, etc., que podem não ser facilmente utilizáveis em um local especial da instalação. Além disso, envolve cálculos complexos [63]. Outro caminho é usar dados de visibilidade para prever a atenuação específica. Esse modelo Kruse, Kim, [64-65]. O modelo de Kruse e Kim é o modelo dependente do comprimento de onda usado para estimar a atenuação óptica específica a partir dos dados de visibilidade.

A neve afeta os sistemas FSO espalhando a onda de luz e a potência de feixe do laser é atenuada devido à perda no nível de intensidade do sinal recebido. Quando o nível do sinal recebido diminui, ocorrem erros de bit ou falha completa do link [66]. A quantidade de atenuação da luz é proporcional à figura e tamanho da partícula de neve ou gotas da chuva [65, 66]. Como o tamanho dos flocos de neve é geralmente maior que as gotas de chuva, a flutuação da intensidade do sinal recebido será maior [67] e pode causar falha no link [68-69]. Sempre que o feixe de luz do laser passa pela partícula de neve, a potência do sinal recebido depende da extensão da

partícula e da separação do transmissor e da localização da partícula de neve em relação à seção transversal dos feixes.

A chuva é formada pelo vapor de água contido na atmosfera. Consiste em gotículas de água cuja forma e número são variáveis em tempo e local. Sua forma depende do tamanho: são consideradas esferas até um raio de 1 mm e além disso como esferóides oblatos: elipsóides achatados da revolução [65]. A dispersão devido à chuva é chamada dispersão não seletiva, porque o raio das gotas de chuva (100 – 1000  $\mu\text{m}$ ) é significativamente maior que o comprimento de onda dos sistemas FSO típicos. O laser é capaz de atravessar a partícula de gota de chuva, com menos efeito de dispersão. As partículas de neblina são realmente baixas e permanecem mais tempo no ar, mas as partículas de chuva são realmente grandes e permanecem mais curtas na aura. Esta é a principal razão pela qual a atenuação via chuva é menor que a neblina. Um detalhe interessante é que as tecnologias sem fio de radiofrequência que usam frequências acima de 10 GHz são afetadas negativamente pela chuva e pouco afetadas pelo nevoeiro. Isso ocorre devido à correspondência próxima dos comprimentos de onda de radiofrequência com o raio das gotas de chuva, sendo ambos maiores que as gotículas de umidade no nevoeiro [64-65].

## 2.4 Transceptor 5G para Áreas Remotas

Os esforços para o desenvolvimento de uma rede móvel revolucionária estão levando o 5G a cobrir uma ampla gama de requisitos conflitantes. Um cenário importante para países de grande porte como o Brasil recebeu atenção parcialmente pelos órgãos padronizadores. A conectividade sem fio à Internet em áreas remotas e rurais é um futuro importante para as redes 5G para oferecer suporte a vários cenários, como: fazendas inteligentes; cobertura de estradas e monitoramento de desastres ambientais. Além disso, uma rede móvel para áreas remotas pode trazer uma grande parcela da população não conectada para a era da informação. O raio da célula dessa rede pode atingir até 50 km, ao mesmo tempo em que fornece até 100 Mbps na extremidade, permitindo a implantação de rede móvel a preços acessíveis em áreas remotas. Esta seção apresenta o transceptor 5G para áreas remotas, que foi desenvolvido no contexto para o projeto de 5ª geração (5G-RANGE) [70] para fornecer

conectividade em áreas remotas e rurais para diferentes aplicações, satisfazendo os requisitos técnicos e econômicos para operação em áreas remotas.

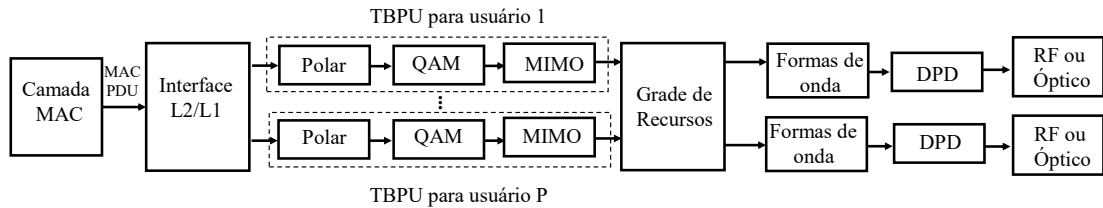
As aplicações em áreas remotas e rurais exigem requisitos diferentes, desde baixa latência para controle de maquinário rural até conectividade de banda larga para monitoramento por vídeo de safras e gado [71]. A Tabela II mostra os principais requisitos endereçados pela camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC) descritas nesta seção. Um alto rendimento é necessário para fornecer acesso de banda larga à Internet para aqueles que vivem em áreas sem cobertura de sinal. A cobertura de longo alcance é importante para aumentar o número de assinantes por celular, reduzindo o número de estações necessárias para a prestação do serviço. Além disso, a célula de longo alcance é importante para a cobertura de estradas. A baixa latência é necessária para controlar máquinas autônomas, como colheitadeiras ou drones para o agronegócio. O custo do espectro licenciado é proibitivo em áreas remotas e rurais, portanto, a rede deve explorar bandas de frequência ociosas como usuário secundário. A exploração do espaço em branco da TV é uma solução interessante, uma vez que a ocupação da TV em áreas rurais e remotas são baixas. No entanto, os usuários primários devem ser protegidos, e a forma de onda utilizada pela rede secundária deve apresentar baixíssima emissão fora de banda, podendo empregar blocos de espectro descontínuos sem causar interferência em tecnologias legadas [72-73].

**Tabela 2. 3:** *Requisitos para redes que atendam áreas remotas e rurais.*

<b>Requerimentos</b>	<b>Valores</b>
Taxa de transmissão	100 Mbps
Cobertura	50 km
Latência	20 ms
Faixa de frequências	Não licenciada
Alocação de espectro	Fragmentado, secundário
Emissão fora da banda	-50 dBc sem filtros de RF

O transceptor proposto para aplicações em áreas remotas e rurais usa as mais recentes técnicas de comunicação digital para superar os desafios canais

duplamente dispersivos. A Fig. 2.11 apresenta o diagrama em blocos básico do transmissor proposto.



**Figura 2. 11:** Diagrama em blocos do nosso transmissor 5G.

Os dados da camada de controle de acesso de mídia (MAC, *media access control*) são entregues a camada física (PHY) usando uma interface L2/L1. O MAC referente a unidade de dados de protocolo (PDU, *protocol data unit*) contém todas as informações de controle para a alocação de recursos e configuração do esquema de codificação de modulação (MCS, *modulation coding scheme*), bem como os dados a serem transmitidos no quadro. Os dados são processados individualmente para cada usuário, pela Unidade de Processamento de Bloco de Transporte (TBPU, *transport block processing unit*), que é responsável pela codificação do canal, modulação de amplitude de quadratura (QAM), codificador de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) e inserção de sinalização auxiliar. O transceptor emprega o código Polar como correção direta de erros (FEC) devido à sua baixa complexidade e alta capacidade de correção de erros. A taxa de código é flexível e pode assumir diferentes valores. A punção é usada para melhorar ainda mais a flexibilidade. O mapeador QAM pode usar a ordem de modulação  $J = 2^p$ , para  $p = \{2, 4, 6, 8\}$  [74- 76].

Neste transceptor, dois esquemas MIMO foram implementados para objetivos diferentes. Para os usuários próximos à estação base, onde a relação sinal-ruído ( $\text{SNR}$ , *Signal-to-Noise Ratio*) é alta o suficiente, o sistema MIMO é utilizado para aumentar a taxa de transmissão da rede, portanto, é empregado a multiplexação espacial. Para o usuário localizado longe da estação base, o esquema MIMO é utilizado para aumentar a robustez, proporcionando diversidade. Neste caso, um código de bloco espaço-tempo (STBC, *Space-Time Block Code*) é usado. A decisão sobre qual esquema MCS ou MIMO será utilizado para cada usuário é baseada em um parâmetro de qualidade de

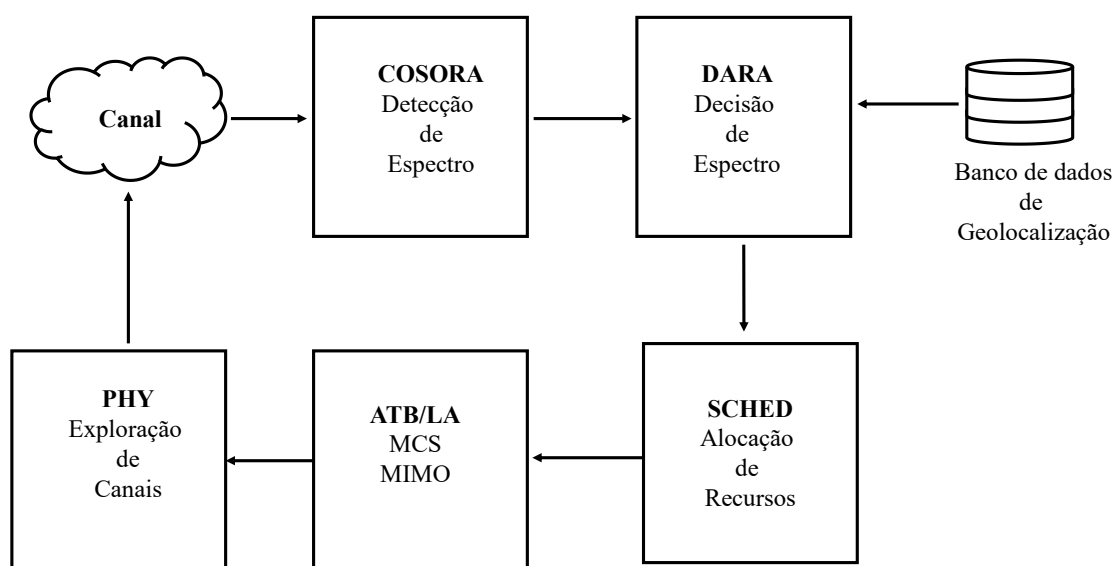
feedback enviado pelo equipamento do usuário a estação base, denominado indicador de qualidade do canal (CQI, *channel quality indicator*). Tal parâmetro é avaliado pelo usuário com base na SNR recebida ou na taxa de erro de bit percebida. O CQI baixo aciona a estação base para usar MCS e STBC mais robustos para um determinado usuário, enquanto o CQI alto aciona a estação base para usar CQI eficiente de espectro e multiplexação no espaço [77, 78].

Após a codificação MIMO, as amostras de dados são organizadas em uma grade de frequência e tempo, na qual a sinalização piloto é inserida. Um modulador de forma de onda é aplicado para produzir o sinal em banda base a ser transmitido. O transceptor pode empregar três formas de onda diferentes: OFDM [79], multiplexação por divisão ortogonal de frequência filtrada (F-OFDM) [80] e GFDM [81]. OFDM é a forma de onda mais comum em sistemas sem fio hoje em dia devido à sua simplicidade e robustez contra desvanecimentos de canais em múltiplos percursos. OFDM usa  $K$  subportadoras ortogonais para transmitir  $K$  amostras de dados, usando um formato de pulso quadrado. Portanto, OFDM tem emissão fora da faixa muito alta. F-OFDM é uma derivação de OFDM, mas com filtro de banda base aplicado a toda a largura de banda. Este filtro reduz a emissão fora da faixa, enquanto mantém a ortogonalidade dentro da largura de banda total. GFDM é uma nova forma de onda que usa  $K$  subportadoras e  $M$  subsímbolos para transmitir símbolos de dados  $N = KM$ . Um protótipo de Resposta ao Impulso do Filtro (FIR, *filter impulse response*) é  $K$  vezes ciclicamente alterado na frequência e  $M$  vezes ciclicamente alterado no tempo para produzir um conjunto de  $N$  FIRs, um para cada símbolo de dados. Os FIRs modulados são adicionados juntos e um prefixo cíclico (CP, *cyclic prefix*) é adicionado para proteger o sinal de multipercuso no canal. A filtragem de subportadora reduz a emissão fora da faixa, que pode ser ainda mais reduzida usando uma janela de tempo aplicada sobre o sinal modulado. A janela de tempo suaviza a transição de um bloco para o outro, melhorando a localização da frequência do sinal. O GFDM com janela de tempo pode atingir emissões fora da faixa abaixo de -50 dBc.

Por fim, os sinais fornecidos pelos moduladores GFDM são aplicados a pré-distorção digital (DPD, *Digital Pre-Distortion*). Este bloco é responsável por compensar as não linearidades introduzidas pelos amplificadores de potência. O sinal pré-distorcido é deslocado para a frequência operacional de passagem de banda e

amplificado antes de ser aplicado à antena de transmissão para comunicação sem fio ou aplicado ao sistema óptico. No lado do receptor, todos os processos descritos para o transmissor são revertidos e a PDU recuperada é entregue à camada MAC pela interface L1 / L2.

A camada MAC implementada no transceptor é responsável pelo controle do PHY, definindo o esquema MCS e MIMO a ser utilizado por cada usuário, de acordo com o CQI correspondente. A camada MAC também é responsável pela alocação de recursos na grade de tempo-frequência e pela alocação de espectro. Esta é uma das principais inovações nesta camada MAC, visto que o uso secundário dos canais ociosos é uma demanda para operação em áreas remotas e rurais, a camada MAC deve ser capaz de definir quais canais estão disponíveis na região onde a rede está sendo implantada. Conforme representado na Fig. 2.12, a camada MAC usa um mecanismo cognitivo para decidir sobre a alocação de canal com base na detecção de espectro realizada por usuários selecionados. A estação base comanda os usuários para medir os canais potencialmente disponíveis usando o bloco de sensoriamento de espectro colaborativo otimizado para áreas remotas (COSORA, *Collaborative Spectrum Sensing Optimized for Remote Areas*) [82].



