

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

TESE DE DOUTORADO

**CENÁRIOS DE REDES DE ACESSO PARA INTEGRAÇÃO DE
REDES ÓPTICAS E SEM FIO BASEADAS EM SISTEMAS DE RÁDIO
SOBRE FIBRA**

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

TD 01/2016

**BELÉM/PA
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

**CENÁRIOS DE REDES DE ACESSO PARA INTEGRAÇÃO DE
REDES ÓPTICAS E SEM FIO BASEADAS EM SISTEMAS DE RÁDIO
SOBRE FIBRA**

**BELÉM/PA
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Oliveira, Rosinei de Sousa, 1981 -

Cenários de redes de acesso para integração de redes ópticas e sem fio baseadas em sistemas de radio sobre fibra / Rosinei de Sousa Oliveira.-2016

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

1. Comunicações ópticas. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Fibras ópticas. I. Título

CDD 22.ed.621.38275

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

**CENÁRIOS DE REDES DE ACESSO PARA INTEGRAÇÃO DE
REDES ÓPTICAS E SEM FIO BASEADAS EM SISTEMAS DE RÁDIO
SOBRE FIBRA**

Tese de doutorado apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa e co-orientação do Prof. Dr. António Luís Jesus Teixeira.

**BELÉM/PA
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CENÁRIOS DE REDES DE ACESSO PARA INTEGRAÇÃO DE REDES ÓPTICAS E SEM FIO
BASEADAS EM SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA**

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM 15 / 01 / 2016

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Weyl Albuquerque Costa (ORIENTADOR – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. António Luis Jesus Teixeira (CO-ORIENTADOR– IT-AVEIRO/Portugal)

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero (AVALIADOR EXTERNO - UFF/RJ)

Dr. João Claudio Chamma Carvalho (AVALIADOR EXTERNO - UFPA/Castanhal)

Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior (AVALIADOR INTERNO - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Marco José de Sousa (AVALIADOR INTERNO - PPGEE/UFPA)

VISTO:

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes (COORDENADOR PPGEE/UFPA)
BELÉM/PA
2016**

*O temor do Senhor é o princípio da Sabedoria.
Provérbios 9:10a.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo suas infinitas bênçãos em minha vida, e pela Fé que me deu forças pra lutar por esse grande sonho.

Aos meus pais Rosivaldo e Raimunda Oliveira, pelo infinito amor, ensinamentos, e por me proporcionarem acesso a educação, mesmo diante de tantas dificuldades.

As minhas irmãs Rosivânia e Rosiane, pelo cuidado que tiveram comigo e pelo companheirismo mesmo distante. Aos meus lindos sobrinhos Lucas e Yasmin, pelo respeito e admiração.

À família Matos, em especial minha namorada Alina, pelo amor, companheirismo e por ter compartilhado e vivenciado comigo as lutas enfrentadas durante a jornada em busca desse sonho.

Ao professor João Weyl, pelos ensinamentos, apoio, pela oportunidade dada para a realização desse grande sonho. Serei eternamente grato!

Ao professor António Teixeira pela rica contribuição e orientação.

Ao Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD), em especial ao professor Renato Francês, pelos ensinamentos e apoio.

Ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado, em especial a Liane Barbosa, Kárytha de Paula e Daniel Levy, pelo apoio.

Aos amigos do grupo do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, em especial ao Ricardo Ferreira, Diogo Viana, Simão Brandão, Adolfo Oliveira, João Silva e André Peixoto, pela ajuda e amizade.

À UFPA e ao PPGEE, por ter me acolhido como aluno de doutorado durante 5 anos.

À UFOPA e ao Programa de Computação por ter me cedido licença para que eu pudesse me dedicar de forma exclusiva a esse trabalho.

