

Sistemas *Fiber-wireless* 5G NR

Luiz Augusto Melo Pereira

Fevereiro / 2020

SISTEMAS *FIBER-WIRELESS* 5G NR

Luiz Augusto Melo Pereira

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.

Santa Rita do Sapucaí

2020

Pereira, Luiz Augusto Melo

P436s

 Sistemas Fiber-wireless 5G NR. / Luiz Augusto Melo Pereira. –
Santa Rita do Sapucaí, 2020.
 126p.

 Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.
 Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional
de Telecomunicações – INATEL.
 Inclui bibliografia e anexo.

 1. 5G NR 2. FiWi 3. Fotônica de Micro-ondas 4. Fronthaul 5. Rádio
sobre Fibra 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Sodré Junior, Arismar
Cerqueira. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

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

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior
INATEL

Prof. Dr. Luciano Leonel Mendes
INATEL

Prof. Dr. Evandro Conforti
UNICAMP

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

“Each dream you leave behind is a part of your future that will no longer exist.”

Steve Jobs

*Aos meus familiares e a todos
que me incentivaram neste desafio.*

Agradecimentos

Desejo registrar o mais profundo reconhecimento a todos que me acompanharam e apoiaram ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por iluminar minhas decisões para que meu caminho chegasse até aqui.

Registro também minha gratidão às pessoas mais importantes de minha vida. A vocês, meus pais, Altair e Gorete, vocês foram meus primeiros grandes professores, obrigado por me ensinarem as lições mais importantes da vida e por muitas vezes sacrificarem seus próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. A vocês, queridos irmãos, Kalyne, Natalia, Pedro Henrique e Ana Júlia por estarem sempre do meu lado, vocês são minha inspiração, exemplo de fraternidade, compreensão e paciência. Amo vocês!

Aos meus grandes amigos e membros do laboratório WOCA. Especialmente ao Ramon, Eduardo, Matheus, Andreia, Hugo e Tiago, pelas valiosas contribuições neste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) por conceder a estrutura necessária e à fundação Inatel (Finatel) pelo apoio financeiro para a realização do curso de Mestrado. A todos os professores do Inatel.

A meu orientador Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior, pela confiança e pelos ensinamentos transmitidos. Muito obrigado!

Ao professor Dr. Luciano Leonel Mendes pela confiança e ensinamentos ao longo do programa de estágio docente (PED), como parte de minha formação acadêmica.

À empresa Keysight Technologies pelo suporte técnico oferecido ao longo dos experimentos desta dissertação, especialmente aos engenheiros Rodrigo Vicentini, Lucas Nabuco e Bruno Duarte.

Aos engenheiros José Reis e Ricardo Alfredo da empresa Rohde & Schwarz, pelo apoio técnico oferecido.

Ao Marcelo Abreu e Renato Guadagnini da empresa Venturus pelo empréstimo

de alguns equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, sendo eles um gerador de sinais vetoriais (SMW200A) e um analisador de sinais vetoriais (FSW).

Ao Ricardo Landim, da empresa VivaVox, por fornecer a infraestrutura óptica do provedor de Internet utilizado neste trabalho.

Ao Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR), pelo transceptor 5G nacional utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

À Finep/Funtel por parcialmente financiar este trabalho (Convênio 01.14.0231.00 - Centro de Referência em Radiocomunicações ou CRR), CNPq, CAPES, FAPEMIG.

À RNP por parcialmente financiar este trabalho com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Brasil.

Índice

Índice	x
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Lista de Símbolos	xxi
Lista de Publicações	xxv
Lista de Premiações	xxvii
Resumo	xxix
Abstract	xxxii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Revisão Bibliográfica	8
1.3 Contribuições	11
2 Fundamentos Teóricos	13
2.1 Quinta Geração de Comunicações Móveis	13
2.2 Formas de Onda para 5G	17
2.2.1 OFDM	18
2.2.2 GFDM	20
2.2.3 F-OFDM	22

2.3	Padrão 5G <i>new radio</i>	24
2.4	Sistemas <i>Fiber-wireless</i> 5G	30
3	Análise Numérica de Sistemas <i>Analog-RoF</i> 5G	39
3.1	Sistemas A-RoF	39
4	Implementação de Sistemas <i>Fiber-Wireless</i> 5G	47
4.1	Transceptor 5G Nacional	47
4.2	Implementação de Sistemas 5G NR	50
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Trabalhos Futuros	73
	Apêndices	74
1	Arquivos Fonte das Simulações	75
	Referências Bibliográficas	81

Lista de Figuras

Figura 1.1	Evolução dos sistemas de comunicações móveis.	4
Figura 1.2	Evolução das arquiteturas das redes de telefonia móvel ao longo das gerações: PSTN - <i>public switched telephone network</i> ; MTSO - <i>mobile telephone switching office</i> ; BSC - <i>base station controller</i> ; BTS - <i>base station transceiver</i> ; RNC - <i>radio network controller</i> ; EPC - <i>evolved packet core</i>	5
Figura 1.3	C-RAN para redes móveis 5G.	6
Figura 1.4	Centralização das BBUs.	6
Figura 2.1	Rede 5G baseada em C-RAN e os principais cenários de operação.	14
Figura 2.2	Desafios para aumentar a capacidade de redes móveis [adaptado de [58]].	15
Figura 2.3	Espectro de um sinal OFDM.	18
Figura 2.4	Diagrama em blocos de um sistema OFDM: CP- prefixo cíclico; ADC- conversor analógico para digital; DAC- conversor digital para analógico.	20
Figura 2.5	Diagrama em blocos de um sistema GFDM [adaptado de [78]].	20
Figura 2.6	Estrutura do bloco de transmissão dos sinais OFDM e GFDM.	21
Figura 2.7	Diagrama em blocos da forma de onda F-OFDM.	23
Figura 2.8	Processo de filtragem do F-OFDM.	24
Figura 2.9	Estrutura tempo/frequência do padrão 5G NR.	26
Figura 2.10	Sistemas FiWi 5G baseados em rádio sobre fibra analógico e digital.	32
Figura 2.11	Taxa de bits do padrão LTE em função da taxa resultante do encapsulamento CPRI.	33

Figura 2.12 Esquema básico do rádio sobre fibra: (a) Modulação direta; (b) Modulação externa.	34
Figura 2.13 Modulador de Mach-Zehnder: (a) Representação da estrutura; (b) Função de transferência normalizada.	35
Figura 2.14 Espectro óptico na saída do modulador, no qual observa-se a portadora óptica em 1560 nm e as bandas laterais espaçadas de 26 GHz.	36
Figura 3.1 Inserção do vetor de amostras do Matlab no Optisystem.	40
Figura 3.2 Diagrama em blocos da integração do Matlab e Optisystem.	40
Figura 3.3 Espectros dos sinais OFDM GFDM e F-OFDM.	42
Figura 3.4 Espectros dos sinais transmitidos: (a) OFDM; (b) GFDM; (c) F-OFDM.	44
Figura 3.5 Constelações para a configuração B2B: (a) OFDM; (b) GFDM; (c) F-OFDM.	45
Figura 3.6 Diagrama em blocos de um sistema A-RoF 5G.	45
Figura 3.7 Constelações do sistema RoF para : (a) OFDM; (b) GFDM; (c) F-OFDM.	46
Figura 4.1 Fotografia do transceptor 5G nacional.	48
Figura 4.2 Diagrama em blocos do transceptor 5G nacional [Adaptado da versão original de MSc. Danilo Simões Gaspar].	49
Figura 4.3 Arquitetura de um sistema FiWi 5G baseado em A-RoF: VSG-gerador de sinais vetoriais; DD-MZM- modulador de Mach-Zehnder de duplo interferômetro; DPX- diplexador; EA – amplificador elétrico; VSA- analisador de sinais vetoriais.	51
Figura 4.4 Fotografia do arranjo experimental.	51
Figura 4.5 Espectro elétrico medido na saída do EA ₁	52
Figura 4.6 EVM _{RMS} em função da potência de RF na saída de EA ₁ para o sinal de 3,5 GHz, com modulação 64-QAM.	53
Figura 4.7 EVM _{RMS} em função da potência de RF na saída da antena de transmissão.	55

Figura 4.8 EVM_{RMS} em função da potência óptica na entrada do PD, para as modulações 16 e 64-QAM	56
Figura 4.9 Desempenho de EVM_{RMS} do sistema FiWi 5G NR em 26 GHz em função da largura de faixa para 64-QAM.	57
Figura 4.10 Sistema 5G NR multi-aplicações.	58
Figura 4.11 Arquitetura do sistema FiWi 5G multi-banda baseado em A-RoF e WDM-PON: OLT - terminal de linha óptica; MC - conversor de mídia; ONU - unidade de rede óptica; PC - computador pessoal.	59
Figura 4.12 Fotografias do cenário de medida de desempenho do sistema FiWi multi-bandas: (a) sistema FiWi multi-banda; (b) transmissão do sinal em 788 MHz; (c) recepção do sinal em 26 GHz a 10 m; (d) recepção do sinal em 788 MHz a 105 m.	60
Figura 4.13 Espectro elétrico medido na saída do PD.	62
Figura 4.14 Espectro elétrico das formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM antes da radiação.	62
Figura 4.15 Análise de EVM_{RMS} para as formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM em 788 MHz.	63
Figura 4.16 Desempenho do 5G NR em 3,5 GHz em termos de EVM_{RMS} em função da largura de faixa.	64
Figura 4.17 Espectro e constelação do sinal 5G NR: (a) B2B; (b) RoF; (c) FiWi.	65
Figura 4.18 Fotografia da femto-célula em 26 GHz e com 10 m de alcance.	66
Figura 4.19 EVM_{RMS} em função da largura de faixa, ordem de modulação e uso de DPD em 26 GHz.	66
Figura 4.20 Demodulação de um sinal de 4 Gbit/s em 26 GHz com 10 m de alcance: (a) Constelação; (b) Diagrama de olho; (c) Espectro Elétrico; (d) EVM_{RMS}	67
Figura 4.21 Desempenho de EVM_{RMS} 5G NR em 26 GHz em função da largura de faixa.	68
Figura 4.22 Medição de latência: (a) B2B; (b) Enlace óptico.	69
Figura 4.23 Desempenho da aplicação FTTH na saída da ONU.	70

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Revisão bibliográfica e contribuições da dissertação.	12
Tabela 2.1	Implementação de redes comerciais 5G em FR1.	16
Tabela 2.2	Implementação de redes comerciais 5G em FR2.	17
Tabela 2.3	Frequências e bandas de operação do 5G NR segundo o 3GPP.	24
Tabela 2.4	Numerologia em função do espaçamento entre subportadoras.	26
Tabela 2.5	Fator multiplicativo do cabeçalho de acordo com a frequência de operação.	27
Tabela 2.6	Alocação de blocos de recursos em função da largura de faixa e Δf para FR1.	28
Tabela 2.7	Alocação de blocos de recursos em função da largura de faixa e Δf para FR2.	28
Tabela 2.8	Exemplos de cálculo de máxima vazão de dados teórica para 256-QAM [87].	29
Tabela 3.1	Especificações de EVM_{RMS} segundo o 3GPP [106].	43
Tabela 3.2	Parâmetros de geração dos símbolos OFDM, GFDM e F-OFDM.	43
Tabela 4.1	Parâmetros de transmissão do sinal 5G NR para espaçamento entre subportadoras de 120 kHz.	54
Tabela 4.2	Níveis de potência óptica e elétrica.	61

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>
A-RoF	<i>Analog Radio-over-fiber</i>
ADC	<i>Analog-to-digital Converter</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
AWG	<i>Arbitrary Waveform Generator</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BBoF	<i>Baseband-over-fiber</i>
BBU	<i>Baseband Unit</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
C-RAN	<i>Centralized Radio Access Network</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CO	<i>Central Office</i>
CORESETs	<i>Control Resource Sets</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>

CP-OFDM	<i>Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CPRI	<i>Common Public Radio Interface</i>
CS	<i>Cyclic Suffix</i>
CSI-RS	<i>Channel State Information Reference Signal</i>
CU	<i>Centralized Unit</i>
D-RoF	<i>Digital Radio-over-fiber</i>
DAC	<i>Digital-to-analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DCI	<i>Downlink Control Information</i>
DD-MZM	<i>Dual-drive Mach-Zehnder Modulator</i>
DFB	<i>Distributed Feedback</i>
DL	<i>Downlink</i>
DMRS	<i>Demodulation Reference Signal</i>
DPD	<i>Digital Predistortion</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DU	<i>Distribution Unit</i>
E/O	<i>Electrical-to-optical Conversion</i>
EA	<i>Electrical Amplifier</i>
eCPRI	<i>evolved CPRI</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
eRAC	<i>Enhanced Remote Area Communications</i>
ESA	<i>Electrical Spectrum Analyzer</i>
EVM_{RMS}	<i>Root Mean Square Error Vector Magnitude</i>
F-OFDM	<i>Filtered OFDM</i>
FBMC	<i>Filter Bank Multi Carrier</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FiWi	<i>Fiber-wireless</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>

FR1	<i>Frequency Range 1</i>
FR2	<i>Frequency Range 2</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
GFDM	<i>Generalized frequency division multiplexing</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
GSM	<i>Global System Mobile</i>
IBI	<i>Interblock interference</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IFoF	<i>Intermediate Frequency-over fiber</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LD	<i>Laser</i>
LDPC	<i>Low-density Parity-check Code</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LTE	<i>Long-term Evolution</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MATP	<i>Maximum Transmission Point</i>
MC	<i>Media Converter</i>
MF	<i>Matched Filter</i>
MIMO	<i>Multiple-input Multiple-output</i>
MITP	<i>Minimum Transmission Point</i>
mm-waves	<i>Millimeter Waves</i>
MMF	<i>Multi-mode Fiber</i>
MMSE	<i>Minimum Mean Squared Error</i>
mMTC	<i>Massive Machine Type Communication</i>
MTSO	<i>Mobile Telephone Switching Office</i>
MWP	<i>Microwave Photonics</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telecommunications</i>
O/E	<i>Optical-to-electrical Conversion</i>

OBSAI	<i>Open Base Station Architecture Initiative</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OOBE	<i>Out-of-band Emission</i>
OPM	<i>Optical Power Monitor</i>
ORI	<i>Open Radio Equipment Interface</i>
PAPR	<i>Peak-to-average Power Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PD	<i>Photodetector</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PIN	<i>P-intrinsic-N</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PSS	<i>Primary Synchronization Signal</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
PTRS	<i>Phase-tracking Reference Signal</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QAM	<i>Quadrature and Amplitude Modulation</i>
QP	<i>Quadrature Point</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RAU	<i>Remote Antenna Unit</i>
RBW	<i>Resolution Bandwidth</i>
RF	<i>Radiofrequency</i>
RFoF	<i>Radiofrequency-over-fiber</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RoF	<i>Radio-over-fiber</i>
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
SC-FDE	<i>Single-Carrier Frequency Domain Equalization</i>

SC-FDM	<i>Single Carrier Division Multiplexing</i>
SD-MZM	<i>Single-drive Mach-Zehnder Modulator</i>
SMF	<i>Single-mode Fiber</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNR	<i>Signal-to-noise Ratio</i>
SSS	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
STC	<i>Space Time Coding</i>
TACS	<i>Total Access Communication System</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TR-STC	<i>Time Reversal STC</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UF-OFDM	<i>Universal-filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
UL	<i>Uplink</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low-latency Communication</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
VEA	<i>Variable Electrical Attenuator</i>
VOA	<i>Variable Optical Attenuator</i>
VSA	<i>Vector Signal Analyzer</i>
VSG	<i>Vector Signal Generator</i>
W-CDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WOLA	<i>Weighted Overlap and Add</i>
ZF	<i>Zero Forcing</i>

Lista de Símbolos

A_{bit}	Número de amostras por bit
\mathbf{B}	Matriz de demoduação
B_c	Banda de coerência do canal
B_s	Banda de transmissão de um símbolo
C	Codificação do padrão CPRI
Δf	Espaçamento entre as subportadoras
d_k	Conjunto de símbolos QAM de transmissão
$d_{k,m}$	Símbolo de dado transmitido na K -ésima subportadora e no M -ésimo sub-símbolo
$E_{\text{in}}(t)$	Campo elétrico de entrada da portadora óptica
$E_{\text{out}}(t)$	Campo elétrico de saída da portadora óptica
f	Frequência
$f^{(j)}$	Fator de escala
f_s	Frequência de amostragem
$g_k[n]$	Pulso transmitido na k -ésima subportadora
$g[n]$	Protótipo do filtro de transmissão
h	Constante de Planck
$H[k]$	Resposta em frequência do canal
$h[n]$	Resposta impulsiva do canal
I_p	Corrente fotodetectada
J	Quantidade de bandas agregadas
K	Número de subportadoras
K_{on}	Subportadoras ativas

M	Sub-símbolos
μ	Numerologia
N	Número de pontos da IFFT/FFT
N_a	Número de antenas por setor
N_e	Número de elétrons liberados por segundo
N_f	Número de fótons incidentes por segundo
$N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$	Número de blocos de recurso alocados para dada numerologia
$OH^{(j)}$	Cabeçalho utilizado para sinalização
ω_{RF_1}	Frequência angular do sinal elétrico de entrada no braço superior do modulador óptico
ω_{RF_2}	Frequência angular do sinal elétrico de entrada no braço inferior do modulador óptico
ϕ_1	Fase resultante da aplicação da tensão de polarização no braço superior do modulador óptico
ϕ_2	Fase resultante da aplicação da tensão de polarização no braço inferior do modulador óptico
P_{in}	Potência incidente no fotodetector
Q_{bits}	Quantidade de bits utilizados para quantização
$Q_m^{(j)}$	Número de bits por símbolo modulado
R	Responsividade do fotodetector
R_b	Vazão de dados em bits/s
$\text{rect}[n]$	Pulso de transmissão retangular
RF_1	Sinal de RF aplicado ao braço superior do modulador óptico
RF_2	Sinal de RF aplicado ao braço inferior do modulador óptico
R_{max}	Máxima taxa de codificação
T	Tempo de sinalização
T_s^μ	Duração média de um símbolo OFDM para dada numerologia
V_{bias}	Tensão de modulação
V_{e_1}	Tensão de modulação aplicada aos eletrodos do braço superior do modulador óptico
V_{e_2}	Tensão de modulação aplicada aos eletrodos do braço superior do modu-

	lador óptico
$v_{\text{Layers}}^{(j)}$	Número de camadas para aplicações com múltiplas antenas de transmissão e recepção
V_{m_1}	Amplitude do sinal elétrico de entrada no braço superior do modulador óptico
V_{m_2}	Amplitude do sinal elétrico de entrada no braço inferior do modulador óptico
V_π	Tensão de meia onda do modulador de Mach-Zehnder
$W[k]$	Transformada discreta de Fourier de $w[n]$
$w[n]$	Amostras do ruído AWGN
\mathbf{y}_{eq}	Sinal recebido e equalizado no domínio da frequência
$y[n]$	Sinal discreto recebido

Lista de Publicações

Periódicos:

- (i) R. M. Borges, **L. A. M. Pereira**, H. R. D. Filgueiras, A. C. Ferreira, M. S. B. Cunha, E. R. Neto, L. L. Mendes and Arismar Cerqueira S. Jr., “DSP-based Flexible-waveform and Multi-application 5G Fiber-Wireless System,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642-653, 1 Fevereiro.1, 2020.
- (ii) E. S. Lima, R. M. Borges, **L. A. M. Pereira**, H. R. D. Filgueiras, A. M. Alberti and Arismar Cerqueira S. Jr., “Multiband and photonicallly amplified fiber-wireless Xhaul,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44381-44390, Março, 2020.
- (iii) E. S. Lima, **L. A. M. Pereira**, R. M. Borges and Arismar Cerqueira S. Jr., “Brillouin Effect Impact in RoF Systems with Photonic-Assisted RF amplification,” *Journal of Communication and Information Systems*. Aceito em Maio de 2020.
- (iv) **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 Multi-band 5G NR Fiber-Wireless System using Analog Radio over Fiber Technology” *Optics communications*. Submetido em Fevereiro de 2020.
- (v) E. S. Lima, **L. A. M. Pereira**, R. M. Borges, M. A. Oliveira and Arismar Cerqueira S. Jr., “Photonicallly-amplified Mobile Backhaul and 5G NR Fronthaul,” *IET Optoelectronics* , Submetido em Março de 2020.
- (vi) R. M. Borges, **L. A. M. Pereira**, A. C. Ferreira, L. L. Mendes, D. H. Spadoti and Arismar Cerqueira S. Jr., “5G NR Fiber-Wireless System for Long-reach and eMBB Scenarios,” *Microwave and Optical Technology Letters*, Submetido em Abril de 2020.

Congressos:

- (vii) R. M. Borges, **L. A. M. Pereira**, T. R. R. Marins, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, Arismar Cerqueira S. Jr., “Implementação de uma Rede Óptico-Wireless Baseada em GFDM para 5G,” In *Encontro Anual do Iecom em Comunicações, Redes e Criptografia (ENCOM 2018)*, Salvador-BA, 2018.
- (viii) E. S. Lima, **L. A. M. Pereira**, R. M. Borges and Arismar Cerqueira S. Jr., “Impacto do Efeito Brillouin em Sistemas Óptico-wireless com Amplificação de RF no Domínio Fotônico,” In *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Petrópolis-RJ, 2019.
- (ix) R. M. Borges, **L. A. M. Pereira**, T. R. R. Marins, L. L. Mendes, D. H. Spadoti and Arismar Cerqueira S. Jr., “Sistema fibra/rádio com vazão de Gbit/s para aplicações 5G,” In *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Petrópolis-RJ, 2019.
- (x) E. S. Lima, **L. A. M. Pereira**, R. M. Borges, Arismar Cerqueira S. Jr., “Photonics-assisted Amplification for Baseband-over-Fiber Links,” In *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro-Portugal, 2019.

Lista de Premiações

1. Trabalho premiado como melhor artigo na área de comunicações ópticas: Impacto do Efeito Brillouin em Sistemas Óptico-wireless com Amplificação de RF no Domínio Fotônico, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, Petrópolis-RJ, 2019.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a concepção e a implementação de um *fronthaul* baseado na tecnologia analógica rádio sobre fibra (A-RoF) para sistemas 5G. Inicialmente, apresenta-se análises de desempenho numéricas das formas de onda OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*), GFDM (*generalized frequency division multiplexing*) e F-OFDM (*filtered OFDM*), as quais foram geradas no Matlab integradas ao Optisystem e demoduladas no Matlab.

Posteriormente relata-se a implementação de sistemas *fiber-wireless* (FiWi) 5G, com vazão de dados da ordem de Gbit/s, utilizando o novo padrão 5G NR (*5G new radio*). Adicionalmente emprega-se um transceptor 5G nacional desenvolvido no Intel ao longo do projeto CRR, que possui a flexibilidade da escolha entre as formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM. De posse dos dois sinais 5G, aplicou-se a técnica analógica rádio sobre fibra para distribuição simultânea de múltiplos sinais de RF em um *fronthaul* óptico. O *fronthaul* proposto neste trabalho foi integrado à uma rede óptica de um provedor de Internet para a distribuição dos sinais nas faixas de frequências previstas para redes 5G, tais como, 788 MHz, 3,5 GHz e 26 GHz. Resultados numéricos e experimentais demonstram aplicabilidade da solução proposta, com vazão de 210,9 Mbit/s e 4,41 Gbit/s, respectivamente.

Palavras-Chave: 5G NR, FiWi, fotônica de micro-ondas, *fronthaul*, rádio sobre fibra.

Abstract

This work reports the design and implementation of an analog radio-over-fiber-based fronthaul solution for 5G systems. We have numerically investigated the performance of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), generalized frequency division multiplexing (GFDM) and filtered OFDM (F-OFDM), which have been generated using Matlab integrated on Optisystem and demodulated in Matlab.

Afterwards, we have reported a 5G FiWi system with Gbit/s throughput, using 5G new radio (5G NR) standard. Additionally, we have employed the Brazilian 5G transceiver, which can cover OFDM, GFDM and F-OFDM waveforms. We have applied the Analog-radio-over-fiber (A-RoF) solution for simultaneously distribute multiple radiofrequency (RF) signals through optical fronthaul. Such solution take advantages of an Internet service provider for distributing RF signal in the 5G frequency bands, e.g., 788 MHz, 3.5 GHz and 26 GHz. Numerical and experimental results demonstrated the proposed solution feasibility, achieving throughput of 210.9 Mbit/s and 4.41 Gbit/s.

Keywords: *5G NR, FiWi, fronthaul, analog radio-over-fiber, fronthaul, microwave photonics.*

Capítulo 1

Introdução

As comunicações móveis estão em constante evolução modificando o modo como as pessoas acessam e compartilham informações. Os primeiros sistemas permitiram a comunicação por voz entre usuários utilizando técnicas de transmissão analógicas. Ao decorrer dos anos, desenvolveram-se os sistemas celulares digitais e a Internet móvel, em paralelo com a evolução dos aparelhos celulares. A partir disso, houve um crescimento considerável de aplicativos e serviços virtuais, nos quais os usuários passaram a operar na rede celular como consumidores e produtores de informação. Conseqüentemente, a evolução nas arquiteturas das RANs (*Radio Access Networks*), tornou-se primordial. O presente capítulo apresenta uma breve abordagem sobre a evolução das comunicações móveis e exhibe as tendências das redes de acesso do sistema de telefonia móvel de quinta geração (5G).

1.1 Contextualização

Na década de 80 surgiu o sistema de telefonia móvel de primeira geração (1G), com o objetivo de prover comunicação por voz. Utilizou-se a tecnologia de modulação analógica e a técnica FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) para fornecer múltiplo acesso aos usuários em frequência distintas. Diversos sistemas celulares foram desenvolvidas nesta época, como é o caso do NMT (*Nordic Mobile Telecommunications*), TACS (*Total Access Communication System*) e AMPS (*Advanced Mobile Phone Sys-*

tem) [1]. Outro fator importante desta geração, refere-se ao formato hexagonal das células, o qual influencia no planejamento de frequências do sistema. Este formato foi escolhido considerando transmissões omnidirecionais com as BTSs (*Base Transceiver Stations*) posicionadas no centro da célula com área de cobertura similar à um círculo. Contudo, o formato circular apresenta áreas de sobreposição ou áreas descobertas quando um conjunto de células são implementados. Alguns polígonos regulares não apresentam esta desvantagem, como é o caso do hexágono, triângulo e o quadrado. Logo, o formato hexagonal foi escolhido por apresentar maior similaridade á um círculo [2]. Além disso, implementou-se técnicas de reuso de frequência para estender a área de cobertura do sistema. Desta forma, as frequências utilizadas em uma BTS podem ser utilizadas simultaneamente em outra BTS, posicionada a uma distância suficiente para evitar ou minimizar interferência. O sistema 1G já contava com mecanismos de *roaming* e *handoff*, os quais possibilitam comunicação móvel fora do serviço local e transição entre células, respectivamente.

O emprego de tecnologia digital em sistemas celulares permitiu um avanço considerável em termos de desempenho e capacidade da rede, fato que culminou no desenvolvimento do sistema de telefonia móvel de segunda geração (2G). Esta evolução, permitiu aumentar a qualidade da transmissões de voz, a segurança e a capacidade do sistema. Além disso, no 2G foi implementado o serviço de SMS (*Short Message Service*). Em redes de segunda geração, o controle de acesso aos recursos da rede é realizado tanto no tempo quanto na frequência, por meio das técnicas de TDMA (*Time Division Multiple Access*) e divisão na frequência FDMA, respectivamente. Dentre os padrões 2G, destacam-se o padrão europeu GSM (*Global System Mobile*) e os padrões americanos IS-54, IS-136 e IS-95 [3]. O último deles, também conhecido como (CDMA-One), utiliza a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), a qual aplica códigos pseudo-aleatórios para separar as informações de diversos usuários regendo o acesso ao meio. Adicionalmente, desenvolveu-se um mecanismo de controle de potência, a fim de mitigar as interferências entre usuários.

O surgimento do sistema de telefonia móvel de terceira geração (3G) contribuiu significativamente para popularização da Internet e dos serviços baseados em pacotes. Nas redes de terceira geração, o múltiplo acesso aos recursos da rede é realizado por

meio da técnica W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). A diferença crucial do W-CDMA em relação ao CDMA, está na utilização de múltiplas portadoras banda larga. Para tornar o mercado do 3G global, ao contrário do que aconteceu no 2G onde cada continente utilizava um padrão celular diferente, criou-se a organização padronizadora 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Tal organização fornece as especificações de sistemas de comunicações móveis, em forma de *Releases*, atuando inclusive nas gerações de comunicações móveis sucessoras [4]. O uso de novas técnicas de transmissão possibilitou a evolução dos sistemas celulares, visando o aumento de capacidade e da vazão de dados. Dentre estas técnicas, cita-se o uso de MIMO (*Multiple-input Multiple-output*) o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a agregação de portadoras, as quais são empregadas em sistema de telefonia móvel de quarta geração (4G).

O 4G surgiu para suprir a crescente demanda por elevadas taxas de transmissões e alta capacidade. O padrão de comunicações móveis 4G ficou conhecido como LTE (*Long-term Evolution*). Nas redes de quarta geração, utiliza-se no DL (*Downlink*) a técnica OFDM, na qual divide-se a largura de banda total do sinal em múltiplas sub-bandas, espaçadas de 15 kHz, acrescentando robustez contra desvanecimentos seletivos causados por múltiplos percursos [5]. O múltiplo acesso ao meio é realizado por meio da combinação das técnicas OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e TDMA. No UL (*Uplink*), utiliza-se a forma de onda SC-FDE (*Single-Carrier Frequency Domain Equalization*) e TDMA/FDMA para controlar o acesso ao meio.

A Figura 1.1 apresenta um resumo das evoluções das redes de comunicações móveis com suas principais características. Ao longo da evolução das redes móveis, houve um aumento da complexidade uma vez que as novas técnicas de comunicação tenham que atender novo pré-requisitos desafiadores. As redes móveis de quinta geração possibilitam novas funcionalidades, por meio da melhoria de técnicas utilizadas nas gerações anteriores, bem como novas técnicas e abordagens aplicadas a novos cenários de uso da rede móvel [6].

A viabilização dos casos de uso do 5G requerem o desenvolvimento de uma nova tecnologia de rede de acesso flexível. O 3GPP, em 2017, iniciou a padronização da

tecnologia denominada, 5G NR (*5G New Radio*). As principais vantagens do 5G NR em relação ao LTE incluem: formas de onda com características que favorecem a coexistência com outras tecnologias; larguras de faixa maiores; redução da PAPR (*Peak-to-average Power Ratio*); latência reduzida [7].