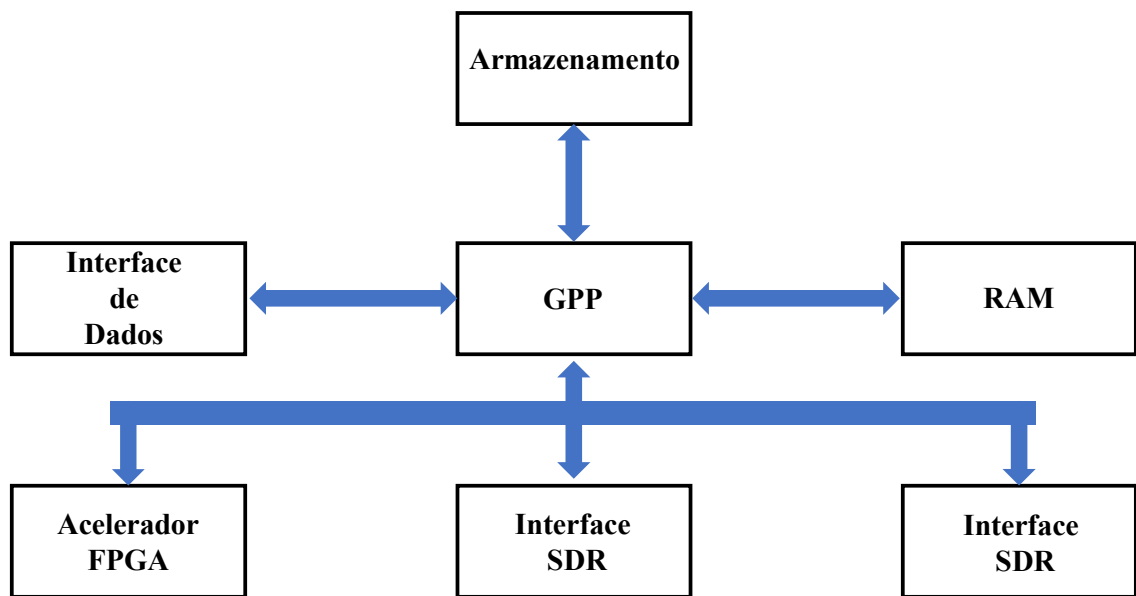
**Figura 2. 12:** Diagrama em blocos da camada MAC.

Depois de realizar a detecção de espectro, os usuários reportam seus resultados individuais a estação base que funde todas as medições para obter uma decisão final sobre a disponibilidade dos canais usando o bloco de espectro dinâmico e alocação de recursos para áreas remotas (*dynamic spectrum and resource allocation for remote areas*, DARA) [82]. Este bloco também consulta um banco de dados de geolocalização que lista os canais disponíveis de acordo com o regulador de espectro.

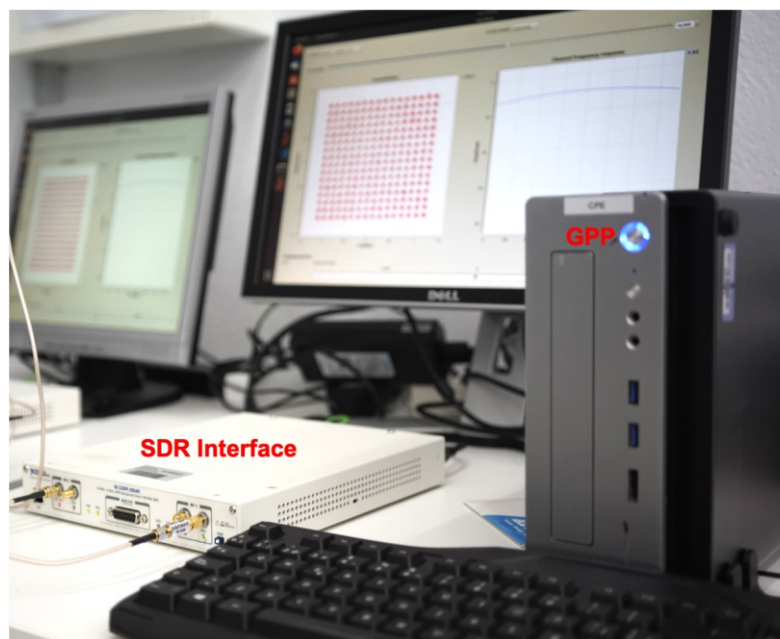
O *Scheduler* é responsável por alocar os dados do usuário nos canais selecionados. Observe que a alocação de espectro fragmentado (FSA, *fragmented spectrum allocation*) [83] pode ser usado para explorar pedaços de espectro entre sinais de TV. Finalmente, os blocos de largura de banda de transmissão adaptativa (ATB, *adaptive transmission bandwidth*) e adaptação de Link (LA, *link adaptation*) definem qual esquema MCS e MIMO a ser usado para transmitir e receber os dados de um determinado usuário.

O transceptor 5G-RANGE foi implementado usando a abordagem de rádio definido por software (SDR, *software-defined radio*). Uma plataforma baseada em processador de uso geral (GPP, *general purpose processor*) foi usada para processar todos os sinais de banda base, enquanto um *front-end* de rádio, denominado interface SDR e conectado ao GPP por meio de um barramento expresso de interconexão de componente periférico (PCI, *Peripheral Component Interconnect*), fornece uma interface com as antenas de transmissão e recepção ou o sistema óptico. Uma placa de matriz de portas programáveis em campo (FPGA, *field programmable gate array*) é usada como acelerador de hardware para blocos que precisam de alto paralelismo, como o decodificador Polar. A Fig. 2.13 descreve o diagrama em blocos básico da plataforma transceptora 5G-RANGE.

O transceptor 5G proposto representa uma solução de baixo custo e alta flexibilidade, já que computadores prontos para uso podem ser usados para implementar sistemas de comunicação de última geração. A Figura 2.14 mostra uma imagem do transceptor, onde um minicomputador pessoal (PC) é usado como GPP e um software periférico de rádio universal (USRP, *universal software radio peripheral*) da National Instruments modelo 2954R é usado como acelerador FPGA e interface SDR.



**Figura 2. 13:** Diagrama em blocos da plataforma SDR.



**Figura 2. 14:** O transceptor 5G-RANGE.

O transceptor 5G-RANGE baseado nesta plataforma atinge alto desempenho em termos de taxa de transferência e emissão fora da faixa. A Figura 2.15 (a) relata que o transceptor é capaz de fornecer até 125 Mbps, enquanto 2.15 (b) mostra a emissão fora da faixa abaixo de -58 dBc sem qualquer filtragem de RF.



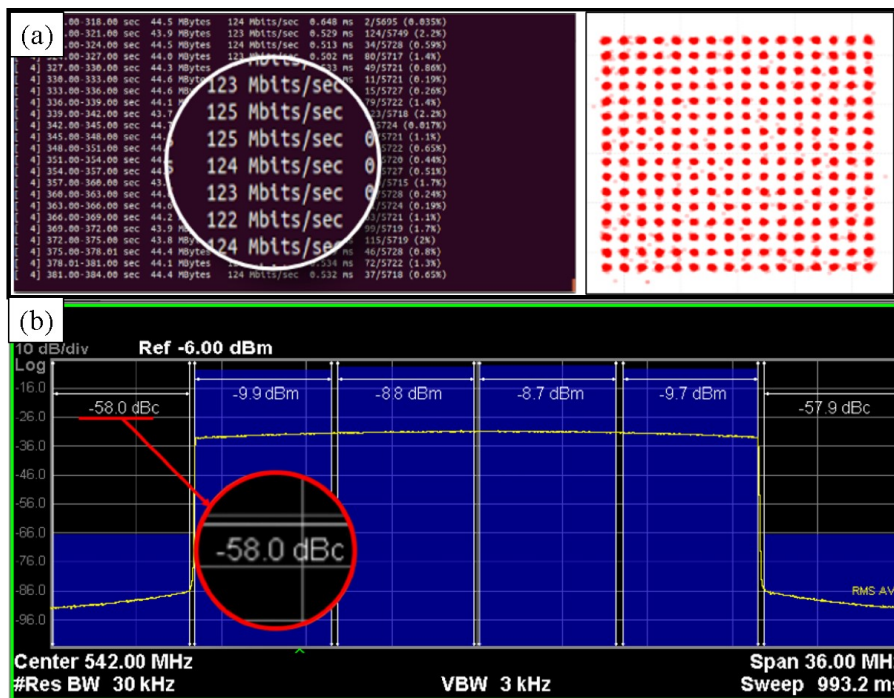


Figura 2.15: (a) Taxa máxima de dados do transceptor SDR (b) Desempenho do SDR para emissão fora da faixa.

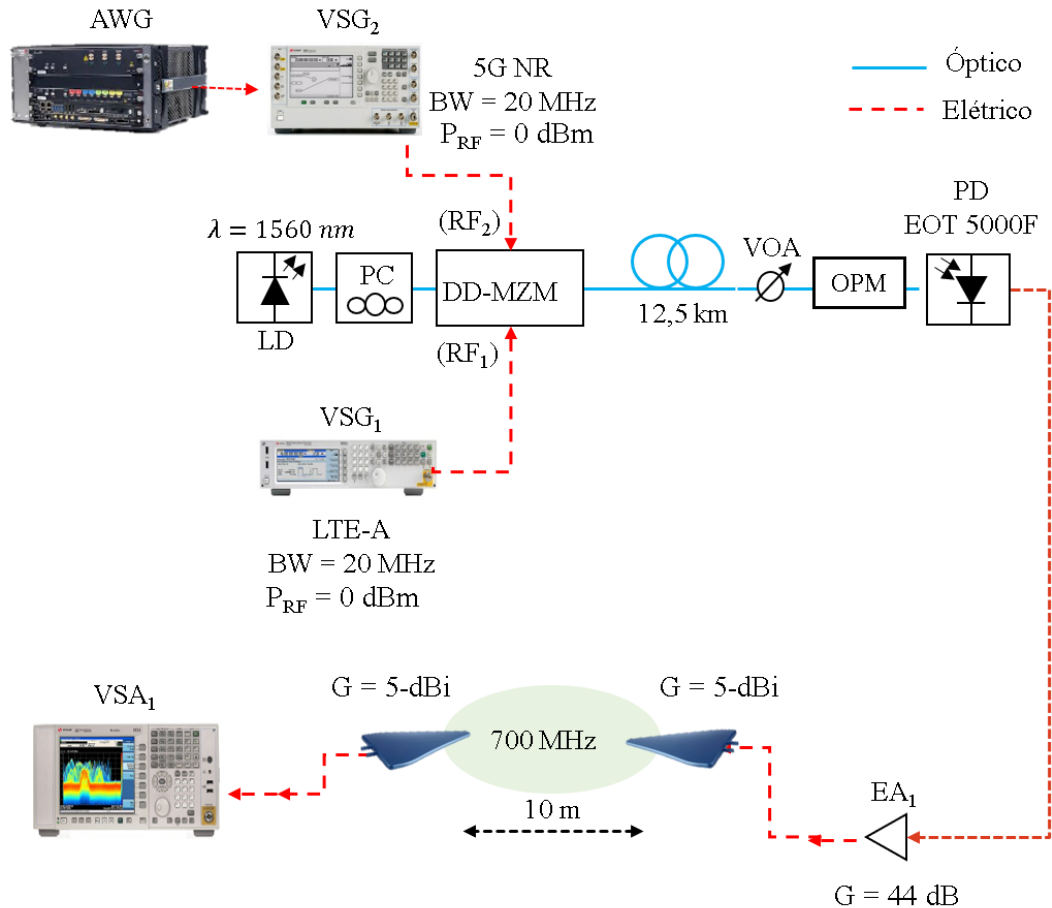
## 3 - Implementações 5G NR com *Fronthauls* em Fibra óptica

### 3.1 Coexistência entre 5G NR e LTE-A em Sistemas FiWi

A investigação de desempenho do sistema FiWi proposto considerou o cenário WRAN, operando na faixa de frequência de 700 MHz. A Figura 3.1 ilustra o diagrama em blocos do sistema FiWi proposto, que explora uma solução A-RoF baseada em modulação externa e detecção direta. Em síntese, um gerador de sinais vetoriais (VSG<sub>1</sub>) EXG (N5171B) da Keysight gerou o sinal LTE-A (RF<sub>2</sub>) em 778 MHz, o qual é configurado *offline*, por meio do programa Signal Studio. Utilizou-se sinais com largura de faixa de 20 MHz e modulação 16-QAM e 64-QAM. Um gerador de formas de onda arbitrárias (AWG M9505A), em conjunto com o programa Signal Studio, gerou o sinal no padrão 5G NR (RF<sub>1</sub>) em banda base com largura de faixa de 20 MHz e modulações 16- e 64-QAM. Posteriormente, um segundo gerador de sinais vetoriais (VSG<sub>2</sub>) também da Keysight (PSG E8267D) realizou a conversão do sinal de banda base para a banda de 700 MHz.

Um modulador Mach-Zehnder de acionamento duplo (DD-MZM, *Dual Drive Mach-Zehnder Modulator*) modula uma portadora óptica em 1560 nm proveniente do laser com dois sinais de RF distintos. O feixe óptico é então lançado em uma fibra monomodo com potência óptica de 4 dBm proveniente do laser. Em relação aos níveis de potência, os sinais RF<sub>1</sub> e RF<sub>2</sub> foram transmitidos à 0 dBm, enquanto o fotodetector recebeu potência óptica fixa de -2 dBm. O comprimento do enlace de fibra óptica foi de 12,5 km e na recepção utilizou-se um atenuador óptico variável e um monitor de potência óptica para variar e monitorar, respectivamente, a potência óptica no

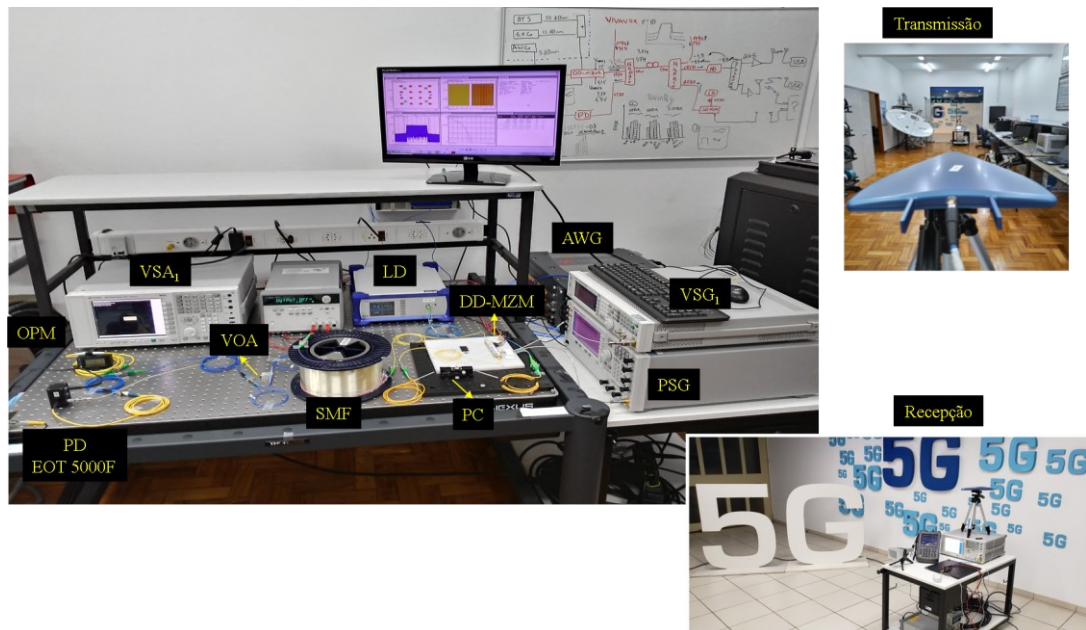
fotodetector (PD) EOT 5000F. Após a fotodetecção, os sinais já convertidos para o domínio elétrico, foram demodulados e analisados em função do  $EVM_{RMS}$  utilizando um analisador de espectro da Keysight (MXA N9020A) representado por VSA<sub>1</sub>.