À CAPES pelo fomento da pesquisa realizada tanto no Brasil quanto em Portugal.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	X
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT.....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. GERAL.....	3
1.3.2. ESPECÍFICOS.....	3
1.4. TRABALHOS CORRELATOS.....	4
1.5. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	8
2. REDES DE ACESSO.....	10
2.1. NÃO CABEADAS.....	10
2.2. CABEADAS.....	13
2.2.1. DSL.....	13
2.2.2. REDES ÓPTICAS.....	14
2.3. EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS BASEADAS EM P2MP.....	16
2.3.1. TECNOLOGIA BPON.....	16
2.3.2. TECNOLOGIA EPON.....	16
2.3.3. TECNOLOGIA 10G-EPON.....	17
2.3.4. TECNOLOGIA G-PON.....	17
2.3.5. REDES ÓPTICAS DE PRÓXIMA GERAÇÃO.....	18
3. SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA.....	22
3.1. ANALÓGICO – ROF.....	24
3.1.1. FONTES DE RUÍDO NO EMISSOR.....	25
3.1.1.1. RUÍDO DO FILTRO.....	25
3.1.1.2. DISTORÇÕES DE INTERMODULAÇÃO.....	25
3.1.2. DEGRADAÇÕES NO DOMÍNIO ÓPTICO.....	26
3.1.3. FONTES DE RUÍDO NO RECEPTOR.....	28

3.1.3.1.	RUÍDO DO FOTODETECTOR	28
3.1.4.	SNR TOTAL DOS SISTEMAS ROF	28
3.2.	DIGITAL - DROF	29
3.2.1.	FONTES DE RUÍDO NO EMISSOR	30
3.2.1.1.	RUÍDO DO FILTRO	30
3.2.1.2.	RUÍDO DE JITTER NA ADC	30
3.2.1.3.	RUÍDO DE QUANTIZAÇÃO.....	31
3.2.2.	DEGRADAÇÕES NO DOMÍNIO ÓPTICO	32
3.2.3.	RUÍDOS NO RECEPTOR.....	33
3.2.3.1.	RUÍDO DO FOTODETECTOR	33
3.3.	SNR TOTAL DOS SISTEMAS DROF	33
3.4.	INTERFACE DE RÁDIO CPRI.....	33
3.5.	ARQUITETURA C-RAN.....	34
4.	ESTUDO DE CASO BASEADO EM SIMULAÇÃO	37
4.1.	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	37
4.2.	CENÁRIOS.....	37
4.2.1.	ROF-RF E ROF-IF.....	37
4.2.2.	DROF	39
4.2.3.	CENÁRIO DE COEXISTÊNCIA.....	41
4.3.	RESULTADOS	44
4.3.1.	CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS	44
4.3.2.	DESEMPENHO DO CENÁRIO DROF.....	45
4.3.3.	DESEMPENHO DO CENÁRIO DE COEXISTÊNCIA	49
5.	ESTUDO DE CASO BASEADO EM EXPERIMENTAÇÃO	52
5.1.	AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO	52
5.2.	CENÁRIOS.....	52
5.2.1.	COEXISTÊNCIA ENTRE SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA E TWDM	52
5.2.2.	COEXISTÊNCIA ENTRE SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA E RF-VIDEO OVERLAY	56
5.3.	RESULTADOS	58
5.3.1.	CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS	58
5.3.2.	ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA	59
5.3.2.1.	DESEMPENHO DOS CENÁRIOS DROF	59
5.3.2.2.	DESEMPENHO DOS CENÁRIOS ROF.....	61