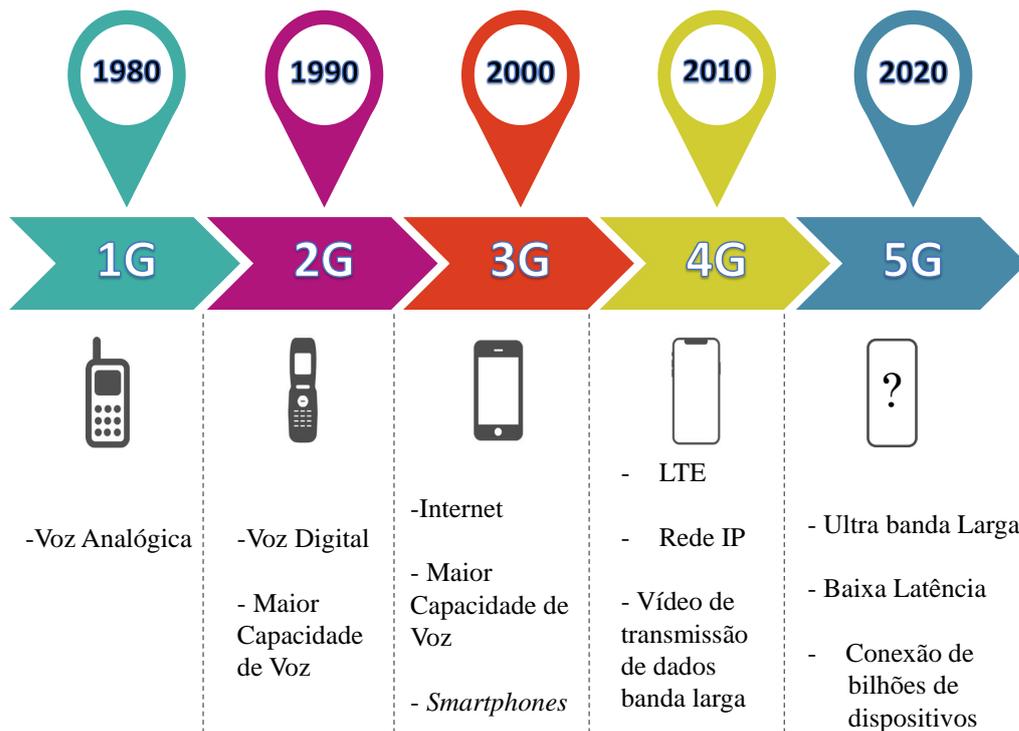


Figura 1.1: Evolução dos sistemas de comunicações móveis.

A diversidade de funcionalidades oferecidas pelo 5G possibilita o aumento expressivo de dispositivos conectados à rede e do tráfego de dados. Consequentemente, a arquitetura de rede 5G deve suportar bilhões de dispositivos conectados, além de favorecer a implementação de novas tecnologias. Desta forma, as arquiteturas de redes tradicionais, empregadas nas gerações de comunicações móveis anteriores, estão sendo modificadas a fim de aumentar a eficácia da distribuição, transporte e transmissão de sinais de RF (*Radiofrequency*).

O aumento expressivo de usuários utilizando o sistema celular satura a capacidade da rede, impulsionando o desenvolvimento de novas arquiteturas e melhoria de cobertura oferecida pela rede móvel. Na Figura 1.2. tem-se a evolução das arquiteturas de rede ao longo do desenvolvimento das gerações de comunicações móveis. No sistema

móvel 1G, o MTSO (*Mobile Telephone Switching Office*) realiza a conexão entre a PSTN (*Public Switched Telephone Network*) e as BTSs. Na arquitetura de rede 2G, adicionou-se os BSCs (*Base Station Controllers*). Dentre as funções da BSC, cita-se: controle de potência de transmissão das BTSs; monitoramento e controle de qualidade das ligações; alocação do canal utilizado na ligação; controle de *handoff* para outras células. Nas arquiteturas de rede 3G, acrescentou-se os RNCs (*Radio Network Controllers*), as estações rádio base passaram a ser denominadas como NodeB. Nas redes 4G, o núcleo da rede realiza tarefas adicionais e passou a ser denominado EPC (*Evolved Packet Core*). A estação rádio base (eNodeB) passou a realizar processamento que anteriormente era realizado pela RNC. A evolução das redes celulares apontam para a necessidade de aprimoramento em vários pontos da rede. Contudo, as modificações realizadas para viabilizar a implementação de novos sistemas também deve acomodar tecnologias legadas, as quais são substituídas de maneira gradual.

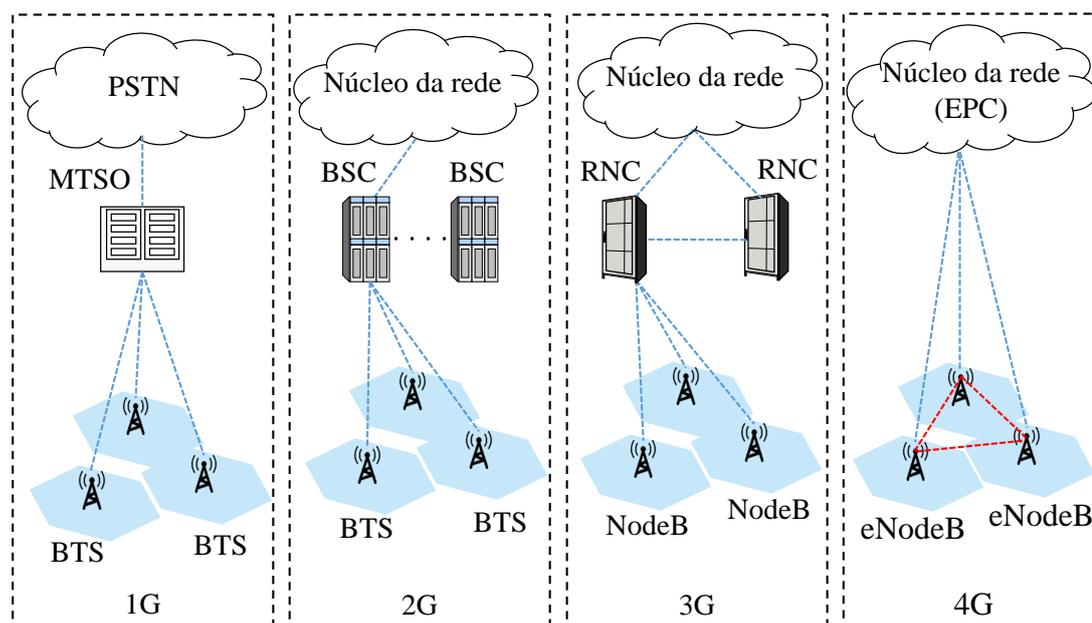


Figura 1.2: Evolução das arquiteturas das redes de telefonia móvel ao longo das gerações: PSTN - public switched telephone network; MTSO - mobile telephone switching office; BSC - base station controller; BTS - base station transceiver; RNC - radio network controller; EPC - evolved packet core.

A Figura 1.3 expõe a implementação da arquitetura de C-RAN (*Centralized Radio Access Network*), a qual tem despertado interesse na implementação de redes 5G. Em tal arquitetura, conecta-se a RRU (*Remote Radio Unit*) à CO (*Central Office*), uti-

lizando um enlace de fibra óptica conhecido como *fronthaul*. Nas COs, centraliza-se as BBUs (*Baseband Units*), permitindo reduzir o processamento nas BTSs. A centralização das BBUs é classificada de acordo com a interação entre BBU e RRU, como exemplifica a Figura 1.4. Classifica-se como *BBU pool* o compartilhamento de recursos entre BBUs para atender diversas RRU. Obtêm-se o *BBUs hostel* ao conectar-se cada BBU individualmente à RRU. Por fim, as BBUs podem ser virtualizadas e processadas computacionalmente, criando o conceito *BBU cloud* [8].

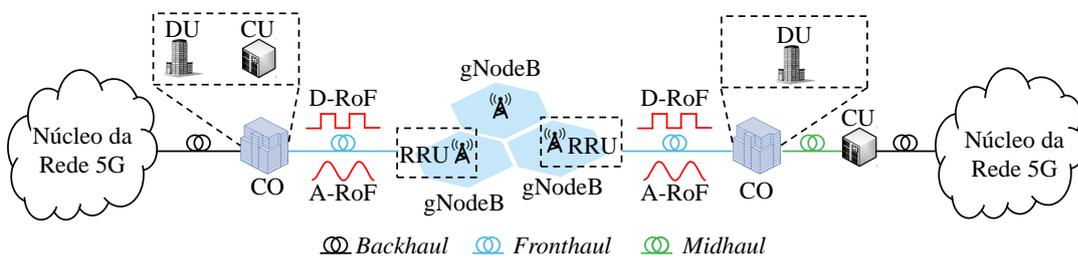


Figura 1.3: C-RAN para redes móveis 5G.

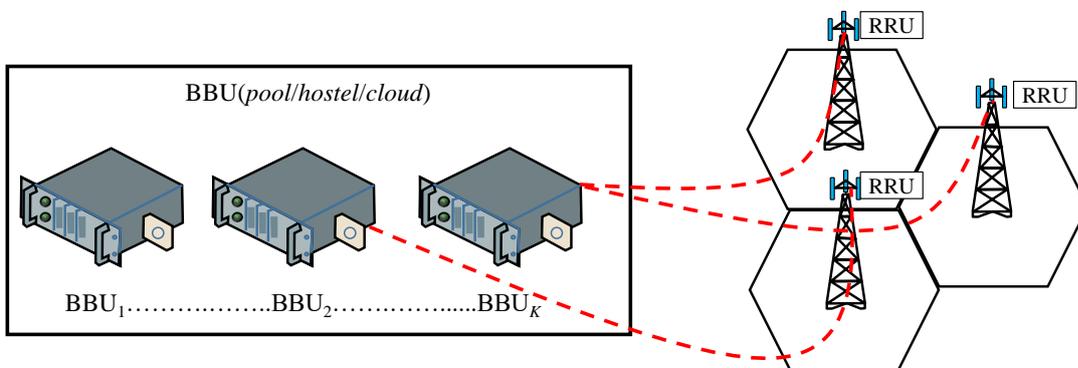


Figura 1.4: Centralização das BBUs.

Nas redes de acesso C-RAN, aplica-se uma divisão funcional, com o objetivo de minimizar a latência e aumentar a flexibilidade do sistema [9]. Tal divisão gerou duas novas unidades de rede conhecidas como DU (*Distribution Unit*) e CU (*Centralized Unit*). As unidades DU e CU realizam algumas das funções das BBUs tradicionais, podendo ser alocadas na CO ou implementadas separadamente. Na configuração em que implementa-se somente a unidade DU na CO, cria-se um novo enlace de transmissão óptico (*midhaul*) para conectar a CO e DU. Por fim, conecta-se o núcleo da rede 5G à CO ou CU por meio de um *backhaul* óptico.

Tipicamente, transporta-se os sinais no *fronthaul* utilizando a técnica de D-RoF (*Digital Radio-over-fiber*). Os padrões de transmissão digital comumente utilizados são: CPRI (*Common Public Radio Interface*); eCPRI (*evolved CPRI*); OBSAI (*Open Base Station Architecture Initiative*); ORI (*Open Radio Equipment Interface*). Nos últimos anos, intensificou-se o uso de técnicas D-RoF para transmissão de dados em enlaces *fronthaul*. Contudo, o aumento da vazão de dados e a implementação de transmissões MIMO em redes 5G requerem taxas de transmissões extremamente elevadas ao utilizar-se D-RoF. Isto torna-se ainda mais crítico com o aumento da frequência de operação, devido à necessidade de aumento da frequência de amostragem. O padrão CPRI utiliza de 4 a 20 bits para representar cada amostra I e Q a ser transmitida. Em síntese, o padrão CPRI apresenta baixa eficiência espectral uma vez que os recursos de banda disponíveis são esgotados rapidamente com o aumento da taxa de transmissão dos sinais transportados. Desta forma, métodos para melhorar a eficiência de transmissão em sistemas D-RoF, aplicando compressão de dados, vêm sendo propostos [10, 11]. Paralelamente, aumentou-se o interesse na solução A-RoF (*Analog Radio-over-fiber*) no *fronthaul*.

Neste contexto, sistemas FiWi (*Fiber-wireless*) baseados na tecnologia A-RoF vêm sendo propostos para arquiteturas 5G, com o intuito de favorecer a transmissão simultânea de múltiplos sinais de RF entre uma estação rádio base centralizada e a RAU (*Remote Antenna Unit*) [12, 13]. Tal aplicabilidade permite explorar a infraestrutura óptica existente, bem como sua capilaridade para criar uma rede banda larga de distribuição de sinais de RF. O “estado da arte” inclui a distribuição de sinais em ondas milimétricas e formas de onda potenciais para 5G [14], bem como enlaces RoF (*Radio-over-fiber*) para C-RAN [15], auxiliados inclusive por DSP (*Digital Signal Processing*) [16]. As arquiteturas correlacionadas vêm sendo implementadas utilizando diversas técnicas e componentes, como por exemplo, modulação direta e externa de fontes luminosas, moduladores eletro-ópticos de braço único e de fase e quadratura, fotodetectores PIN (*P-intrinsic-N*) e APDs (*Avalanche Photodiodes*) [17, 18]. Por conseguinte, os sistemas FiWi desempenham um papel importante na construção das redes 5G, oferecendo uma solução promissora de transporte e transmissão de múltiplos sinais.

1.2 Revisão Bibliográfica

A partir das premissas apresentadas, identificou-se que a implementação da pluralidade de serviços da rede 5G não converge para uma única solução. Portanto, as arquiteturas de rede 5G contam com o emprego de várias tecnologias que geralmente são tratadas de maneira isolada, resultando em diversas possibilidades de pesquisa. Uma das áreas amplamente discutidas refere-se à escolha do esquema de multiplexação para transmissão de sinais 5G. Nas redes de comunicações de quarta geração, emprega-se o esquema de multiplexação OFDM, proposto em 1966, o qual tornou-se muito popular devido a robustez contra desvanecimentos causados por múltiplos percursos [19]. Porém, a OOBE (*Out-of-band Emission*) e a elevada PAPR não são atrativas para sistemas de quinta geração [20–22]. Devido a estas características, aumentou-se o interesse por parte da comunidade científica em propor formas de onda capazes de reduzir ou eliminar os referidos problemas do OFDM. Pesquisas apontam para as seguintes formas de onda: GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*); UF-OFDM (*Universal-filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing*); FBMC (*Filter Bank Multi Carrier*) [23, 24] para compor a camada física de sistemas 5G. A *Release 15* do 3GPP definiu a forma de onda CP-OFDM (*Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), incluindo as opções de filtragem e janelamento para cenários de operação que requerem taxas de transmissão na ordem de Gbit/s [25–27].

N. Michailow e colaboradores identificaram o GFDM como uma forma de onda inovadora e flexível, capaz de atender simultaneamente os pré-requisitos de alta vazão, elevada eficiência energética e baixa latência [28]. A análise de desempenho do GFDM considerou a taxa de erros de símbolos ao transmitir sinais 5G em canais caracterizados como AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) e canais seletivos em frequência e variantes no tempo. Os autores também investigaram a complexidade de implementação de um transceptor GFDM.

Os autores de [29] relataram uma comparação de desempenho de formas de onda potenciais para 5G em termos de OOBE, eficiência espectral, latência, complexidade de implementação, robustez contra erros de sincronismo. O cenário 5G abordado, refere-se à comunicação massiva entre máquinas, ressaltando-se as principais vanta-

gens e desvantagens das formas de onda em função de uma relação de compromisso entre complexidade e desempenho.

A. Delmade e colaboradores demonstraram experimentalmente a coexistência das formas de onda OFDM, GFDM e UF-OFDM em um *fronthaul* de 25 km [30]. O sinal elétrico modulante foi constituído de sinais OFDM provenientes de uma rede LTE, combinados com sinais 5G (GFDM e UF-OFDM) aplicados à uma fonte óptica pelo processo de modulação direta. Utilizou-se a métrica de medida do EVM_{RMS} (*Root Mean Square Error Vector Magnitude*) em função da potência óptica na entrada do fotodetector. Com isto, avaliou-se o desempenho dos sinais coexistindo em canais adjacentes.

Outra área chave, que gerou grande interesse na comunidade científica, refere-se a utilização da MWP (*Microwave Photonics*) para a geração, o processamento e a distribuição de sinais de RF no domínio óptico. Particularmente, a técnica RoF permite distribuir sinais analógicos (A-RoF) e digitais (D-RoF) ao longo do *fronthaul* óptico, além de favorecer a implementação de transmissões na faixa de micro-ondas e mm-waves (*Millimeter Waves*), com a vantagem da atenuação das fibras ópticas (0,2 dB/km) [31]. O emprego de MWP para gerar e processar sinais no domínio óptico começou a ser explorado na década de 80; experimentos pioneiros demonstraram a transmissão de um sinal na frequência de 4,4 GHz ao longo de 1,1 km de fibra óptica [32]. No contexto de telecomunicações, aplicou-se o sistema RoF pela primeira vez para fornecer serviços de telefonia sem fio de segunda geração na rede de acesso [33].

No contexto do 5G, aplica-se RoF nas arquiteturas C-RAN [34] para distribuição de sinais analógicos ou digitais entre as COs e RRUs via SMF (*Single-mode Fiber*). Complementarmente, adiciona-se um enlace sem fio para conexão entre o usuário e a rede, dando origem aos sistemas FiWi. As principais pesquisas de RoF para redes 5G incluem sistemas modulados com múltiplas bandas [35], implementação de redes com capacidade da ordem de Gbit/s [15], transmissão de sinais analógicos ou digitais em *fronthaul* óptico com o auxílio de DSP [16, 36].

Liu e colaboradores [14] demonstraram a geração de um sinal de RF em 60 GHz

utilizando técnicas fotônicas. Posteriormente propuseram em [34] uma nova arquitetura RoF capaz de prover múltiplos serviços como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) e TV analógica. Em relação à distribuição de sinais, Ikeda e colaboradores demonstraram a transmissão simultânea de um sinal em banda base, um sinal na faixa de micro-ondas e um sinal na faixa de mm-waves em um enlace óptico [35].

Paralelamente, as técnicas de compressão de dados vêm sendo exploradas em sistemas D-RoF, com o objetivo de elevar a eficiência dos padrões de transmissão digital. Em [36], os autores aplicaram o algoritmo de R-Lloyd para aumentar a eficiência de compressão de dados do padrão CPRI. Por outro lado, diversos trabalhos expõem a distribuição de sinais em enlaces ópticos por meio de técnicas A-RoF. Noweir e colaboradores propuseram a linearização de um sistema A-RoF aplicando DPD (*Digital Predistortion*) para compensar distorções causadas por amplificadores e conversões óptico-elétricas [16]. Em [37], Tian e colaboradores implementaram uma rede óptica de acesso baseada em GFDM com extensão de 1 km de SMF, alcançando vazão de 4 Gbit/s. Recentemente, nosso grupo de pesquisa *Wireless and Optical Convergent Access* (WOCA), do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), reportou a implementação de um transceptor 5G baseado em GFDM em uma GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) [38]. A arquitetura proposta fez uso da capilaridade de uma rede óptica real para distribuir sinais utilizando as bandas de 700 MHz e 26 GHz, que podem ser empregadas em 5G.

As principais pesquisas sobre FiWi para comunicações 5G demonstram as vantagens desta técnica em termos de flexibilidade, complexidade e desempenho. Em [39], os autores reportaram a transmissão de um sinal analógico F-OFDM (*Filtered OFDM*) em um sistema FiWi composto por 20 km de fibra óptica e antenas log-periódicas. Em [15], os autores demonstraram experimentalmente um *fronthaul* óptico com capacidade da ordem de Gbit/s, operando com frequência intermediária (3,6 GHz) e transmissão com alcance de 5 m com frequências entre 57 e 64 GHz. Em [40], os autores exploraram um sistema FiWi proposto para guiamento de feixe por meio de variação do comprimento de onda da portadora óptica. Dando continuidade aos trabalhos do Grupo WOCA, em [41] R. M. Borges e colaboradores apresentaram um sistema FiWi multi-banda capaz de prover transmissões 5G de longo alcance na frequência de 734 MHz

e comunicações em ambiente interno de alta vazão na frequência de 26 GHz. Finalmente, H. R. D. Filgueiras e colaboradores relataram a implementação de um sistema FiWi multi-banda nas frequências de 7,5 e 28 GHz alcançando vazão de 18 Gbit/s [42].

Esta revisão bibliográfica permitiu identificar algumas áreas-chaves de estudo referentes aos sistemas FiWi 5G. Desta forma foi possível reconhecer o “estado da arte” e com isto, apontar as contribuições desta dissertação. A partir da revisão foi possível selecionar as técnicas adequadas para realização deste trabalho incluindo: A-RoF; modulação externa; detecção direta; utilização de DSP.

1.3 Contribuições

Apresentam-se como principais contribuições deste trabalho, a implementação e análise de redes FiWi 5G baseadas em A-RoF de acordo com a arquitetura C-RAN. Como prova de conceito, analisou-se numericamente e experimentalmente o desempenho de redes FiWi nas faixas de frequências potências para 5G. Adicionalmente, utilizou-se a infraestrutura óptica real do provedor de Internet da empresa VivaVox [43] para distribuição dos sinais 5G, demonstrando a possibilidade de operadoras de telefonia móvel alugarem a infraestrutura óptica existente. A Tabela 1.1 mostra uma comparação do “estado da arte” com as contribuições apresentadas neste trabalho, as quais podem ser listadas da seguinte forma:

- i. Utilização conjunta das ferramentas computacionais Matlab e Optisystem para simulação de um sistema A-RoF.
- ii. Integração do transceptor 5G brasileiro a um sistema FiWi.
- iii. Implementação de um sistema FiWi multi-banda aplicado a macro-células de longo alcance e femto-células de alta vazão.
- iv. Utilização de um sistema FiWi baseado em A-RoF para o transporte e a transmissão de sinais 5G NR de acordo com o 3GPP *Release* 15 nas frequências de 3,5 GHz e 26 GHz.
- v. Análise de desempenho de sistemas FiWi 5G em termos de EVM_{RMS} de acordo com os pré-requisitos do 3GPP.

Tabela 1.1: Revisão bibliográfica e contribuições da dissertação.

Referência	Forma de onda	Arquitetura	Aplicação	Frequência
[14]	-Banda base	-RoF + WDM	-FTTH - Distribuição de RF	-Banda base -18,0 GHz -60,0 GHz
[15]	-QPSK -16-QAM	-FiWi	-5G	-De 57,0 a 64,0 GHz
[16]	-Padrão LTE	-RoF	-LTE	-24,0 GHz
[30]	-OFDM -GFDM -UF-OFDM	-RoF	-4G -5G	-1,5 GHz
[34]	-WiFi -TV analógica	-RoF + -WDM	-TV -WiMAX -WiFi	-2,4 GHz -60,0 GHz
[35]	-DBPSK	-RoF	-FTTH -Distribuição de RF	-Banda base -5,0 GHz -59,6 GHz
[36]	-OFDM -SC-OFDM	-RoF	-5G	-
[37]	-GFDM	-RoF	-5G	-
[38]	-GFDM -16-QAM	-RoF+ WDM	-5G -FTTH	-Banda base -735,0 MHz -26,0 GHz
[39]	-F-OFDM	-FiWi	-5G	-6,0 GHz
[40]	-16-QAM -32-QAM -64-QAM -128-QAM	-FiWi	-5G	-17,6 GHz -26,0 GHz
[41]	-GFDM -16-QAM	-FiWi	-5G	-735,0 MHz -26,0 GHz
[42]	-16-,64- e 256-QAM	-FiWi	-5G	-7,5 GHz -28,0 GHz
Este trabalho [44]	-OFDM -GFDM -F-OFDM -16 e 64 QAM -5G NR	-FiWi + -WDM	-5G	-Banda base -788,0 MHz -3,5 GHz -26,0 GHz

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Este capítulo tem por objetivo apresentar a fundamentação teórica relacionada à implementação de redes de quinta geração. São abordadas formas de onda para 5G, o padrão 5G NR e sistemas FiWi.

2.1 Quinta Geração de Comunicações Móveis

A quinta geração de comunicações móveis emergiu como uma evolução significativa da banda larga móvel, visto tende a suportar ganhos de 1.000 vezes em volume de dados e número de dispositivos conectados em relação ao 4G [45]. Além disso, os sistemas 5G favorecem um ecossistema aberto para inovação, com novos serviços e aplicações em prol de uma sociedade totalmente conectada. Na Figura 2.1 tem-se os principais cenários de uso da rede 5G, incluindo: eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) com comunicações da ordem de Gbit/s; URLLC (*Ultra-Reliable Low-latency Communication*) e mMTC (*Massive Machine Type Communication*). Complementarmente, aplicações de eRAC (*Enhanced Remote Area Communications*) também tem atraído interesse de países de larga extensão, tais como Brasil, China, Rússia e Finlândia [46–48]. Cada cenário de operação apresenta desafios técnicos diferentes, visto que o sistema pode oferecer uma pluralidade de serviços. Os principais serviços oferecidos no cenário eMBB incluem: vídeo *streaming* 3D e 4k; realidade virtual; realidade aumentada; transferência massiva de dados. As aplicações eRAC incluem o

monitoramento da produção rural e desenvolvimento de fazendas inteligentes [49]. No cenário mMTC espera-se bilhões de dispositivos conectados à rede visando aplicações IoT (*Internet of Things*) [50]. Finalmente, com as comunicações URLLC, vislumbra-se acomodar serviços de baixa latência e alta confiabilidade, habilitando aplicações como: cirurgias remotas; Internet táctil; carros autônomos e indústria 4.0 [51, 52]. Assim, soluções técnicas inovadoras e o uso de bandas adicionais do espectro eletromagnético são necessárias para suportar variedade de serviços e casos de uso do 5G [53].

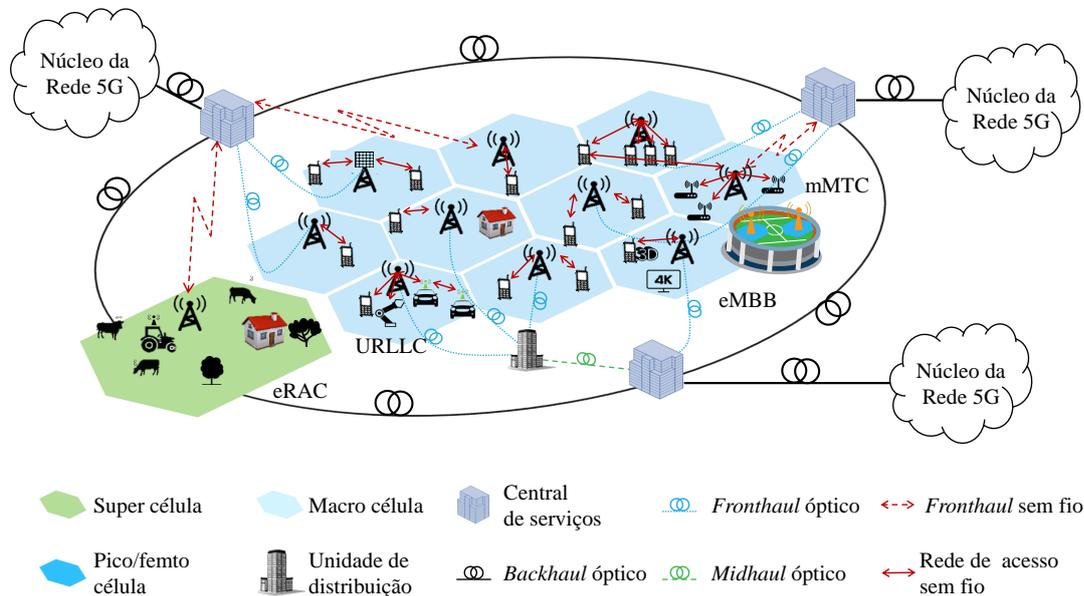


Figura 2.1: Rede 5G baseada em C-RAN e os principais cenários de operação.

As redes móveis 5G oferecem uma evolução em termos de vazão de dados, flexibilidade e qualidade de serviço em relação às redes 4G. Para isso, implementou-se tecnologias capazes de explorar de maneira eficiente e otimizada os recursos físicos existentes. A Figura 2.2 expõe os principais desafios para aumentar a capacidade de redes móveis e as técnicas que permitem superar tais desafios [54]. O uso de novas formas de onda com elevada eficiência espectral, transmissões MIMO e codificações avançadas de canal, permitem aumentar a capacidade da rede. Além disso, a eficiência espectral do sistema como um todo pode ser aperfeiçoada aplicando as técnicas de rádio cognitivo e múltiplos pontos coordenados [55, 56]. Rádios cognitivos permitem alocar a faixa de frequência de operação dinamicamente, possibilitando o uso de ja-

nelas espectrais sub-utilizadas. A técnica de múltiplos ponto coordenados possibilita aumentar a vazão de dados do sistema ao coordenar células adjacentes para conjuntamente transmitir e receber sinais, evitando interferência entre as células. Tal funcionalidade beneficia principalmente os usuários que se encontram nos limites de cobertura da célula e sofrem com maiores interferências. Outra solução para aumentar a capacidade da rede refere-se a implementação de femto-, pico- e nano-células de alta vazão. Porém, tal solução ainda apresenta elevados custos de implementação [57].

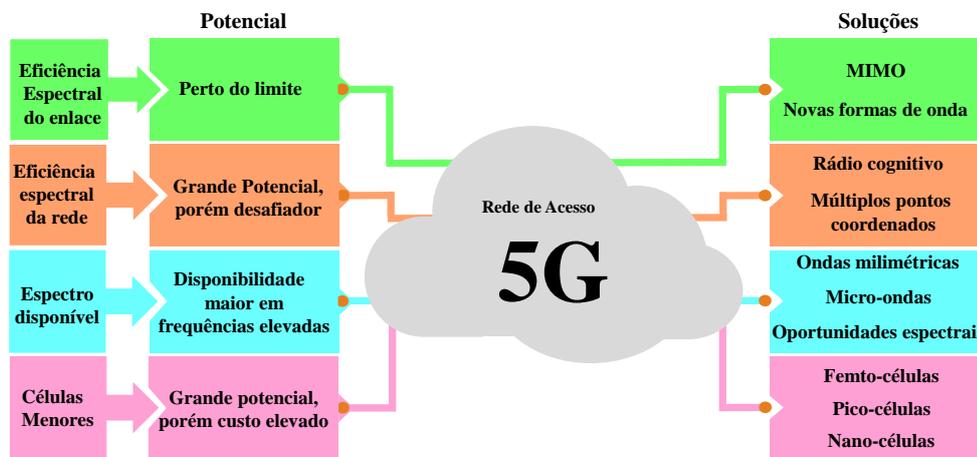


Figura 2.2: Desafios para aumentar a capacidade de redes móveis [adaptado de [58]].

Nas redes de comunicações móveis 5G, identificou-se a necessidade de operar com múltiplas frequências para atender os diversos tipos de serviços oferecidos por cada cenário [59]. Assim, o 3GPP especificou duas faixas de frequências, reconhecidas como FR1 (*Frequency Range 1*) e FR2 (*Frequency Range 2*) [60]. FR1 compreende frequências entre 0,45 até 7,125 GHz e FR2 frequências entre 24,25 e 52,6 GHz. Desta forma, é possível selecionar as faixas de operação adequadas em cada cenário de uso da rede 5G. Por exemplo, as frequências entre 1 e 6 GHz podem ser utilizadas para aplicações mMTC [61]. As frequências pertencentes ao FR2 são atrativas para implementação de femto células visando aplicações eMBB em ambientes internos e URLLC para aplicações de indústria 4.0 [62–66]. Finalmente, as frequências entre 450 MHz e 1 GHz podem ser empregadas no cenário eRAC habilitando cobertura de pelo menos 50 km a partir da estação rádio base [67].