**Figura 3. 1:** Diagrama em blocos do sistema FiWi proposto: AWG – Arbitrary Waveform Generator; VSG - Vector Signal Generator; VSA - Vector Signal Analyser; LD – Laser Diode; PC – Polarization Controller; DD-MZM – Dual Drive Mach-Zehnder Modulator; SMF – Single Mode Fiber; VOA – variable optical attenuator; OPM – optical power monitor; EA -Electrical Amplifier; PD - Photodetector..

Inicialmente, realizou-se a caracterização do sistema RoF, em função das tensões de polarização  $V_{bias1}$  e  $V_{bias2}$ , potência óptica recebida e potência elétrica dos sinais RF<sub>1</sub> e RF<sub>2</sub>. Com isto, obteve-se os níveis de grandezas que resultaram em valores ótimos de  $EVM_{RMS}$ . Sequencialmente, realizou-se a análise de coexistência entre os sinais, a qual consistiu em fixar o sinal LTE-A em 778 MHz e deslocar a frequência de portadora do sinal 5G NR, com objetivo de encontrar o espaçamento mínimo entre

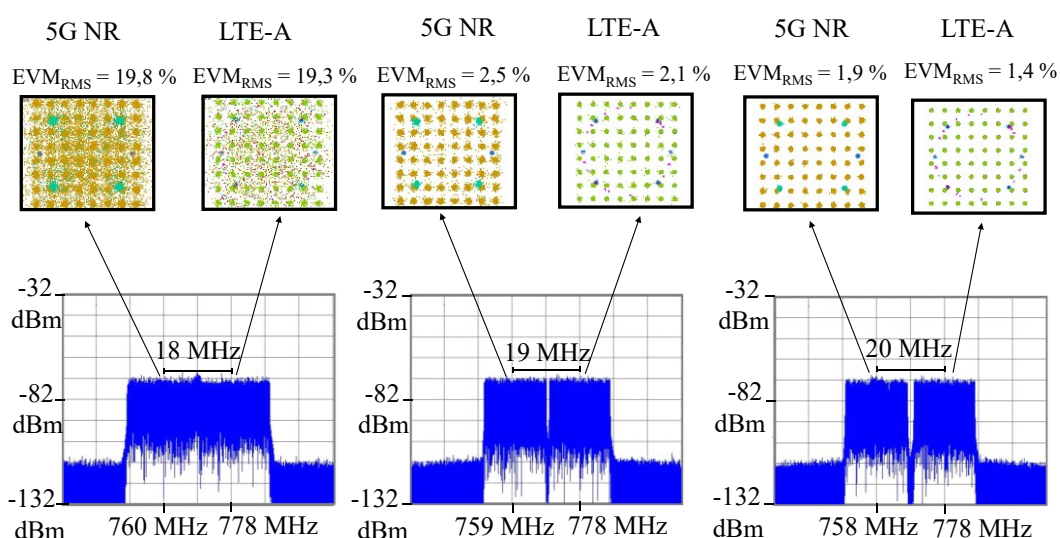
os sinais, que não produza interferência mútua significativa. Os valores de  $EVM_{RMS}$  obtidos foram comparados com as especificações do 3GPP para versão do *Release 15*. valores limites de 12,5% e 8% para modulação 16- e 64-QAM, respectivamente. A Figura 3.2 apresenta o setup experimental.



**Figura 3. 2:** Setup experimental do sistema FiWi proposto.

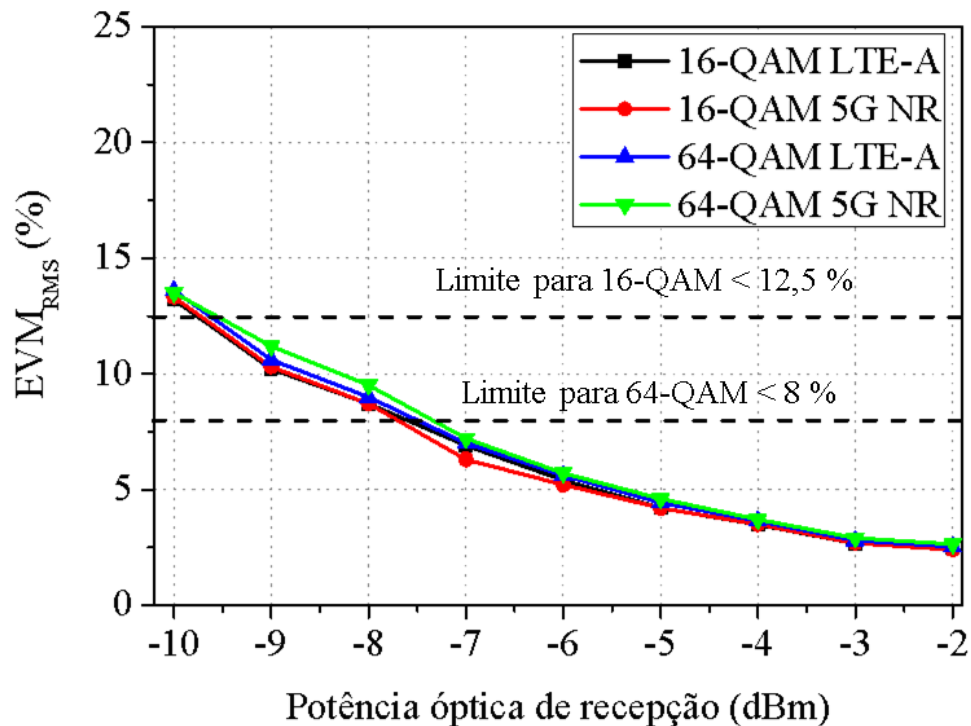
A Figura 3.3 apresenta uma investigação experimental do desempenho de  $EVM_{RMS}$  em função do deslocamento de frequência entre os sinais LTE-A e 5G NR na faixa de 700 MHz. Para análise de coexistência, utilizou-se níveis de potência óptica e de RF de -2 e 0 dBm, respectivamente. A frequência central do sinal 5G NR foi variada entre 760, 759 e 758 MHz, respectivamente. Para *offset* de frequência de 18 MHz ocorreu uma sobreposição espectral de 2 MHz entre os sinais, resultando em níveis de  $EVM_{RMS}$  acima de 19 % o que ultrapassa os limites especificados pelo 3GPP, tornando o sistema inadequado para operação. As subportadoras que continham dados foram extremamente afetadas em consequência desta sobreposição, tendo em vista a constelação dispersa apresentada para o canal físico de transmissão (*Physical Broadcast Channel, PDSCH*) dos sinais 5G NR e LTE-A, apresentados na Figura 3.3. Por outro lado, um *offset* de 19 MHz garantirá que o nível de  $EVM_{RMS}$  esteja abaixo de 3%. Para este deslocamento, ocorre sobreposição espectral de 1 MHz entre os sinais, no entanto

esta sobreposição não afeta significativamente os sinais após o *fronthaul* óptico. O deslocamento de 20 MHz apresenta níveis de  $EVM_{RMS}$  ainda menores, na ordem de 1,9 % e 1,4 % para os sinais 5G NR e LTE-A respectivamente. Vale ressaltar os símbolos bem definidos com que é apresentada a constelação referente ao canal PDSCH modulado em 64-QAM para ambos os sinais, comprovando a possibilidade de coexistência entre as tecnologias 4G e 5G para aplicações de longo alcance.



**Figura 3. 3:** Análise de coexistência entre os sinais LTE-A e 5G NR, na banda de 700 MHz em função do deslocamento em frequência em um sistema RoF.

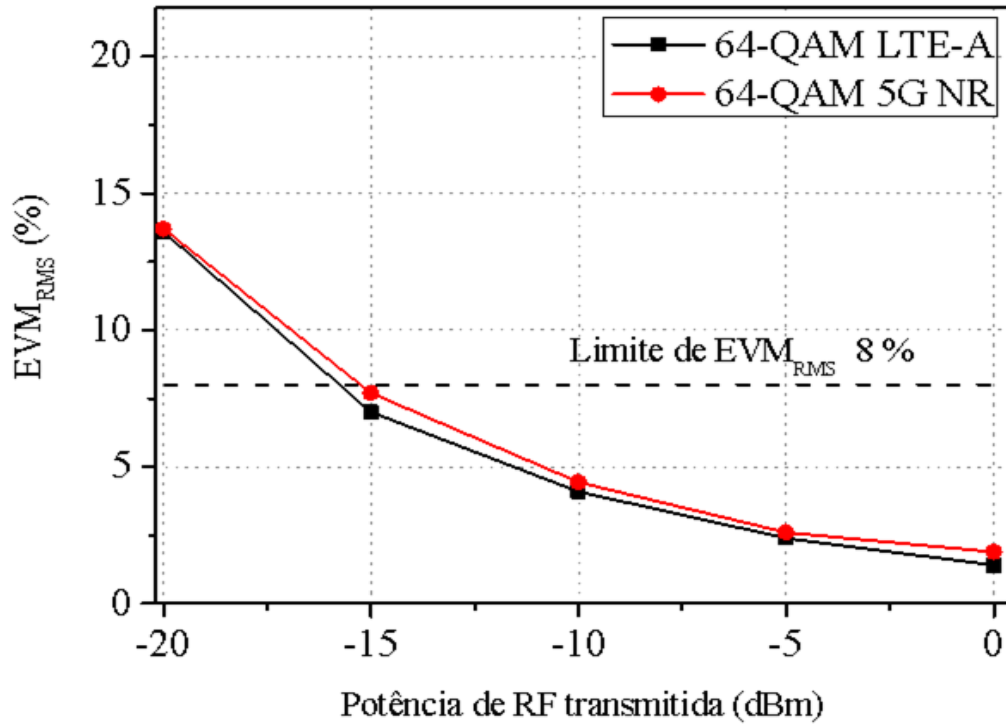
A Figura 3.4 apresenta os resultados de  $EVM_{RMS}$  em função da potência óptica no fotodetector para os sinais LTE-A e 5G NR espaçados de 19 MHz entre as portadoras. A potência de RF de transmissão manteve-se em 0 dBm para ambos sinais, enquanto que a potência óptica de recepção foi variada de -10 a 0 dBm. Para ordem de modulação 16-QAM, os sinais LTE-A e 5G NR apresentaram valores de  $EVM_{RMS}$  abaixo dos limites estipulados pelo 3GPP para potência óptica igual ou superior a -9,6 dBm. Para ordens de modulação de 64-QAM, necessitou-se de um acréscimo de potência óptica de 2 dB adicionais para atender os limites de  $EVM_{RMS}$  do 3GPP. Com o aumento da potência óptica recebida, conseguiu-se aumentar a vazão de 67,2 Mbps para 100,8 Mbps para o sinal LTE-A e de 54 Mbps para 82 Mbps para o sinal 5G NR.



**Figura 3. 4:**  $EVM_{RMS}$  em função da potência óptica no fotodetector.

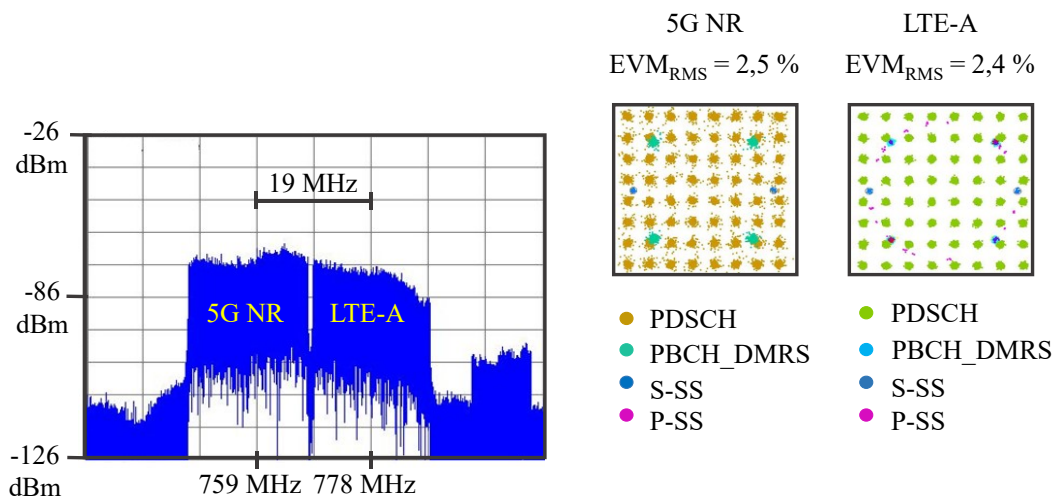
A Figura 3.5 relata a caracterização do sistema FiWi em função da potência de RF transmitida. Para esta caracterização um valor de potência óptica de 0 dBm na recepção foi mantida com deslocamento de frequências de 19 MHz e ordem de modulação 64-QAM. Para variações na potência de RF entre -20 a -15,8 dBm, os limites de  $EVM_{RMS}$  estipulados pelo 3GPP ultrapassaram o nível de 8%, o que é proibitivo para ordem de modulação utilizada que foi o 64-QAM. O nível de potência de RF de 0 dBm apresentou níveis de  $EVM_{RMS}$  de apenas 1,9 % e 1,4 % para os sinais 5G NR e LTE-A, respectivamente.