5.3.3.	CENÁRIOS DE COEXISTÊNCIA.....	63
5.3.3.1.	DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE DROF E TWDM.....	63
5.3.3.2.	DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE ROF E TWDM	65
5.3.3.1.	DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE DROF E RF-VIDEO OVERLAY.....	67
5.3.3.2.	DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE ROF E RF-VIDEO OVERLAY	68
6.	CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	70
6.1.	CONCLUSÕES.....	70
6.2.	CONTRIBUIÇÕES.....	72
6.3.	PUBLICAÇÕES.....	73
6.4.	TRABALHOS FUTUROS.....	74
	REFERÊNCIAS.....	77
	APÊNDICE A	85
	RoF-RF	85
	DRoF.....	87
	APÊNDICE B	89
	G-PON.....	89
	XG-PON.....	90
	TWDM.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figure 2.1: Arquitetura básica de uma rede PON.	14
Figure 2.2: Ilustração da arquitetura <i>Point-to-Point</i>	15
Figure 2.3: Ilustração da arquitetura P2MP	15
Figure 2.4: Evolução das redes PON especificadas pela ITU-T	19
Figure 2.5: Plano de comprimento de onda de coexistência dos padrões G-PON e XG-PON	19
Figure 2.6: Evolução dos padrões de rede PON do IEEE e ITU-T	21
Figure 3.1: Arquitetura de um Sistema de Rádio Sobre Fibra	22
Figure 3.2: Arquitetura básica de um sistema RoF	24
Figure 3.3: Principais fontes de degradação de um sistema RoF	25
Figure 3.4: Ilustração do <i>two-tone test</i> para caracterização dos produtos de intermodulação de 2ª e 3ª ordem.	26
Figure 3.5: Modelos de BS para sistemas RoF, onde as letras representam as diferentes arquiteturas em: (a) <i>Radio Frequency</i> ; (b) <i>Intermediate Frequency</i> e (c) <i>Base Band</i>	27
Figure 3.6: Arquitetura básica de um sistema DRoF	29
Figure 3.7: Principais fontes de degradação dos sistemas DRoF	30
Figure 3.8: Modelos de BS para sistemas DRoF, nos quais as letras representam as diferentes arquiteturas: (a) <i>Radio Frequency</i> e (b) <i>Intermediate Frequency</i>	33
Figure 3.9: Arquitetura da interface CPRI	34
Figure 3.10: Arquiteturas de estações base, nas quais, as letras representam: (a) arquitetura tradicional RAN; (b) arquitetura atual C-RAN	35
Figure 4.1: Cenários RoF-RF nos quais as letras representam: a) sinal em frequência central; b) sinal analógico no domínio óptico; c) sinal convertido para o domínio da frequência e d) sinal recuperado após a transmissão	38
Figure 4.2: Figura Cenário RoF-IF onde as letras representam: a) o sinal na frequência central; b) sinal na frequência intermediária; c) sinal analógico no domínio óptico; d) sinal convertido para o domínio elétrico; e) sinal em frequência intermediária e f) sinal em frequência central recuperado	39
Figure 4.3: Cenário DRoF-IF onde as letras representam: a) o sinal na frequência central; b) sinal na frequência intermediária; c) sinal digital no domínio óptico; d) sinal convertido para o domínio elétrico; e) sinal em frequência intermediária e f) sinal em frequência central recuperado.	39
Figure 4.4: Espectro após a DAC: (a) função de transferência da DAC para com IF de 200 MHz e (b) visão ampliada da primeira zona de Nyquist.	41
Figure 4.5: Espectro após a DAC: (a) função de transferência da DAC para com IF de 400 MHz e (b) visão ampliada da primeira zona de Nyquist.	41