Com a definição do padrão 5G para o cenário eMBB, diversos países deram início a implementação comercial da nova rede móvel 5G. Os Estados Unidos, China, Co-

reia do Sul, Japão e alguns países membros da União Europeia, lançaram em 2019 os primeiros serviços comerciais 5G. As operadoras de telefonia móvel T-Mobile, Sprint, SK Telecom, Verizon e AT&T lançaram recentemente serviços comerciais 5G, atendendo pequenas regiões, mas com planos de extensão de cobertura para os próximos anos. Em paralelo, operadoras móveis como a Docomo, China Telecom Corp, China Mobile Communication Corporation, e outras pretendem implementar o 5G em 2020. Nas Tabelas 2.1 e Tabela 2.2 listam-se as operadoras responsáveis pela implementações de sistemas comerciais 5G no mundo em FR1 e FR2, respectivamente [68].

Tabela 2.1: Implementação de redes comerciais 5G em FR1.

Espectro	<1 GHz	2,3 a 2,5 GHz	3,4 a 3,7 GHz			4,4 a 4,9 GHz
Países						
Serviços comerciais	T-Mobile 2019 AT&T 2020	Sprint 2019 CMCC 2020	Vodafone Orange EE Three TIM 2019/2020	CTC 2020	Docomo 2020 KT&SKT 2019	CMCC 2020 Docomo/ Softbank 2020

No Brasil, algumas bandas de frequências abaixo de 6 GHz são utilizadas para prover serviços de radiodifusão, comunicação por satélite, telefonia móvel de segunda, terceira e quarta geração. A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) gerencia a alocação de espectro e distribui as faixas de frequências de acordo com as aplicações e regiões. Porém, as faixas espectrais para operação do 5G ainda não estão completamente definidas. Desta forma, estuda-se disponibilizar outras frequências além das já definidas na faixa entre 2,3 e 3,5 GHz. Em ondas milimétricas vislumbra-se licenciar a faixa espectral entre 24,5 e 27,5 GHz [69].

Tabela 2.2: Implementação de redes comerciais 5G em FR2.

Espectro	28 GHz		39 GHz
Países		 	
Serviços comerciais	Verizon 2018 AT&T T-Mobile 2019	Docomo/ Softbank 2020 KT e SKT 2020	AT&T 2018 Verizon T-Mobile 2019

2.2 Formas de Onda para 5G

A escolha da forma de onda é uma das decisões mais importante no desenvolvimento de sistemas de comunicações móveis, visto que tal decisão impacta na estrutura temporal e espectral do sinal transmitido [24]. A utilização de formas de onda de múltiplas portadoras reduz os impactos causados pelo desvanecimento seletivo do canal, presente em transmissões que apresentam múltiplos percursos entre as antenas transmissora e receptora. Devido aos múltiplos percursos, oriundos de obstáculos entre a transmissão e recepção, versões atrasadas do sinal chegam à antena de recepção degradando a qualidade da comunicação.

Para determinar se um sinal sofrerá degradações devido a múltiplos percursos, torna-se necessário conhecer a banda de coerência do canal (B_c). Um canal é considerado plano se a banda de coerência for muito maior do que a banda de transmissão de um símbolo (B_s), ou seja, $B_c \gg B_s$ [70, 71]. Neste caso, simplifica-se os equalizadores utilizados na recepção, visto que o sinal recebido é uma réplica do sinal transmitido ponderado por um fator escalar complexo [72]. Desta forma, torna-se interessante utilizar a técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*), na qual divide-se a banda total do sinal entre N canais ou subportadoras de maneira que cada subportadora individualmente sofra um desvanecimento plano.

2.2.1 OFDM

Ainda que a técnica de transmissão por múltiplas portadoras apresente robustez contra efeitos de desvanecimentos causados por múltiplos percursos, a baixa eficiência espectral é um fator limitante na utilização deste método em cenários de densa utilização espectral. Por esta razão, desenvolveu-se a técnica de transmissão de múltiplas portadoras ortogonais. A ortogonalidade permite sobreposição espectral entre as subportadoras sem que haja interferências mútuas. O espaçamento mínimo entre as subportadoras que garante a ortogonalidade depende do tempo de sinalização (T) e obedece a seguinte expressão [73]

$$\Delta f_{\min} = \frac{1}{T}. \quad (2.1)$$

Na técnica OFDM, transmite-se múltiplas portadoras dividindo a taxa de sinalização total entre as N portadoras adotadas. A Figura 2.3 ilustra o espectro de um sinal OFDM. Na referida técnica, um modulador digital recebe os bits a serem transmitidos e mapeia-os em fase e quadratura. Sequencialmente, aplica-se o sinal mapeado em um conversor série paralelo (S/P), gerando N feixes de símbolos complexos.

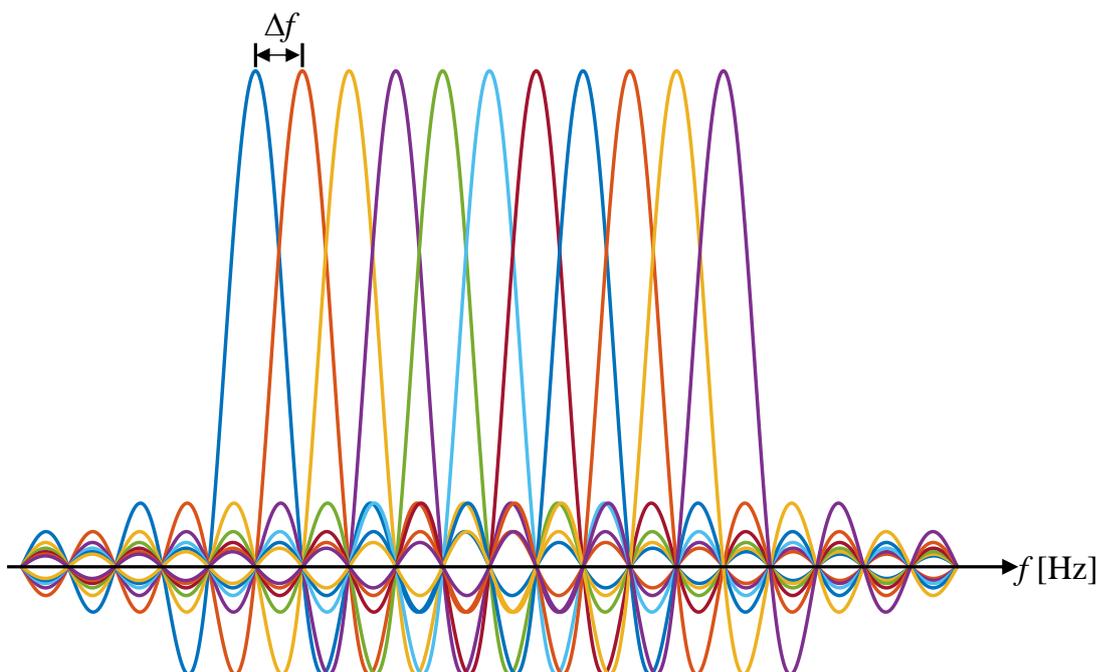


Figura 2.3: Espectro de um sinal OFDM.

Atualmente, utiliza-se DSP para modular as portadoras por meio de transformadas de Fourier. Nesta abordagem, aplica-se a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) no conjunto de símbolos complexos à serem transmitidos (d_k) para modular as K portadoras. Devido ao efeito dispersivo no tempo do canal, pode ocorrer sobreposição entre os blocos transmitidos, resultando em interferências intersímbolicas. Para evitar tal efeito, adiciona-se o prefixo cíclico ao sinal, o qual consiste no posicionamento de cópias das últimas amostras de um símbolo OFDM no início de cada símbolo mantendo a circularidade com a primeira amostra. Logo, a duração do CP (*Cyclic Prefix*) deve ser maior do que a máxima dispersão temporal do canal, para que a interferência intersimbólica seja eliminada [74].

O sinal OFDM discreto transmitido é dado por [73]

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} d_k g_k[n], \quad (2.2)$$

onde $g_k[n]$ representa o pulso transmitido na k -ésima subportadora, dado por [73]

$$g_k[n] = \text{rect}[n] \exp\left(-j2\pi \frac{k}{K} n\right), \quad (2.3)$$

em que $\text{rect}[n]$ representa o filtro retangular de transmissão responsável pela elevada OOB, uma vez que as subportadoras assumem o aspecto de um *sinc* no domínio da frequência [75].

Na recepção, retira-se o prefixo cíclico do sinal antes da aplicação da FFT (*Fast Fourier Transform*). Devido a adição do prefixo cíclico na transmissão, a convolução entre o sinal OFDM e a resposta impulsiva do canal ($h[n]$) torna-se circular, ou seja, o sinal discreto recebido ($y[n]$), pode ser modelado por [76]

$$y[n] = h[n] \otimes x[n] + w[n], \quad (2.4)$$

em que $w[n]$ representa as amostras ruidosas provenientes do ruído AWGN. A estimativa do símbolo recebido na k -ésima subportadora é dada por [76]

$$\hat{d}_k = \frac{Y(k)}{H(k)} = d_k + \frac{W(k)}{H(k)}, \quad (2.5)$$

sendo $H[k]$ a resposta em frequência do canal na frequência da k -ésima subportadora e $W[k]$ é a amostra do ruído AWGN na mesma frequência. A Figura 2.4 apresenta um diagrama em blocos de um sistema OFDM.

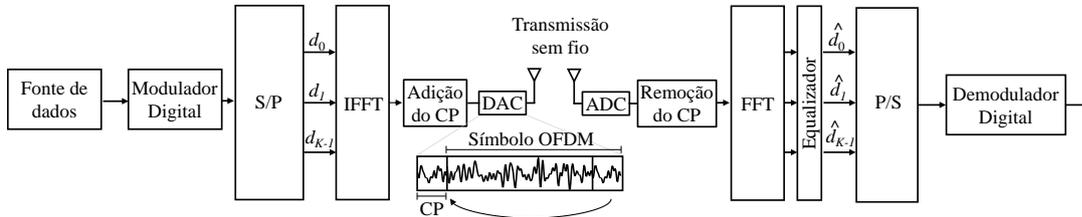


Figura 2.4: Diagrama em blocos de um sistema OFDM: CP- prefixo cíclico; ADC- conversor analógico para digital; DAC- conversor digital para analógico.

2.2.2 GFDM

Embora o sistema OFDM esteja bem difundido, algumas características inerentes ao método, como a elevada OOBE e PAPR, afetam a coexistência com outros sistemas de comunicações móveis em canais adjacentes e a eficiência energética, respectivamente. Por conseguinte, diversas pesquisas defendem novas formas de onda para sistemas 5G. O GFDM, proposto em 2009 por Fettweis e colaboradores [77], permite transportar símbolos de dados $d_{k,m}$ em K subportadoras não-ortogonais e M sub-símbolos. Os blocos de informações gerados possuem $N = KM$ símbolos de dados, como pode ser visto na Figura 2.5.

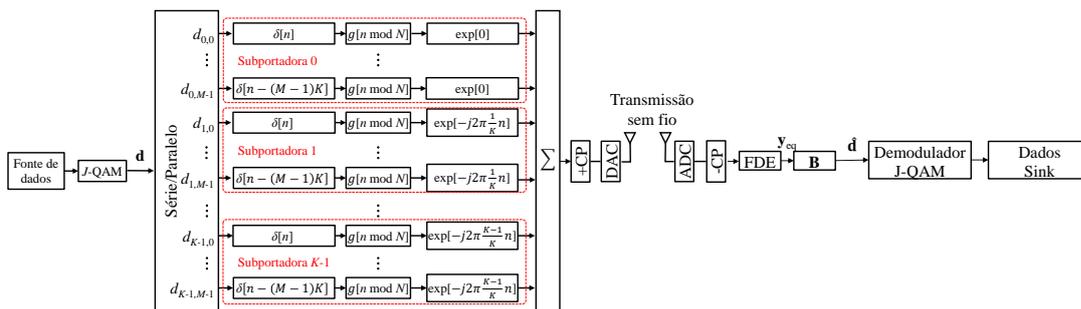


Figura 2.5: Diagrama em blocos de um sistema GFDM [adaptado de [78]].

Assim como no OFDM, protege-se o sinal contra os efeitos dispersivos do canal adicionando um prefixo cíclico em cada símbolo. Portanto, o GFDM permite reduzir o número de prefixos cíclicos em M vezes em relação ao OFDM, uma vez que divide-se o símbolo GFDM em sub-símbolos como exemplifica a Figura 2.6.

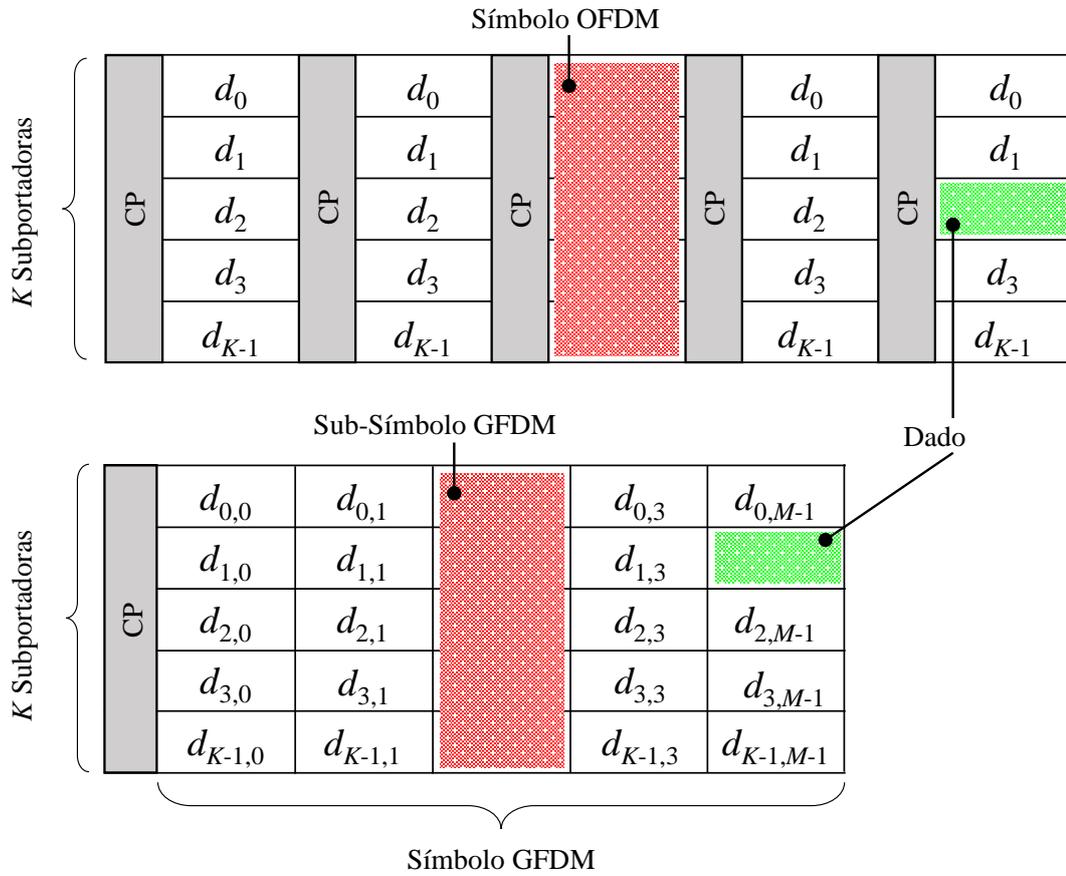


Figura 2.6: Estrutura do bloco de transmissão dos sinais OFDM e GFDM.

No sinal GFDM, utiliza-se filtros deslocados circularmente no domínio do tempo para filtrar cada subportadora e, conseqüentemente, formatar o pulso transmitido reduzindo a OOBE. Diferentes pulsos podem ser usados, como por exemplo: raiz de cosseno elevado; cosseno elevado; Dirichlet [79]. A forma de onda GFDM apresenta elevada flexibilidade, visto que outras formas de onda podem ser geradas de acordo com a parametrização adequada de K e M e da escolha do filtro de TX. Por exemplo, obtêm-se a forma de onda OFDM ao fazer $M = 1$, $K > 1$ e aplicar filtros de transmissão retangulares, enquanto que obtêm-se a SC-FDM (*Single Carrier Division Multiplexing*) fazendo $K = 1$, $M > 1$ e empregando o pulso Dirichlet.

O sinal GFDM discreto pode ser representado por [77]

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} d_{k,m} g[\langle n - mK \rangle_N] e^{-j2\pi \frac{k}{K} n}, \quad (2.6)$$

em que $g[n]$ é o filtro protótipo de transmissão e $\langle(\cdot)\rangle_N$ representa a função módulo ou o resto da divisão de (\cdot) por N . Cada filtro de transmissão é circularmente deslocado no tempo e na frequência e transporta um símbolo de dados. As amostras do filtro podem ser dispostas em uma matriz de modulação da seguinte forma

$$\mathbf{A} = [\mathbf{g}_{0,0} \dots \mathbf{g}_{K-1,0} \dots \mathbf{g}_{0,M-1} \dots \mathbf{g}_{K-1,M-1}]. \quad (2.7)$$

Finalmente, obtêm-se o vetor de amostras transmitidas dado por $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{d}$, onde

$$\mathbf{d} = [d_{0,0} \dots d_{K-1,0} \dots d_{0,M-1} \dots d_{K-1,M-1}]^T, \quad (2.8)$$

é o vetor de símbolos de dados contendo N elementos. O processo de modulação do sinal GFDM pode introduzir interferências entre os blocos de transmissão devido as subportadoras não-ortogonais. Por esta razão, os receptores são desenvolvidos para cancelar ou reduzir tais interferências.

Na recepção, o sinal GFDM equalizado no domínio da frequência, representado por \mathbf{y}_{eq} , é aplicado à uma matriz de demodulação para estimação dos símbolos transmitidos. Desta forma, o vetor de amostras recebidas é dado por

$$\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{B}\mathbf{y}_{\text{eq}}, \quad (2.9)$$

sendo \mathbf{B} a matriz de demodulação, pode ser do tipo ZF (*Zero Forcing*), MF (*matched Filter*) ou MMSE (*Minimum Mean Squared Error*). Essas matrizes são empregadas para alcançar diferentes objetivos, como redução da interferência entre as subportadoras, maximização da SNR (*Signal-to-noise Ratio*) e compromisso entre SNR e redução de interferência [76, 80].

2.2.3 F-OFDM

Recentemente, o órgão padronizador 3GPP definiu a forma de onda CP-OFDM para o cenário eMBB, incluindo técnicas opcionais de confinamento espectral como filtragem e janelamento [25]. Formas de onda como F-OFDM e UF-OFDM aplicam a técnica de filtragem, enquanto que a forma de onda WOLA (*Weighted Overlap and*

Ad) aplica a técnica de janelamento. Em síntese, a técnica de filtragem permite reduzir a OOB, uma vez que as sub-bandas do sinal OFDM são filtradas no domínio da frequência [81]. Por outro lado, o método de janelamento opera no domínio do tempo, suavizando as transições entre a última amostra de um determinado símbolo e a primeira amostra do próximo símbolo [82].

A forma de onda OFDM permite diferentes ordens de modulação por subportadora. Além disso, o número total de subportadoras pode ser parametrizado de acordo com a largura de faixa ou símbolo a ser transmitidos. No entanto, todas as subportadoras devem possuir o mesmo tempo de símbolo e mesmo comprimento de CP.

A infinidade de casos de uso e cenários de aplicação de sistemas 5G demandam elevada flexibilidade, visto que dispositivos IoT com bateria restrita não podem utilizar a mesma estrutura tempo/frequência de celulares operando com taxas de transmissão da ordem de Gbit/s. A forma de onda F-OFDM utiliza os mesmos princípios da OFDM, porém adiciona um conjunto de filtros aplicados a um conjunto de subportadoras [83], como ilustra a Figura 2.7.

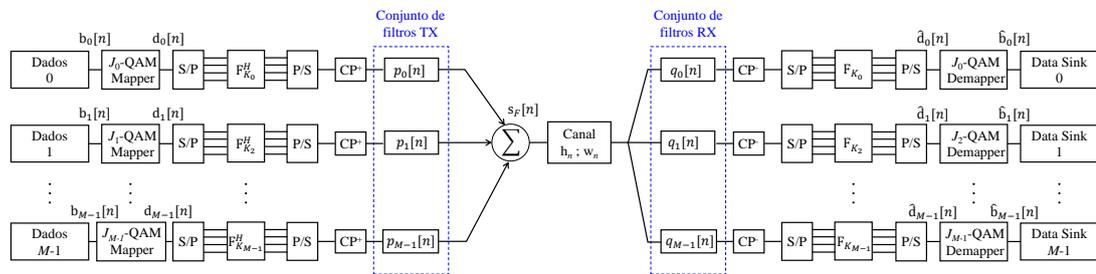


Figura 2.7: Diagrama em blocos da forma de onda F-OFDM.

Cada fonte de dados pode prover informações de diferentes cenários de operação, por exemplo, mMTC, eMBB, URLLC ou eRAC. Tais informações são independentes entre si, o que permite a aplicação de diferentes ordens de modulação e comprimento de CP para cada fonte de informação. O conjunto de filtros de transmissão $p_m[n]$ filtram um conjunto de sub-bandas correspondente a largura de faixa de cada fonte de informação. Na recepção, utiliza-se filtros equivalentes aos aplicados na transmissão, denotados por $q_m[n]$, os quais separam os sinais provenientes de diferentes fontes de informação.

Uma banda de guarda de no mínimo metade da subportadora com a maior largura de faixa é necessária para eliminar interferências entre sub-bandas adjacentes. Consequentemente, a forma de onda F-OFDM aumenta consideravelmente a flexibilidade do sistema, porém a eficiência espectral pode ser reduzida com o aumento de sub-bandas independentes. A Figura 2.8 apresenta o processo de filtragem da forma de onda F-OFDM.

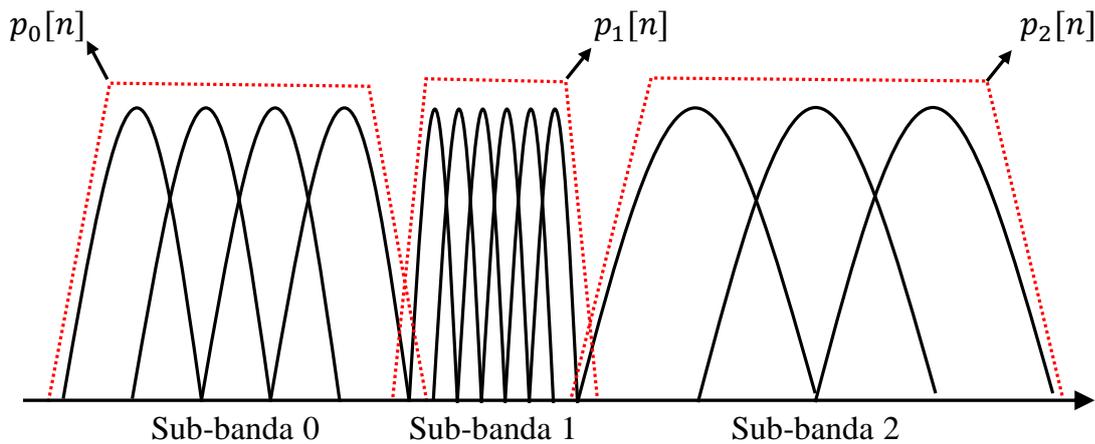


Figura 2.8: Processo de filtragem do F-OFDM.

2.3 Padrão 5G *new radio*

No final de 2017 deu-se início a padronização do 5G NR (*Release 15*), visando vazão de dados da ordem de Gbit/s, comunicações de baixa latência, elevada eficiência energética e escalabilidade. Definiram-se alguns parâmetros de operação que diferenciam 5G NR do padrão LTE. A Tabela 2.3 resume as especificações do 3GPP para o 5G NR em termos de frequências de operação, larguras de faixa permitidas, configuração MIMO e espaçamento entre subportadoras (Δf).

Tabela 2.3: Frequências e bandas de operação do 5G NR segundo o 3GPP.

	FR1	FR2
Frequências (MHz)	450 a 7125	24250 a 52600
Larguras de faixa (MHz)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 e 100	50, 100, 200 e 400

A nova tecnologia do 5G suporta transmissões na faixa de mm-waves, e MIMO para alcançar elevada vazão de dados e atender ao cenário eMBB [84]. Entretanto, elevadas perdas de propagação são inerentes em transmissões na faixa de ondas milimétricas e conseqüentemente, reduz-se a área de cobertura do sinal. Uma das soluções para este problema é utilizar múltiplos feixes diretivos para estabelecer enlaces de comunicação entre rádio base e equipamento de usuário, possibilitando aumentar a distância de cobertura de cada rádio base [85].

O novo padrão foi desenvolvido para atingir maior eficiência energética em relação ao LTE. Isto é feito reduzindo a transmissão dos sinais conhecidos como *always on*, os quais são utilizados para detecção de rádio base, estimação de canal e difusão de informações do sistema. Estes sinais são transmitidos de maneira ininterrupta e causam impacto negativo na eficiência energética, principalmente em redes densas de alta vazão.

O padrão 5G NR aplica a forma de onda de múltiplas portadoras CP-OFDM para transmissões entre a estação rádio base e o equipamento do usuário, tanto no sentido de UL quanto no de DL. Esta forma de onda apresenta robustez contra dispersões causadas pelo canal e sua estrutura permite explorar os domínios do tempo e frequência.

Na Figura 2.9 tem-se a estrutura tempo/frequência do 5G NR, na qual a informação é dividida em quadros (*frames*) de 10 ms, distribuídos ao longo de 12 subportadoras. Os *frames* são divididos em 10 *sub-frames* de 1 ms, nos quais transmite-se *slots* contendo 14 símbolos OFDM, com duração em função do espaçamento entre subportadoras. Enquanto que no LTE as subportadoras são espaçadas de 15 kHz, por outro lado, o 5G NR emprega espaçamentos variados entre subportadoras. Por esta razão, a duração dos *slots* varia, diminuindo com o aumento do espaçamento entre subportadoras, visto que o *slot* possui comprimento fixo de símbolos OFDM. Tal característica originou o conceito de transmissões em frações de *slots*, conhecidas como *mini-slots*, os quais possuem 2, 4 ou 7 símbolos OFDM, para aplicações que requerem baixa latência. Os *mini-slots* podem ser iniciados imediatamente, mesmo quando outro *slot* está sendo transmitido, assim, diminui-se ainda mais a latência, tornando esta solução atrativa para o cenário URLLC [86].

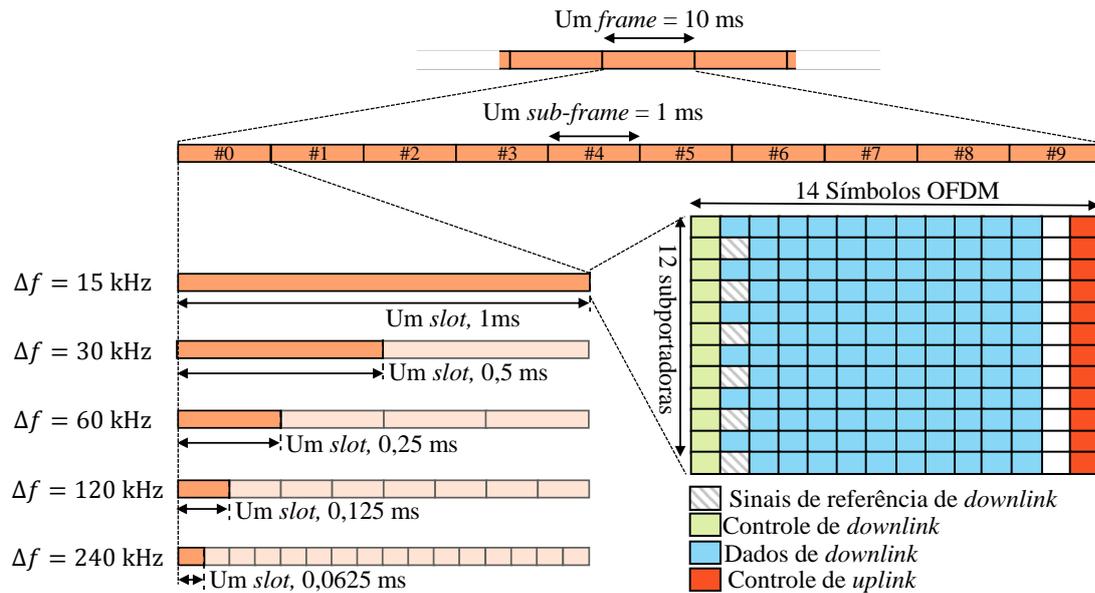


Figura 2.9: Estrutura tempo/frequência do padrão 5G NR.

Em um *sub-frame* transmite-se 1, 2, 4, 8, ou 16 *slots* de acordo com a numerologia (μ) o, espaçamento entre subportadoras selecionado. A quantidade de símbolos OFDM por *slot* depende do comprimento do prefixo cíclico. O prefixo cíclico pode ser configurado com comprimento normal ou estendido, porém o padrão 5G NR permite selecionar o prefixo estendido apenas para subportadoras espaçadas de 120 kHz. A Tabela 2.4 resume a relação entre o índice de cada numerologia em função do espaçamento entre subportadoras e comprimento do prefixo cíclico [87].

Tabela 2.4: Numerologia em função do espaçamento entre subportadoras.

Faixa de frequências	μ	$\Delta f = 2^\mu \times 15$ kHz	Prefixo cíclico
FR1	0	15 kHz	Normal
	1	30 kHz	Normal
	2	60 kHz	Normal, Estendido
FR2	2	60 kHz	Normal, Estendido
	3	120 kHz	Normal
	4	240 kHz	Normal

A máxima taxa de bits alcançada no padrão 5G NR depende de fatores como a quantidade de portadoras moduladas agregadas (J), número máximo de camadas de

multiplexação espacial ($v_{\text{Layers}}^{(j)}$) para aplicações MIMO, alocação dos blocos de recurso ($N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$) para dada numerologia e quantidade de bits por símbolo $Q_m^{(j)}$. Em [88] define-se o cálculo aproximado da vazão de dados (R_b) em Mbit/s como

$$R_b = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left(v_{\text{Layers}}^{(j)} Q_m^{(j)} f^{(j)} R_{\text{max}} \frac{12 N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}}{T_s^\mu} (1 - OH^{(j)}) \right), \quad (2.10)$$

em que R_{max} representa a taxa máxima de codificação com valor igual a 948/1024, assumindo o uso de códigos de LDPC (*Low-density Parity-check Code*), $f^{(j)}$ denota o fator de escala com valores permitidos de 1,0; 0,8; 0,75 ou 0,4. O parâmetro $OH^{(j)}$ representa o cabeçalho utilizado para sinalização e assume valores de acordo com a direção de transmissão e faixa de frequência conforme apresenta a Tabela 2.5. Finalmente, o tempo de duração média dos símbolos OFDM (T_s^μ) para dada numerologia obedece a expressão

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \times 2^\mu}. \quad (2.11)$$

Tabela 2.5: Fator multiplicativo do cabeçalho de acordo com a frequência de operação.