De posse dos valores do deslocamento de frequência igual a 19 MHz, da potência óptica de recepção de 0 dBm e da potência transmitida de RF igual a 0 dBm, realizou-se uma transmissão sem fio em uma femtocélula de 10 metros, como prova de conceito. Na saída do fotodetector, um estágio de amplificação de 44 dB foi adicionado para compensar as perdas do enlace sem fio. Antenas log-periódica (AARONIA HyperLOG 7040) faixa-larga com ganho de 5-dBi foram responsáveis por transmitir e receber os sinais LTE-A e 5G NR. Na recepção, um analisador de espectro da Keysight (MXA N9020A) foi responsável por demodular e analisar os sinais.



**Figura 3. 5:**  $EVM_{RMS}$  em função da potência de RF transmitida.

A Figura 3.6 apresenta os espectros obtidos na recepção do sistema FiWi e as respectivas constelações. Nota-se que um espaçamento mínimo de 19 MHz foi suficiente para que as tecnologias coexistam, utilizando a mesma infraestrutura de *fronthaul* móvel. As constelações estão claras e com os símbolos bem definidos, perfazendo  $EVM_{RMS}$  de 2,5 % e 2,4 % para 5G NR e LTE-A, respectivamente.



**Figura 3. 6:** Espectro de saída do sistema FiWi proposto para transmissão de sinais 4G e 5G.



## 3.2 Sistema FiWi baseado em A-RoF para múltiplas aplicações

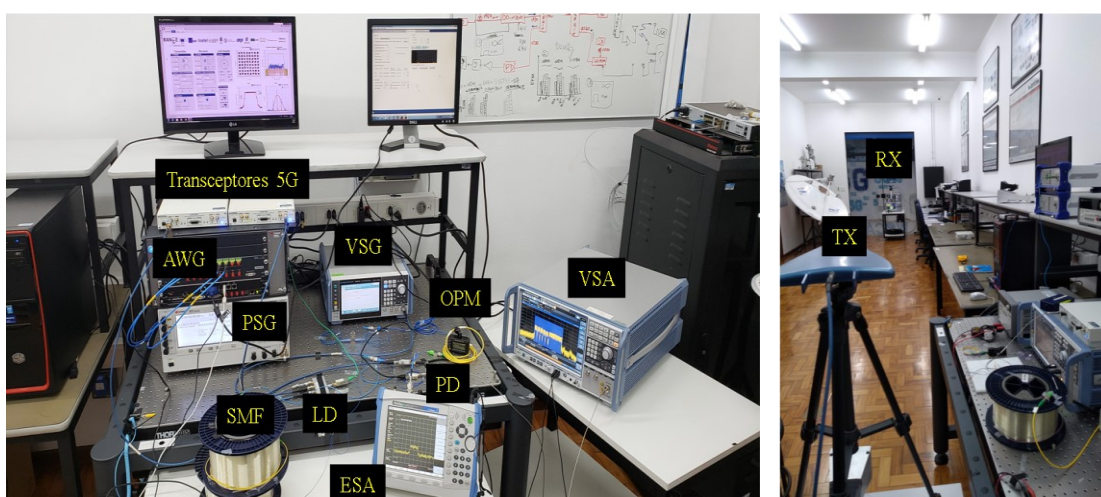
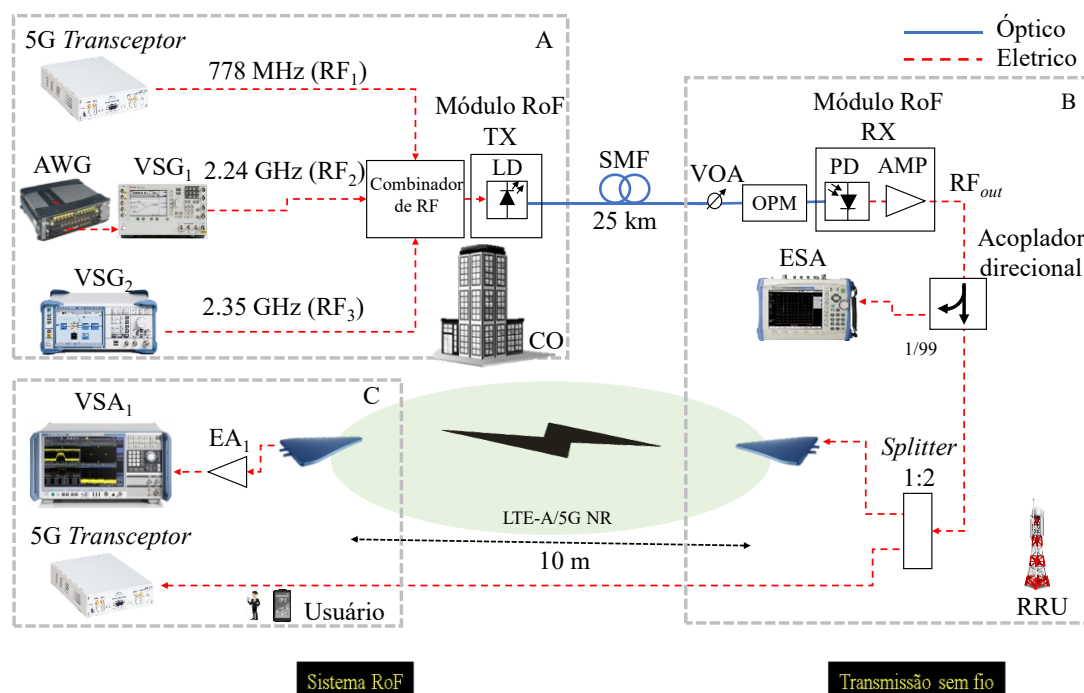
A implementação do sistema FiWi para múltiplas aplicações utilizando *fronthaul* de fibra óptica, foi baseada na transmissão e distribuição simultânea de diferentes sinais de RF aproveitando a tecnologia de rádio analógico sobre fibra. Este sistema permite transmitir simultaneamente sinais de banda larga para áreas remotas, sem a necessidade de conversores analógico-digital e digital-analógico, simplificando as unidades remotas instaladas nas estações rádio base.

Modulação e detecção direta são técnicas empregadas também pelos sistemas RoF devido à simplicidade e menor custo em relação a outras abordagens, como modulação externa e detecção coerente. A Figura 3.7 ilustra um diagrama de blocos da arquitetura proposta. De acordo com o conceito C-RAN, o esquema é dividido em três partes principais: CO, RRU e usuário final, conforme indicado pelos marcadores da figura nos pontos A, B e C, respectivamente. A rede de transporte considera o *fronthaul* de 25 km baseado em fibra monomodo, conectando CO com RRU, além do link sem fio de 10 m, conectando a RRU à unidade de usuário final.

No CO, o *transceptor* 5G gera o primeiro sinal de RF ( $RF_1$ ), correspondente a um sinal F-OFDM de largura de faixa de 10 MHz, com frequência de transmissão em 778 MHz e modulação 64-QAM, para aplicações WRAN. O AWG da Keysight (M8190A) executando o *software* Signal Studio gera cinco sub-bandas LTE-A com modulação 256-QAM utilizando agregação de portadoras em banda base. Essas sub-bandas são sequencialmente convertidas para frequência central de 2,24 GHz por meio do VSG<sub>1</sub> (PSGE8267D), também da Keysight, dando origem ao segundo sinal de RF ( $RF_2$ ) com largura de faixa total de 100 MHz e é voltado para aplicações eMBB externos. Além disso, um VSG<sub>2</sub> (SMBV100B) da Rohde & Schwarz fornece o terceiro sinal de RF ( $RF_3$ ) a ser transmitido, correspondendo ao padrão 5G NR de acordo com o 3GPP *Release* 15. De maneira semelhante ao sinal LTE-A, o  $RF_3$  possui ordem de modulação 256-QAM e largura de faixa de 100 MHz visando atender o cenário eMBB. No entanto, está centrado em 2,35 GHz. Também na CO, um combinador de RF combina todos os sinais de RF gerados que vão para o estágio de conversão eletro-óptico (E/O) por meio de um módulo RoF comercial (OZ101mini TX). Basicamente,



este é composto por um laser (*Distributed Feedback*, DFB) com potência óptica de saída fixa de 4 dBm e comprimento de onda centrado em 1551 nm, uma entrada de RF, uma entrada de fonte de alimentação DC e uma saída óptica. Dessa maneira, os sinais de RF modulam simultaneamente a portadora óptica em 1551 nm, que é então lançada no *fronthaul* óptico.

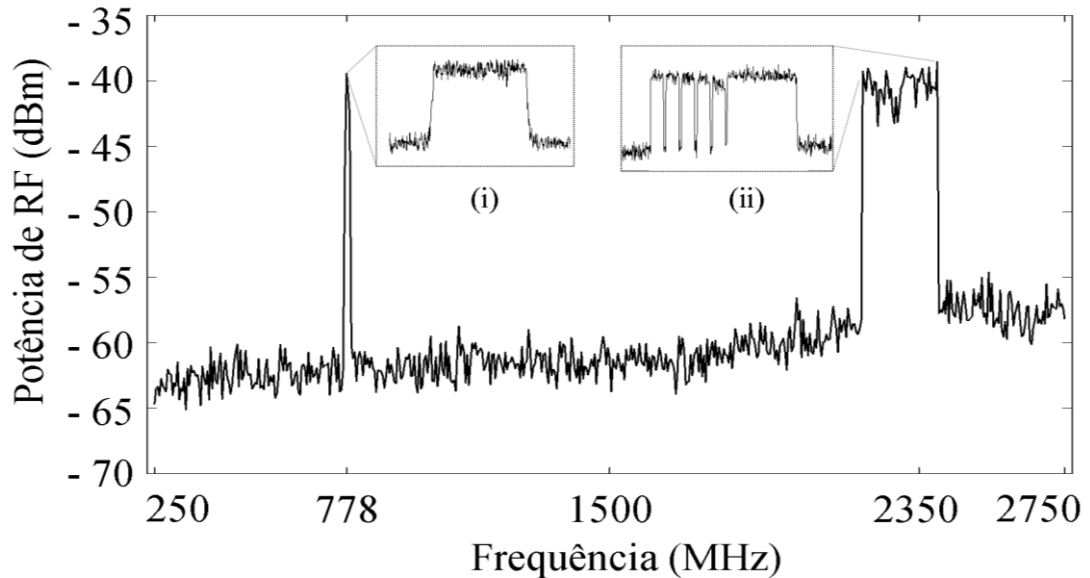


**Figura 3. 7:** Sistema FiWi proposto para operação non-standalone baseado na transmissão de rádio analógico sobre fibra (A-RoF). AWG – Arbitrary Waveforms Generator; VSG – Vector Signal Generator; DPX – Diplexer; LD – Laser Diode; SMF – Single Mode Fiber; VOA – Variable Optical Attenuator.

Na RRU, um VOA e um OPM são usados para variar e medir a potência óptica na entrada do fotodetector, respectivamente. O VOA e o OPM emulam nossa caracterização experimental e não são necessários em uma implantação comercial, que pode aplicar a conversão óptico-elétrico (O/E) como o primeiro estágio na RRU. Na configuração implementada, um segundo módulo RoF comercial (OZ101mini RX) realiza a conversão de O/E usando detecção direta. Vale ressaltar que esse dispositivo se beneficia da amplificação elétrica integrada de 22 dB. Os sinais de RF recuperados e amplificados são então submetidos a um acoplador direcional, que fornece uma amostra do campo elétrico com 1% da energia total para um analisador de espectro elétrico BTS ES8222A (ESA) da Anritsu que mede/monitora RF<sub>1</sub>, RF<sub>2</sub> e RF<sub>3</sub>. Paralelamente, o acoplador direcional fornece 99% da energia total a um divisor de potência 2:1, usado para criar duas versões dos sinais de RF. Um deles é direcionado e conectado a outro *transceptor* 5G usando um link com cabos de RF, enquanto o segundo alimenta uma antena comercial (AARONIA HyperLOG 7040, com ganho de 5-dBi nas frequências trabalhadas) para transmissão sem fio. Vale ressaltar que o sinal F-OFDM proveniente do *transceptor* 5G não foi irradiado, tendo em vista, que o propósito deste sinal era de alimentar uma estação rádio base. Finalmente, o bloco receptor do *transceptor* 5G demodula o sinal F-OFDM em 778 MHz na unidade de usuário, enquanto outra antena AARONIA HyperLOG 7040 (idêntica à anterior) recebe RF<sub>2</sub> e RF<sub>3</sub> também no usuário final. Após um estágio de amplificação elétrica de 40 dB, um analisador de sinal vetorial FSW-8351 (VSA<sub>1</sub>) da Rohde & Schwarz realiza as medições dos sinais LTE-A e 5G NR.

Dividimos a investigação experimental em duas etapas, a saber: análise do sistema RoF e análise do sistema FiWi. Primeiramente, o espectro elétrico na saída do módulo receptor RoF é ilustrado na Figura 3.8, assumindo -6 dBm de potência de RF para cada sinal elétrico no CO, bem como -7 dBm de potência óptica recebida na RRU. Pode-se notar a presença dos três sinais de RF em 778,0 MHz, 2,24 GHz e 2,35 GHz, respectivamente, além da ausência de componentes espectrais indesejados. A partir inserções (i) e (ii), pode-se observar também que não há distorção aparente após a modulação simultânea no domínio óptico. Especialmente na inserção (ii), são visíveis as cinco sub-bandas LTE-A de largura de banda de 20 MHz, ocupando uma porção de 100 MHz do espectro e coexistindo com o padrão 5G NR. A partir da medição do

espectro, pode-se concluir que os sinais de RF estão de acordo com o esperado e podem ser devidamente amplificados e irradiados, em função da aplicação desejada.