Figure 4.6: Arquitetura de coexistência baseada no padrão ITU-T G.989.1 (NG-PON2)	42
Figure 4.7: Plano de comprimento de onda utilizado que garante a compatibilidade dos sistemas legados e os novos padrões	44
Figure 4.8: Impacto dos ruído de jitter para diferentes valores de bits de resolução da ADC onde as letras representam: (a) desempenho para DRoF com 200 MHz e (b) desempenho para DRoF com 400 MHz.....	46
Figure 4.9: SNR para diferentes valores de bits de resolução da ADC.	47
Figure 4.10: Impacto dos bits da ADC na sensibilidade do sistema onde os valores em cada linha representam a taxa total na fibra decorrente do processo de digitalização	48
Figure 4.11: Cenários de coexistência onde as letras representam: (a) <i>downlink</i> e (b) <i>uplink</i>	50
Figure 4.12: Desempenho dos sistemas de rádio sobre fibra em função do EVM onde as letras representam os sentidos: (a) <i>downlink</i> e (b) <i>uplink</i>	51
Figure 5.1: Cenário experimental de coexistência entre canais rádio e TWDM	53
Figure 5.2: Espectro elétrico dos canais de radio sobre fibra analógico onde as letras representam: (a) 3 portadoras RF; (b) 5 portadoras RF; (c) 3 portadoras IF e (d) 5 portadoras IF	54
Figure 5.3: Espectro óptico dos canais TWDM e rádio a saída do OSA para espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz.....	55
Figure 5.4: Cenário experimental de coexistência entre canais rádio e RF-Vídeo Overlay para espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz.....	56
Figure 5.5: Espectro óptico dos canais de rádio e RF-Vídeo Overlay a saída do OSA.....	56
Figure 5.6: Imagens da instrumentação utilizada no experimento de coexistência	57
Figure 5.7: Desempenho das transmissões DRoF para diferentes valores de potência recebida onde as letras representam os cenários: (a) 0.3 ps de jitter em back-to-back ;(b) 0.3 ps de jitter com 20 km de fibra; (c) 0.9 ps de jitter em back-to-back e (d) 0.9 ps de jitter com 20 km de fibra .	60
Figure 5.8: Espectro recebido para 20km onde as letras representam com -14 dBm de potência recebida onde as letras representam os cenários: (a) 3 portadoras em IF; (b) 3 portadoras em RF; (c) portadoras em IF e (d) 5 portadoras em RF.....	61
Figure 5.9: Desempenho das transmissões RoF para diferentes valores de potência recebida onde as letras representam os cenários: (a) 3 portadoras RF em back-to-back; (b) 3 portadoras RF em 20km de fibra; (c) 3 portadoras IF em back-to-back e (d) 3 portadoras IF em 20km de fibra.....	62
Figure 5.10: Desempenho das transmissões RoF para diferentes valores de potência recebida onde as letras representam os cenários:: (a) 5 portadoras RF em back-to-back; (b) 5 portadoras RF em 20km de fibra; (c) 5 portadoras IF em back-to-back e (d) 5 portadoras IF em 20km de fibra.....	63

Figure 5.11: Impacto dos canais TWDM nos canais DRoF onde as letras representam os cenários DRoF: (a) 4 bits de resolução; (b) 5 bits de resolução e (c) 8 bits de resolução.	64
Figure 5.12: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-RF com 3 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz.	65
Figure 5.13: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-IF com 3 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz.	66
Figure 5.14: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-RF com 5 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz.	66
Figure 5.15: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-IF com 5 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz.	67
Figure 5.16: Impacto do sinal de Vídeo-RF nos cenários DRoF para os espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz nos cenários no qual as letras representam os cenários para: (a) 4 bits, (b) 5bits e (c) 8 bits de resolução da ADC.	68
Figure 5.17: Impacto dos sinais de RF-Vídeo Overlay nos cenários RoF nos quais as letras representam os cenários: (a) 3 portadoras em RF, (b) 3 portadoras em IF, (c) 5 portadoras em RF e (d) 5 portadoras em IF.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Configurações dos cenários de rádio sobre fibra	44
Tabela 4.2: Configurações do cenário de coexistência	45
Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na geração e reconstrução do sinal no VPI.	58
Tabela 5.2: Comprimento de onda utilizado no cenário de coexistência entre TWDM e rádio sobre fibra	59
Tabela 5.3: Comprimento de onda utilizado no cenário de coexistência entre RF- <i>Vídeo Overlay</i> e rádio sobre fibra	59