	FR1	FR2
<i>Downlink</i>	0,14	0,18
<i>Uplink</i>	0,08	0,1

A largura de faixa máxima de transmissão depende da quantidade de $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$ adotada. Em [60] especifica-se as larguras de faixas máximas permitidas para comunicações 5G bem como a quantidade de blocos de recursos alocados. As Tabelas 2.6 e 2.7 listam as configurações em termos de $N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$ para atingir larguras de faixas máximas de transmissão em função de Δf nas faixas de frequência FR1 e FR2, respectivamente. A partir de (2.10) e (2.11), obtêm-se a Tabela 2.8, que resume exemplos de vazões máximas de dados teórica, para *uplink* e *downlink*, considerando uma camada de multiplexação espacial, ausência de agregação de portadoras e modulação 256-QAM [87].

Tabela 2.6: Alocação de blocos de recursos em função da largura de faixa e Δf para FR1.

Largura de Faixa (MHz)	Δf (kHz)	$N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$
5	15, 30	25, 11
10	15, 30, 60	52, 24, 11
15	15, 30, 60	79, 38, 18
20	15, 30, 60	106, 51, 24
25	15, 30, 60	133, 65, 31
30	15, 30, 60	160, 78, 38
40	15, 30, 60	216, 106, 51
50	15, 30, 60	270, 133, 65
60	30, 60	162, 79
70	30, 60	189, 93
80	30, 60	217, 107
90	30, 60	245, 121
100	30, 60	273, 135

Tabela 2.7: Alocação de blocos de recursos em função da largura de faixa e Δf para FR2.

Largura de Faixa (MHz)	Δf (kHz)	$N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu}$
50	60, 120	66, 32
100	60, 120	132, 66
200	60, 120	264, 132
400	120	264

O padrão 5G NR possui dois modelos de operação conhecidos como *non-standalone* e *standalone*. No modelo *non-standalone*, utiliza-se o núcleo da LTE para gerenciar a comunicação realizada por meio da interface 5G NR. No *standalone*, o núcleo da rede 5G, com todas as funcionalidades necessárias para atender os novos serviços, é utilizada para gerenciar e controlar todas as conexões. Assim, facilita-se a transição do 4G para 5G devido à compatibilidade das tecnologias de acesso com o núcleo da rede [89].

Tabela 2.8: Exemplos de cálculo de máxima vazão de dados teórica para 256-QAM [87].

Faixa de frequência	Δf	Largura de banda	DL	UL
FR1	15 kHz	50 MHz	288,9 Mbit/s	309,1 Mbit/s
FR1	30 kHz	100 MHz	584,3 Mbit/s	625 Mbit/s
FR1	60 kHz	100 MHz	577,8 Mbit/s	618,1 Mbit/s
FR2	60 kHz	200 MHz	1,08 Gbit/s	1,18 Gbit/s
FR2	120 kHz	400 MHz	2,15 Gbit/s	2,37 Mbit/s

As redes de acesso 5G NR operam de maneira similar às redes LTE. As gNodeB transmitem periodicamente sinais de sincronismo para os UEs (*User Equipments*). A partir destes sinais, os UEs são capazes de encontrar, identificar e sincronizar-se à uma rede. Junto com o PSS (*Primary Synchronization Signal*) e SSS (*Secondary Synchronization Signal*), transmite-se um PBCH (*Physical Broadcast Channel*) contendo informações do sistema necessárias para aquisição e seleção de células.

Assim como no LTE, as transmissões de dados são agendadas pela estação rádio base de acordo com as condições de canal, prioridades de tráfego e qualidade de serviço necessária. Tais métricas são fornecidas por dispositivos de usuário por um PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*). A partir destas informações, as estações

rádio base enviam para os UEs as DCI (*Downlink Control Information*). Tais informações são transmitidas no PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) utilizando a modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) [90].

Em transmissões *downlink*, os dados são mapeados no PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*). Similarmente, para dados de *uplink*, utiliza-se o PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*). Os sinais de referência são utilizados para estimação de canal, auxílio na demodulação e compensação de ruído de fase, especialmente em mm-waves. Dentre os sinais de referência, cita-se: DMRS (*Demodulation Reference Signal*); PTRS (*Phase-tracking Reference Signal*); CSI-RS (*Channel State Information Reference Signal*).

Apesar da similaridade de operação com o LTE, o padrão 5G NR apresenta algumas diferenças notáveis. Por exemplo, no 5G NR, os sinais de sincronismo SSS e PSS são transmitidos com menor periodicidade em relação ao LTE, visando aumento de eficiência energética. Outra diferença entre os padrões reside na flexibilidade de alocação de recursos para canais de controle de *downlink*. No LTE, os canais de controle são distribuídos ao longo de toda banda do sistema. Nesta abordagem, interferências entre células afetam a banda inteira dos sinais de controle, além de demandar que os UEs procurem pelos canais de controle ao longo de toda banda do sinal [91]. Por outro lado, o 5G NR transmite os PDCCH em CORESETs (*Control Resource Sets*), os quais podem ser configurados para ocupar apenas parte da banda, introduzindo flexibilidade ao sistema.

2.4 Sistemas *Fiber-wireless* 5G

Sistemas de comunicações modernos exploram um conjunto de tecnologias para transporte e transmissão de sinais entre usuários e o núcleo da rede. Os sistemas *FiWi* se enquadram nesse conjunto de tecnologias unindo as vantagens de sistemas ópticos e sem fio. Isto é possível graças ao aperfeiçoamento de fontes luminosas e fibras ópticas de baixas perdas em conjunto com a evolução das comunicações sem fio que contribuem para implementação de enlaces de longas distâncias e elevada vazão de dados. No entanto, para alcançar altas taxas de transmissão nos núcleos de rede, é

necessário elevar as frequências de operação. Em contrapartida, reduz-se a área de cobertura devido à elevadas perdas de propagação.

Neste contexto, MWP engloba as vantagens das comunicações ópticas e elétricas em um único sistema [92, 93]. Sistemas FiWi baseados na tecnologia RoF são empregados em redes 5G, com o intuito de favorecer a transmissão simultânea de múltiplos sinais de RF entre uma BTS centralizada e a RAU [12, 13, 34]. Tal aplicabilidade permite explorar a infraestrutura óptica existente, bem como sua capilaridade, para criar uma rede banda larga de distribuição de RF. Para tal, aplica-se o sinal de RF modulante à uma fonte luminosa centrada em comprimentos de onda (λ) diferentes daqueles padronizados para aplicações como GPON [94].

Uma fonte luminosa baseia-se em emissão espontânea ou estimulada, as quais ocorrem quando um átomo excitado retorna à quantidade básica de energia [95]. As principais fontes ópticas de sistemas luminosos são o LEDs (*Light-Emitting Diodes*) e o Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Na emissão espontânea, fótons são gerados aleatoriamente sem coerência de fase ou direção entre os mesmos. Por outro lado, a emissão estimulada é iniciada por um fóton existente, o qual possui características como direção de propagação, energia e fase bem definidas. Tais características são replicadas nos fótons gerados, culminando em uma emissão de luz estimulada e coerente. Os sistemas ópticos atuais demandam fontes luminosas com larguras espectrais estreitas para alcançar-se modulação com elevada taxa de bits e pequena dispersão. Os lasers cumprem estas demandas de maneira mais eficiente em relação aos LEDs e, conseqüentemente, são amplamente utilizados em sistemas RoF.

As soluções RoF são empregados em sistemas FiWi 5G de acordo com a arquitetura C-RAN, para transporte de sinais analógicos (A-RoF) ou digitais (D-RoF), conforme esquematizado na Figura 2.10 [96]. Em síntese, a técnica RoF realiza a E/O (*Electrical-to-optical Conversion*) e O/E (*Optical-to-electrical Conversion*), adequando o sinal ao canal de transmissão.

Grande parte dos enlaces *fronthaul* modernos empregam D-RoF utilizando o padrão CPRI. Nesta solução realiza-se o processamento digital banda base do sinal, encapsu-

lamento CPRI e conversão E/O na CO. Conecta-se a CO e RRU por meio de SMFs, na qual transporta-se amostras digitalizadas do sinal. Na BTS realiza-se a conversão O/E, desencapsulamento CPRI e conversão do sinal digital para analógico. Sequencialmente, o *front-end* de RF realiza a amplificação, conversão de frequência e a transmissão do sinal a ser recebido pelos UEs.

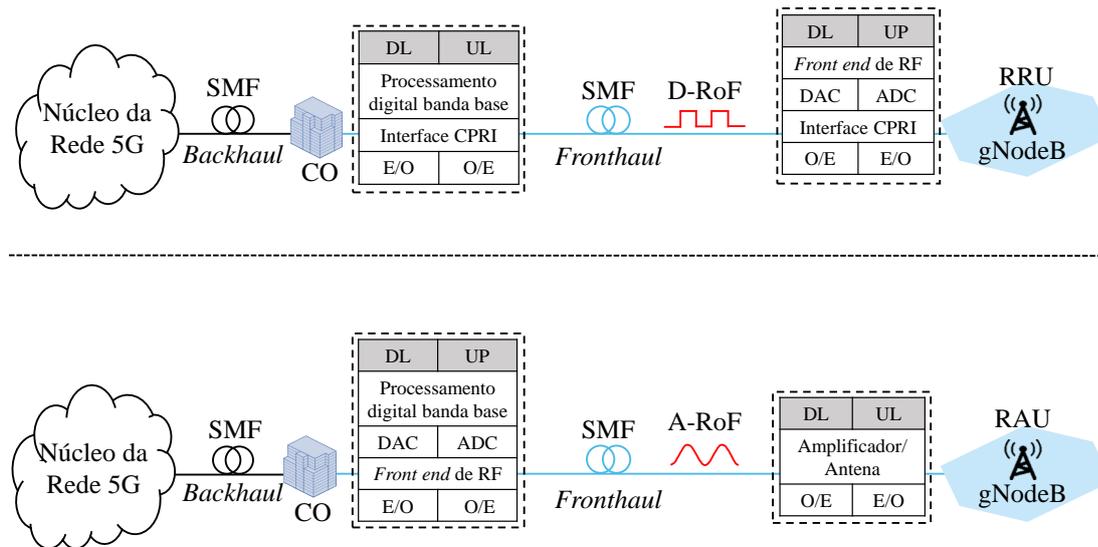


Figura 2.10: Sistemas *FiWi* 5G baseados em rádio sobre fibra analógico e digital.

Em transmissões na faixa de ondas milimétricas, a amostragem do sinal torna-se um fator crítico, visto que é necessário utilizar um ADC (*Analog-to-digital Converter*) e DAC (*Digital-to-analog Converter*) com altas frequências de amostragem e banda e portanto, elevado custo. Ainda que os sistemas D-RoF sejam amplamente utilizados em enlaces *fronthaul*, é evidente a necessidade de melhorias para tornar essa solução viável em redes móveis de quinta geração. Fato que está relacionado com a baixa eficiência de transmissão de bits do padrão CPRI, caracterizada pela utilização da banda disponível para transmissão das amostras do sinal digitalizado [97,98].

A Figura 2.11 exemplifica a taxa resultante do encapsulamento de sinais do padrão LTE segundo as especificações do CPRI. Considerou-se apenas uma antena por setor e taxas de transmissões muito além dos valores especificados no padrão LTE. Por exemplo, calculou-se taxas de transmissão para larguras de bandas de até 400 MHz. Esta abordagem permitiu destacar a elevada taxa de bits resultante do processo de encapsulamento do CPRI.

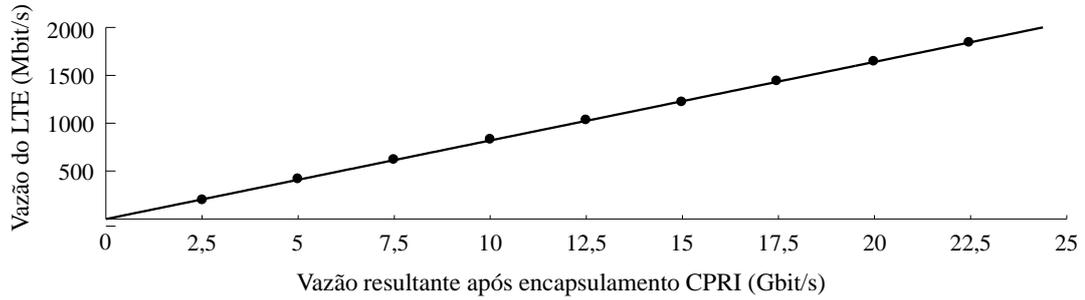


Figura 2.11: Taxa de bits do padrão LTE em função da taxa resultante do encapsulamento CPRI.

Os parâmetros que influenciam na taxa de bits do encapsulamento CPRI representam a frequência de amostragem (f_s), a quantidade de bits utilizada para a quantização (Q_{bits}), número de antenas por setor (N_a), a taxa de codificação e sinalização [90]. A taxa de amostragem está relacionada com a largura de banda de operação do sinal e assume valores múltiplos de 3,84 MHz. A especificação do CPRI define uma estrutura de transmissão dividida em *frames* contendo 16 CPRI “*words*”, sendo 15 para transmissão de dados e 1 para controle e gerenciamento. Existem dois tipos de codificações (C) especificadas para aplicações CPRI: os códigos 8B/10B e 64B/66B. Finalmente, obtêm-se a taxa de bits resultante a partir de [98]

$$R_{\text{bCPRI}} = 2 Q_{\text{bits}} f_s N_a \frac{16}{15} C. \quad (2.12)$$

Os sistemas A-RoF apresentam-se como uma alternativa potencial aos sistemas D-RoF, permitindo maximizar a eficiência espectral, reduzir custos e simplificar as BTSs. A simplificação ocorre devido ao deslocamento do *front end* de RF para a CO, bem como eliminação de conversores ADC e DAC nas estações rádio base [99]. Esta divisão criou uma nova terminologia para a RRU, passando a ser denominada RAU. Outras nomenclaturas que surgiram com técnica A-RoF referem-se à frequência de portadora utilizada.

Os sistemas A-RoF podem ser divididos em três categorias: RFoF (*Radiofrequency-over-fiber*); IFoF (*Intermediate Frequency-over fiber*); BBoF (*Baseband-over-fiber*) [100]. Ao contrário do IFoF, sistemas RFoF transportam sinais nas frequências de radiação das redes acesso, eliminando a necessidade de osciladores na BTS para multiplicação

em frequência. Contudo, esta abordagem apresenta maior susceptibilidade a dispersões cromáticas e distorções, em comparação com as demais técnicas A-RoF [101]. Em sistemas BBoF, transporta-se sinais em banda base até a estação rádio base para fotodetecção. Após a fotodetecção, o sinal de informação modula uma portadora de RF de acordo com a frequência de operação da rede de acesso. É importante ressaltar que os sistemas A-RoF realizam a conversão E/O por meio das técnicas de modulação direta ou externa, em contraste com os sistemas D-RoF que raramente empregam modulação externa [95, 102].

A Figura 2.12 expõe o esquema básico de um sistema A-RoF de modulação direta (Figura 2.12 (a)) e externa (Figura 2.12 (b)). Na modulação direta, aplica-se o sinal modulante de RF, contendo as informações a serem transmitidas, diretamente na corrente de alimentação do laser. As variações no sinal modulante modificam a intensidade da luz, caracterizando uma modulação de intensidade na portadora óptica. Por conseguinte, o sinal óptico na saída do laser possui a mesma forma do sinal elétrico modulante. A modulação direta possui custos menores em relação a modulação externa, o que a torna atrativa principalmente para aplicações com taxas de transmissão de até 10 Gbit/s. Esta limitação é imposta principalmente pelo tempo de resposta do laser e o *chirp*, causado por variações de fase da portadora óptica ao longo do tempo. Para contornar estes problemas, utiliza-se moduladores eletro-ópticos externos.

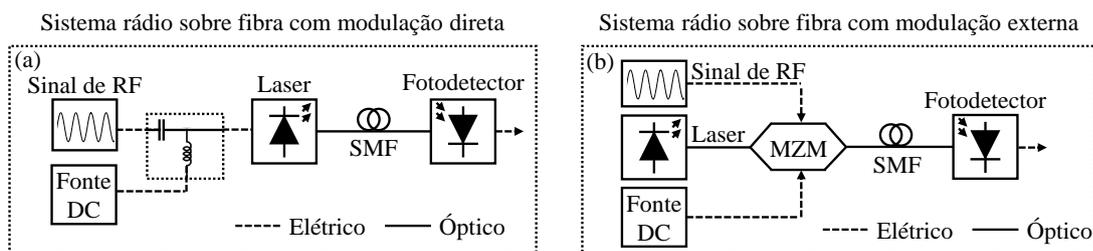


Figura 2.12: Esquema básico do rádio sobre fibra: (a) Modulação direta; (b) Modulação externa.

Na modulação externa, tipicamente emprega-se um modulador óptico com guias de onda de Niobato de Lítio (LiNbO_3) (Figura 2.13 (a)). Modifica-se o índice modal efetivo do guia ao aplicar uma tensão de polarização (V_{bias}), resultando em variação de fase do sinal de entrada. A partir deste princípio, consegue-se produzir, por exemplo, um DD-MZM (*Dual-drive Mach-Zehnder Modulator*) que permite modular a intensi-

dade do feixe óptico com dois sinais elétricos distintos (RF_1 e RF_2).

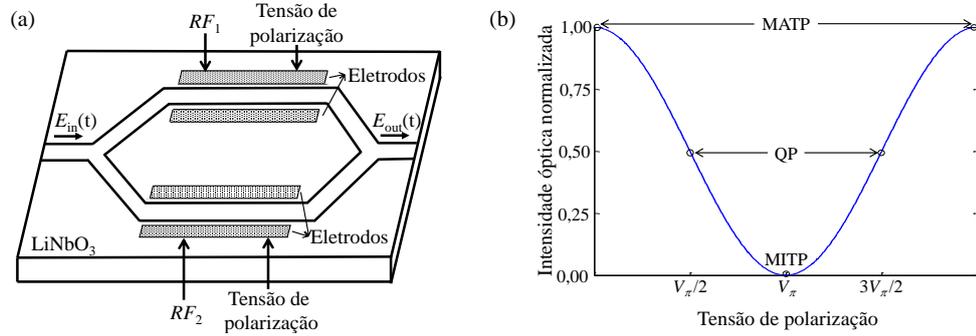


Figura 2.13: *Modulador de Mach-Zehnder: (a) Representação da estrutura; (b) Função de transferência normalizada.*

A intensidade de campo elétrico da portadora óptica de entrada ($E_{in}(t)$) é distribuída em partes iguais de potência entre os braços do modulador. O campo elétrico da portadora óptica na saída do dispositivo ($E_{out}(t)$), varia de acordo com a tensão de polarização aplicada ao guia (Figura 2.13 (b)) e pode ser descrito por [103]

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} [e^{-i\phi_1} + e^{-i\phi_2}], \quad (2.13)$$

em que ϕ_1 e ϕ_2 representam as fases resultantes da aplicação das tensões de polarização V_{bias_1} e V_{bias_2} , respectivamente e podem ser expressas por

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2V_\pi} V_{e1}, \quad \phi_2 = \frac{\pi}{2V_\pi} V_{e2}, \quad (2.14)$$

sendo V_π a tensão de meia onda do modulador, V_{e1} e V_{e2} as tensões de modulação aplicadas aos eletrodos dos braços superiores e inferiores, nesta ordem, a qual relaciona-se diretamente com os sinais RF_1 e RF_2 e as tensões de polarização de acordo com

$$V_{e1} = V_{m1} \cos(\omega_{RF_1} t) + V_{bias_1}, \quad V_{e2} = V_{m2} \cos(\omega_{RF_2} t) + V_{bias_2}. \quad (2.15)$$

Finalmente, substituindo (2.14) e (2.15) em (2.13) obtêm-se [103]

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{2} \left[e^{-i\left(\frac{\pi}{2V_{\pi 1}} V_{m1} \cos(\omega_{RF_1} t) + V_{bias_1}\right)} + e^{-i\left(\frac{\pi}{2V_{\pi 2}} V_{m2} \cos(\omega_{RF_2} t) + V_{bias_2}\right)} \right], \quad (2.16)$$

onde V_{m_1} , V_{m_2} , ω_{RF_1} e ω_{RF_2} representam as amplitudes e frequências angulares dos sinais de entrada do modulador (RF_1 e RF_2), respectivamente. Em (2.16) nota-se que a intensidade do campo elétrico da portadora óptica varia em função da tensão aplicada aos eletrodos.

Os principais pontos de operação do modulador óptico referem-se a: MATP (*Maximum Transmission Point*); MITP (*Minimum Transmission Point*); QP (*Quadrature Point*). Na ausência da tensão de polarização, os campos elétricos da portadora óptica nos dois braços sofrem deslocamentos de fase iguais, sendo combinados construtivamente na saída do dispositivo, caracterizando o MATP. Ao aplicar uma tensão V_π obtêm-se o MITP, no qual introduz-se um desvio de fase de 180° entre os braços do modulador. Neste ponto, a combinação resultante é destrutiva e portanto, o sinal de RF é atenuado na frequência de interesse. Evidentemente, existe uma várias combinações de fase entre os braços do modulador, dependendo do ponto de operação escolhido sobre a função de transferência.

O processo de modulação da portadora óptica cria bandas laterais espaçadas da portadora óptica de acordo com a frequência do sinal de RF. Por esta razão, o espectro óptico do sinal na saída do modulador assume o aspecto da Figura 2.14 quando um sinal em 26 GHz modula a portadora óptica centrada em 1560 nm. Sequencialmente, o sinal modulado é lançado em uma fibra óptica.

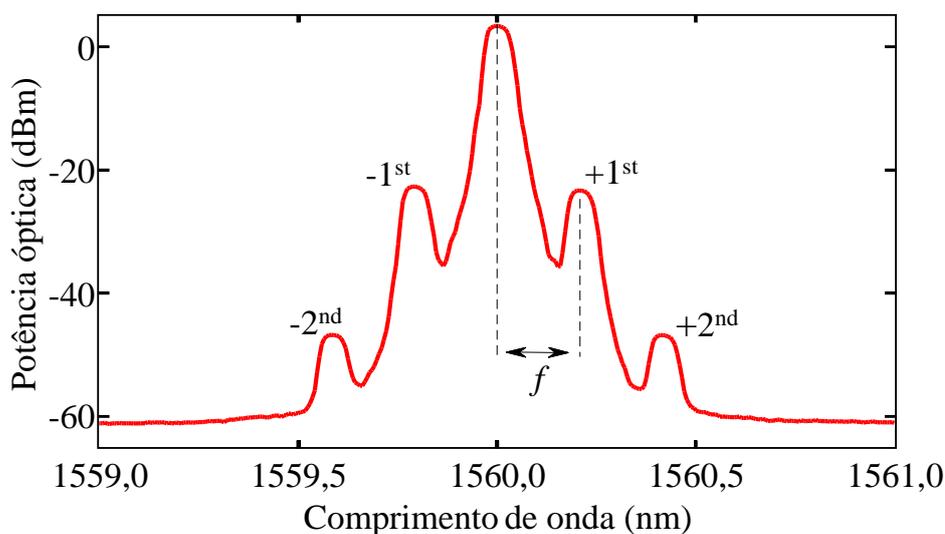


Figura 2.14: Espectro óptico na saída do modulador, no qual observa-se a portadora óptica em 1560 nm e as bandas laterais espaçadas de 26 GHz.

Há duas classes de fibras ópticas aplicadas às redes de telecomunicações classificadas conforme o número de modos que se propagam pelo núcleo: a MMF (*Multi-mode Fiber*) e a SMF. Os modos referem-se às distribuições do campo eletromagnético guiado ao longo do comprimento da fibras. Fibras monomodo permitem transmissão de feixes ópticos modulados com maior taxa de bits, visto que apenas uma distribuição de campo fica confinada ao núcleo, e conseqüentemente há uma redução na dispersão total [102]. Após percorrer a extensão da fibra, o feixe óptico modulado é convertido para o domínio elétrico por um fotodetector.

Essencialmente, a fotodeteção implica em fornecer uma corrente elétrica a partir da incidência de um feixe óptico. Portanto, há necessidade de relacionar a corrente fotodetectada com as grandezas associadas ao feixe de luz que chega ao detector. Considerando que a energia do feixe óptico é suficiente para liberação de elétrons no material semiconductor, ocorre a transferência dos elétrons da banda de valência para a respectiva banda de condução. Do ponto de vista ideal, para incidência de certa quantidade de fótons por segundo deveria ocorrer igual quantidade de elétrons liberados por segundo. Na prática, o número de elétrons liberados por segundo (N_e) é inferior ao número de fons incidentes por segundo (N_f) e a relação entre os dois valores define a eficiência quântica do dispositivo, dada por [95]

$$\eta_q = \frac{N_e}{N_f}. \quad (2.17)$$

Este parâmetro depende do comprimento de onda e cada material apresenta o valor máximo em torno de um comprimento de onda específico. Além disto, existe um comprimento de onda de corte acima do qual não há mais transferência de elétrons para a banda de condução, uma vez que o fóton não possuirá mais energia suficiente para isto. Multiplicando-se o denominador e o numerador de (2.17) pela carga do elétron e pela energia do fóton, lembrando que a quantidade de elétrons por segundo definirá a corrente resultante e a quantidade de fótons incidente indicará a potência do feixe óptico, o que conduz a [95]

$$\eta_q = \frac{N_e q_e h f}{N_f q_e h f} = \frac{I_p h f}{N_f h f q_e} = \frac{I_p h f}{P_{in} q_e}, \quad (2.18)$$

nesta expressão I_p é a fotocorrente gerada pelo deslocamento de elétrons e lacunas no semicondutor, h é a constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.seg), f é a frequência do feixe óptico e P_{in} é a potência resultante do produto do número de fótons incidentes por unidade de tempo pela energia do fóton. Isolando a fotocorrente tem-se

$$I_p = \eta_q \frac{q_e}{hf} P_{in} = \eta_q \frac{q_e \lambda}{hc} P_{in} = R P_{in}, \quad (2.19)$$

onde R é um parâmetro que aglutina os diferentes fatores desta equação e é conhecido como a responsividade do fotodetector em Amperes por Watt (A/W). No parâmetro R estão incluídas a eficiência quântica, a carga do elétron, o comprimento de onda do feixe, a constante de Planck e a velocidade da luz no vácuo. Como são todos valores invariáveis, a responsividade é constante para dado comprimento de onda. Conclui-se, portanto, que a fotocorrente é diretamente proporcional à potência óptica incidente [95]. Por esta razão, a fotocorrente acompanha as variações de potência do feixe óptico. Conseguem-se reproduzir, no domínio elétrico, a mesma forma de onda que estiver modulando a onda portadora no domínio óptico.

Neste capítulo, introduziu-se os cenários de usos de redes 5G, bem como as técnicas promissoras para aumentar a capacidade das redes móveis. Apontou-se como uma área chave de estudos, as formas de onda à serem utilizadas em sistemas 5G nas *Releases* 16 e 17 do 3GPP. Finalmente, discutiu-se algumas técnicas de implementação de sistemas FiWi com destaque para a técnica A-RoF.

Capítulo 3

Análise Numérica de Sistemas

Analog-RoF 5G

Este capítulo apresenta análises numéricas de sistemas A-RoF 5G, utilizando uma plataforma numérica composta pelo Matlab e Optisystem. O Optisystem é uma ferramenta computacional que permite projetar sistemas opto-eletrônicos. Neste capítulo são abordados o transporte das formas de onda 5G em enlaces ópticos, bem como a investigação de desempenho da transmissão em termos de EVM_{RMS} .

3.1 Sistemas A-RoF

O Optisystem é uma ferramenta computacional, que possibilita simular sistemas de comunicações nos domínios elétrico e óptico a partir de uma biblioteca de componentes. Dentre estes componentes cita-se: geradores de bits, moduladores digitais, fontes luminosas, moduladores eletro-ópticos, fibras ópticas, fotodetectores, filtros digitais e outros. Embora o Optisystem possua uma extensa biblioteca de componentes ópticos e elétricos, esta ferramenta é limitada em termos de geração de formas de ondas. Porém, alguns componentes da biblioteca permitem a co-simulação com programas computacionais externos, como por exemplo o Matlab. Com isto, pode-se utilizar o Matlab para gerar e demodular sinais, e o Optisystem para implementar o sistema óptico de transporte de sinais. A Figura 3.1 exemplifica a configuração do componente Matlab

do Optisystem. Nesta interface, realiza-se o direcionamento das amostras criadas no Matlab para o Optisystem a partir do local de armazenamento e nome do arquivo de geração.

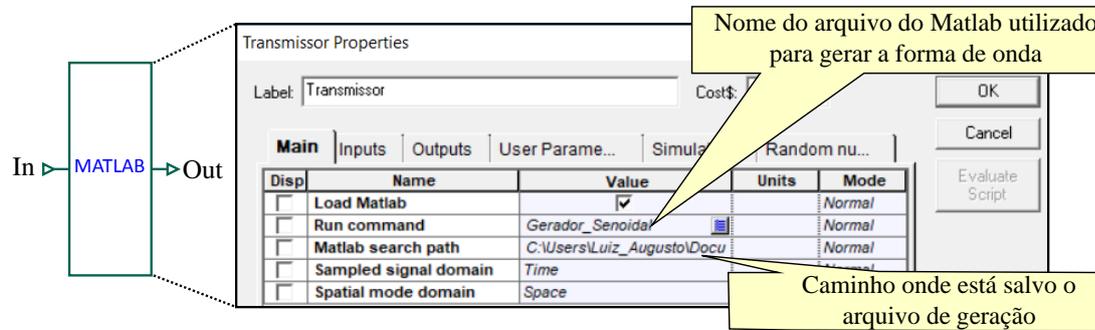


Figura 3.1: Inserção do vetor de amostras do Matlab no Optisystem.

A Figura 3.2 exemplifica o processo de integração do Matlab e Optisystem visando projetar um sistema A-RoF. Um transmissor banda base gera as formas de onda candidatas para comunicações 5G no Matlab. Tais forma de onda são geradas a partir dos algoritmos fornecidos pelo grupo de pesquisa da Universidade Tecnológica de Dresden na Alemanha [104]. No Optisystem, adiciona-se ruído AWGN ao sinal e realiza-se a conversão para banda passante multiplicando as amostras do sinal pelas amostras de uma portadora elétrica. Um modulador eletro-óptico modula a portadora óptica com o sinal elétrico a ser transmitido, para que possa ser transportado em uma SMF. Após percorrer a extensão da fibra óptica, o sinal é fotodetectado, convertido para banda base e exportado para o Matlab para processamento. Desta forma, é possível investigar os efeitos do sistema óptico nas formas de onda transmitidas.

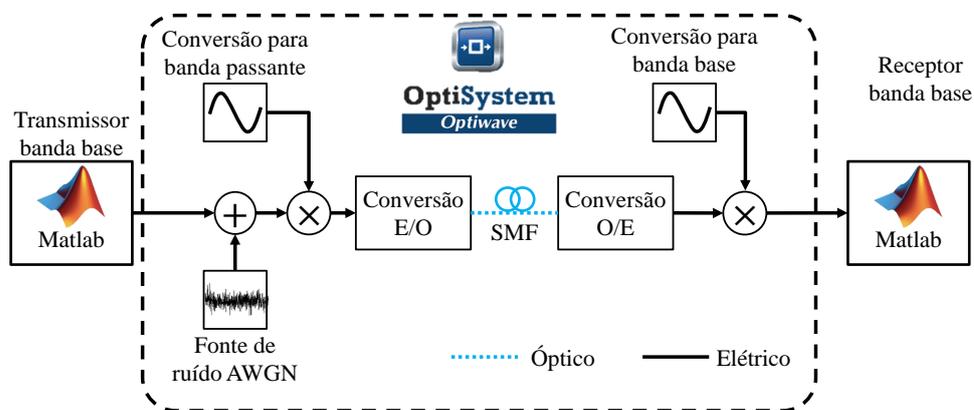


Figura 3.2: Diagrama em blocos da integração do Matlab e Optisystem.