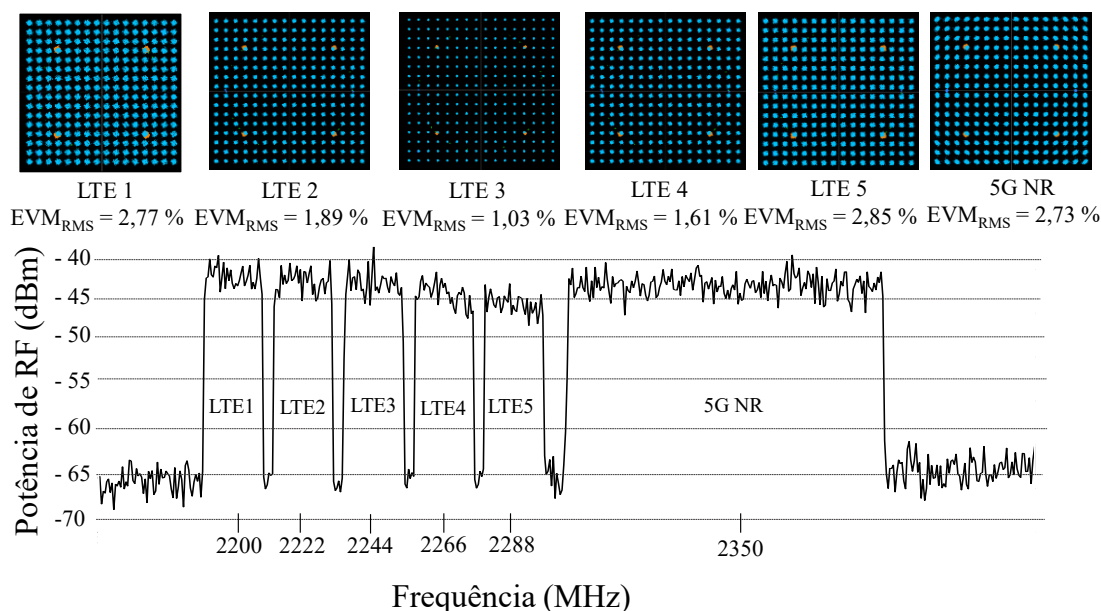


**Figura 3. 8:** Espectro elétrico medido na saída do fotodiodo: (i) sinal F-OFDM em 778 MHz; (ii) sinais LTE-A e 5G NR.

O próximo passo de nossa investigação foi de coexistência do padrão 5G NR e do LTE-A, uma vez que muitos grupos e empresas de pesquisa reivindicaram a implantação de 5G sobre a arquitetura de redes LTE-A existente. Nessa análise, o  $RF_2$  foi mantido centralizado em 2,24 GHz, enquanto a portadora de frequência  $RF_3$  foi variada, com o objetivo de alterar a banda de guarda entre os sinais de RF avaliando-se uma coexistência entre canais adjacentes, ou seja, o deslocamento de frequência mínimo que não impõe interferência entre os sinais LTE-A e 5G NR. A figura de mérito avaliada foi a magnitude do vetor de erro, de forma que os valores obtidos do  $EVM_{RMS}$  foram comparados com os requisitos do 3GPP de acordo com o *Release 15*. Os últimos especificam 8% e 3,5% como limites do  $EVM_{RMS}$  para 64- e 256-QAM, respectivamente.

Tomando os valores de  $EVM_{RMS}$  mencionados acima como referência, encontramos o deslocamento de frequência mínimo de 106 MHz que permite atender com eficiência aos requisitos de 3GPP, conforme relatado na Figura 3.9. Esse deslocamento de frequência é equivalente a uma banda de guarda de 2 MHz entre o LTE-A e padrão 5G NR. No caso de configurar 106 MHz como deslocamento de

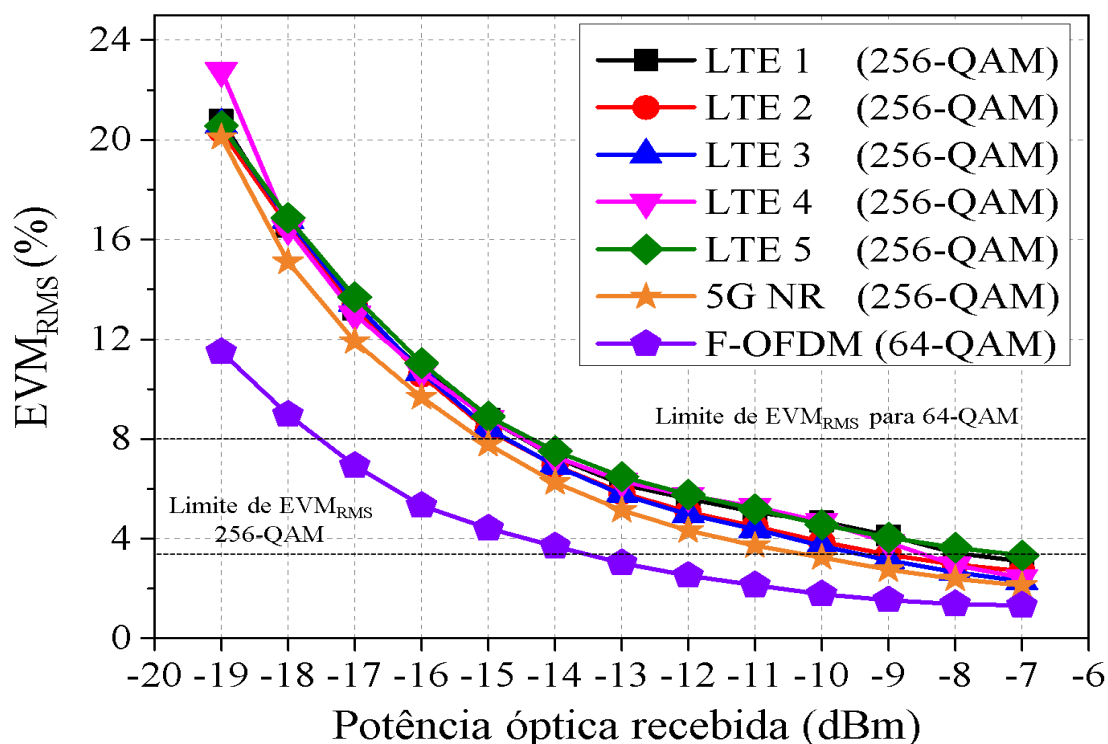
frequência, alcançamos uma taxa de transferência de 490 Mbps para o LTE-A com  $EVM_{RMS}$  não excedendo 2,8%.



**Figura 3. 9:** Medidas de  $EVM_{RMS}$  e as respectivas constelações para os sinais LTE-A e 5G NR coexistindo em uma mesma arquitetura de rede móvel.

O padrão 5G NR permitiu uma taxa de transferência de 578 Mbps com 2,7% de  $EVM_{RMS}$ . Vale ressaltar que o sinal F-OFDM em 778 MHz foi mantido o tempo todo, garantindo uma taxa de transmissão de 60 Mbps com 2,8% de  $EVM_{RMS}$ . As constelações medidas de cada sub-banda LTE-A e 5G NR são apresentadas na Figura 3.9, a partir da qual é possível observar símbolos bem definidos. A partir dos resultados relatados, pode-se concluir que os padrões 4G e 5G podem ter uma coexistência na arquitetura proposta, abordando aplicações WRAN e eMBB, desde que o desvio mínimo de frequência de 106 MHz seja respeitado para estas condições de trabalho.

Antes de irradiar os sinais, medimos o  $EVM_{RMS}$  na saída do sistema RoF, em função da potência óptica na entrada do fotodetector, que variou de -19 a -7 dBm. Nosso objetivo foi identificar os níveis de potência óptica que permitem atender aos requisitos 3GPP  $EVM_{RMS}$  para os sinais F-OFDM, LTE-A e 5G NR. Para a análise, o desvio de frequência entre os sinais 4G e 5G NR foi mantido em 106 MHz e a potência de RF na saída do combinador de RF foi de -5 dBm. Conforme relatado na Figura 3.10.

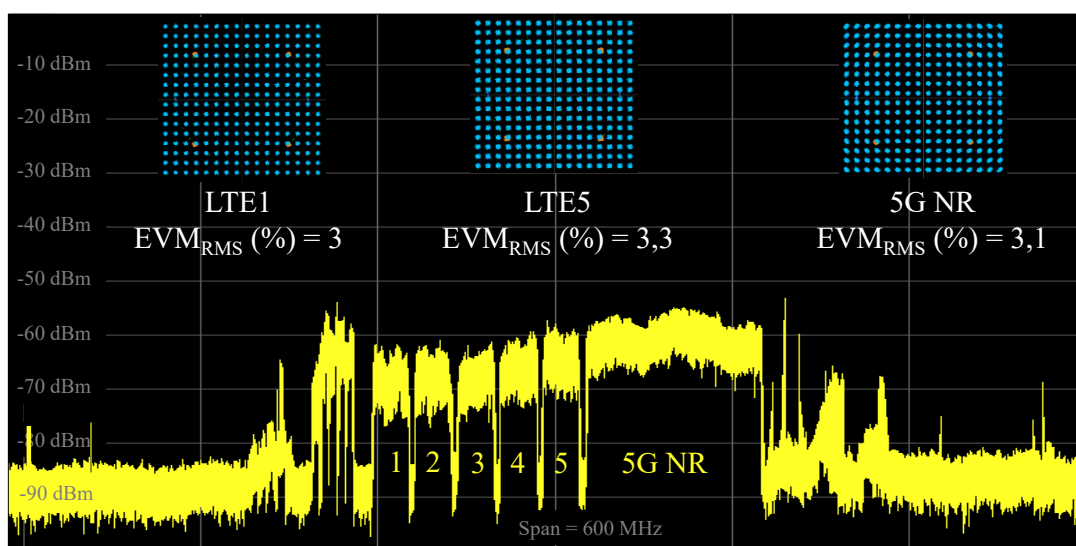


**Figura 3. 10:**  $EVM_{RMS}$  em função da potência óptica no fotodiodo.

O nível de  $EVM_{RMS}$  do sinal F-OFDM em 778 MHz e modulação 64-QAM atendeu ao requisito 3GPP de 8% recebendo níveis de potência óptica superiores a -17,5 dBm. As sub-bandas centrais do sinal LTE-A apresentaram  $EVM_{RMS}$  abaixo de 3,5% para uma potência óptica maior ou igual a -9 dBm, enquanto as sub-bandas extremas de LTE-A exigiram 2 dB a mais de potência óptica para atender os requisitos do 3GPP. O padrão 5G NR com 256-QAM em 2,35 GHz atendeu ao requisito do 3GPP para medidas de  $EVM_{RMS}$  iguais a 3,5%, recebendo níveis de potência óptica maiores ou iguais a -10 dBm.

O desempenho digital aprimorado do F-OFDM com potências ópticas mais baixas em relação aos outros sinais é justificado pela largura de faixa do sinal ser de 10 MHz para uma mesma distribuição de potência dos sinais com largura de faixa de 100 MHz, resultando em uma relação sinal ruído melhorada. Portanto, abordar simultaneamente as aplicações eMBB e WRAN nas condições apresentadas requer um nível mínimo de potência óptica de -7 dBm na RRU, além de um deslocamento mínimo de 106 MHz entre os sinais LTE-A e 5G NR.

Posteriormente implementamos uma femtocélula interna de 10 m de alcance, abrangendo a transmissão sem fio LTE-A e 5G NR, após a distribuição de RF ao longo do percurso óptico de 25 km. O desvio mínimo de frequência entre o LTE-A e o 5G NR de 106 MHz foi mantido em direção a uma coexistência em canais adjacentes com a menor banda de guarda possível. A potência óptica na entrada do fotodetector foi ajustada para -7 dBm. A potência isotrópica radiada equivalente (*Effective Isotropic Radiated Power*, EIRP) foi de -17 e -16 dBm para os sinais em 2,24 e 2,35 GHz, respectivamente. A Figura 3.16 ilustra o espectro medido usando VSA<sub>1</sub>. A diferença de magnitude entre os sinais é proveniente da resposta do canal sem fio e os componentes adicionais do espectro são provenientes de outros serviços de telecomunicações ativos. O sinal LTE-A apresentou símbolos bem definidos na constelação e um  $EVM_{RMS}$  máximo de 3,3%, conforme relatado nas inserções, atendendo ao requisito 3GPP. Um  $EVM_{RMS}$  de 3,3% refere-se à sub-banda extrema no lado direito, isto é, o pior caso, como demonstrado anteriormente. De maneira semelhante, o sinal 5G NR apresentou símbolos bem definidos na constelação e 3,1% medido de  $EVM_{RMS}$ , atendendo ao requisito do 3GPP para este parâmetro. Como conclusão, o sinal LTE-A e 5G NR provou ser capaz de coexistir no sistema FiWi proposto.

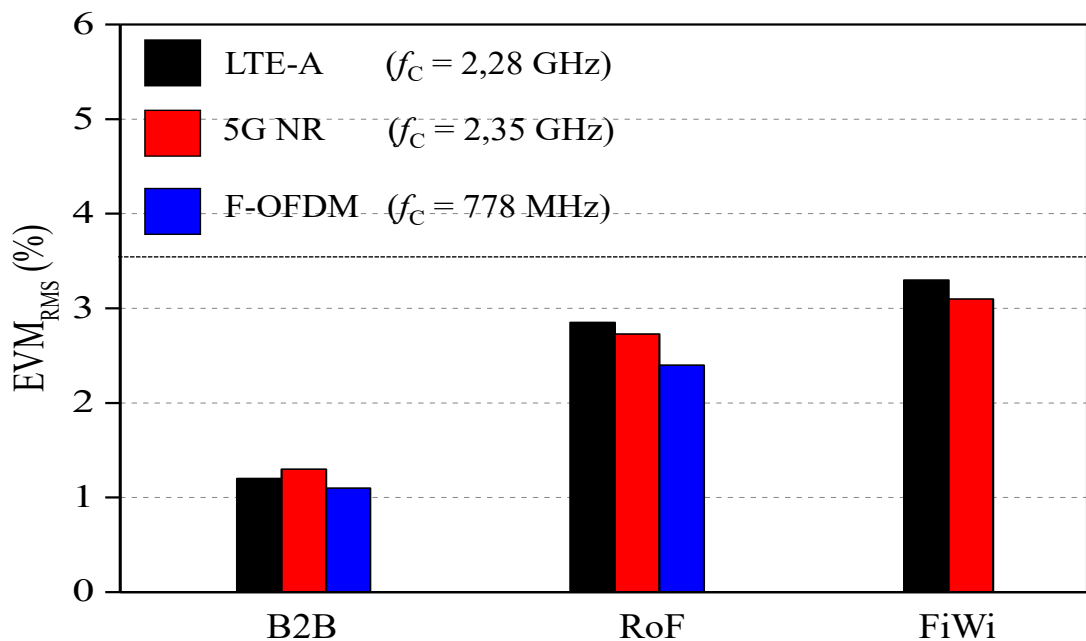


**Figura 3. 11:** Espectro medido na recepção do Sistema FiWi proposto.

Por fim efetuamos uma comparação de desempenho digital entre as configurações *back-to-back* (B2B), RoF e FiWi, conforme apresentado na Figura 3.12.