LISTA DE ABREVIATURAS

10G-EPON – 10 Gigabit Ethernet PON
2G – Segunda Geração de Redes Móveis
3 GPP – Third Generation Partnership Project
3G – Terceira Geração de Redes Móveis
4G – Quarta Geração de Redes Móveis
5G – Quinta Geração de Redes Móveis
ADC – Analog to Digital Converter
ADSL – Asymmetric Digital Subscriber Line
AMPS – Advanced Mobile Phone Service
AP – Access Point
APD – Avalanche Photodiode
ATM – Asynchronous Transfer Mode
AWG – Arbitrary Waveform Generator
BB – Base Band
BBU – Base Band Unit
BER – Bit Error Rate
BPF – Band Pass Filter
BPON – Broadband PON
BS – Base Station
C-RAN – Centralized/Cloud Remote Access Network
CAPEX – Capital Expenditure
CDMA – Code Division Multiple Access
CE_x – Coexistence Interface
CO – Central Office
CPRI – Common Public Radio Interface
DAC – Digital to Analog Converter
DD MZM - Dual Drive MZM
DFB – Distributed Feedback Laser
DRoF – Digitized Radio over Fiber
DSL – Digital Subscriber Line

DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexers
DSO – Digital Sampling Oscilloscope
E-O – Eletro-Óptico
EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifiers
EDGE – Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EMI – Electromagnetic Interference
EPON – Ethernet PON
EVM – Error Vector Magnitude
FSAN – Full Service Access Network
G-PON – Gigabit Passive Optical Network
GPRS – General Packet Ratio Service
GSM – Global System for Mobile
HDTV- High-Definition Television
HSCSD – High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA - High Speed Downlink Packet
HSPA – High Speed Packet Data
HSUPA – High Speed Uplink Packet Access
IEEE – Institute of Electric and Electronic Engineers
IF – Intermediate Frequency
ITU-T – International Telecommunication Union
LAN – Local Area Network
LTE – Long Term Evolution
LTE-A – Long Term Evolution – Advanced
MAC – Media Access Control
METIS – Mobile and Wireless Communications Enablers for Twenty-Twenty
MIMO – Multiple Input Multiple-Output
MZM – Mach Zender Modulator
NG-PON – Next Generation Passive Optical Network
NRZ – Non-Return Zero
OBSAI – Open Base Station Architecture Iniative
ODN – Optical Distribution Network

OLT – Optical Line Terminal
ONU – Optical Network Unit
OPEX – Operational Expenditure
P2MP – Point-to-Multipoint
P2P – Point-to-Point
PAN – Personal Area Networks
PON – Passive Optical Network
RAN – Remote Access Network
RE – Radio Equipment
REC – Radio Equipment Control
RF – Radio Frequency
RIN – Relative Intensity Noise
RoF – Radio over Fiber
RRH – Remote Radio Head
RRU – Remote Radio Unit
SNR – Signal to Noise Ratio
SOA – Semiconductor Optical Amplifier
SSMF – Standard Single Mode Fiber
TACS – Total Access Communication System
TDM – Time Division Multiple
TDMA – Time Division Multiple Access
TWDM- PON – Time and Wavelength Division Multiplexed – PON
UMTS – Universal Mobile Telecommunication System
UWB – Ultra Wide Band
VDSL – Very High bit-rate DSL
VOA – Variable Optical Attenuator
WAN – Wide Area Network
WCDM- Wideband Code Division Multiple Access
WDM – Wavelength Division Multiplexing
WLAN – Wireless Local Area Network
XPM - Cross-Phase Modulation