As formas de onda analisadas foram obtidas a partir da implementação de em Matlab da forma de onda GFDM. A partir da implementação da forma de onda GFDM foi possível gerar as formas de onda OFDM e F-OFDM. A forma de onda OFDM foi obtida fazendo $M = 1$ e utilizando filtro formatador de pulso retangular, enquanto que obteve-se a forma de onda F-OFDM ao aplicar filtragem nas sub-bandas do sinal OFDM reduzindo a OOBE. É importante ressaltar que a filtragem adequada para o F-OFDM deve possuir uma resposta plana ao longo de toda sub-banda. Além disso, a resposta em frequência do filtro deve possuir a transição tão próxima à de um filtro ideal quanto possível para reduzir a banda de guarda necessária entre as sub-bandas. Um filtro com resposta em frequência retangular, isto é, um *sinc* no domínio do tempo, atende estes critérios. Desta forma, o sinal F-OFDM foi obtido realizando a filtragem nas sub-bandas do sinal OFDM no optisystem por meio de um filtro digital com $\alpha = 0,1$. A largura de faixa do filtro escolhido foi determinada a partir da ocupação espectral das subportadoras que transportam os símbolos QAM (*Quadrature and Amplitude Modulation*).

A importação da forma de onda do Matlab no Optisystem requer a adequação do vetor de amostras segundo os parâmetros do Optisystem. Por exemplo, o vetor do Optisystem que receberá as amostras do Matlab possui comprimento de $2^n A_{\text{bit}}$, onde n é o número de bits e A_{bit} o número de amostras por bit. Logo o vetor de amostras do Matlab deverá possuir este mesmo comprimento.

Na recepção, utiliza-se o mesmo componente empregado na transmissão, porém configurado para exportar as amostras do sinal na saída do sistema óptico para o Matlab, onde é realizada a demodulação. A Figura 3.3 apresenta a comparação do espectro das formas de onda em análise para uma RBW (*Resolution Bandwidth*) de 15 kHz. Para as três formas de onda foram utilizadas 60 portadoras pra transportar os dados mapeados em 64-QAM. Para as formas de onda OFDM e F-OFDM, gerou-se 3 símbolos com $K = 512$ e $M = 1$ cada. Já para a forma de onda GFDM, utilizou-se $K = 512$ e $M = 3$. Estas configurações permitiram que as três formas de onda sob análise fossem geradas com larguras de banda iguais para fins de comparação. Nota-se que as formas de onda GFDM e OFDM OOBE consideravelmente menor em relação ao OFDM, o que as tornam atrativas para comunicações 5G.

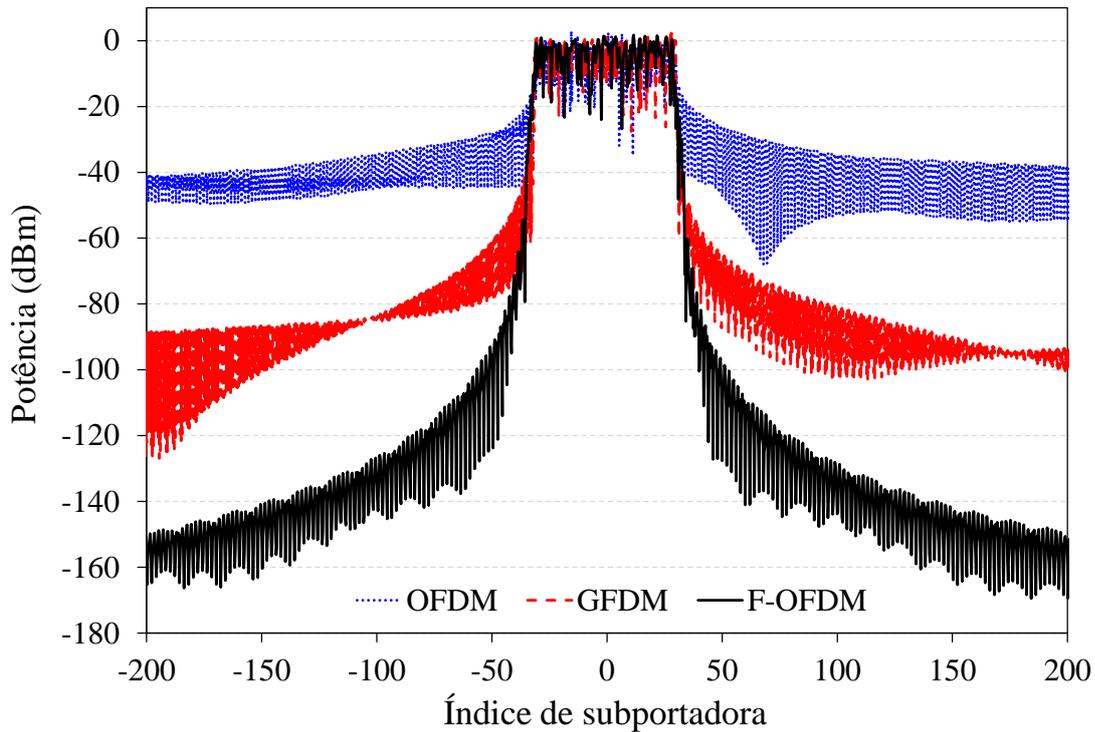


Figura 3.3: Espectros dos sinais OFDM GFDM e F-OFDM.

A análise de desempenho do sistema A-RoF foi conduzida para as formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM. Utilizou-se a métrica de desempenho EVM_{RMS} para analisar a qualidade do sinal recebido. EVM_{RMS} representa a razão entre o erro total do símbolo estimado na recepção em comparação com símbolo com maior probabilidade de ter sido transmitido e a energia total dos símbolos transmitidos, ou seja [105]

$$EVM_{RMS} = 100 \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{K-1} |d[k] - \hat{d}[k]|_2^2}{\sum_{k=0}^{K-1} |d[k]|_2^2}}, \quad (3.1)$$

onde $|\cdot|_p$ é o operador norma- p e \hat{d}_k é o k -ésimo elemento de $\hat{\mathbf{d}}$. O 3GPP especifica os valores máximos de EVM_{RMS} permitidos na recepção em função da ordem de modulação utilizada, conforme apresenta a Tabela 3.1 [106].

O Apêndice 1 apresenta o código de geração da forma de onda GFDM, a partir do qual obtêm-se as formas de onda OFDM e F-OFDM. Os parâmetros de transmissão selecionados garantiram sinais com taxas de transmissão e larguras de faixa iguais. Além disso, no Optisystem realizou-se a medição e controle de potência de cada subportadora das forma de onda por meio de um *power meter* e um atenuador

Tabela 3.1: Especificações de EVM_{RMS} segundo o 3GPP [106].

Ordem de Modulação	$EVM_{RMS}(\%)$
QPSK	17,5
16-QAM	12,5
64-QAM	8,0
256-QAM	3,5

elétrico variável, respectivamente. A Tabela 3.2 resume os parâmetros de geração dos símbolos OFDM, GFDM e F-OFDM. Os dados são mapeados em 36 subportadoras ativas (K_{on} (subportadoras ativas)) dentre as 512 subportadoras possíveis de modo a não ultrapassar os 100 MHz máximo de banda para comunicações em FR1, conforme especificado pelo 3GPP. Utilizou-se a modulação QAM com 4 bits por símbolo para formar 108 símbolos complexos transmitidos em cada forma de onda. No sistema A-RoF transmitiu-se 1 bloco GFDM com 3 sub-símbolos e 3 blocos OFDM com 1 sub-símbolo cada, resultando em uma taxa de transmissão de 210,9 Mbit/s e largura de faixa de 75 MHz. É importante ressaltar que a cada bloco de transmissão OFDM adicionou-se 1 CP, logo, 3 CPs foram adicionados. Por outro lado, na forma de onda GFDM transmitiu-se a mesma quantidade de dados com adição de apenas 1 CP. Para manter a energia média por símbolo constante, os 3 prefixos cíclicos adicionados ao OFDM possuem o mesmo tamanho que 1 prefixo cíclico adicionado ao GFDM, resultando em gastos energéticos iguais para inserção de redundâncias para as três formas de onda. Contudo, esta abordagem proporcionou ao GFDM maior robustez em canais com múltiplos percursos, visto que o comprimento do prefixo cíclico impacta diretamente no nível de IBI (*Interblock interference*) e depende do máximo atraso do canal.

Tabela 3.2: Parâmetros de geração dos símbolos OFDM, GFDM e F-OFDM.

Parâmetros de transmissão	OFDM	GFDM	F-OFDM
Número de subportadoras (K)	512	512	512
Subportadoras ativas (K_{on})	36	36	36
Número de subsímbolos (M)	1	3	1
Símbolos QAM transmitidos	108	108	108
Blocos transmitidos	3	1	3

Desta forma quanto maior o comprimento do prefixo cíclico, maior a proteção contra desvanecimentos causados por múltiplos percursos. Esta abordagem foi realizada apenas como prova de conceito, uma vez que o comprimento do prefixo cíclico não é uma escolha do projetista, e sim uma imposição do canal.

A partir da geração das formas de onda foi possível realizar a integração entre o Optisystem e Matlab para análise de desempenho de um *fronthaul* baseado em A-RoF. Com isto, verificou-se a qualidade dos sinais antes e após o emprego do sistema óptico utilizado para transporte dos sinais. O transmissor gera o vetor de amostras das formas de onda em banda base no domínio do tempo. No Optisystem, converte-se os sinais para banda passante utilizando uma portadora elétrica centrada em 3,5 GHz. Os espectros das formas de onda na saída do transmissor são visualizados em um ESA (*Electrical Spectrum Analyzer*) para fins de comparação. A Figura 3.4 ilustra o espectro das formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM, respectivamente. Nota-se que os sinais possuem níveis de potência e larguras de faixa iguais para garantir a análise uma comparação justa em termos de EVM_{RMS} .

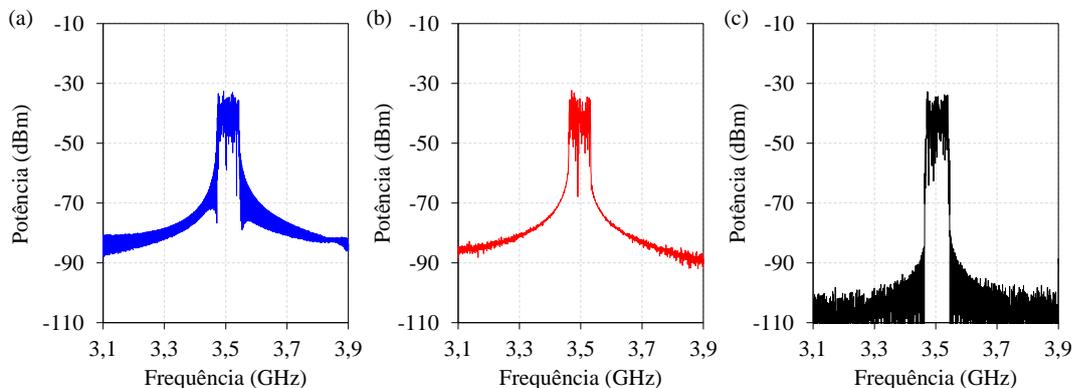


Figura 3.4: Espectros dos sinais transmitidos: (a) OFDM; (b) GFDM; (c) F-OFDM.

A primeira análise foi conduzida para a configuração *back-to-back* (B2B) na qual conecta-se o transmissor diretamente ao receptor. Tomou-se como referência os pré-requisitos de EVM_{RMS} do 3GPP em função da ordem de modulação do sinal. Por exemplo, para 16-QAM, o EVM_{RMS} máximo não deve ultrapassar 12,5%. A Figura 3.5 apresenta as constelações e informações de EVM_{RMS} dos sinais OFDM, GFDM e F-OFDM. As formas de onda OFDM e GFDM alcançaram EVM_{RMS} igual 0,1%, enquanto que para F-OFDM obteve-se 0,4%. É importante ressaltar que a degradação

na qualidade do sinal F-OFDM resulta da filtragem aplicadas às sub-bandas do sinal, visto que as portadoras posicionadas no início e fim da sub-banda são afetadas por uma região de resposta não linear dos filtros de transmissão e recepção. O valores de EVM_{RMS} obtidos estão muito abaixo do limite estipulado pelo 3GPP, assim como esperado para a configuração B2B.

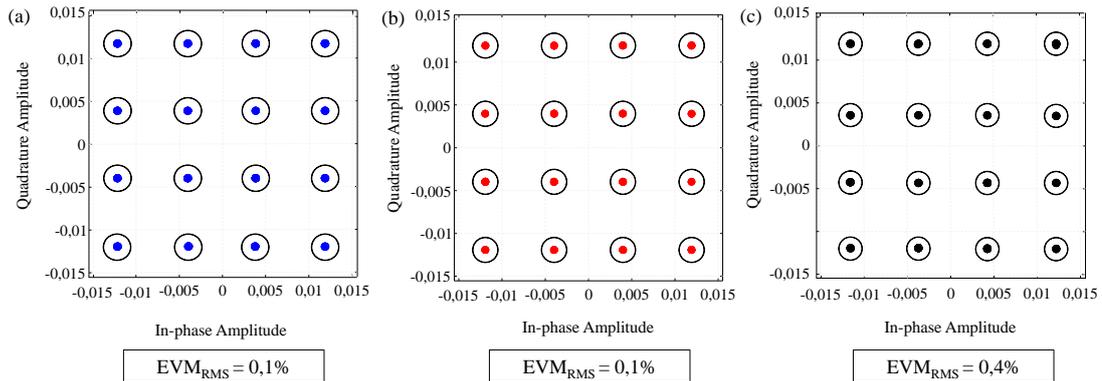


Figura 3.5: Constelações para a configuração B2B: (a) OFDM; (b) GFDM; (c) F-OFDM.

A Figura 3.6 mostra o diagrama em blocos do sistema A-RoF 5G. O bloco de referências fornece ao Matlab parâmetros do Optisystem, como o comprimento do vetor de amostras e o de tempo. Tais informações permitem parametrizar variáveis do Optisystem, utilizadas no Matlab, garantindo que alterações de configurações do Optisystem sejam consideradas pelo código de geração de formas de onda do Matlab. Um VEA (*Variable Eletrical Attenuator*) controla a potência do sinal em banda base ao qual adiciona-se o ruído. O produto entre as amostras do sinal com a portadora

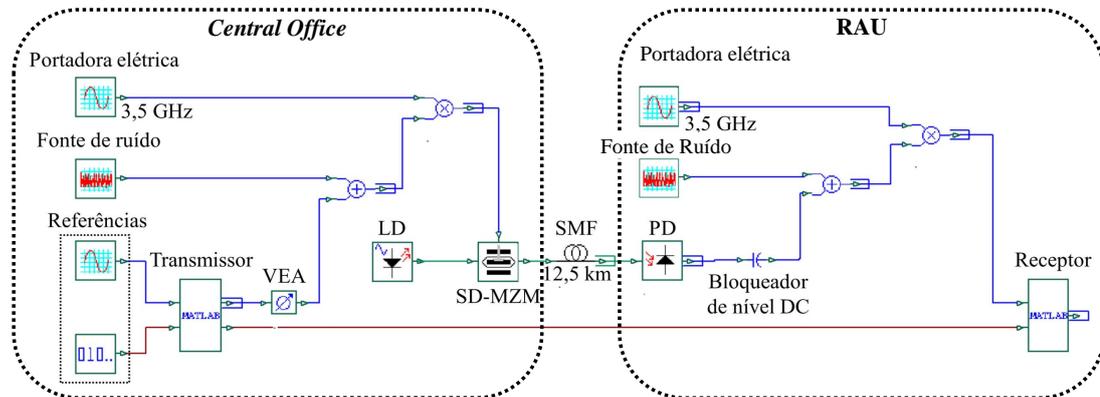


Figura 3.6: Diagrama em blocos de um sistema A-RoF 5G.

elétrica centrada em 3,5 GHz translada o sinal para banda passante. Sequencialmente, aplica-se a forma de onda em um SD-MZM (*Single-drive Mach-Zehnder Modulator*). O sinal aplicado ao SD-MZM modula uma portadora óptica proveniente do LD (*Laser*) centrada em 1550 nm. O sinal modulado percorre 12,5 km de fibra óptica com perda de 0,2 dB/km e atinge um PD (*Photodetector*) do tipo PIN. O PD realiza a conversão O/E do sinal modulado acrescentando DC (*Direct Current*). Por esta razão, utilizou-se um bloqueador de nível DC na saída do PD antes da conversão para banda base. Finalmente, o sinal é exportado para o Matlab pelo bloco receptor para demodulação.

A análise de desempenho do sistema óptico considerou o transporte das formas de onda em 12,5 km de fibra óptica SMF. Configurou-se os componentes do sistema de acordo com parâmetros de componentes reais a fim de aproximar a análise numérica de transmissões práticas. Por exemplo, o nível de ruído adicionado ao sinal é similar aos pisos de ruído apresentados por equipamentos práticos de laboratório, com valores próximos a -100 dBm. Um sinal de RF com 5 dBm modula uma portadora óptica gerada por um LD com potência de 10 dBm. A potência óptica inserida na SMF foi de 7 dBm, visto que o SD-MZM possui 3 dB de perda de inserção. A potência na entrada do fotodetector foi de 4,5 dBm devido à perda de 2,5 dB na SMF. A Figura 3.7 apresenta o desempenho das formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM em termos de EVM_{RMS} . Para as três formas de onda, é possível observar símbolos bem definidos na constelação visto que os valores de EVM_{RMS} foram de 1,3% para OFDM, 1,4% para GFDM e 1,7% para F-OFDM. Tais valores atendem com folga as especificações do 3GPP possibilitando a extensão do enlace óptico e/ou aumento taxa de transmissão.

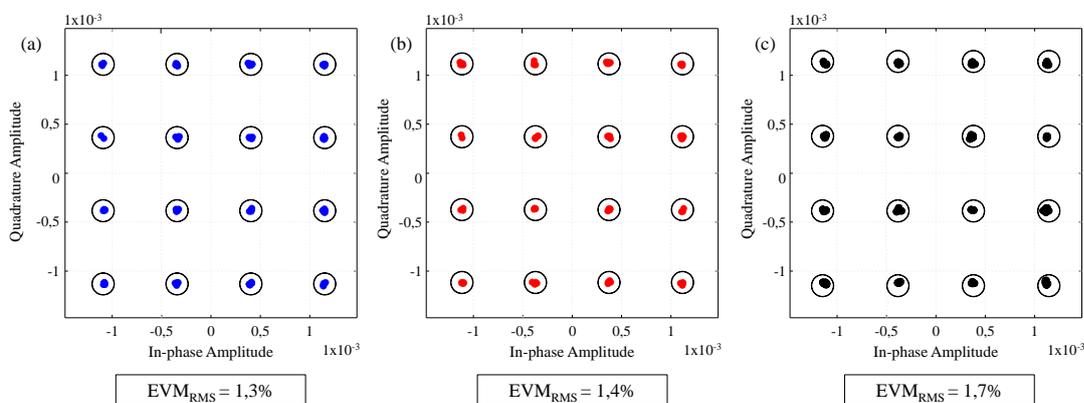


Figura 3.7: Constelações do sistema RoF para : (a) OFDM; (b) GFDM; (c) F-OFDM.

Capítulo 4

Implementação de Sistemas

Fiber-Wireless 5G

Este capítulo apresenta a implementação de sistemas A-RoF como uma solução *fronthaul* para redes 5G. Para isto, geradores comerciais dos fabricantes Keysight e Rohde & Schwarz foram utilizados e um transceptor 5G nacional desenvolvido pelo Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) no Inatel. A solução *fronthaul* 5G compreende frequências de operação de acordo com as especificações da *release* 16, isto é, 788 MHz, 3,5 GHz e 26 GHz [60].

4.1 Transceptor 5G Nacional

A camada física do 5G deve ser flexível para atender aplicações com diferentes pré-requisitos. Por exemplo, as redes 5G devem suportar serviços de alta mobilidade, elevada vazão de dados na ordem de Gbit/s e suportar a conexão de bilhões de dispositivos. A versão atual o padrão 5G NR atende principalmente aplicações de alta vazão de dados, empregando a forma de onda CP-OFDM, códigos LDPC em canais de dados, códigos polares em canais de controle e MIMO para multiplexação. Por outro lado, o transceptor 5G nacional foi desenvolvido para atender outros cenários de aplicação, incluindo eRAC, permitindo a escolha da forma de onda entre OFDM, GFDM e F-OFDM. Em junho de 2017, a solução desenvolvida pelo CRR para camada

física do 5G, recebeu a premiação do eWINE Grand Challenge em Oulu na Finlândia, competindo com instituições europeias. Além disso, em agosto de 2017, o Inatel realizou, em Brasília, uma demonstração desta tecnologia 5G na presença do ministro da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, do Secretário de Política de Informática e da Secretária de Radiodifusão.

A Figura 4.1 apresenta uma fotografia do transceptor 5G utilizado neste trabalho. O transceptor 5G utiliza um dispositivo USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) (2954R) [107] do fabricante National Instruments, o qual é baseado em rádio definido por *software*. Este dispositivo opera até 6 GHz com larguras de faixa de até 160 MHz.



Figura 4.1: Fotografia do transceptor 5G nacional.

Diferentes métodos de programação em FPGA (*Field Programmable Gate Array*) compõem a implementação do transceptor 5G. Utilizou-se o LabView Communications como principal ferramenta computacional de desenvolvimento. A Figura 4.2 ilustra o diagrama em blocos do transceptor 5G. O bloco de adaptação de taxa é responsável por ajustar a vazão de dados requerida por um usuário para uma vazão de dados fixa de acordo com a capacidade do sistema. Isto é feito inserindo bits nos quadros de transmissão quando a vazão demandada é menor que a capacidade do sistema. Na recepção, o bloco de remoção de preenchimento elimina os bits inseridos pelo transmissor.

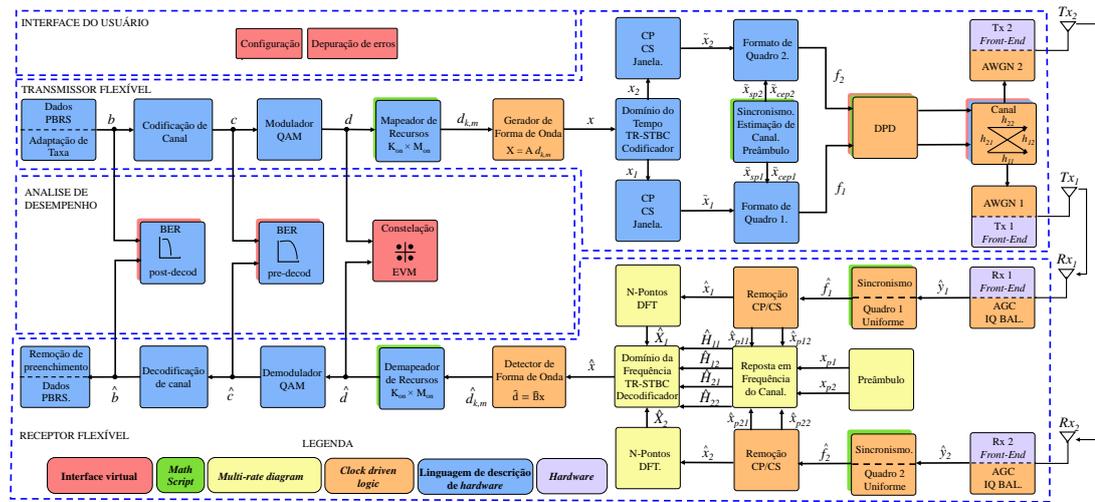


Figura 4.2: Diagrama em blocos do transceptor 5G nacional [Adaptado da versão original de MSc. Danilo Simões Gaspar].

No transceptor 5G, implementou-se códigos polares e LDPC para a codificação de canal e controle de erros. Porém, para as aplicações eRAC, o desempenho dos códigos LDPCs e códigos polares são similares. Portanto, o transceptor 5G aplica códigos polares para codificação de canal e controle de erros.

Os bits na saída do codificador de canal são transformados em símbolos complexos por um modulador digital, que emprega as modulações QPSK e QAM. Desta forma, pode-se utilizar elevadas ordens de modulação (256-QAM) para aplicações eMBB, enquanto que a robustez oferecida pela modulação QPSK é atraente para conexão de dispositivos IoT. Na recepção, o demodulador transforma os símbolos em bits que são entregues ao decodificador de canal para correção de erros.

O mapeador de recursos organiza os dados na estrutura de quadros do sistema. Os símbolos de dados de usuários distintos são multiplexados com informações de controle e portadoras piloto utilizadas para estimação de canal. No lado da recepção, o demapeador de recursos recupera o fluxo de símbolos de dados dos usuários e encaminha-os para o demodulador QAM.

No gerador de forma de onda, os quadros de transmissão são multiplexados utilizando OFDM, GFDM ou F-OFDM. Neste bloco, aplica-se o processamento digital específico de cada forma de onda incluindo os filtros digitais utilizados para redução da OOB. A OOB pode ser reduzida ainda mais ao aplicar-se na forma de onda a

técnica de janelamento após a inserção do CP e CS (*Cyclic Suffix*).

A técnica MIMO é amplamente utilizada em redes móveis sem fio para fornecer aumento da vazão de dados e eficiência espectral [108]. Para aplicações eRAC, MIMO visando diversidade, torna-se interessante visto que este esquema acrescenta robustez contra canais seletivos em frequência e variantes no tempo. Esquemas MIMO convencionais usados para fornecer diversidade espacial, como a STC (*Space Time Coding*) proposta por Alamouti [109], são aplicados aos símbolos QAM antes da geração da forma de onda. Contudo, esta técnica não é atrativa para formas de ondas não ortogonais devido à necessidade de equalização antes da combinação para evitar a ISI (*Intersymbol Interference*) residual causada por múltiplos percursos, resultando em uma severa perda de desempenho dependendo da resposta ao impulso do canal [110]. O transceptor 5G emprega a técnica TR-STC (*Time Reversal STC*) para prover diversidade para qualquer forma de onda, inclusive as não ortogonais [110]. Esta solução aplica o STC nas amostras da forma de onda no domínio da frequência. Com isto, a combinação pode ser realizada antes do processo de equalização.

Um conjunto de algoritmos são utilizados pelo receptor para a realização do sincronismo e estimação de canal. O transceptor 5G utiliza dois preâmbulos enviados antes da forma de onda, para sincronismo e estimação de canal. O sincronismo determina o início do quadro por meio da correlação no domínio do tempo do sinal recebido e da sequência piloto conhecida [111]. Adicionalmente, o sincronismo de frequência é obtido por meio da fase do pico de correlação [112]. Paralelamente, obtêm-se uma estimativa do canal ao comparar o espectro do preâmbulo recebido com o espectro da sequência de referência conhecida.

4.2 Implementação de Sistemas 5G NR

A Figura 4.3 ilustra o diagrama em blocos de um sistema FiWi 5G o baseado em A-RoF, enquanto que a Figura 4.4 apresenta uma fotografia do arranjo experimental utilizado. A arquitetura proposta explora a solução A-RoF baseada em modulação externa e detecção direta, para compor um *fronthaul* multi-banda de acordo com o princípio C-RAN. Na CO, um DD-MZM modula uma portadora óptica centrada em

1560 nm proveniente de um LD do tipo DFB (*Distributed Feedback*), com dois sinais de RF distintos. O primeiro sinal (RF_1) corresponde ao sinal gerado pelo transceptor 5G desenvolvido no CRR- Inatel, em 3,5 GHz, enquanto que o segundo sinal (RF_2) em 26 GHz provém de um VSG (*Vector Signal Generator*).

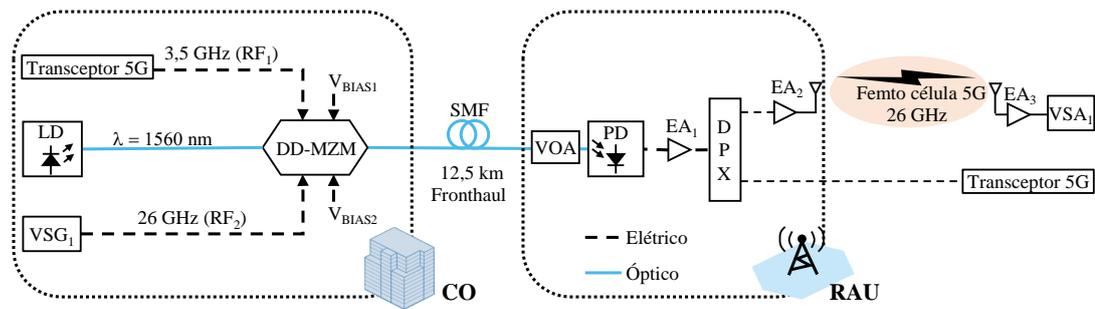


Figura 4.3: Arquitetura de um sistema FiWi 5G baseado em A-RoF: VSG- gerador de sinais vetoriais; DD-MZM- modulador de Mach-Zehnder de duplo interferômetro; DPX- diplexador; EA – amplificador elétrico; VSA- analisador de sinais vetoriais.

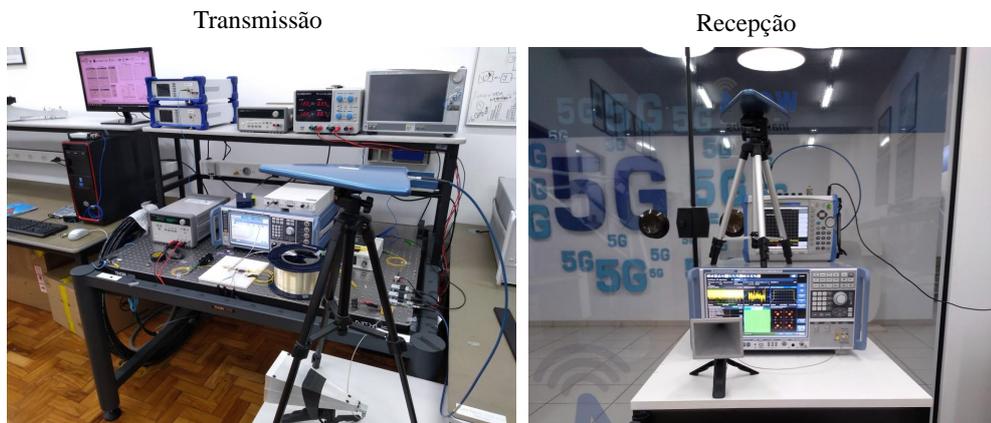


Figura 4.4: Fotografia do arranjo experimental.