A implementação B2B considera o transmissor conectado diretamente ao receptor, permitindo medir o  $EVM_{RMS}$  mínimo fornecido por meio do transmissor e assim quantificar o aumento  $EVM_{RMS}$  no caso de empregar sistemas RoF e FiWi. Os resultados foram obtidos assumindo o sinal 5G NR centrado em 2,35 GHz, sinal F-OFDM centrado em 778 MHz e a sub-banda LTE-A em 2,28 GHz, que sofre a maior interferência devido às sub-bandas vizinhas em ambos os lados.

Como esperado, medidas de  $EVM_{RMS}$  tão baixas quanto 1,5% foram obtidas para a configuração de B2B. Pode-se notar que a implementação RoF aumenta o  $EVM_{RMS}$  em torno de 1,5%, tal degradação é justificada pela taxa de propagação de 25 km na SMF, as perdas na conversão elétrico-óptica e óptico-elétrica, bem como os ruídos provenientes do fotodetector. No entanto, todos os sinais avaliados atingiram os requisitos de  $EVM_{RMS}$  propostos pelo 3GPP, fornecendo 1,1 Gbps de taxa de transmissão total. O desvanecimento e os múltiplos percursos impostos pelo canal sem fio prejudicam os sinais transmitidos em fase e magnitude. Apesar da redução de desempenho, o nível de  $EVM_{RMS}$  aumentou apenas 0,5%, satisfazendo o limite 3GPP para 256-QAM (3,5%) para todos os sinais avaliados. Vale ressaltar que medidas de  $EVM_{RMS}$  tão baixo quanto 3,3% são valores notáveis para uma implementação FiWi, demonstrando a viabilidade do sistema.



**Figura 3. 12:** Caracterização do sistema FiWi proposto: B2B – Back-to-Back; RoF – Radio Over Fiber; FiWi – Fiber-Wireless.

## 4 - Implementações 5G NR com *fronthauls* FSO

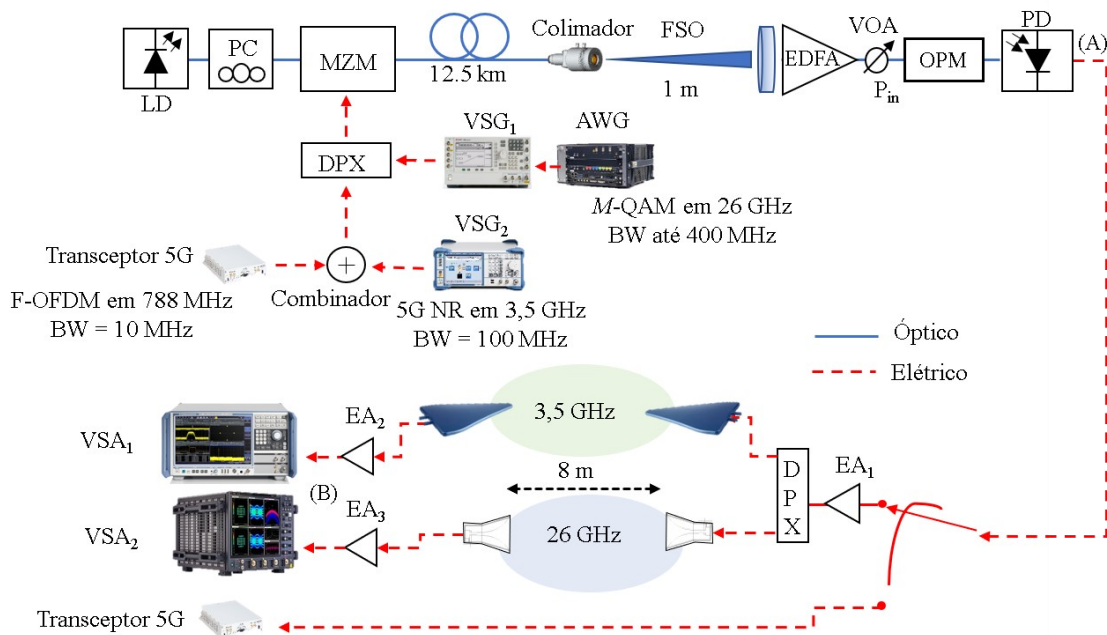
A implementação do sistema 5G FiWi utilizando FSO como *fronthaul* é descrita em termos de diagrama de blocos na Figura 4.1. Beneficiou-se do emprego em conjunto das tecnologias RoF, FSO e sem fio em uma arquitetura híbrida proposta, que emprega o RoF e FSO pela integração do *fronthaul*, permitindo um link sem fio 5G atuando em FR1 e FR2.

O link FSO aumenta a flexibilidade do sistema, permitindo alcançar locais com conexão restrita via fibra, como regiões montanhosas, lagos e rios, fornecendo taxas de transmissão semelhantes à da fibra óptica. Propusemos transmitir simultaneamente três sinais de RF na arquitetura híbrida, usando as bandas de frequência 5G padronizadas pelo 3GPP Release 15, a saber: Sinal F-OFDM centralizado em 788 MHz, com largura de faixa de 10 MHz e modulação 64-QAM, gerado pelo *transceptor* 5G para áreas remotas; padrão 5G NR gerado pelo equipamento SMBV100B (VSG<sub>2</sub>) da Rohde & Schwarz. O sinal dispunha de largura de faixa de 100 MHz transmitido a 3,5 GHz, de acordo com as especificações 3GPP *Release* 15 visando aplicações externas eMBB; Sinal M-QAM em banda base gerado pelo gerador de forma de onda arbitrária (AWG) da Keysight (M8190A) e convertido para frequência de 26 GHz com o equipamento PSGE8267D (VSG<sub>1</sub>), também da Keysight. O sinal gerado foi trabalhado com largura de faixa de até 400 MHz para cenários internos de eMBB.

Um combinador de RF foi utilizado para combinar os sinais de 788 MHz e 3,5 GHz e o sinal elétrico resultante foi combinado com o M-QAM utilizando um diplexador que opera em faixas de frequências mais elevadas. O nível de potência dos sinais de RF foi ajustado para 0 dBm, exceto o M-QAM em 26 GHz, que foi empregado 5 dBm devido as perdas impostas por meio do modulador Mach-Zehnder (MZM), fotodetector (PD) e a resposta do cabo RF sobre a frequência de 26 GHz. Os sinais combinados foram acoplados na entrada do MZM, que modula uma portadora óptica



em 1549,70 nm, fornecida por um laser DFB. Posteriormente, o sinal óptico modulado foi lançado no *fronthaul* óptico de 12,5 km de fibra SMF, atingindo um colimador, este por sua vez direciona o feixe de luz para ser transmitido no espaço livre. Um *fronthaul* FSO foi implementado como prova de conceito, integrando a aplicação híbrida RoF/FSO. No lado da recepção, uma lente óptica do modelo M-5X da fabricante Newport com um fator de ampliação de cinco vezes (5x) foi usada para colimar o feixe óptico e acoplá-lo a um cabo óptico. A sensibilidade do link FSO em termos de alinhamento do feixe óptico deve ser levada em consideração, por esse motivo, foi utilizado um microposicionador de 3 eixos para alinhamento entre o transmissor e o receptor com objetivo de reduzir a atenuação devido a desalinhamentos e vibrações.



**Figura 4. 1:** Proposta de arquitetura híbrida FiWi usando RoF e FSO: PC - Polarization Controller; AWG - Arbitrary Waveform Generator; VSG - Vector Signal Generator; LD - Laser Diode; EDFA - Erbium-doped Fiber Amplifier; VOA - Variable Optical Attenuator; PD - Photodetector; EA - Electrical Amplifier; DPX - Diplexer; VSA - Vector Signal Analyzer.

O feixe óptico de recepção foi amplificado por um amplificador de fibra dopado com érbio (EDFA) da fabricante GoLight para compensar as perdas do sistema e obter controle sobre os níveis de potência óptica na recepção. Sequencialmente, um VOA e

um OPM acoplado à saída do EDFA foram utilizados para atenuar e monitorar o nível de potência óptica na entrada do fotodetector, respectivamente. Os sinais de RF foram convertidos para o domínio elétrico pelo fotodetector modelo XPDV2120RA da fabricante u2t. Os sinais na saída do fotodetector foram amplificados por EA<sub>1</sub> com ganho de 24 dB e divididos usando um diplexador idêntico, que separa os sinais de 3,5 GHz e 26 GHz. O sinal 5G foi transmitido e recebido por antenas comerciais (AARONIA HyperLOG 7040, com ganho de 5-dBi nas frequências trabalhadas), enquanto o sinal M-QAM foi transmitido e recebido utilizando antenas corneta idênticas com ganho de 25-dBi, desenvolvida pelo nosso grupo de pesquisa, dando origem a um link sem fio de alcance de 10 m. O sinal 5G recebido foi amplificado individualmente usando EA<sub>2</sub> (ganho de 20 dB) e analisado por um VSA<sub>1</sub> (FSW-8351), enquanto o sinal em 26 GHz foi amplificado com 35 dB (EA<sub>3</sub>) e demodulado por um osciloscópio VSA<sub>2</sub> modelo DSAZ632A.

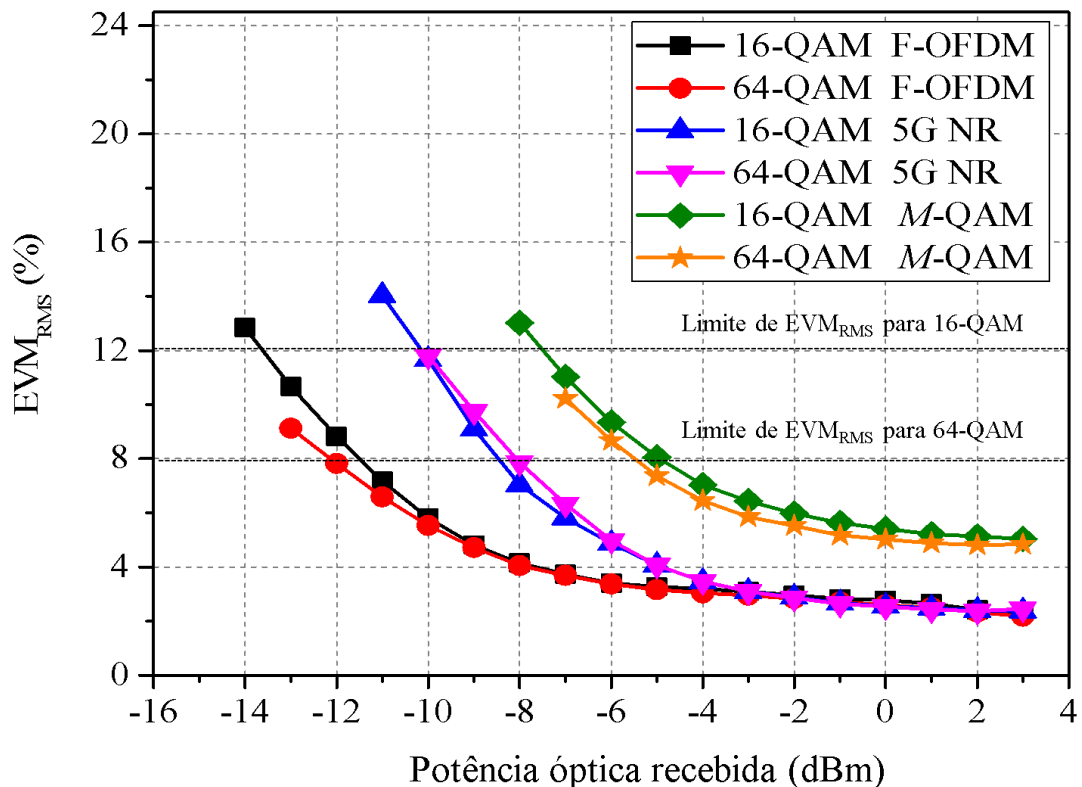
## 4.1 Investigação RoF/FSO

A investigação de desempenho do sistema consistiu em avaliar a arquitetura híbrida nos pontos identificados como (A) e (B) da Figura 4.1. O primeiro cenário investigado (A) consistiu em avaliar o desempenho do sistema na saída do fotodetector, ou seja, avaliar o desempenho do *fronthaul* RoF seguido de um *fronthaul* FSO. O segundo caso (B), considera a análise da implementação do sistema 5G FiWi, empregando RoF e FSO como *fronthaul* simultaneamente, seguidos por um link de acesso sem fio de 10 metros.

Em ambos os cenários, o desempenho do sistema foi avaliado em termos de medidas de EVM<sub>RMS</sub>, de acordo com as especificações do *Release 15* do 3GPP, a saber: valor máximo de EVM<sub>RMS</sub> de 3,5%, 8% e 12,5% para 256-QAM, 64-QAM e 16-QAM, respectivamente. A Figura 4.2 apresenta os níveis EVM<sub>RMS</sub> em função da potência óptica na entrada do fotodetector, empregando ordens de modulação de 16- e 64-QAM (Marcador (A) da Figura 4.1).

Os resultados experimentais foram obtidos variando o nível de potência óptica de -14 a 3 dBm na entrada do fotodetector. Particularmente para o F-OFDM, o sistema RoF/FSO proposto cumpriu as especificações do 3GPP, para níveis de potência óptica

superiores a -14 dBm e -12 dBm, para modulações 16- e 64-QAM, respectivamente. O melhor ponto de desempenho foi em torno de 3 dBm de potência óptica e os valores de  $EVM_{RMS}$  foram de 2,3% e 2,1% para 16- e 64-QAM, respectivamente, atingindo taxa de transmissão de 60 Mbps. O sinal 5G NR com largura de faixa de 100 MHz forneceu 578 Mbps de taxa de transferência e  $EVM_{RMS}$  medido de 2,37% e 2,45% para 16- e 64-QAM, respectivamente. Pode-se observar que o 64-QAM atinge o limite do 3GPP a aproximadamente -8 dBm de potência óptica, enquanto que para 16-QAM a recomendação é atendida para potências ópticas superiores a -10 dBm.