RESUMO

A constante demanda por alta largura de banda principalmente dos usuários finais tem levado as operadoras de telecomunicações a explorar novas soluções para aumentar a capacidade da infraestrutura atual. A combinação das altas taxas disponibilizada pelos enlaces ópticos com a flexibilidade e mobilidade das redes sem fio é vista com uma solução promissora para suportar o alto tráfego, decorrente principalmente de novas aplicações e do aumento de dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets*. Nesse contexto, os sistemas de rádio sobre fibra têm sido a solução mais utilizada para prover a real integração fixo-móvel. Tradicionalmente, esses sistemas são baseados na transmissão de sinais analógicos (RoF), entretanto as altas degradações originadas principalmente no domínio óptico impõem limites na real aplicação desse tipo de sistema. Esse problema tem sido contornado com uso de sinais digitalizados (DRoF) que minimizam os efeitos que limitam o desempenho das transmissões analógicas, visto que o enlace, do emissor ao receptor é realizado no domínio digital. Por outro lado, os sistemas digitais apresentam como desafio a necessidade de enlaces ópticos com maior largura de banda em função do processo de digitalização que aumenta significativamente a taxa de dados a ser transmitida no enlace óptico.. A utilização de sistemas de rádio sobre fibra tem modificado a infraestrutura tradicional móvel com a adição de arquiteturas baseadas na centralização das funcionalidades mais complexas do sistema na *central office*, deixando na antena apenas funções mais básicas, o que possibilita diminuição dos custos, principalmente do consumo de energia. Tais arquiteturas são denominadas C-RAN (*Cloud/Centralized Remote Access Network*). Em contrapartida, essa descentralização requer redes ópticas de acesso de alta capacidade para conexão entre a *central office* e antena no segmento denominado *fronthaul*. Dentro desse contexto, a investigação de cenários que consideram a aplicação de sistemas de rádio sobre fibra enquanto solução para redes de acesso vem sendo explorada, mais intensamente, desde 2010. Todavia em grande parte dos trabalhos, o objeto principal de estudo tem sido na análise de desempenho da transmissão de sistemas de rádio sobre fibra, analógico e digitais. Por outro lado, até o momento do desenvolvimento dessa tese, a investigação desses sistemas em cenários considerando a coexistência tanto com sistemas legados (RF-Vídeo, G-PON e XG-PON) quanto com novos

padrões (TWDM-PON). Esse tipo de estudo é importante porque visa, principalmente, investigar a compatibilidade dos sistemas de rádio sobre fibra em cenários mais realísticos.

Nesse contexto, essa tese propõe investigar cenários de rede de acesso baseado em sistemas de rádio sobre fibra em cenários de coexistência. Inicialmente, os estudos foram conduzidos por meio de simulação, e, adicionalmente, por experimentos realizados em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: RoF; DRoF; C-RAN e Redes Ópticas de Acesso.

ABSTRACT

The constant increasing demand for higher bandwidth services from subscribers has led to the integration of optical network infrastructure and wireless broadband access. Combining the capacity of optical fiber with the flexibility and mobility of wireless networks, a powerful system can be created to support data traffic volumes on demand. The radio over fiber system is the most used solution to integrate radio and fiber technologies. However, the analog links decrease linearly with the increasing length due to distortions from optical link. On the other hand, digitized radio transmission minimizes the physical impairments and can maintain its dynamic range independent from the fiber's transmission length. Nevertheless, the optical link requires a high bandwidth due to the digitalization process, which from the implementation point of view represents one of the major challenges. This new context will change the network infrastructure and has forced operators to embrace solutions to improve the capacity of the system, mainly in radio access network (RAN). A new concept of RAN, called Centralized-RAN (C-RAN) is gaining great interest because this architecture improves the fixed/mobile convergence. In comparison with a classic architecture, this comes out with an innovative architecture where all complex functionalities are executed in the central office (CO), while the base station (BS) is responsible for executing less complex functions which bring reduced costs, improved performance and fixed/mobile convergence. Based on this information, this thesis proposal aims to investigate the radio over fiber scenarios as a solution to provide real access networks. In order to meet this goal, first we intending to investigate architectures by simulations, after we want replay the proposed followed by experimental demos in more realistic scenarios.