O DD-MZM permite mitigar as interferências entre os sinais (RF_1) e (RF_2), visto que estes são aplicados ao DD-MZM individualmente nos braços superior e inferior com tensões de polarização distintas (V_{BIAS1} e V_{BIAS2}) [38]. Experimentalmente selecionou-se de maneira manual as tensões de polarizações para operação no QP, permitindo reduzir significativamente as distorções nos sinais. Vale ressaltar que a temperatura influencia na tensão de polarização do modulador fazendo-a variar ao longo do experimento, logo foi realizado um monitoramento manual do ponto de operação do modulador e o controle da temperatura do ambiente com ar condicionado [113].

O feixe óptico é lançado em uma SMF com extensão de 12,5 km até a RAU na qual os sinais de RF são recuperados por um PD e amplificados por EA_1 (*Electrical Amplifier*), que corresponde a dois amplificadores em cascata com 12 dB de ganho e figura de ruído de 5,5 dB, cada. Um diplexador separa os sinais de 3,5 GHz e 26 GHz. O sinal em 3,5 GHz é aplicado ao transceptor 5G para ser analisado, enquanto que o sinal em 26 GHz é amplificado por EA_2 , o qual possui ganho de 40 dB e figura de ruído de 4,5 dB. Sequencialmente, o sinal em 26 GHz é irradiado e recebido por uma antena corneta de 25 dBi de ganho e aplicado a um VSA (*Vector Signal Analyzer*). Desta forma, implementou-se uma femto-célula de 10 m.

A Figura 4.5 ilustra o espectro elétrico medido na saída de EA_1 , na qual é possível observar a presença dos sinais 5G centrados em 3,5 e 26 GHz. Os níveis de potência observados para os dois sinais variam de acordo com a largura de faixa de modulação de cada sinal e com a resposta do componentes em função da frequência de operação. Adicionalmente, constatou-se que as tensões de polarização (V_{BIAS1} e V_{BIAS2}) escolhidas minimizam a produção de espúrios ao longo da faixa de frequências analisada. Percebe-se ainda, que a partir de 18 GHz o patamar de ruído aumenta devido a resposta em frequência dos componentes elétricos do analisador de espectro.

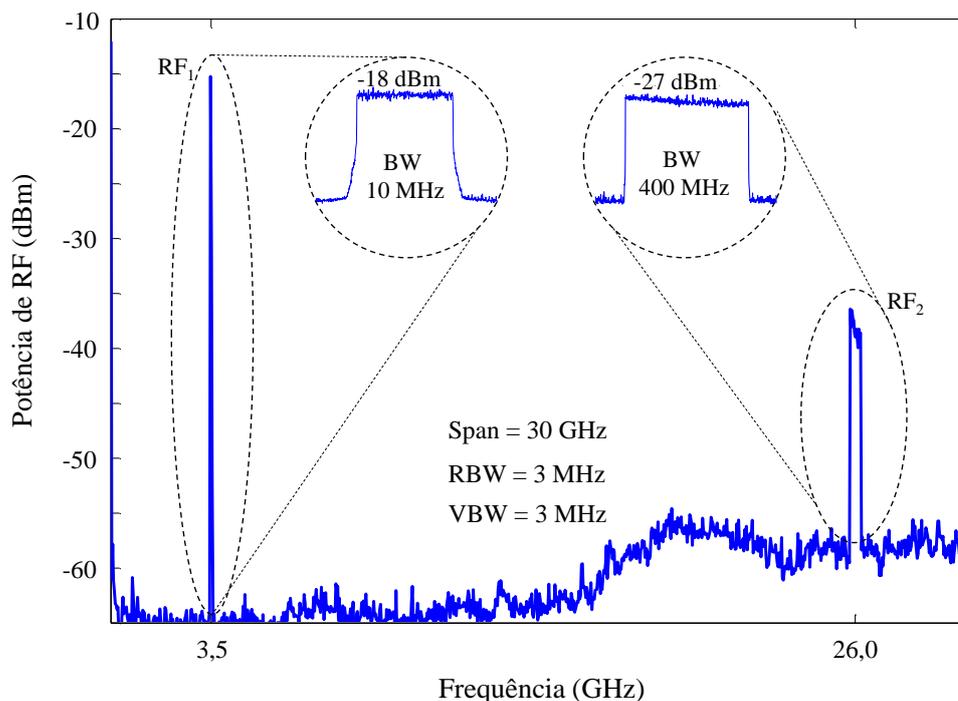


Figura 4.5: Espectro elétrico medido na saída do EA_1 .

Na Figura 4.6 são apresentadas as curvas de EVM_{RMS} do transceptor 5G para as formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM, em função da potência do sinal RF_1 na saída do EA_1 . Nas referidas formas de onda, utilizou-se um modulador digital 64-QAM, para dar origem aos símbolos complexos que são transportados nas subportadoras em conjunto com sinais de sincronismo e controle. A taxa de 40 Mbit/s utilizada, resultou em uma ocupação de banda de 10 MHz. A investigação de desempenho em termos de EVM_{RMS} foi conduzida variando a potência elétrica (P_{RF1}) na entrada do modulador DD-MZM de -35 a -3 dBm, resultando em valores de potência de -50 a -24 dBm na saída do EA_1 . As curvas de EVM_{RMS} medidas para as formas de onda GFDM e OFDM apresentaram comportamento semelhante e valores abaixo da especificação máxima de EVM_{RMS} , a partir de -49 dBm. A forma de onda F-OFDM apresentou queda de desempenho em relação as demais formas de onda analisadas, atendendo a norma de EVM_{RMS} para potências acima de -46 dBm. Os *insets* (i), (ii) e (iii) da Figura 4.6 apresentam as constelações medidas para o F-OFDM com potências de -50, -39 e -24 dBm. O aumento de P_{RF1} implicou em aumento de SNR, conseqüentemente, melhoria do EVM_{RMS} medido, que passou de 21,5% para 1,33%.

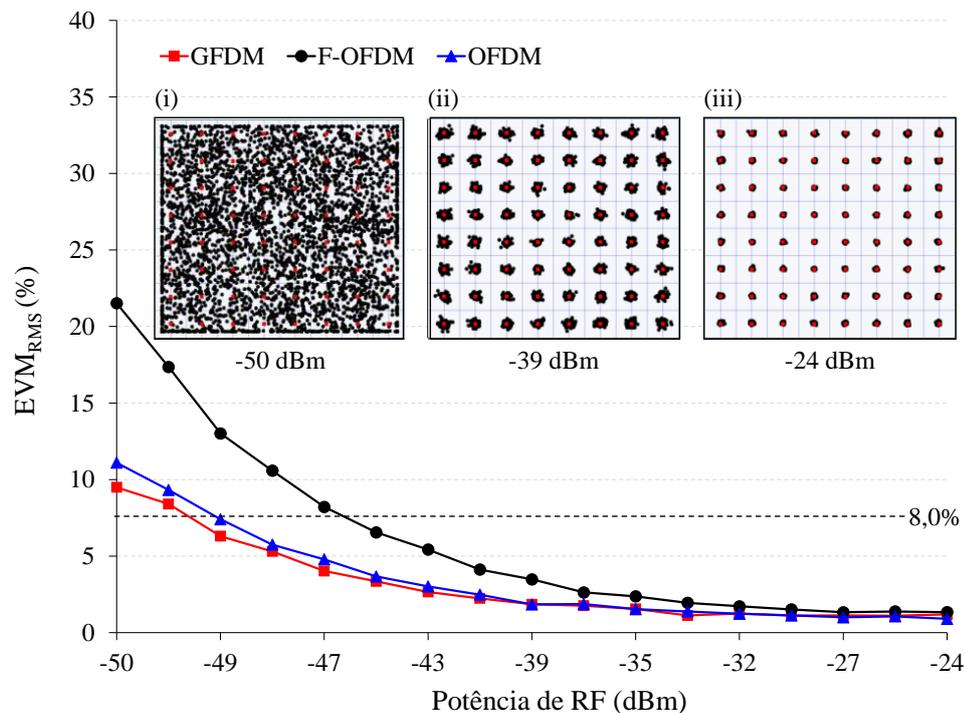


Figura 4.6: EVM_{RMS} em função da potência de RF na saída de EA_1 para o sinal de 3,5 GHz, com modulação 64-QAM.

A investigação do cenário eMBB em 26 GHz incluiu as análises dos níveis de potência óptica e elétrica do sistema RoF, que resultaram em uma qualidade de serviço adequada na saída de EA₁ e na borda de uma femto-célula com 10 m de alcance em ambiente interno. Ou seja, o sistema RoF foi caracterizado em função da potência elétrica do sinal RF₂ (P_{RF2}) e potência óptica na entrada do PD. A Tabela 4.1 resume os parâmetros de transmissão dos sinais 5G NR em termos de largura de faixa, número de blocos de recursos alocados ($N_{PRB}^{BW(j),\mu}$) e vazão de dados (R_b). Utilizou-se a $\mu = 3$ e conseqüentemente, subportadoras espaçadas de 120 kHz.

Tabela 4.1: Parâmetros de transmissão do sinal 5G NR para espaçamento entre subportadoras de 120 kHz.

Largura de faixa (MHz)	$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$	R_b 16-QAM	R_b 64-QAM
50	33	130,59 Mbit/s	195,89 Mbit/s
100	66	269,35 Mbit/s	404,03 Mbit/s
200	132	538,71 Mbit/s	808,06 Mbit/s
400	264	1,07 Gbit/s	1,61 Gbit/s

A Figura 4.7 apresenta as curvas de EVM_{RMS} em função da potência elétrica efetivamente radiada, ou seja, considerando o ganho de EA₂ (35 dB) e da antena de transmissão 25 dBi. Os níveis de potência efetivamente irradiada (11,5 a 29,5 dBm) foram obtidos variando a potência de RF de entrada no DD-MZM de -8 a 9 dBm. Na configuração B2B conecta-se o transmissor diretamente ao receptor usando um cabo de 1 m com perda de 7,7 dB em 26 GHz. Por outro lado, a configuração RoF corresponde ao transporte dos sinais em um enlace óptico de 12,5 km e análise na saída da antena de transmissão. Configurou-se a potência de transmissão do laser para 10 dBm resultando em 2 dBm na entrada do fotodetector após a propagação pelo sistema RoF, incluindo o *fronthaul* de 12,5 km. Observou-se que a partir de 23,5 dBm o EVM_{RMS} está abaixo do limite especificado pelo 3GPP para todas as larguras de faixa e vazões apresentadas na Tabela 4.1. Nota-se que a máxima penalidade de potência entre a configuração B2B e RoF está em torno de 6 dB.

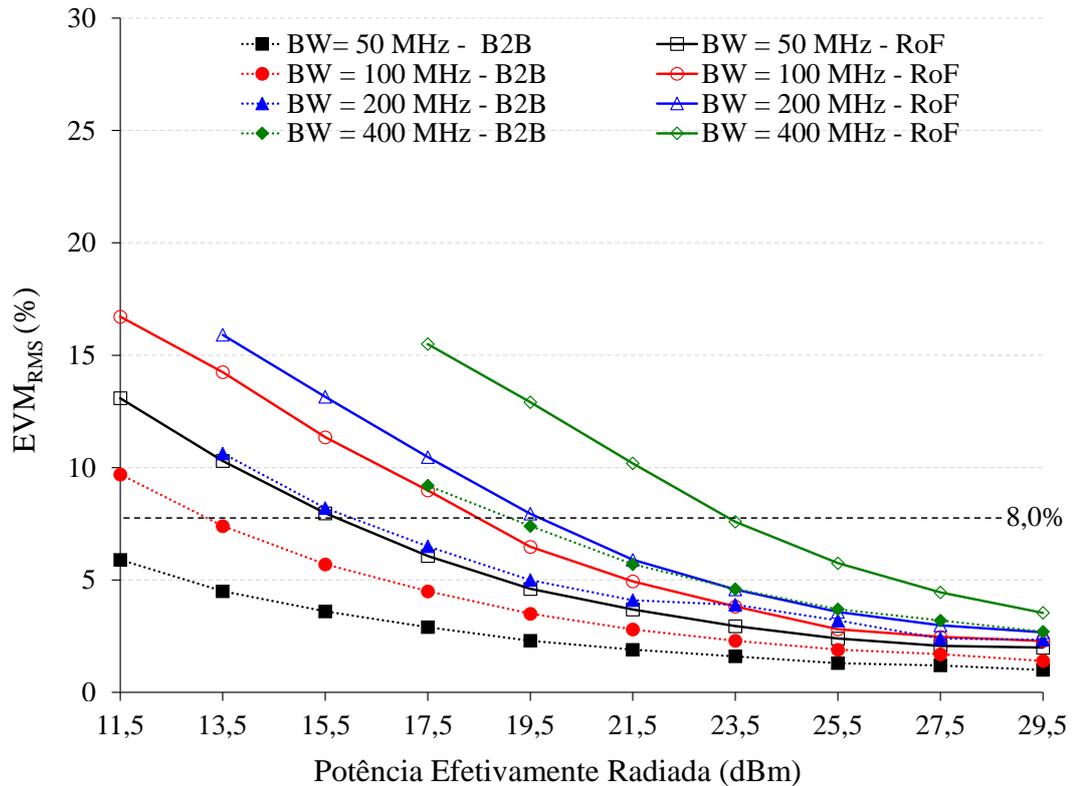


Figura 4.7: EVM_{RMS} em função da potência de RF na saída da antena de transmissão.

A Figura 4.8 apresenta a caracterização do sistema A-RoF em função da potência óptica de entrada no PD. Utilizou-se um VOA (*Variable Optical Attenuator*) e um OPM (*Optical Power Monitor*) para garantir valores de potência entre -10 e 2 dBm na entrada do PD. Para valores de $EVM_{RMS} > 12,5\%$, pode-se observar valores mais altos de EVM_{RMS} para 16-QAM em potências ópticas mais baixas, quando comparados a 64-QAM. No entanto, neste caso, o sistema estava operando com uma relação sinal-ruído baixa, o que diminuiu a precisão da medição. Esse fenômeno ocorre devido a distância entre os símbolos do 64-QAM ser menor que a do 16-QAM para a mesma energia média da constelação. Isso significa que o desvio dos símbolos recebidos em relação aos símbolos de referência é menor para 64-QAM, o que resulta em EVM_{RMS} mais baixo. Vale ressaltar dois pontos: i) no cenário de baixa potência óptica, 16-QAM funciona corretamente e de acordo com o requisito de 3GPP, portanto, a medição do EVM_{RMS} é precisa; ii) em altos níveis de potência óptica, o 16-QAM e o 64-QAM operam com aproximadamente o mesmo EVM_{RMS} e atendem aos requisitos correspondentes de 3GPP, conforme o esperado. Para a modulação 16-QAM, os níveis de

potência que produziram valores de EVM_{RMS} abaixo do limiar máximo, foram -9, -7,7 -4 e -2,1 dBm para as larguras de faixa de 50, 100, 200, 400 MHz, respectivamente. O aumento da ordem de modulação para 64-QAM demandou potência óptica adicional de 2,5 dBm para atender ao limite de EVM_{RMS} .

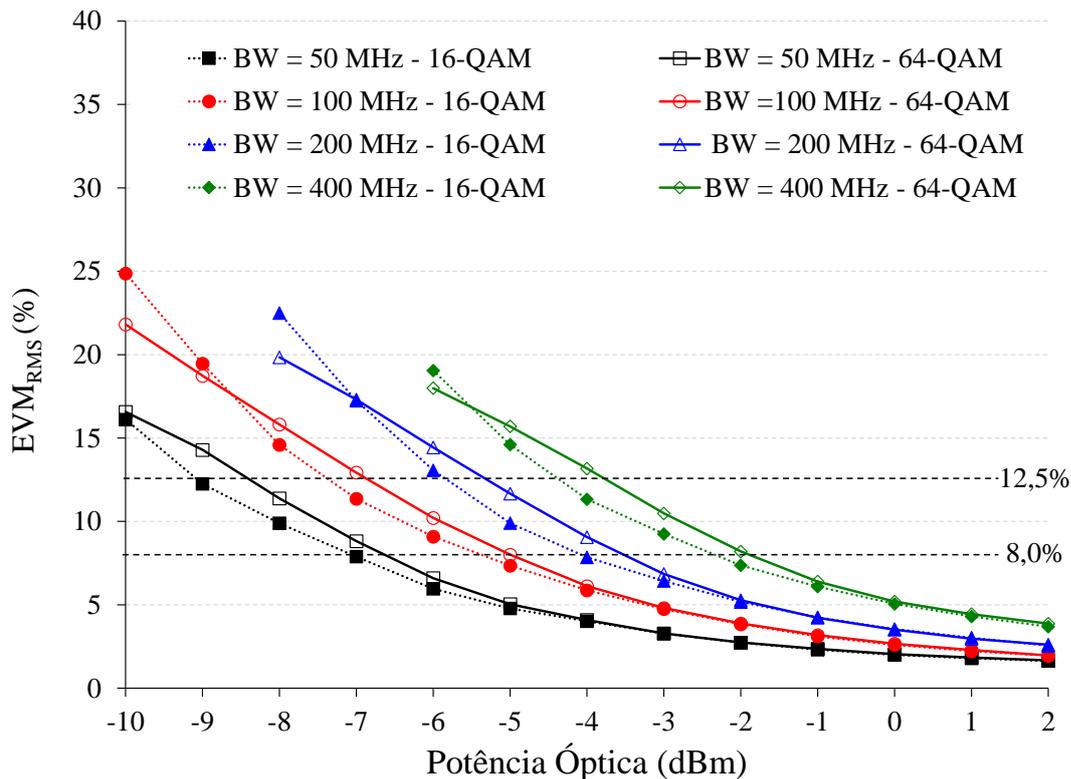


Figura 4.8: EVM_{RMS} em função da potência óptica na entrada do PD, para as modulações 16 e 64-QAM

A última e mais importante fase na implementação do cenário eMBB refere-se à análise de desempenho do sistema FiWi, levando em consideração a propagação sem fio pela femto-célula 5G NR em ambiente interno. O sinal recebido foi analisado pelo VSA_1 na borda de uma femto-célula com 10 m de alcance. Como a atenuação da propagação sem fio na faixa de frequência de ondas milimétricas é muito alta, foram escolhidos os melhores pontos de desempenho das duas últimas análises para implementar o sistema FiWi, os quais foram: 2 dBm na entrada PD da Figura 4.8; potência efetivamente irradiada de 29,5 dBm da Figura 4.7. Mais uma vez, todas as larguras de banda especificadas pelo FR2 5G NR foram analisadas, sendo elas: 50, 100, 200 e 400 MHz. A potência elétrica do sinal recebido medido na saída da antena corneta de

recepção (-35 dBm), foi amplificada pelo EA₃, que fornece ganho de 35 dB com figura de ruído de 4,5 dB. Como resultado, a potência recebida no VSA₁ foi de 0 dBm. A Figura 4.9 apresenta as medições de EVM_{RMS} na borda da femto-célula. Os requisitos 3GPP para 16 e 64-QAM foram cumpridos para todas as larguras de banda avaliadas. Os *insets* (i) e (ii) da Figura 4.9 ilustram as constelações dos sinais com larguras de faixa de 50 e 400 MHz e de modulações 16 e 64-QAM. Nas referidas constelações, é possível distinguir todos os símbolos, visto que os valores de EVM_{RMS} foram de 3,07 e 3,43% para largura de faixa de 50 MHz e 7,18 e 7,72% para configuração de 400 MHz.

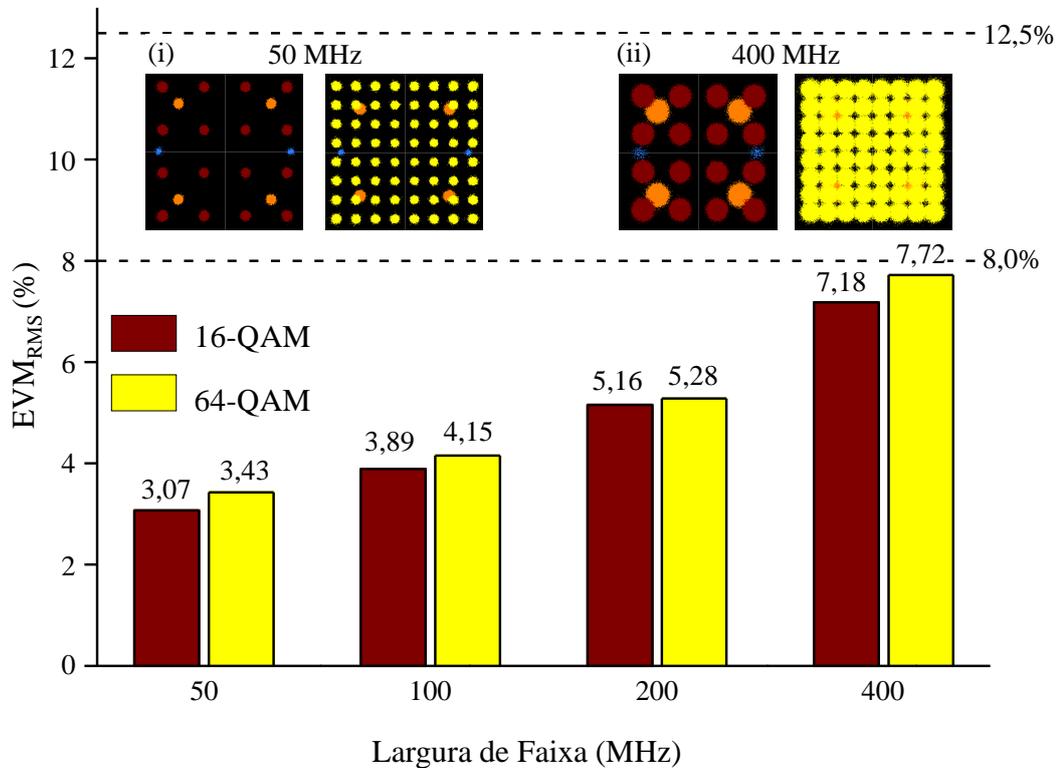


Figura 4.9: Desempenho de EVM_{RMS} do sistema FiWi 5G NR em 26 GHz em função da largura de faixa para 64-QAM.

A partir dos resultados acima apresentados, constatou-se a viabilidade dos sistemas A-RoF para o transporte e transmissão de sinais 5G. Adicionalmente, propõe-se utilizar a infraestrutura de uma rede óptica proveniente de um ISP (*Internet Service Provider*) da cidade de Santa Rita do Sapucaí- MG para distribuir sinais 5G a pontos estratégicos para que, posteriormente, os sinais possam ser transmitidos aos usuários finais.

Considerando que os resultados do sistemas FiWi permitiram verificar a viabilidade de tal sistema, incrementou-se ainda na análise, novas aplicações visando investigar diversos cenários de uso da rede conforme apresentado na Figura 4.10. Com isso, é possível utilizar uma única infraestrutura de rede para dar vazão a serviços diversificados. É importante ressaltar que tais serviços pertencem a cenários de usos diferente e, portanto, possuem pré requisitos diferentes. Na avaliação da técnica proposta, considerou-se as seguintes aplicações: transmissão de sinais OFDM, GFDM e F-OFDM na frequência de 788 MHz para aplicações eRAC; transmissão de sinais 5G NR em 3,5 GHz para aplicações eMBB em ambiente externo; transmissão de sinais em 26 GHz para habilitar femto-células Multi-Gbit/s; utilização de uma aplicação M2M (*Machine to Machine*) operando com o padrão PROFINET, como uma prova de conceito para automação industrial.

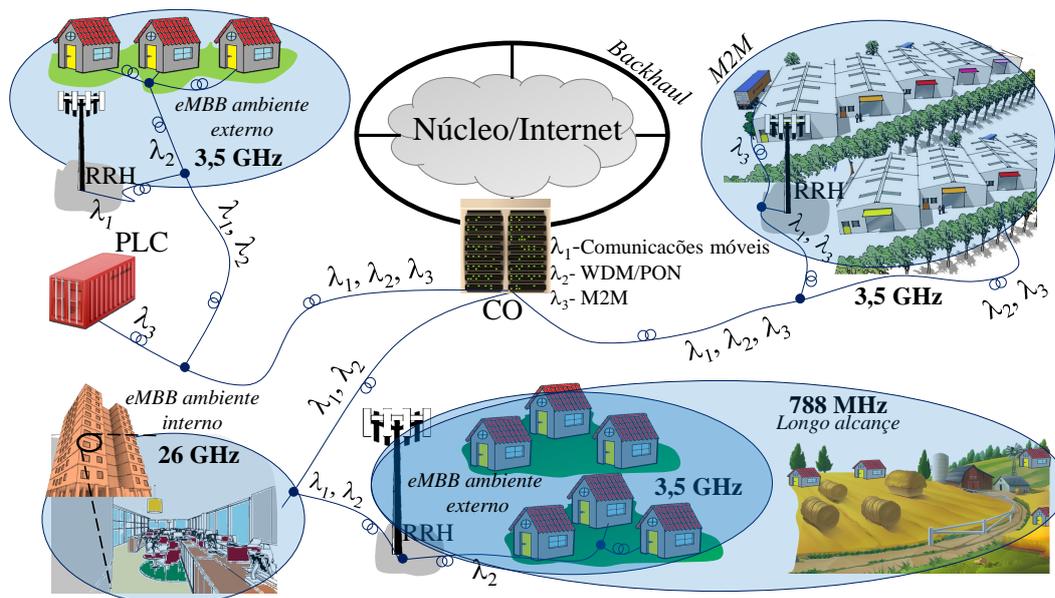


Figura 4.10: Sistema 5G NR multi-aplicações.

A Figura 4.11 ilustra o diagrama em blocos do sistema FiWi baseado em A-RoF para comunicações 5G, enquanto que a Figura 4.12 apresenta a fotografia do arranjo experimental utilizado. A solução proposta utiliza a estrutura de uma rede PON (*Passive Optical Network*) de 2 km como *fronthaul*. A rede PON é utilizada pelo ISP da Vivavox para prover Internet na cidade de Santa Rita do Sapucaí. Para isto, os sinais

de RF são transmitidos no comprimento de onda $\lambda = 1560$ nm enquanto que os sinais originais da rede PON, fornecidos pelo ISP utilizam os comprimentos de onda de 1490 e 1310 nm para aplicações de FTTH (*Fiber to the Home*). Adicionalmente, utiliza-se o comprimento de onda de 1500 nm em aplicações M2M em automação industrial, utilizando um par mestre e escravo e MCs (*Media Converters*) de acordo com o padrão PROFINET. Um AWG (*Arbitrary Waveform Generator*) em conjunto com um VSG₁ produzem o sinal QAM banda larga em 26 GHz (RF₁), o qual posteriormente é substituído por um gerador de sinais no padrão 5G NR. O VSG₂, em conjunto com um AWG, produz o sinal RF₂, enquanto que o sinal RF₃ em 788 MHz provêm do transceptor 5G. Os sinais RF₂ e RF₃ são combinados eletricamente e, juntamente com RF₁, modulam a portadora óptica em 1560 nm por meio de um único DD-MZM. O DD-MZM é polarizado por $V_{BIAS1} = 6,1$ V e $V_{BIAS2} = 1,0$ V para operar em QP. Em seguida, um acoplador WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)₁ combina os sinais ópticos nos diferentes comprimentos de onda para que sejam transportados em uma mesma fibra óptica.

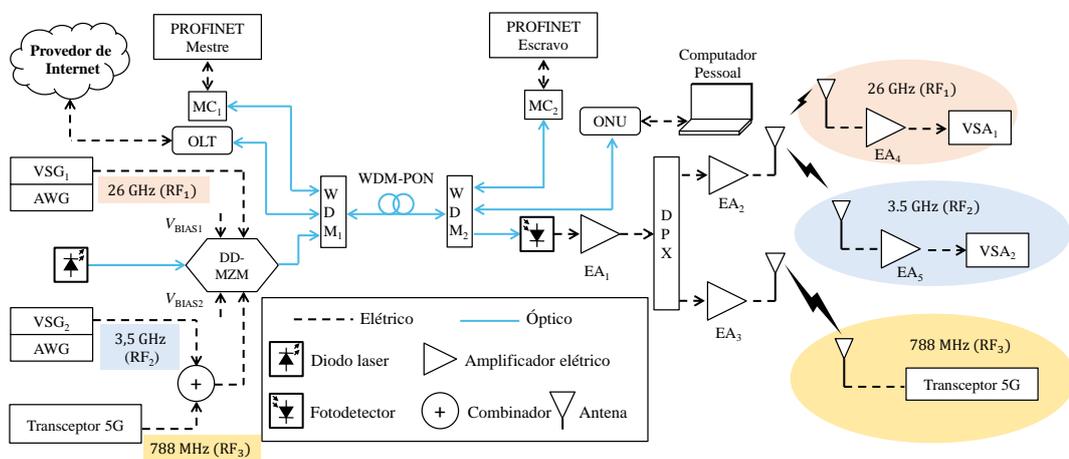


Figura 4.11: Arquitetura do sistema FiWi 5G multi-banda baseado em A-RoF e WDM-PON: OLT - terminal de linha óptica; MC - conversor de mídia; ONU - unidade de rede óptica; PC - computador pessoal.

O sinal na saída do acoplador WDM₁ percorre a extensão da rede WDM-PON até o acoplador WDM₂, o qual separa os comprimentos de onda em três fibras ópticas distintas. O sinal em 1550 nm é entregue ao MC₂ e alimenta o componente escravo do PROFINET. O ISP provê 100 e 30 Mbit/s para *download* e *upload* de informações

em portadoras ópticas centradas em comprimentos de onda diferentes. O *download* de informações é feito em 1490 nm e entregue a ONU (*Optical Network Unit*), a qual é conectada a um computador, enquanto que o *upload* é feito em 1310 nm. Logo, por meio de um teste de velocidade [114] é possível verificar o impacto da presença de sinais externos na rede PON.



Figura 4.12: Fotografias do cenário de medida de desempenho do sistema FiWi multi-bandas: (a) sistema FiWi multi-banda; (b) transmissão do sinal em 788 MHz; (c) recepção do sinal em 26 GHz a 10 m; (d) recepção do sinal em 788 MHz a 105 m.

Finalmente, a portadora óptica em 1560 nm é convertida para o domínio elétrico por um fotodetector. Os três sinais de RF são então amplificados por um amplificador elétrico faixa larga (EA₁). Um *diplexer* (DPX) separa o sinal RF₁ dos sinais RF₂ e RF₃ os quais são posteriormente irradiados pela mesma antena. Antes da radiação os sinais passam por um segundo processo de amplificação (EA₂ e EA₃). Os amplificadores EA₃ e EA₅ possuem ganho de 21,5 dB e figura de ruído de 1,5 dB, cada. O sinal em 26 GHz é transmitido por uma corneta de 25 dBi de ganho, recebido por uma corneta de 12 dBi de ganho, amplificado por EA₄, o qual possui ganho de 40 dB e figura de ruído de 4,5 dB. Posteriormente o sinal em 26 GHz é analisado pelo VSA₁. Paralelamente, os sinais RF₂ e RF₃ são transmitidos pela mesma antena comercial (AARONIA HyperLOG 7040, com 5-dBi de ganho) e recebidos individualmente por

antenas idênticas. O sinal 5G NR em 3,5 GHz é amplificado por EA₅ e analisado pelo VSA₂, enquanto que o sinal em 788 MHz é analisado por um segundo transceptor 5G. A Tabela 4.2 reporta as potências elétrica e óptica em diferentes estágios do arranjo experimental.

Tabela 4.2: Níveis de potência óptica e elétrica.