**Figura 4. 2:** Desempenho digital em função da potência óptica no fotodetector do sistema RoF/FSO, para sinais F-OFDM, 5G NR e M-QAM.

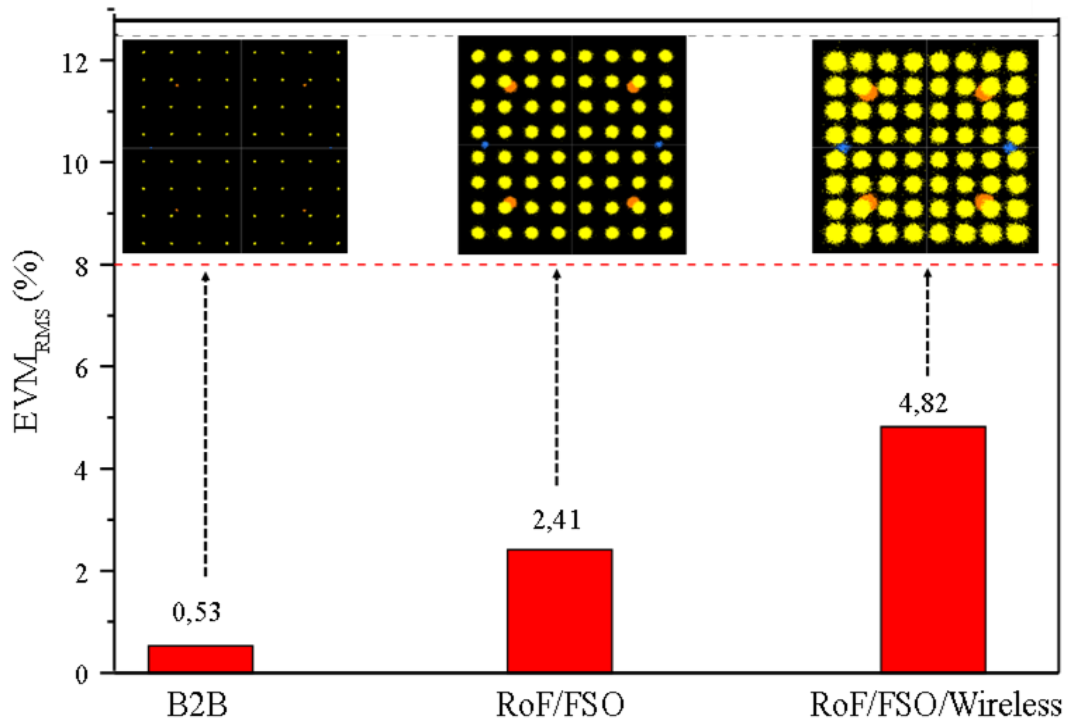
Pode-se notar que as curvas são semelhantes para níveis de potência óptica superiores a -4 dBm para os sinais F-OFDM e 5G NR. No entanto, o sinal F-OFDM têm largura de faixa de 10 MHz, diferentemente do 5G NR que dispõe de 100 MHz de largura de faixa. Abaixo de -4 dBm a relação sinal ruído dos sinais permite que o sinal com 10 MHz de banda tenha desempenho aprimorado em termos de  $EVM_{RMS}$ .

Para o sinal  $M$ -QAM em 26 GHz, configuramos corretamente a largura de banda de 400 MHz, o que implica em taxa de transferência de 2,4 Gbps para a ordem de modulação de 64-QAM. Essa taxa de transmissão foi alcançada para níveis de potência óptica superiores a -5 dBm, enquanto o 16-QAM forneceu 1,6 Gbps com 3 dB a menos de potência óptica. Pode-se observar em 26 GHz, os valores aceitáveis de  $EVM_{RMS}$  ocorrem para níveis mais altos de potência óptica devido a resposta em frequência dos componentes empregados no *setup*. O sistema RoF/FSO híbrido proposto forneceu taxa de transferência total na ordem de 2.3 Gbps, de acordo com as especificações do 3GPP Release 15.

## 4.2 Investigação RoF/FSO/*Wireless*

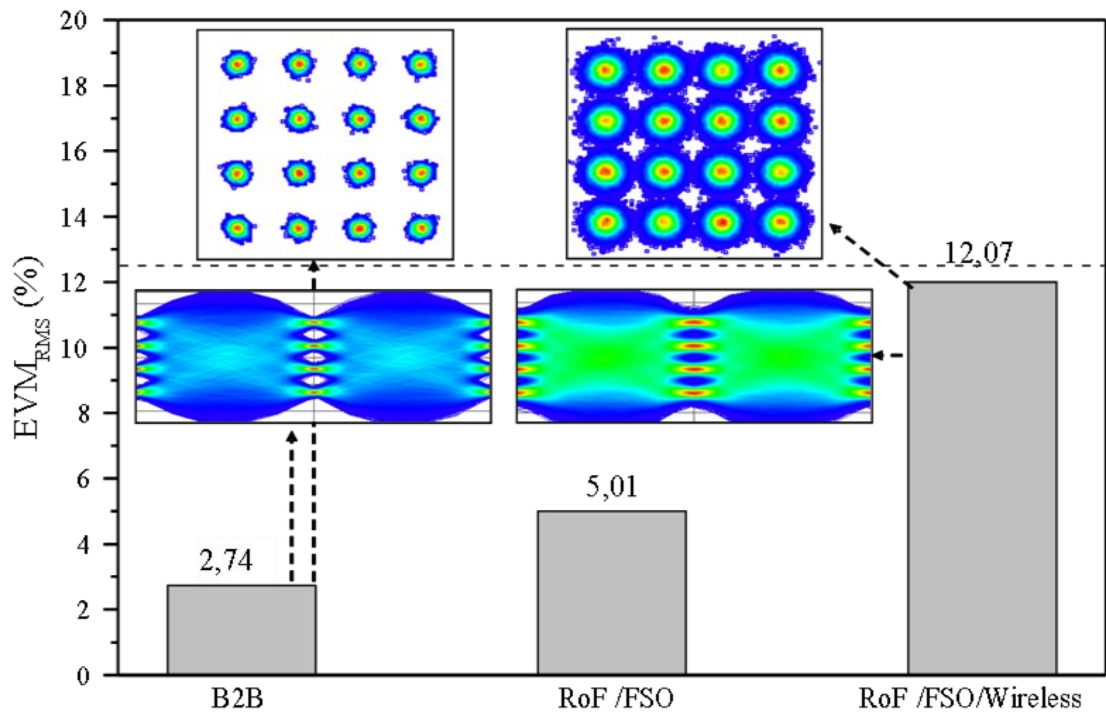
A segunda e mais importante caracterização foi a análise de desempenho do sistema 5G FiWi usando RoF e FSO. Escolhemos o melhor ponto de desempenho RoF/FSO (3 dBm óptico no PD) para implementar o sistema híbrido 5G FiWi. Um link sem fio de alcance de 8 metros foi estabelecido para demonstrar a aplicabilidade do sistema. Nós transmitimos um sinal 5G NR padronizado a 3,5 GHz e um sinal  $M$ -QAM a 26 GHz. A Figura 4.3 apresenta o desempenho digital do 5G NR para B2B, RoF/FSO e RoF/FSO/*Wireless*, incluindo as constelações medidas.

Como esperado, o valor de  $EVM_{RMS}$  para B2B permaneceu abaixo de 1%, dando origem a constelações extremamente bem definidas. Justifica-se o valor de 0,53 % devido a maior parte por perda no cabo de RF que interliga os geradores com os analisadores de RF. A implementação do RoF/FSO não prejudica o desempenho geral do sistema e, conseqüentemente, o valor do  $EVM_{RMS}$  não foi significativamente aumentado, não ultrapassando o valor de 2,41 %. O aumento de  $EVM_{RMS}$  é justificado por meio das perdas nas conversões E/O, dispersão e atenuação na fibra. O canal sem fio degrada o sinal tanto na fase quanto na magnitude, o que é observado pela dispersão dos símbolos na constelação RoF/FSO/*Wireless*. No entanto, o sistema 5G NR FiWi atendeu aos requisitos 3GPP com margens de até 3,2%, o que pode ser usado para estender a femtocélula, uma vez que usamos a largura de banda máxima padronizada para FR1. Portanto, a abordagem híbrida mostrou potencial para integrar as redes 5G, trazendo o benefício notável da flexibilidade do FSO.



**Figura 4. 3:** Análise de desempenho digital 5G NR FiWi: 3,5 GHz, empregando RoF - backhaul e FSO - fronthaul.

Da mesma forma, o sinal  $M$ -QAM com largura de faixa de 400 MHz foi avaliado experimentalmente para sistemas B2B, RoF/FSO e FiWi, conforme apresentado na Figura 4.4. Pode-se observar um excelente desempenho digital para casos B2B e RoF/FSO. De qualquer forma, a propagação em 26 GHz prejudica gravemente o desempenho digital do  $EVM_{RMS}$  e o sistema FiWi com largura de banda de 400 MHz excedeu as especificações 3GPP. Por esse motivo, empregamos apenas ordem de modulação de 16-QAM e largura de banda de 200 MHz para superar esse problema. Apesar da redução da largura de banda, o sistema híbrido FiWi forneceu  $EVM_{RMS}$  em torno de 12%, próximo ao máximo aceitável (12,5%). A degradação do desempenho digital pode ser observada tanto na constelação quanto no diagrama de olho, enfatizando as condições severas do canal sem fio ao operar em frequências de ondas milimétricas. No entanto, o sistema híbrido RoF/FSO/Wireless alcançou uma taxa de transmissão total na ordem de 1,4 Gbps, demonstrando a viabilidade do sistema FiWi empregar o FSO como *fronthaul*.



**Figura 4. 4:** Análise de desempenho do sinal 16-QAM FiWi: 26 GHz usando RoF - backhaul e FSO - fronthaul.

## 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

Foi proposta neste trabalho a investigação experimental de diferentes arquiteturas de redes móveis baseadas em A-RoF e FSO para o transporte de sinais LTE-A e 5G NR operando de forma simultânea. Resultados experimentais comprovaram que as tecnologias podem coexistir utilizando a mesma infraestrutura de rede, se devidos parâmetros forem levados em conta, estes são: deslocamento de frequência mínimo entre as portadoras de RF dos sinais; níveis de potência óptico na recepção e níveis de potência de RF transmitidas. Propõe-se também a implementação híbrida utilizando as tecnologias RoF/FSO/*Wireless* com objetivo de atender possíveis soluções para diferentes cenários de atuação do 5G.

A primeira investigação propôs utilizar a tecnologia A-RoF uma adequação no modo de transmissão óptico, com modulação externa por meio de um MZM de acionamento duplo. O objetivo era maximizar a eficiência do sistema e com isso propor a transmissão sem fio em uma femtocélula de 10 metros. Com isso obteve-se a vazão máxima de 182,8 Mbps com modulação 64-QAM no sistema FiWi proposto.

Uma segunda análise realizada utilizando modulação direta do laser, agora operando com múltiplos sinais, a saber: F-OFDM com largura de faixa de 10 MHz; cinco sub-bandas LTE-A totalizando uma BW de 100 MHz; um sinal 5G NR com 100 MHz de BW. Os múltiplos sinais transmitidos tem por objetivo atender aplicações eMBB externas e aplicações WRAN. O *offset* mínimo de frequências para evitar sobreposição entre os sinais LTE-A e 5G NR foi de 106 MHz, o que corresponde a uma banda de guarda de 2 MHz. A vazão de dados alcançadas para esta investigação foi superior à 1 Gbps.

Investigou-se ainda o uso de um *link* RoF de 12,5 km como *fronthaul* seguido por um *fronthaul* baseado em FSO. O objetivo era explorar diferentes tecnologias

trabalhando em conjunto para aliar os benefícios de ambas e empregar em novas topologias propostas de redes 5G. Na última configuração, transmitimos 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 três cenários propostos para o 5G. Na primeira análise, o rendimento total alcançado utilizando RoF/FSO foi de 2,3 Gbps. A vazão de 1,4 Gbps foi alcançada em uma segunda análise por meio do sistema híbrido RoF/FSO/*Wireless*. A solução híbrida de RoF/FSO/*Wireless* mostrou potencial para aumentar a flexibilidade das redes de acesso via rádio, permitindo cobertura em áreas de difícil acesso.

Trabalhos futuros dizem respeito à implementação FiWi operando em *dowlink* e *uplink* simultaneamente, explorando diferentes modos de coexistência entre os sinais, transmitindo LTE-A para ERB e o UE recebendo 5G NR. A aplicação de novas tecnologias empregadas às redes móveis tais como: inteligência artificial para monitoramento da qualidade de transmissão; utilização de OWC como opção de canal de transporte de sinais, permitindo trabalhar na faixa de THz; uma arquitetura de rede que possa atender os quatro cenários propostos para o 5G de forma simultânea.



# APÊNDICE

Equipamentos e dispositivos empregados nas configurações experimentais.