Keywords: Radio over Fiber, C-RAN, Optical Access Networks

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

As novas gerações de redes móveis precisam atender a demanda decorrente do crescimento exponencial por largura de banda. Estudos preveem que a partir de 2020 as redes deverão ter infraestrutura para suportar um crescimento 1000 vezes maior, comparado a década atual [Nokia, 2011]. Serviços como vídeo em ultra definição, jogos *on line*, comunicações *machine-to-machine* e computação em nuvem são alguns exemplos de aplicações que estão cada vez mais presente no cotidiano dos usuários e que requerem alta largura de banda.

Esse crescimento do consumo de dados, além das aplicações, é decorrente do uso maciço de dispositivos móveis. Estima-se que o número de dispositivos conectados em algum tipo de rede móvel é maior que o contingente populacional [Cisco Systems, 2013]. O crescimento global de tráfego do usuário final crescerá 21% até 2018, enquanto que no mesmo período a perspectiva de crescimento do tráfego móvel é de 61% [Cisco System, 2014].

Para atender a necessidade da demanda de tráfego, especialmente móvel, as operadoras de telecomunicações têm explorado e desenvolvido novas soluções para melhorar a infraestrutura de rede e assim prover serviços de qualidade para os usuários finais. Nesse contexto, o LTE (*Long Term Evolution*) tem sido a principal solução da 4ª geração de redes móveis (4G). De acordo com a especificação, são fornecidas taxas de pelo menos 1 Gbit/s [Korowajczuk, 2011].

Ainda que a 5ª geração de redes móveis (5G) encontra-se restrita as pesquisas e debates, é esperado que até o final da década atual esse conceito esteja presente na infraestrutura de rede das operadoras. Além do suporte às altas taxas de transmissão, a 5ª geração terá como princípio o conceito de “sociedade conectada” tendo como base tais

fatores: o alto número de dispositivos conectados simultaneamente, melhor cobertura, alta eficiência espectral, baixo atraso, baixo consumo de energia, entre outros [METIS, 2013].

Apesar dos avanços significativos na infraestrutura das redes móveis, os tradicionais enlaces de rádio que conectam a BS (*Base Station*) ao núcleo da rede (*backbone*) não permitem explorar as novas tecnologias em sua totalidade, devido às limitações relacionadas com a capacidade de transmissão e, das altas perdas. O LTE operando em setores com múltiplas antenas pode requerer taxas de até 10 Gbit/s, por exemplo. Do ponto de vista de implementação, essa limitação dos enlaces tradicionais sem fio é um dos principais desafios para as operadoras. Para contornar esse desafio, a solução natural é a conexão da antena com núcleo da rede por meio de enlaces ópticos. Assim, a combinação da alta capacidade de transferência das redes ópticas, com a mobilidade e flexibilidade das redes sem fio é considerada uma solução em potencial para atender os novos requisitos por largura de banda.

As soluções mais utilizadas para integração óptico/sem fio são baseadas em sistemas RoF (*Radio over Fiber*) que consiste na transmissão de um sinal de rádio da CO (*Central Office*) para antena sobre um enlace óptico. Da antena o sinal é propagado para os receptores. Como as redes PONs (*Passive Optical Networks*) possuem baixo custo de implantação e larga utilização, o cenário mais provável dessa integração é utilização de sistemas RoF baseados em padrões PON, sobretudo considerando as NG-PON (*Next Generation PON*) que proveem capacidades de transmissão na ordem de dezenas de gigabits.

1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Esse novo paradigma de integração óptico/sem fio tem modificado significativamente a infraestrutura de rede móvel atual, principalmente no RAN (*Remote Access Network*), o que vem forçando as operadoras a buscar soluções que visem aumentar a capacidade da rede, sem comprometer os custos. Diante desse cenário, um novo conceito de RAN centralizado, denominado C-RAN, tem atraído considerável interesse [China Mobile, 2010]. Em comparação com o modelo tradicional, o C-RAN concentra todas as funcionalidade mais complexas na CO, transferindo para antena operações mais básicas como recepção e amplificação do sinal. A conexão entre a CO e a antena na ODN (*Optical*

Distribution Network) é realizada sobre o segmento chamado *fronthaul* que faz uso de sistemas rádio sobre fibra para transmissão de dados.