Estágio do arranjo experimental	Potência (dBm)
Saída do laser	14
Saída do DD-MZM	5,8
Saída do transceptor 5G	-5
Saída do VSG	2
Saída do ASG	0
Saída do WDM1	4,5
Potência de entrada do PD	-0,5
Potência radiada em 788 MHz	2
Potência radiada em 3,5 GHz	0,8
Potência radiada em 26 GHz	23
Potência recebida em 788 MHz (105 m)	-63
Potência recebida em 3,5 GHz (13 m)	-21
Potência recebida em 26 GHz (10 m)	-13

A Figura 4.13 apresenta o espectro elétrico medido na saída do PD. Nota-se a presença dos três sinais de RF em 788 MHz, 3,5 GHz e 26 GHz. A diferença dos níveis de potências entre os sinais refere-se a resposta eletro-óptica em função da frequência e largura de faixa de modulação de cada sinal. Como apresentado nos zooms dos sinais, os quais possuem largura de faixa de 6, 100 e 200 MHz para as frequências de 788 MHz, 3,5 GHz e 26 GHz, respectivamente. Nota-se a o ponto de operação escolhido do DD-MZM reduziu a emissão de espúrios harmônicos ao longo de toda faixa de análise. A partir deste estágio, os sinais de RF podem ser apropriadamente amplificados e irradiados.

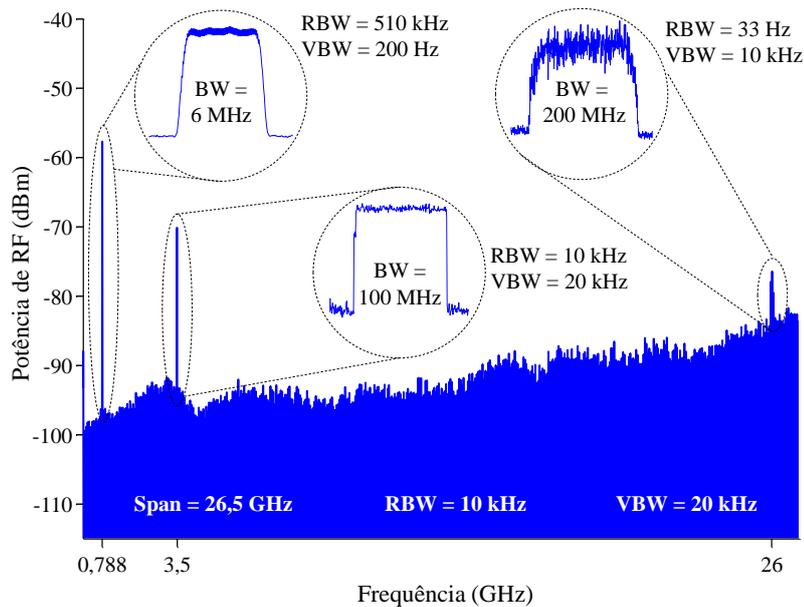


Figura 4.13: Espectro elétrico medido na saída do PD.

A Figura 4.14 ilustra o espectro dos sinais OFDM, GFDM e F-OFDM após a fotodetecção. Como esperado, as formas de onda GFDM e F-OFDM apresentam menor OOB em relação a OFDM. Tal característica favorece a coexistência com outros sistemas de telecomunicações operantes em canais adjacentes. A forma de onda F-OFDM apresentou comportamento similar ao GFDM com emissão fora da faixa ligeiramente menor, como pode ser visto no zoom da Figura 4.14. É importante ressaltar que nas três formas de onda foram empregados filtros para redução da emissão fora da faixa.

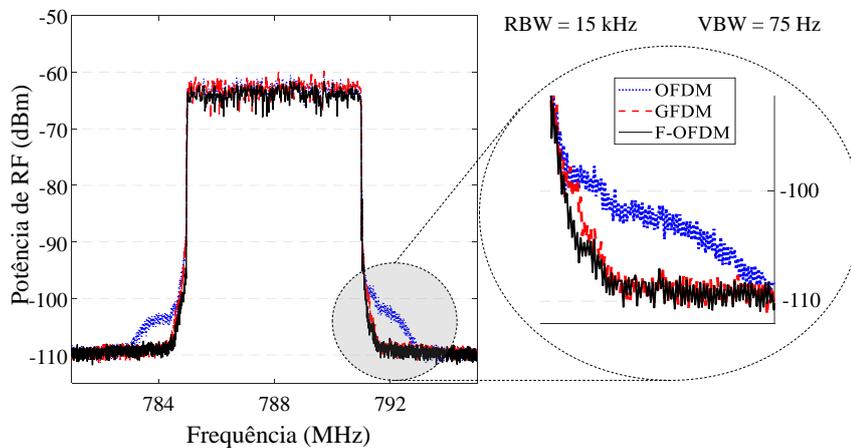


Figura 4.14: Espectro elétrico das formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM antes da radiação.

A Figura 4.15 apresenta a análise de desempenho das formas de onda para as configurações B2B, RoF e FiWi vislumbrando-se coberturas de longa distância. A análise B2B demonstrou que o transceptor 5G foi capaz de prover valores de EVM_{RMS} abaixo de 1,48%, independente da forma de onda. O sistema A-RoF na saída de EA₁ não aumenta significativamente o EVM_{RMS} que se manteve abaixo de 1,85%. No sistema FiWi, o EVM_{RMS} aumentou devido a propagação do sinal a 105 m de distância. A forma de onda F-OFDM apresentou desempenho inferior em relação as demais com valor de EVM_{RMS} de 3,01%. No entanto, este valor ainda está abaixo do limite estipulado pelo 3GPP para modulação 256-QAM, resultando em símbolos bem definidos na constelação como pode ser observado no *inset* (i) da Figura 4.15.

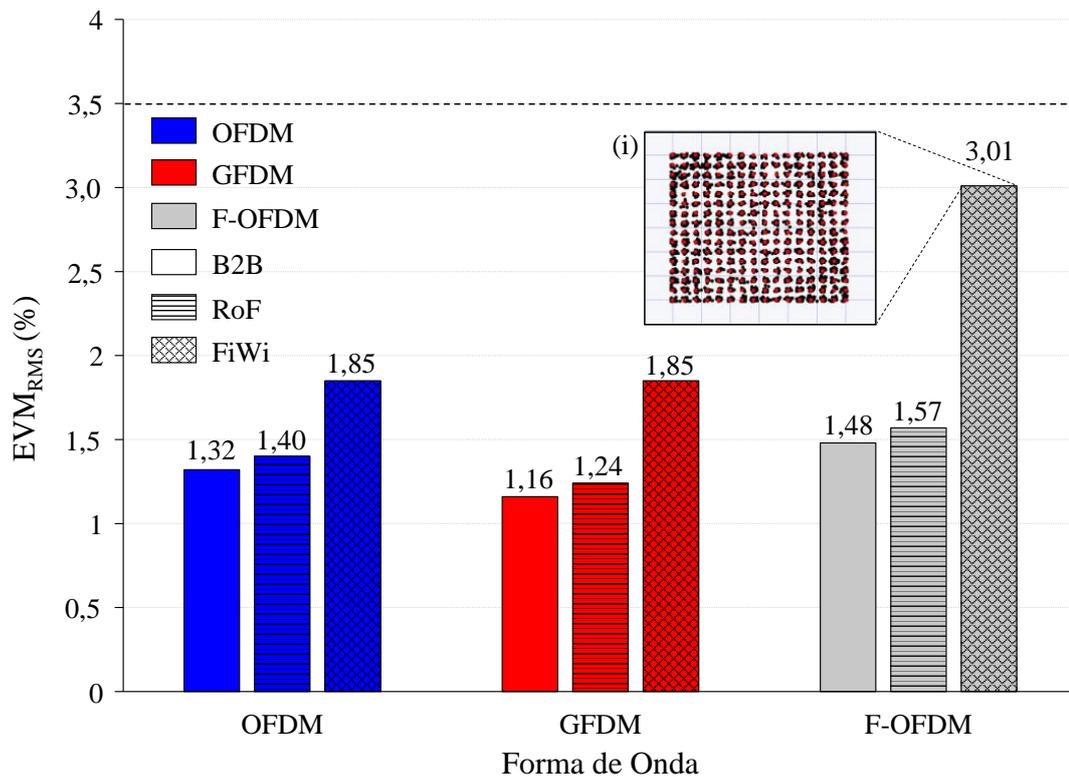


Figura 4.15: Análise de EVM_{RMS} para as formas de onda OFDM, GFDM e F-OFDM em 788 MHz.

Na investigação do cenário eMBB utilizou-se o programa *Signal Studio* da Keysight para geração do sinal 5G NR em 3,5 GHz. Utilizou-se $\Delta f = 30$ kHz e 20 *time slots*. Dentre eles, 16 foram configurados para PDSCH e 4 para PUSCH. Dos 16 PDSCH, 14 foram configurados para transportar símbolos 64-QAM e 2 para símbolos 256-QAM.

Adicionalmente, implementou-se um grupo de sinais de referências DMRS. A análise considerou três larguras de faixas distintas sendo 20, 60 e 100 MHz com 51, 162 e 273 blocos de recursos alocados, respectivamente. Estas configurações geraram sinais com taxas de 72,22 Mbit/s para o sinal de 20 MHz, 229,39 Mbit/s para o sinal de 60 MHz e 386,57 Mbit/s para o sinal de 100 MHz.

A Figura 4.16 apresenta os valores de EVM_{RMS} obtidos em função da largura de faixa para um enlace de 13 m. O sinal modulado com 64-QAM atende as especificações do 3GPP para todas as configurações, enquanto que o sinal configurado com 256-QAM excede o limite de EVM_{RMS} do 3GPP para o sistema FiWi com larguras de faixas de 60 e 100 MHz. É importante ressaltar que aumentando o nível de potência transmitida e/ou utilizando técnicas como DPD é possível combater esta redução de desempenho.

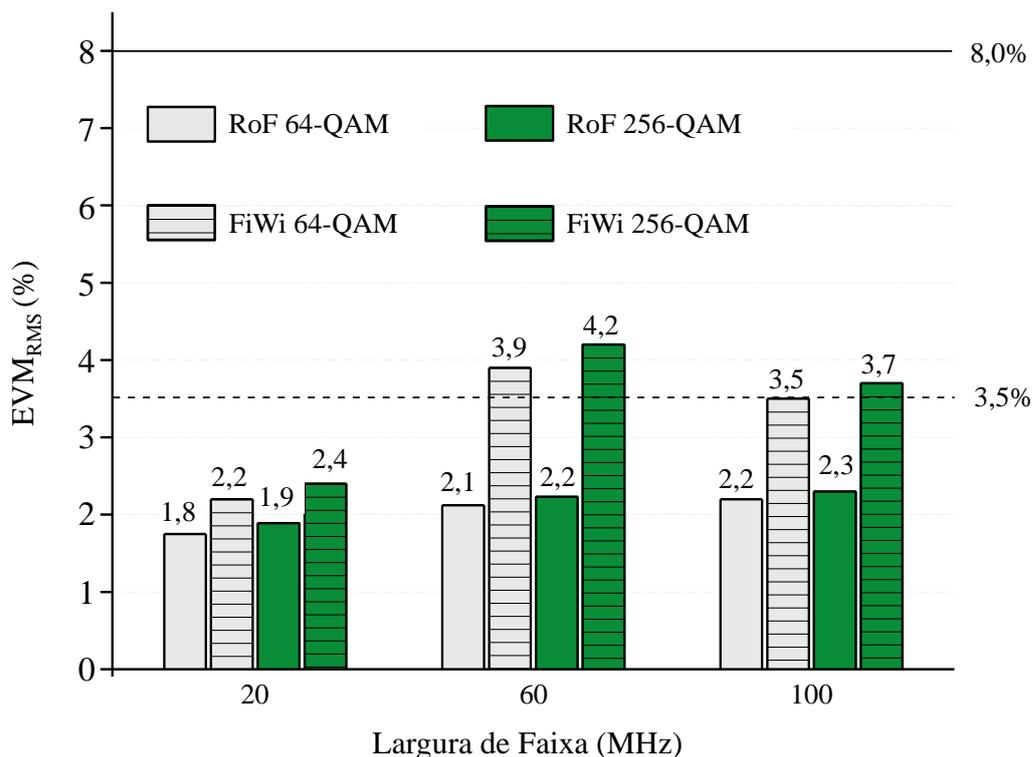


Figura 4.16: Desempenho do 5G NR em 3,5 GHz em termos de EVM_{RMS} em função da largura de faixa.

A Figura 4.17 ilustra o espectro e constelação do sinal 5G NR para as configurações B2B, RoF e FiWi. Para as configurações B2B (Figura 4.17 (a)) e RoF (Figura 4.17 (b)) é possível identificar os símbolos na constelação. A constelação na cor laranja escuro

refere-se ao sinal 256-QAM enquanto que a cor laranja claro refere-se ao sinal 64-QAM. Por outro lado, a Figura 4.17 (c) apresenta o desempenho do sistema FiWi no qual a degradação de fase e magnitude pode ser observada no espectro e na constelação. As potências recebidas foram -3,8; -5,3 e -21 dBm para as configurações B2B, RoF e FiWi. A presença de múltiplos sinais no sistema não implicou em degradação de desempenho.

A investigação do cenário eMBB para ambientes internos foi conduzida a partir da implementação de uma femto-célula de 10 m de alcance ilustrada na Figura 4.18. Utilizou-se sinais com larguras de faixa de 200, 400 e 800 MHz modulados em 16 e 64QAM. A Figura 4.19 apresenta os valores de EVM_{RMS} medidos na borda da femto-célula para as referidas configurações. O sinal com largura de faixa de 200 MHz atingiu taxas 0,6 e 1,0 Gbit/s para as modulações 16 e 64-QAM, respectivamente. Para os sinais com larguras de faixas de 400 e 800 MHz, o EVM_{RMS} ultrapassou o limite de 12,5% especificado pelo 3GPP. Por esta razão, aplicou-se a DPD nos sinais reduzindo o EVM_{RMS} para valores abaixo dos limites estipulados pelo 3GPP. A DPD utilizada é uma solução da Keysight aplicada na transmissão do sinal. Desta forma, a DPD permite pré-distorcer o sinal de transmissão para compensar efeitos do canal.

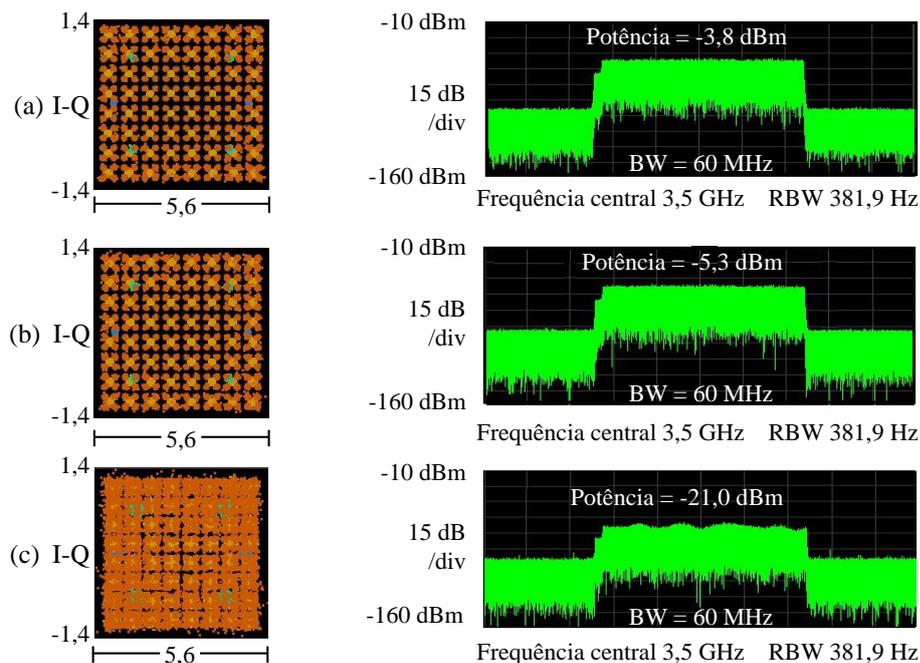


Figura 4.17: Espectro e constelação do sinal 5G NR: (a) B2B; (b) RoF; (c) FiWi.

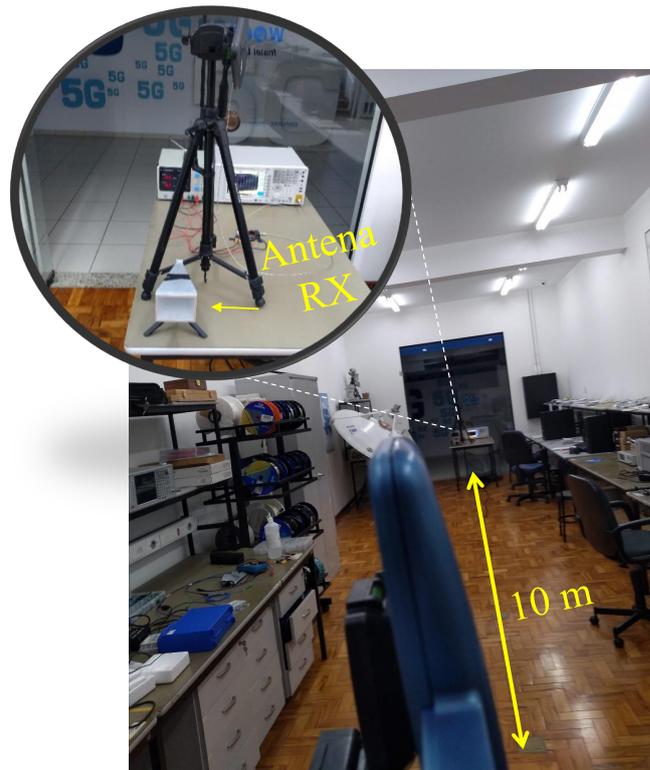


Figura 4.18: Fotografia da femto-célula em 26 GHz e com 10 m de alcance.

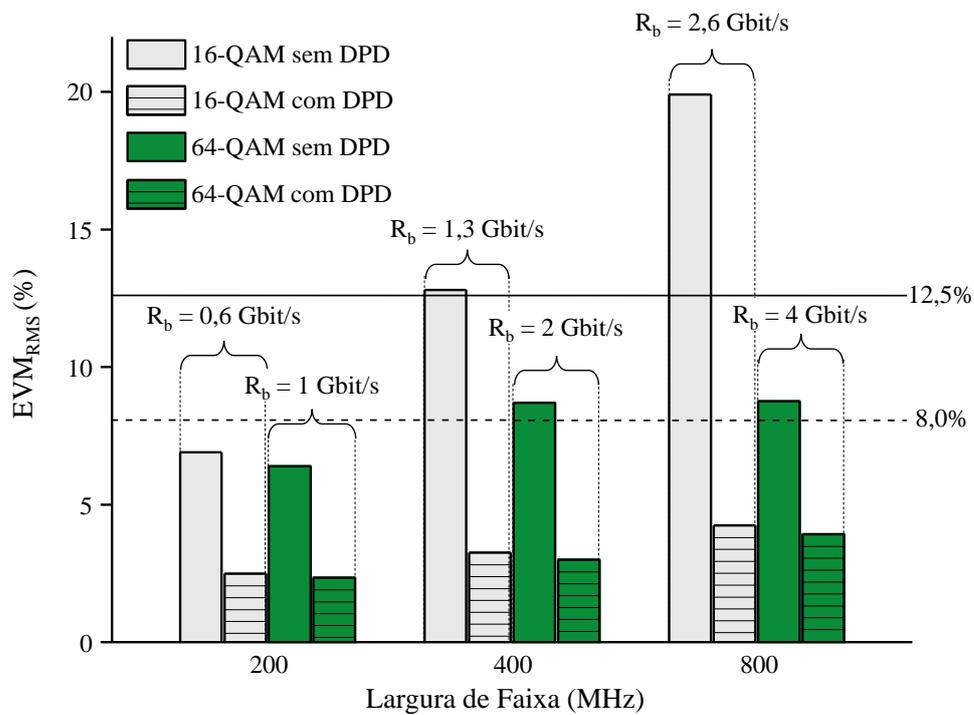


Figura 4.19: EVM_{RMS} em função da largura de faixa, ordem de modulação e uso de DPD em 26 GHz.

A Figura 4.20 demonstra o espectro e diagrama de olho do sinal com taxa de 4 Gbit/s, largura de faixa de 800 MHz modulado com 64-QAM. A SNR alcançada foi de 25 dB resultando em EVM_{RMS} de 3,9%. Pode-se observar que a presença de múltiplos sinais de RF no sistema não apresentou degradações na qualidade do sinal, uma vez que o DD-MZM utilizado permite aplicar tensões de polarização individuais para cada sinal de RF.

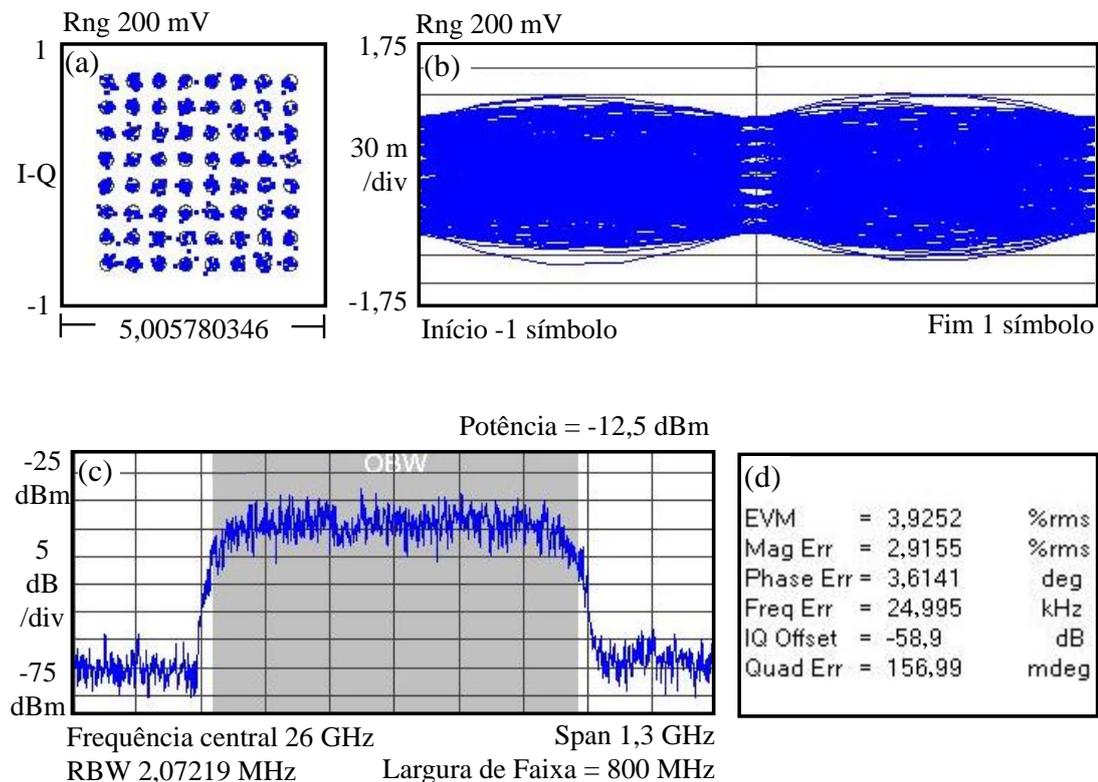


Figura 4.20: Demodulação de um sinal de 4 Gbit/s em 26 GHz com 10 m de alcance: (a) Constelação; (b) Diagrama de olho; (c) Espectro Elétrico; (d) EVM_{RMS} .

Realizou-se também a investigação do cenário eMBB em ambientes internos em 26 GHz para um sinal 5G NR. Utilizou-se o programa *Signal Studio* da Keysight ao invés do AWG, como no caso anterior. Esta abordagem permitiu explorar as vazão de dados do sistema, uma vez que o padrão fechado 5G NR, permite utilizar bandas de transmissão de até 400 MHz sem a utilização da técnica de agregação de portadoras. Utilizou-se $\Delta f = 120$ kHz resultando em 80 *time slots*, todos alocados para PDSCH. Dentre os 80 *time slots*, 49 foram configurados para transportar símbolos 64-QAM e 31 para símbolos 16-QAM. Adicionalmente implementou-se 18 e 12 símbolos DMRS

por bloco de recurso para as modulações 16- e 64-QAM, respectivamente. Utilizou-se sinais com larguras de faixas de 50 MHz com alocação de 26 blocos de recursos e 100 MHz com alocação de 60 blocos de recursos. Tais configurações resultaram em sinais com taxas de bit de 164,95 e 380,65 Mbit/s para as larguras de faixas de 50 e 100 MHz, respectivamente.

A Figura 4.21 apresenta o desempenho do sinal 5G NR em 26 GHz em termos de EVM_{RMS} a uma distância de 10 m do transmissor. Pode-se observar um excelente desempenho para todas as configurações avaliadas, com valores de EVM_{RMS} abaixo e 5%, o qual atende o limiar estipulado pelo 3GPP. Isto indica a possibilidade de aumento das larguras de faixa de operação bem como a extensão do enlace. O *inset* (i) da Figura 4.21 apresenta a constelação dos sinais 16 e 64-QAM representados pelas cores laranja escuro e claro, respectivamente. Para ambos os casos, é possível observar uma baixa dispersão dos símbolos na constelação, uma vez que os valores de EVM_{RMS} abaixo dos limites especificados como aceitáveis pelo 3GPP. Os demais símbolos apresentados na constelação referem-se a sinais de controle e sincronismo.

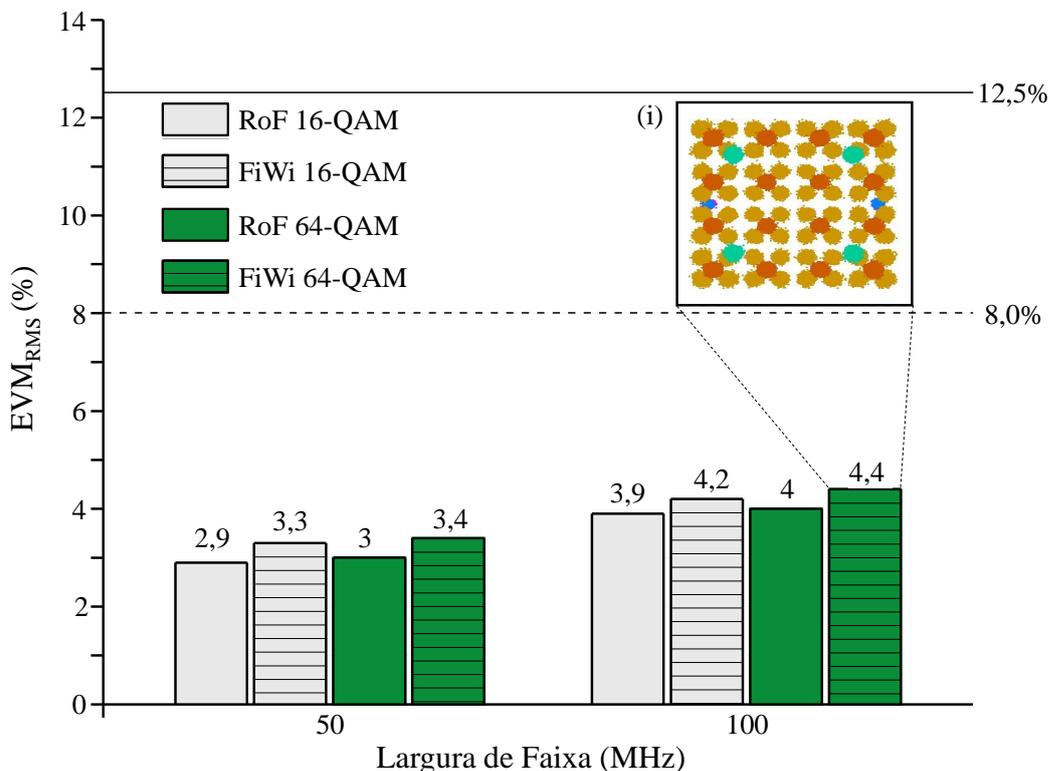


Figura 4.21: Desempenho de EVM_{RMS} 5G NR em 26 GHz em função da largura de faixa.

Com o objetivo de aproveitar toda a infraestrutura sob análise para multi-aplicações, propôs-se integrar uma aplicação M2M ao sistema FiWi. A aplicação M2M utiliza o padrão PROFINET e pode ser potencialmente aplicada à automação industrial. Utilizou-se controladores lógicos programáveis e um módulo de entrada e saída para atuarem como mestre e escravo da rede, respectivamente, em um enlace óptico de 2 km. As conversões ópto-elétrica e eletro-óptica são realizadas por MCs. Utilizou-se um osciloscópio digital para medida da latência da rede como principal métrica de desempenho. A Figura 4.22 (a) apresenta as medidas de latência para a configuração B2B, enquanto que a Figura 4.22 (b) apresenta a latência do enlace óptico. Obteve-se atraso total de 7,347 ms para B2B e 9,542 ms para o enlace óptico. É importante ressaltar que o sinal digital precisa ser enviado do escravo para o mestre, ser processado no ciclo de $300 \mu\text{s}$ e enviado de volta ao escravo em sequência. Portanto, a latência imposta pela rede óptica corresponde a 4 km de propagação na fibra óptica. Portanto, o atraso total entre mestre e escravo é de aproximadamente 4,771 ms. Para ambos os casos, a latência pode ser considerada satisfatória, uma vez que o padrão PROFINET especifica valores de latência abaixo de 10 ms para aplicações em tempo real [115, 116].

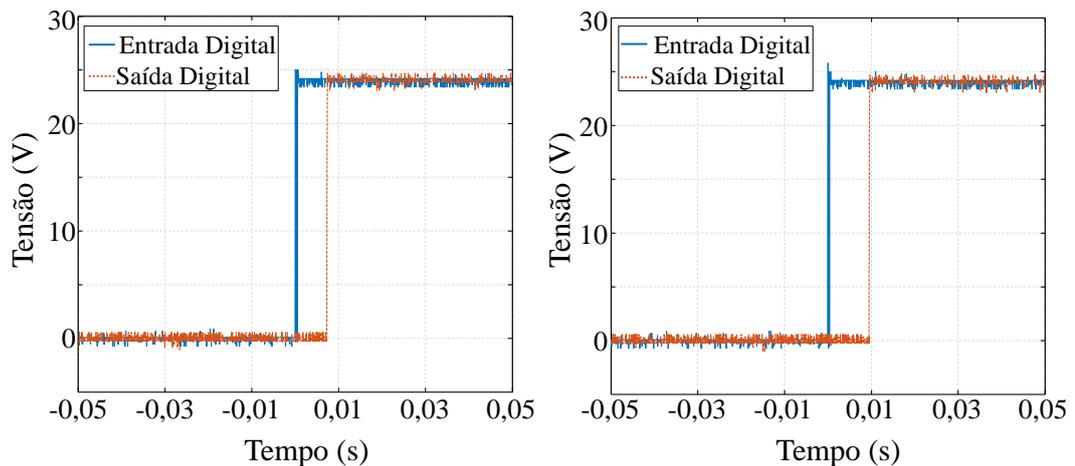


Figura 4.22: Medição de latência: (a) B2B; (b) Enlace óptico.