<b>Dispositivo</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>
Gerador de sinais analogicos	Keysight	N5173B
Gerador de forma de ondas arbitrarías (AWG)	Keysight	M8190A
Gerador de sinais vetoriais	Keysight	PSGE82670
	Rohde & Schwarz	SMBV100B
Analisador de Espectro	Anritsu	MT8222B BTS Master
	Keysight	-FieldFox N9952A
		-MXA N9020A
Modulo RoF TX/RX	OZ Optics	OZ101
Antena	AARONIA HyperLOG	7040
DC-block	Mini-Circuits	BLK-18-S+
	Fairview Microwave	SD3379
Diplexer	Marki Microwave	DPX1721
Modulador Dual-drive Mach-Zehnder	Photoline	MZ-DD-LN-10
Laser	Golight	OS-WT-D-C-20-0-0-P
Atenuador óptico	Thorlabs	VOA50PM-FC
Fibra óptica	Draka	SMF DLPC9 code 279/01
Monitor de potência óptica	Anritsu	CMA5
Analisador de espectro óptico	Anritsu	MS9740A
Fotodetector	u²t	XPDV2120RA
	Eotech	EOT 5000F
Controlador de polarização óptico	General photonics	PolaRITE 5561726
Fonte de alimentação DC	-Keysight	-E3640A
		-E3646A
	-Minipa	-MPL-3303M
		-MPS-3035D
Amplificadores de RF	Fairview Microwave	SBUA-400-12-010-K
	Mini-Circuits	-ZX60-83LN12+

		-ZJL-6G+
Combinador de RF	Kete	KTPD-M2460-2-SMAF
Mach-Zehnder de acionamento único	Fujitsu	FTM7939EK
Colimador de fibra óptica	ThorLabs	F280FC-A
Posicionador 3 eixos	Thorlabs	MBT602
		RB13P1
		MBT616D
Lente objetiva	M-5X	Newport
Osciloscópio	Keysight	DSAZ632A
Analizador de sinais vetoriais	Rohde & Schwarz	FSW-8351VSA
Acoplador Bi-Direcional	Krytar	4100400
Colimador	Thorlabs	F810APC-1550

## Referências Bibliográficas

- [1] T. Farley, "Mobile telephone history," *Telektronikk*, vol. 101, no. 3/4, p. 22, 2005.
- [2] F. Hillebrand, "The creation of standards for global mobile communication: GSM and UMTS standardization from 1982 to 2000," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 20, pp. 24–33, Oct. 2013.
- [3] Rahnema, M. (1993). Overview of the GSM system and protocol architecture. *IEEE Communications magazine*, 31(4), 92-100.
- [4] European CEPT, "GSM memorandum of understanding," Sept. 1987.
- [5] M. Mouly, *The GSM system for mobile communications*. Cell & Sys, 1992.
- [6] Garg, V. K., & Rappaport, T. S. (2001). *Wireless network evolution: 2G to 3G*. Prentice Hall PTR.
- [7] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., & Beming, P. (2010). *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press.
- [8] J. Boccuzzi, "Introduction to Cellular Mobile Communications," in *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 3–37.
- [9] K. L. Matti Latva-aho, *Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence, 6G Flaship*. (Technical Report September, University of Oulu, Finland, 2019.
- [10] ETSI, *Service requirements for next generation new services and markets*, 3GPP TS 22.261 v15.6.0 Release 15, 201.
- [11] Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Maternia, M., & Tullberg, H. (2014). *Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project*. *IEEE communications magazine*, 52(5), 26-35.8.
- [12] G.-R. Project. (2017) *Remote area Access Network for the 5th GEneration*. [Online]. Available: <http://5g-range.eu/>.
- [13] Rath Vannithamby; Shilpa Talwar, "5G," in *Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies*, Wiley, 2017, pp.34-51, doi: 10.1002/9781118979846.ch4.

- [14] J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," *Nature photonics*, vol. 1, no. 6, p. 319, 2007.
- [15] A. He, L. Wang, M. ElKashlan, Y. Chen and K. Wong, "Spectrum and Energy Efficiency in Massive MIMO Enabled HetNets: A Stochastic Geometry Approach," in *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2294-2297, Dec. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2015.2493060.
- [16] I. Chih-Lin, J. Huang, R. Duan, C. Cui, J. X. Jiang, and L. Li, "Recent progress on C-RAN centralization and cloudification," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1030–1039, 2014.
- [17] I. Chih-Lin, H. Li, J. Korhonen, J. Huang, and L. Han, "RAN revolution with NGFI (xHaul) for 5G," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 541–550, 2017.
- [18] S. Rommel, D. Perez-Galacho, J. M. Fabrega, R. Muñoz, S. Sales, and I. Tafur Monroy, "High-capacity 5G fronthaul networks based on optical space division multiplexing," *IEEE Trans. Broadcast.* 65, 434–443 (2019).
- [19] P. Perry, A. Peters, S. McClean, P. Morrow, B. Scotney, and L. Barry, "All-optical network capacity for 5G cellular fronthaul," in *21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (2019)*, pp. 1–4.
- [20] K. Zeb, X. Zhang, and Z. Lu, "High capacity mode division multiplexing based MIMO enabled all-optical analog millimeter-wave over fiber fronthaul architecture for 5G and beyond," *IEEE Access* 7, 89522–89533 (2019).
- [21] D. Chitimalla, K. Kondepudi, L. Valcarenghi, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "5G fronthaul-latency and jitter studies of CPRI over Ethernet," *J. Opt. Commun. Netw.* 9, 172–182 (2017).
- [22] Common Public Radio Interface, "Common public radio interface: eCPRI interface specification," *Technical Report eCPRI specification V1.0* (2018).
- [23] D. Novak, R. B. Waterhouse, A. Nirmalathas, C. Lim, P. A. Gamage, T. R. Clark, M. L. Dennis, and J. A. Nanzer, "Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems," *IEEE J. Quantum Electron.* 52, 1–11 (2016).
- [24] ITU, "Setting the scene for 5G: Opportunities & challenges," *White paper*, 2018.

- [25] R. G. Stephen and R. Zhang, "Joint millimeter-wave fronthaul and OFDMA resource allocation in ultra-dense CRAN," *IEEE Trans. Commun.* 65, 1411–1423 (2017).
- [26] T. Kawanishi, "THz and photonic seamless communications," *J. Lightwave Technol.* 37, 1671–1679 (2019).
- [27] P. T. Dat, A. Kanno, N. Yamamoto, and T. Kawanishi, "Seamless convergence of fiber and wireless systems for 5G and beyond networks," *J. Lightwave Technol.* 37, 592–605 (2019).
- [28] I. Alimi, A. Shahpari, A. Sousa, R. Ferreira, P. Monteiro, and A. Teixeira, "Challenges and opportunities of optical wireless communication technologies," in *Optical Communication Technology* (2017).
- [29] N. A. Gunathilake and M. Z. Shakir, "Empirical performance evaluation of FSO availability under different weather conditions," in *8th International Conference on the Network of the Future (NOF)* (2017), pp. 156–158.
- [30] I. A. Alimi, A. O. Mufutau, A. L. Teixeira, and P. P. Monteiro, "Performance analysis of space-air-ground integrated network (SAGIN) over an arbitrarily correlated multivariate FSO channel," *Wireless Pers. Commun.* 100, 47–66 (2018).
- [31] KILLINGER, D. Free space optics for laser communication through the air. *Optics and Photonics News*, v. 13, p. 36-42, 2002.
- [32] Almeida, Indira Marília Antônio de. Efeitos da neblina no sistema de comunicações ópticas no espaço aberto. 2017. dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações, [Santa Rita Sapucaí].
- [33] 3rd Generation Partnership Project, "Technical specification group radio access network: study on CU-DU lower layer split for NR (Release 15)," *Technical Report* (2017).
- [34] Pereira, Luiz Augusto Melo. Sistemas Fiber-wireless 5G NR. 2020. [126]. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações, [Santa Rita do Sapucaí]
- [35] A. Delmade et al., "Performance analysis of analog IF over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 174-182, March 2018.

- [36] M. Sung, S. Cho, J. Kim, J. K. Lee, J. H. Lee and H. S. Chung, "Demonstration of IFoF-Based Mobile Fronthaul in 5G Prototype With 28-GHz Millimeter wave," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 601-609, 15 Jan.15, 2018.
- [37] R. M. Borges et al., "Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468-4477, Oct.1, 2018.
- [38] J. Kim et al., "MIMO-Supporting Radio-Over-Fiber System and its Application in mmWave-Based Indoor 5G Mobile Network," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 101-111, 1 Jan.1, 2020.
- [39] M. Sung et al., "RoF-Based Radio Access Network for 5G Mobile Communication Systems in 28 GHz Millimeter-Wave," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 409-420, 15 Jan.15, 2020.
- [40] Jan Bohata, Matěj Komanec, Jan Spáčil, Zabih Ghassemlooy, Stanislav Zvánovec e Radan Slavík, "24-26 GHz de fibra óptica de rádio sobre fibra e espaço livre para sistemas de quinta geração", *opt. Lett.* 43, 1035-1038 (2018).
- [41] M. A. Esmail, A. M. Ragheb, H. A. Fathallah, M. Altamimi and S. A. Alshebeili, "5G-28 GHz Signal Transmission Over Hybrid All-Optical FSO/RF Link in Dusty Weather Conditions," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24404-24410, 2019.
- [42] A. O. Mufutau, F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, A. Lorences-Riesgo, A. Oliveira and P. P. Monteiro, "Demonstration of a hybrid optical fiber–wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 72-78, March 2020.
- [43] R. M. Borges et al., "DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642-653, 1 Feb.1, 2020.
- [44] E. S. Lima, R. M. Borges, L. A. Melo Pereira, H. R. Dias Filgueiras, A. M. Alberti and A. Cerqueira Sodré, "Multiband and Photonicly Amplified Fiber-Wireless Xhaul," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44381-44390, 2020.
- [45] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skořld, *4G LTE-Advanced Pro and the Road to 5G*, Elsevier, 2016..

- [46] Holma, H. e Toskala, A., LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [47] S. Ahmadi, LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. Academic Press, 2013.
- [48] 3GPP TS 138 300, version 15.3.1, Release 15, 5G; NR; Overall description, Oct 2018. [Online]. Available: <http://www.etsi.org>
- [49] S. Martin, From Gsm to Lte-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [50] H. Holma, A. Toskala, T. Nakamura 5G Technology: 3GPP New Radio John Wiley & Sons (2020).
- [51] E. Dahlman et al., 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Elsevier/Academic Press, 2018.
- [52] O. Liberg, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergman, J. Sachs, Cellular Internet of Things: Technologies, Standards, and Performance, Academic Press, 2017.
- [53] K. Meit et al., 5G New Radio Fundamentals, procedures, testing aspects, Rohde & Schwarz, 2019.
- [54] 3GPP TS 138 300, version 15.3.1, Release 15, 5G; NR; Overall description, Oct 2018. [Online]. Available: <http://www.etsi.org>.
- [55] J. Capmany, D. Novak, Microwave photonics combines two worlds, Nature Photonics 1 (2007) 319–330.
- [56] J. A. J. Ribeiro, Comunicações ópticas. Érica, 2003.
- [57] G. P. Agrawal, Fiber-optic communication systems. JohnWiley & Sons, 2012, vol. 222.
- [58] Lima, Eduardo Saia. Fronthaul móvel com amplificação de RF no domínio óptico para redes 5G. 2019. [109]. Dissertação( Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações, [Santa Rita do Sapucaí - MG ].
- [59] P. Cao et al., “Reconfigurable UWB Pulse Generation Based on a Dual-Drive Mach–Zehnder Modulator,” IEEE Photonics Journal, vol. 6, no. 5, pp. 1–6, Oct. 2014.

- [60] J.J. O'Reilly, P. M. lane "Remote delivery of video services using mm-wave and optics," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 369-375. February 1994.
- [61] Weichel H., "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", SPIE OpticalEngineeringPress, Vol. TT -3, 1990.
- [62] J. Perez, Z. Ghassemlooy, S. Raj Bhandari, M. Ijaz, and H. Lee Minh, "Ethernet FSO Communications Link Performance Study under a Controlled Fog Environment," *IEEE Communications Letters*, pp. 1- 3, 2012.
- [63] R. N. Mahalati and I. M. Kahn, "Effect of fog on free-space optical links employing imaging receivers," *Journal of Optics Express*, vol. 20, pp. I649-I661, 2012.
- [64] K. Majumdar, I. C. Ricklin, "Free Space Laser Communications Principles and Advances", Springer ISBN 978-0-387-28652-5, 2008.
- [65] B. Olivieret., "Free-Space Optics, Propagation and Communication", Book, ISTE, 2006.
- [66] Roberto Ramirez-Iniguez, Sevia M. Idrus and Ziran Sun, "Optical Wireless Communications IR for Wireless Connectivity", Taylor & Francis Group, Book, CRC Press, 2007.
- [67] J.J. O'Reilly, P. M. lane "Remote delivery of video services using mm-wave and optics," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 369-375. February 1994.
- [68] Weichel H., "Laser Beam Propagation in the Atmosphere", SPIE OpticalEngineeringPress, Vol. TT -3, 1990.
- [69] J. Perez, Z. Ghassemlooy, S. Raj Bhandari, M. Ijaz, and H. Lee Minh, "Ethernet FSO Communications Link Performance Study under a Controlled Fog Environment," *IEEE Communications Letters*, pp. 1- 3, 2012.
- [70] G.-R. Project. (2017) Remote area Access Network for the 5th GEneration. [Online]. Available: <http://5g-range.eu/>
- [71] A. Chassaigne and et al, "D2.1 application and requirements report," 5G-RANGE project, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <http://5g-range.eu>



- [72] S. Ghosh, S. Karar, and A. D. Barman, "A Pricing-Based Rate Allocation Game in TVWS Backhaul and Access Link for Rural Broadband," *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 511–518, 2019.
- [73] Z. You, I. Lu, and W. Li, "High-performing orthogonal frequency division multiplexing precoding scheme for OOB suppression," *IET Communications*, vol. 10, no. 17, pp. 2276–2280, 2016.
- [74] L. Zhang, P. Xiao, A. Zafar, A. u. Quddus, and R. Tafazolli, "FBMC System: An Insight Into Doubly Dispersive Channel Impact," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 3942–3956, 2017.
- [75] W. Chung, C. Chang, K. Feng, and Y. Chen, "An MIMO Configuration Mode and MCS Level Selection Scheme by Fuzzy Q-Learning for HSPA Systems," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, no. 7, pp. 1151–1162, 2012.
- [76] S. Noh, Y. Jung, S. Lee, and J. Kim, "Low-Complexity Symbol Detector for MIMO-OFDM-Based Wireless LANs," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 53, no. 12, pp. 1403–1407, 2006.
- [77] M. Khosraviyani, H. Kalbkhani, and M. G. Shayesteh, "Higher order statistics for modulation and STBC recognition in MIMO systems," *IET Communications*, vol. 13, no. 16, pp. 2436–2446, 2019.
- [78] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Communications Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 5–14, 1990.
- [79] H. Kim, Y. Park, J. Kim, and D. Hong, "A Low-Complex SVD-Based F-OFDM," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 1373–1385, 2020.
- [80] N. Michailow, M. Matthe, I. S. Gaspar, A. N. Caldeilla, L. L. Mendes, A. Festag, and G. Fettweis, "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, 2014.
- [81] F. Cardoso and et al, "D4.1 definition of cognitive mac reference architecture," 5G-RANGE project, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <http://5g-range.eu>
- [82] Z. Huang, Y. Ma, Y. Li, and G. Wen, "A Low Complexity Sub-Optimal Approach to Dynamic Spectrum Allocation for White Space Devices With

Heterogeneous Bandwidth Requirements,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 188–191, 2017.

- [83] S. Ahmadi, *5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*. Academic Press, 2019.