A comparação entre a latência da configuração B2B e o enlace óptico permitiu avaliar o impacto do uso de MCs bidirecionais. Observou-se um atraso adicional de apenas $10 \mu\text{s}$ devido a a propagação do sinal no enlace de fibra óptica. Portanto, esta

abordagem pode ser considerada como potencial solução para substituir enlaces de cabos elétricos baseado no padrão Ethernet. Como conclusão, esta aplicação 5G fornece uma solução para garantir baixa latência, imunidade eletromagnética e de longo alcance para controle, automação de ambientes industriais.

Finalmente, a Figura 4.23 apresenta a medida de vazão da rede WDM-PON utilizada para prover serviços FTTH e transportar os sinais de RF acima mencionados. A métrica de desempenho para esta aplicação foi a vazão de dados da rede na saída da ONU. As taxas de *download* e *upload* foram 100 e 35 Mbit/s os quais estão de acordo com os valores típicos providos pelo ISP. Com isto, pode-se observar que o compartilhamento da infraestrutura da GPON não degradou a qualidade do serviço FTTH originalmente provido pela rede óptica.

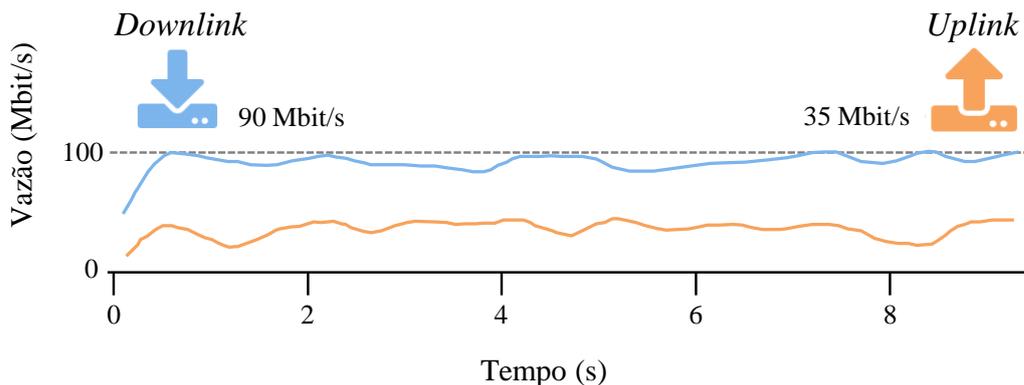


Figura 4.23: Desempenho da aplicação FTTH na saída da ONU.

Como conclusão, a aplicação 5G baseada em F-OFDM apresentou uma vazão de dados de 29 Mbit/s com EVM_{RMS} de 3,01% em uma rede WDM-PON ativa de 2 km, seguida por um enlace sem fio de 105 m operando em 788 MHz. O sinal 5G NR em 3,5 GHz, transmitiu simultaneamente os sinais 64- e 256-QAM, atingindo 385 Mbit/s a uma distância de 13 m do transmissor. A femto célula de 26 GHz forneceu vazão de dados de até 4 Gbit/s, ao aplicar DPD para compensar a degradação do sistema permitindo atender os pré-requisitos do 3GPP. Substituindo o sinal QAM por um sinal 5G NR na femto célula em 26 GHz, alcançou-se uma vazão de dados de 380,65 Mbit/s. Portanto, o sistema FiWi proveu uma vazão de dados total de 4,41 Gbit/s no ar.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O trabalho baseou-se no conceito e implementação de um sistema FiWi que emprega a solução A-RoF para distribuição e transmissão de sinais 5G. Constatou-se, por meio de análises numéricas e experimentais, a viabilidade do sistema proposto. Transmitiu-se sinais 5G provenientes de um transceptor brasileiro desenvolvido no Inatel e geradores comerciais que operam com padrão 5G NR. De posse dos sinais, implementou-se macro-células, visando cobertura de longo alcance e e femto-células, para fornecer aumento na vazão de dados. A partir da utilização da infraestrutura óptica de um provedor de Internet, comprovou-se a eficácia de distribuição de sinais de RF em redes ópticas ativas.

No Capítulo 1, apresentou-se a contextualização sobre a evolução das arquiteturas de redes de telefonia móvel, bem como as tendências das redes de acesso 5G. O uso de técnicas de transmissão sem fio em conjunto com as que empregam fotônica de micro-ondas, foi tratado como potencial para transmissão de sinais de RF, inclusive na faixa de ondas milimétricas. Descreveu-se uma revisão bibliográfica referente aos sistemas RoF e FiWi incluindo as seguintes áreas de pesquisa: implementação de *fronthauls* multi-banda; os sistemas sem fio com capacidade Gbit/s; a distribuição de formas de onda candidatas para comunicações 5G; as arquiteturas de rede que empregam divisões na camada física; o uso de DPD na transmissão de sinais digitais. Esta revisão foi

importante para identificar as áreas chaves de estudo sobre o tema desta dissertação e, assim, permitir a escolha das técnicas adequadas para a implementação do sistema FiWi.

No Capítulo 2, introduziu-se os conceitos relacionados aos cenários de aplicações de sistemas 5G, bem como as técnicas de transmissão potenciais para aumentar a capacidade das redes móveis. Discutiu-se na sequência, algumas formas de onda candidatas para compor a camada física de sistemas 5G, tratando-se de aplicações mMTC e eRAC, visto que o 3GPP definiu a forma de onda CP-OFDM apenas para aplicações eMBB. Foram apresentadas as especificações de sistemas 5G de acordo com o padrão 5G NR. Finalmente, discutiu-se os princípios de operação de sistemas FiWi, incluindo as técnicas de modulação de luz e os principais dispositivos que compõem o referido sistema.

O Capítulo 3 foi dedicado a análises numéricas de um sistema FiWi utilizando as ferramentas computacionais Matlab e Optisystem. Apresentou-se o processo de integração entre as ferramentas computacionais, que possibilitou realizar a análise de desempenho para sistemas A-RoF operando com formas de onda 5G geradas pelo Matlab. Constatou-se que a técnica A-RoF não degrada significativamente a qualidade do sinal transmitido, visto que após a inserção dos sinais no sistema A-RoF o EVM_{RMS} acrescentado esteve abaixo de 2%.

No Capítulo 4 apresentou-se a implementação e análise experimentais de um sistema FiWi multi-banda aplicado a cenários 5G. Utilizou-se a tecnologia A-RoF para distribuição de sinais 5G, visando atender os cenários eRAC e eMBB em ambientes interno e externo. Com isto, implementou-se um *fronthaul* com extensão de 12,5 km, capaz de operar com os sinais OFDM, GFDM e F-OFDM em 3,5 GHz e um sinal no padrão 5G NR em 26 GHz, com larguras de faixa de até 400 MHz. Posteriormente, estendeu-se a análise de desempenho do sistema FiWi ao aplicar a solução *fronthaul* para atender as aplicações eRAC, M2M e eMBB em ambientes internos e externos. Para tal, utilizou-se como enlace *fronthaul*, a rede óptica de um provedor de Internet utilizada para aplicações FTTH. Os sinais de RF simultaneamente transmitidos, referem-se a um sinal F-OFDM em 788 MHz, um sinal no padrão 5G NR em 3,5 GHz

e um sinal QAM em 26 GHz, no qual aplicou-se DPD para compensar as distorções no enlace de comunicação. O sinal QAM em 26 GHz foi posteriormente substituído por um sinal no padrão 5G NR na mesma frequência. Desta forma, validou-se a aplicabilidade do uso de redes FTTH ativas na distribuição de sinais 5G. Finalmente, comprovou-se a viabilidade de implementar-se serviços M2M de baixa latência, de acordo com o padrão PROFINET no sistema FiWi, visando a automação industrial. A solução *fronthaul* baseada em A-RoF aplicada à infraestrutura da rede WDM-PON, demonstrou potencial para permitir a operação 5G em várias faixas de frequência reduzindo custos de implementação e simplificando o sistema.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se o estudo numérico da taxa de erro de símbolos do sistema FiWi proposto. Há ainda a intenção de implementar códigos corretores de erro, visto que a geração dos sinais não abrangeu tal funcionalidade.

Como sequência do trabalho, idealiza-se investigar o desempenho do transceptor 5G em um sistema FiWi operando inclusive com modulações adaptativas, bem como medidas de latência de rede visando atender o cenário URLLC. Idealiza-se a realização de DPD nos sinais 5G NR com o objetivo de estender distância de cobertura do sistema celular. Vislumbra-se também a aplicação da técnica MIMO em um sistema FiWi operando com o padrão 5G NR. Adicionalmente, almeja-se a implementação de um sistema FiWi multi-banda operando nos sentidos de DL e UL, visto que neste trabalho utilizou-se apenas transmissões DL. Propõe-se ainda a aplicação do sistema A-RoF nas futuras redes de comunicações móveis de sexta geração (6G), abrangendo funcionalidades promissoras como inteligência artificial, aprendizado de máquina (*machine learnig*) e redes autônomas.

Apêndice 1

Arquivos Fonte das Simulações

- Exemplo básico de um sinal senoidal gerado no Matlab e integrado no Optisystem.

1. Código do Transmissor

```
1 %Transmissor de um sinal Senoidal
2 Fc = 3.5e9;
3 N_amostras = 8192;
4 Time = 0:1.27984375e-07/N_amostras:1.27984375e-07;
5 Sinal_TX = sin(2*pi*Fc.*Time);
6
7 %Parametros do Optisystem
8 OutputPort1.TypeSignal = 'Electrical';
9 OutputPort1.Noise = [];
10 OutputPort1.IndividualSample = [];
11 OutputPort1.Sampled.Signal = Sinal_TX;
12 OutputPort1.Sampled.Time = Time;
```

2. Código do Receptor

```
1 % Sinal recebido do Optisystem
2 Sinal_RX = InputPort1.Sampled.Signal;
3 OutputPort1 = InputPort1;
```

```
4 plot(InputPort1.Sampled.Time, Sinal_RX)
```

- **Códigos gerador e receptor da forma de onda GFDM.**

1. **Código do Transmissor**

```
1 % Copyright (c) 2014 TU Dresden
2 % All rights reserved.
3
4 % Parametros do Optisystem
5 Number_of_Samples = length(InputPort1.Sampled.Signal)
6 ;
7 Sequence_Length = length(InputPort2.Sequence);
8 Samples_per_Bit = Number_of_Samples/Sequence_Length;
9 Time = InputPort1.Sampled.Time;
10
11 % Criando um conjunto de parametros do GFDM
12 gfdm = get_defaultGFDM('TTI');
13 gfdm.K = 512; % Numero de subportadoras
14 gfdm.Kset = 20:55; % Portadoras ativas
15 gfdm.pulse = 'rrc'; % Filtro raiz de cosseno elevado
16 gfdm.a = 0.5; % Fator de roll-off
17 gfdm.Mon = 3; % Sub-simbolos ativos
18 gfdm.mu = 4; % Numero de bits por simbolo QAM
19 gfdm.M = 3; % Numero de subsimbolos
20 cpLen = 512; % Comprimento do prefixo ciclico
21 gfdm.B = 1; % Numero de blocos GFDM gerados
22
23 % Gerando o sinal
24 bset = get_bset(gfdm)+1;
25 d = zeros(length(get_mset(gfdm)) * length(get_kset(
26 gfdm)), gfdm.B);
27 xg = zeros(gfdm.M*gfdm.K+gfdm.Ncp+gfdm.Ncs, gfdm.B);
```

```
26 gfdm.cache = get_cache(gfdm);
27
28 for j=1:length(bset)
29
30     d(:, bset(j)) = get_random_symbols(gfdm);
31     s = do_qammodulate(d(:, bset(j)), gfdm.mu);
32
33     D = do_map(gfdm, s);
34
35     x = do_modulate(gfdm, D);
36
37     xg(:, bset(j)) = do_agroup(gfdm, x);
38 end
39 tx = do_concatenate(gfdm, xg);
40
41 % Adicionando o prefixo ciclico
42 GFDM_Signal_TX = [tx(end-cpLen+1:end); tx];
43
44 % Inserindo o Sinal GFDM no Optisystem
45 GFDM_Signal_TX_OV= resample(GFDM_Signal_TX,
    Samples_per_Bit, 1);
46 OutputPort1.TypeSignal = 'Electrical';
47 OutputPort1.Noise = [];
48 OutputPort1.IndividualSample = [];
49 OutputPort1.Sampled.Signal = GFDM_Signal_TX_OV
    ';
50 OutputPort1.Sampled.Time = Time;
51 OutputPort2=InputPort2;
```

2. Código do Receptor

```
1 % Sinal GFDM recebido do Optisystem
```

```
2 OutputPort1 = InputPort1;
3 GFDM_Signal_RX = InputPort1.Sampled.Signal;
4 GFDM_Signal_RX_Down = resample(GFDM_Signal_RX,1,
    Samples_per_Bit)';
5 Len = length(GFDM_Signal_RX);
6
7 % Removendo o prefixo ciclico
8 rx = (GFDM_Signal_RX_Down(cpLen+1:end));
9 rx = do_split(gfdm,rx);
10
11 % Demodulando o sinal
12 for k=1:length(bset)
13     x1 = do_demodulate(gfdm,rx(:,bset(k)),'ZF');
14     D1 = do_unmap(gfdm,x1);
15     s1(:,bset(k)) = do_qamdemodulate(D1,gfdm.mu);
16 end
17
18 % Referencias para calculo do EVM
19
20 switch gfdm.mu
21     case 2 % QPSK
22         refConst = qammod((0:3).',4,'
                UnitAveragePower',true);
23     case 4 % 16QAM
24         refConst = qammod((0:15).',16,'
                UnitAveragePower',true);
25     case 6 % 64QAM
26         refConst = qammod((0:63).',64,'
                UnitAveragePower',true);
27     case 8 % 256QAM
28         refConst = qammod((0:255).',256,'
```

```
                                UnitAveragePower', true);  
29 end  
30  
31 % Normalizando o sinal recebido para medida de EVM  
32 Ex = norm(D1,2).^2/length(D1);  
33 nf = modnorm(refConst,'avpow',Ex);  
34  
35 constDiagRx = comm.ConstellationDiagram( ...  
36     'ShowReferenceConstellation', true, ...  
37     'ReferenceConstellation', refConst.*nf, ...  
38     'Position', figposition([20 15 30 40]), ...  
39     'MeasurementInterval', length(D1), ...  
40     'Title', 'GFDM Demodulated Symbols', ...  
41     'Name', 'GFDM Reception', ...  
42     'XLimits', [abs(real(max(D1)))*(-1.3) abs(real(  
43         max(D1)))*1.3], ...  
44     'YLimits', [abs(real(max(D1)))*(-1.3) abs(real(  
45         max(D1)))*1.3]);  
46 step(constDiagRx,D1);
```

Referências Bibliográficas

- [1] V. H. Donald, “Advanced Mobile Phone Service: The Cellular Concept,” *Bell System Technical Journal*, vol. 58, pp. 15–41, Jan. 1979.
- [2] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, 1st ed. USA: CRC Press, Inc., 1993.
- [3] M. Mouly, *The GSM system for mobile communications*. Cell & Sys, 1992.
- [4] V. K. Garg, *Wireless network evolution : 2G to 3G*. Prentice Hall, 2002.
- [5] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, “4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband,” in *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, 2013.
- [6] 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.
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2018.
- [8] T. Pfeiffer, “Next generation mobile fronthaul and midhaul architectures,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 11, pp. B38–B45, 2015.
- [9] 3GPP, “Study on new radio access technology: radio access architecture and interfaces,” TR 38.801, v14.0.0, Release 14, Sep. 2017.
- [10] M. Xu *et al.*, “Statistical data compression and differential coding for digital radio-over-fiber-based mobile fronthaul,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 1, pp. A60–A71, Jan. 2019.

- [11] M. Xu *et al.*, “Key Technologies for Next-Generation Digital RoF Mobile Fronthaul With Statistical Data Compression and Multiband Modulation,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 17, pp. 3671–3679, Sep. 2017.
- [12] G. Kalfas *et al.*, “Next Generation Fiber-Wireless Fronthaul for 5G mmWave Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 3, pp. 138–144, Mar. 2019.
- [13] A. Tzanakaki *et al.*, “Wireless-Optical Network Convergence: Enabling the 5G Architecture to Support Operational and End-User Services,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 184–192, Oct. 2017.
- [14] W. Liu, T. Shao, and J. Yao, “Ultra-wideband and 60-GHz generation and transmission over a wavelength division multiplexing-passive optical network,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 9, pp. 1076–1082, Sep. 2013.
- [15] N. Argyris *et al.*, “A 5G mmWave Fiber-Wireless IFoF Analog Mobile Fronthaul Link With up to 24-Gb/s Multiband Wireless Capacity,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 2883–2891, Jun. 2019.
- [16] M. Noweir *et al.*, “Digitally Linearized Radio-Over Fiber Transmitter Architecture for Cloud Radio Access Network’s Downlink,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp. 3564–3574, Jul. 2018.
- [17] Y. Li *et al.*, “Analogue Radio Over Fiber Aided MIMO Design for the Learning Assisted Adaptive C-RAN Downlink,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 21 359–21 371, Feb. 2019.
- [18] R. Zhang *et al.*, “An Ultra-Reliable MMW/FSO A-RoF System Based on Coordinated Mapping and Combining Technique for 5G and Beyond Mobile Fronthaul,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 20, pp. 4952–4959, Oct. 2018.
- [19] Chang, “Orthogonal Frequency Division Multiplexing,” China Patent 3,488,445, 1966.
- [20] J. S. Ferreira *et al.*, “GFDM Frame Design for 5G Application Scenarios,” *Jour-*

- nal of Communication and Information Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 54–61, Jul. 2017.
- [21] P. Guan *et al.*, “5G Field Trials: OFDM-Based Waveforms and Mixed Numerologies,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1234–1243, Jun. 2017.
- [22] Y. Liu, *et al.*, “Waveform Design for 5G Networks: Analysis and Comparison,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19 282–19 292, Feb. 2017.
- [23] B. Farhang-Boroujeny and H. Moradi, “OFDM inspired waveforms for 5G,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2474–2492, May. 2016.
- [24] R. Ahmed, F. Schaich, and T. Wild, “OFDM Enhancements for 5G Based on Filtering and Windowing,” in *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 39–61.
- [25] 3GPP, “5G; Study on New Radio (NR) access technology,” TR 38.912 version 15.0.0 Release 15, 2018.
- [26] R1-167963, “Way forward on waveform,” 2016, RAN1#86.
- [27] R1-163615, “WF on overview of NR,” 2016, RAN1#84bis.
- [28] N. Michailow *et al.*, “Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061, Sep. 2014.
- [29] Y. Medjahdi *et al.*, “On the Road to 5G: Comparative Study of Physical Layer in MTC Context,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26 556–26 581, Nov. 2017.
- [30] A. Delmade *et al.*, “Performance analysis of analog IF over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 174–182, Mar. 2018.
- [31] C. Lim *et al.*, “Evolution of Radio-Over-Fiber Technology,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 1647–1656, Mar. 2019.
- [32] W. E. Stephens, T. R. Joseph, and B. U. Chen, “Analog Microwave Fiber Optic

- Communications Links,” in *1984 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, May. 1984, pp. 533–534.
- [33] A. J. Cooper, “‘Fibre/radio’ for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network,” *Electronics Letters*, vol. 26, no. 24, pp. 2054–2056, Nov. 1990.
- [34] C. Liu *et al.*, “Key Microwave-Photonics Technologies for Next-Generation Cloud-Based Radio Access Networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3452–3460, Oct. 2014.
- [35] K. Ikeda, T. Kuri, and K. Kitayama, “Simultaneous three-band modulation and fiber-optic transmission of 2.5-Gb/s baseband, microwave-, and 60-GHz-band signals on a single wavelength,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 12, pp. 3194–3202, Dec. 2003.
- [36] M. Xu *et al.*, “A Novel Data-Compression Technology for Digital Mobile Fronthaul with Lloyd Algorithm and Differential Coding,” in *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, Mar. 2018, pp. 1–3.
- [37] F. Tian *et al.*, “A Novel Concatenated Coded Modulation Based on GFDM for Access Optical Networks,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 1–8, Apr. 2018.
- [38] R. M. Borges *et al.*, “Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468–4477, Oct. 2018.
- [39] M. Bi *et al.*, “Investigation of F-OFDM in 5G fronthaul networks for seamless carrier-aggregation and asynchronous transmission,” in *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, Mar. 2017, pp. 1–3.
- [40] M. Morant *et al.*, “Experimental Demonstration of mm-Wave 5G NR Photonic Beamforming Based on ORRs and Multicore Fiber,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 2928–2935, Jul. 2019.
- [41] R. M. Borges *et al.*, “Implementation of a Multi-Gbit/s and GFDM-based Optical-Wireless 5G Network,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and*

- Electromagnetic Applications*, vol. 17, no. 4, pp. 579–589, Dec. 2018.
- [42] H. R. D. Filgueiras *et al.*, “Dual-Band Wireless Fronthaul Using a FSS-Based Focal-Point/Cassegrain Antenna Assisted by an Optical Midhaul,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 112 578–112 587, Aug. 2019.
- [43] ViVavox. (2020, Jan.) Website ViVavox. Acessado em 10 de janeiro de 2020. [Online]. Available: <http://www.vivavox.com.br>
- [44] R. M. Borges *et al.*, “DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 642–653, Feb. 2020.
- [45] 5G PPP, “5G Vision,” *White Paper*, Feb. 2015.
- [46] ITU-R, “IMT vision - framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” Recommendation ITU-R M.2083-0, Sep. 2015 2015.
- [47] I. Philbeck, “Connecting the unconnected: working together to achieve Connect 2020 Agenda targets,” *White Paper*, Feb. 2017.
- [48] J. Lee *et al.*, “Spectrum for 5G: Global Status, Challenges, and Enabling Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 12–18, Mar. 2018.
- [49] M. Ryu *et al.*, “Design and implementation of a connected farm for smart farming system,” in *2015 IEEE Sensors*. IEEE, Nov. 2015, pp. 1–4.
- [50] C. Bockelmann *et al.*, “Towards Massive Connectivity Support for Scalable mMTC Communications in 5G Networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28 969–28 992, May. 2018.
- [51] H. Tullberg *et al.*, “The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 132–139, Dec. 2016.
- [52] J. Sachs *et al.*, “5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 24–31, Mar. 2018.
- [53] B. Skubic *et al.*, “Rethinking Optical Transport to Pave the Way for 5G and

- the Networked Society,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1084–1091, Mar. 2015.
- [54] Alamouti, “Networks of the future—some challenges ahead,” *Keynote speech, WCNC 2012*, Paris, France 2012.
- [55] I. F. Akyildiz *et al.*, “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127 – 2159, Sep. 2006.
- [56] D. Lee *et al.*, “Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: deployment scenarios and operational challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, Feb. 2012.
- [57] J. Markendahl and . Mäkitalo, “A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks,” in *2010 IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops*, Sep. 2010, pp. 145–150.
- [58] S. Alamouti, “Network of the future: some challenges ahead,” *Keynote speech, WCNC, 2012*.
- [59] J. Wang *et al.*, “Spectral Efficiency Improvement with 5G Technologies: Results from Field Tests,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1–1, Jun. 2017.
- [60] 3GPP, “User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 3: Range 1 and Range 2 Interworking operation with other radios ,” TS 38.101-3 version 16.0.0 Release 16, 2019.
- [61] C. Bockelmann *et al.*, “Towards massive connectivity support for scalable mMTC communications in 5G networks,” *IEEE access*, vol. 6, pp. 28 969–28 992, 2018.
- [62] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366–385, Feb. 2014.
- [63] Y. Niu *et al.*, “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G:

- opportunities and challenges,” *Wireless Networks*, vol. 21, no. 8, pp. 2657–2676, Nov. 2015.
- [64] B. Yang *et al.*, “Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5G Millimeter-Wave Communications,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp. 3403–3418, Jul. 2018.
- [65] L. Wan *et al.*, “4G\5G Spectrum Sharing: Efficient 5G Deployment to Serve Enhanced Mobile Broadband and Internet of Things Applications,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 28–39, Dec. 2018.
- [66] S. Niknam *et al.*, “A Multiband OFDMA Heterogeneous Network for Millimeter Wave 5G Wireless Applications,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5640–5648, Sep. 2016.
- [67] V. Popescu, M. Fadda, and M. Murrioni, “Performance analysis of IEEE 802.22 wireless regional area network in the presence of digital video broadcasting – second generation terrestrial broadcasting services,” *IET Communications*, vol. 10, no. 8, pp. 922–928, May. 2016.
- [68] Keysight, “First Steps in 5G: Overcoming New Radio Device Design Challenges Series,” *White Paper*, Mar. 2018.
- [69] ANATEL. (2018, Oct.) Portal Institucional - Tecnologia 5G e satélites são abordados no Futurecom. Acessado em 26 de setembro de 2019. [Online]. Available: <https://www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article?id=2102>
- [70] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels: Second Edition*. Wiley-IEEE Press, Apr. 2005.
- [71] A. M. O. Ribeiro *et al.*, “Coherence bandwidth in a 1.8-ghz urban mobile radio channel,” in *2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 2007*, pp. 599–602.
- [72] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*. McGraw-hill New York, 2001, vol. 4.
- [73] A. R. Bahai, B. R. Saltzberg, and M. Ergen, *Multi-carrier digital communicati-*

- ons: theory and applications of OFDM.* Springer Science & Business Media, 2004.
- [74] L. L. Mendes, “Análise de Desempenho de Sistemas Multiportadora em Canais com Ceifamento de Pico,” 2003, dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Instituto Nacional de Telecomunicações, INATEL.
- [75] R. v. Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications.* Artech House, Inc., 2000.
- [76] I. B. F. Almeida, “GFDM as a framework for FBMC-OQAM: Iterative Detection and Performance Evaluation,” 2018, dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Instituto Nacional de Telecomunicações, INATEL.
- [77] G. Fettweis, M. Krondorf, and S. Bittner, “GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing,” in *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, Apr. 2009, pp. 1–4.
- [78] F. Kaltenberger, R. Knopp, M. Danneberg, and A. Festag, “Experimental analysis and simulative validation of dynamic spectrum access for coexistence of 4G and future 5G systems,” in *2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Jun. 2015.
- [79] M. Matthé *et al.*, “Influence of pulse shaping on bit error rate performance and out of band radiation of Generalized Frequency Division Multiplexing,” in *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, Jun. 2014, pp. 43–48.
- [80] D. S. Gaspar, “Análise de Desempenho de Sistemas GFDM Considerando Erros de Sincronização,” 2017, dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI.
- [81] X. Zhang *et al.*, “Filtered-OFDM - Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks,” in *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec. 2015, pp. 1–6.
- [82] R. Zayani *et al.*, “WOLA-OFDM: A Potential Candidate for Asynchronous 5G,” in *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec. 2016, pp. 1–5.

- [83] P. Weitkemper *et al.*, “On Regular Resource Grid for Filtered OFDM,” *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2486–2489, Dec. 2016.
- [84] M. Shafi *et al.*, “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, Apr. 2017.
- [85] M. Morant *et al.*, “5G NR multi-beam steering employing a photonic TTD chip assisted by multi-core fiber,” in *2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. IEEE, Mar. 2019, pp. 1–3.
- [86] T. Bag *et al.*, “Multi-Numerology Based Resource Allocation for Reducing Average Scheduling Latencies for 5G NR Wireless Networks,” in *2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Jun. 2019, pp. 597–602.
- [87] M. Kottkamp *et al.*, *5G New Radio: Fundamentals, procedures, testing aspects*. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2019.
- [88] 3GPP, “User Equipment (UE) radio access capabilities,” TS 38.306 version 15.3.0 Release 15, 2018.
- [89] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and NR; Multi-connectivity s,” TS 37.340, version 15.7.0 Release 15, 2019.
- [90] S. Parkvall *et al.*, “NR: The new 5G radio access technology,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 24–30, Dec. 2017.
- [91] C. Hoymann *et al.*, “A Lean Carrier for LTE,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 74–80, Feb. 2013.
- [92] J. Yao, “Microwave Photonics,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 314–335, Feb. 2009.
- [93] J. Capmany and D. Novak, “Microwave photonics combines two worlds,” *Nature Photonics*, vol. 1, no. 6, pp. 319–330, Jun. 2007.
- [94] D. Novak *et al.*, “Radio-Over-Fiber Technologies for Emerging Wireless Systems,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2016.

- [95] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012, vol. 222.
- [96] D. Wake, A. Nkansah, and N. J. Gomes, “Radio Over Fiber Link Design for Next Generation Wireless Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, pp. 2456–2464, Aug. 2010.
- [97] I. Specification, “Common Public Radio Interface (CPRI); Interface Specification,” Version 6.1, 2004.
- [98] A. de la Oliva *et al.*, “An overview of the CPRI specification and its application to C-RAN-based LTE scenarios,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 152–159, Feb. 2016.
- [99] G.-K. Chang and L. Cheng, “The benefits of convergence,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2062, p. 20140442, Mar. 2016.
- [100] ITU-T, “Radio-over-fibre (RoF) technologies and their applications,” Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks, 2015.
- [101] C. Lim *et al.*, “Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 390–405, Feb. 2010.
- [102] J. A. J. Ribeiro, *Comunicações ópticas*. Érica, 2003.
- [103] 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.
- [104] Technische Universität Dresden. (2018, Jun.) Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) library for MATLAB. Acessado em 07 de Fevereiro de 2019. [Online]. Available: <https://github.com/vodafone-chair/gfdm-lib-matlab>
- [105] E. TR101290, “Digital video broadcasting (DVB); measurement guidelines for DVB systems,” 2001.
- [106] 3GPP, “Group RAN; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing,” *TS 38.306 version 15.3.0 Release 15*, 2018.
- [107] National Instruments. (2020, Apr.) USRP-2954. Acessado em 10 de abril de

2020. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-br/support/model.usrp-2954.html>
- [108] D. Borges, P. Montezuma, and R. Dinis, “Low complexity MRC and EGC based receivers for SC-FDE modulations with massive MIMO schemes,” in *2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Dec. 2016, pp. 675–678.
- [109] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998.
- [110] M. Matthé *et al.*, “Widely linear estimation for space-time-coded GFDM in low-latency applications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 11, pp. 4501–4509, Nov. 2015.
- [111] X. Na and S. Gao, “An FPGA implementation method of OFDM timing synchronization based on conjugated-symmetrical-structured training sequence,” in *2013 5th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Oct. 2013, pp. 672–675.
- [112] Yang Xiao-dong *et al.*, “A proposed joint timing and frequency synchronization method for IEEE 802.16 OFDM systems,” in *2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Nov. 2008, pp. 34–38.
- [113] D. F. Noque *et al.*, “Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier,” *Optics Communications*, vol. 414, pp. 191–194, 2018.
- [114] Ookla. (2020, Apr.) SpeedTest. Acessado em 03 de abril de 2020. [Online]. Available: <https://www.speedtest.net/>
- [115] M. Luvisotto, Z. Pang, and D. Dzung, “High-performance wireless networks for industrial control applications: New targets and feasibility,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 6, pp. 1074–1093, Jun. 2019.
- [116] M. Luvisotto, Z. Pang, and D. Dzung, “Ultra high performance wireless control for critical applications: Challenges and directions,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1448–1459, Jun. 2017.