A respeito das transmissões de rádio sobre fibra, os principais desafios estão relacionados com o modo em que o sinal é transmitido. A transmissão analógica traz como vantagem a simplicidade da antena, por outro lado o sinal é suscetível aos efeitos da atenuação e dispersão da fibra, que limita o desempenho da transmissão. Em contrapartida, a transmissão de sinais de rádio digitalizados minimiza as restrições dos sistemas analógicos e possui melhor desempenho, sobretudo em relação ao alcance. Entretanto, as transmissões digitais requerem alta capacidade no enlace óptico devido às altas taxas de transmissão decorrentes do processo de digitalização. Um cenário considerando transmissões LTE-A por meio de interface de rádio digital CPRI (*Common Public Interface Rádio*) tem capacidade de operar com taxas de até 10.137,Gbti/s, o que pode não ser suportado no segmento *fronthaul* [CPRI, 2013], especialmente quando o padrão PON é constituído por sistemas legados, como por exemplo o padrão G-PON que fornece taxa máxima de 2.5 Gbit/s.

Diante disso, a realização de estudos no contexto de rádio sobre fibra é de grande importância para prover soluções que considerem aspectos relevantes de sua real utilização enquanto solução em cenários de rede de acesso, levando em consideração os desafios dos diferentes tipos de transmissões de rádio (analógica e digital) e da compatibilidade com padrões das redes ópticas de acesso, tanto dos sistemas legados, quanto dos novos padrões.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GERAL

Face ao exposto, essa proposta de tese tem como objetivo principal propor e investigar cenários de rede de acesso visando a integração de redes ópticas e sem fio por meio de técnicas de transmissão de rádio sobre fibra enquanto solução para redes de acesso em função da crescente demanda por largura de banda, especialmente nas redes móveis.

1.3.2. ESPECÍFICOS

Essa proposta de tese têm os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os principais conceitos, aspectos e desafios relacionados com a integração de redes ópticas e sem fio baseados em técnicas de rádio sobre fibra.
- Investigar, por meio de simulação, sistemas de rádio sobre fibra baseado em transmissões analógicas e digitais.
- Investigar, por meio de simulação, os principais aspectos relacionados a compatibilidade dos sistemas de rádio sobre fibra em contexto de coexistência no qual a infraestrutura de distribuição óptica é composta por sistemas legados (G-PON, XG-PON) e novos padrões (TWDM)
- Realização de análises sistêmicas experimentais visando a investigação de cenários mais realísticos de coexistência entre sistemas de rádio sobre fibra com TWDM e RF-*Vídeo Overlay*, com enfoque principal no impacto que essas tecnologias podem exercer nos sistemas de rádio sobre fibra (analógico e digital).

1.4. TRABALHOS CORRELATOS

A convergência entre redes ópticas e sem fio continua sendo um tópico importante de pesquisa mesmo duas décadas após surgimento dos primeiros trabalhos que investigaram a utilização de fibra óptica como solução para estender o alcance e prover maiores taxas de transmissão para as redes sem fio [Cooper, 1990] [Fye, 1990]. Essa integração, é uma solução promissora que possibilita as operadoras de telecomunicações atender os requisitos do usuário, em especial por maiores taxas de transmissão.

Desde o surgimento dos primeiros trabalhos, diversos cenários baseados em sistemas de rádio sobre fibra vem sendo investigados como a principal abordagem para prover uma real integração de redes ópticas e sem fio [Wake, 2002] [Mitchel, 2006]. Tradicionalmente sistemas de rádio sobre fibra são baseados na transmissão de sinais analógicos (RoF), entretanto diversos trabalhos têm demonstrado que esse tipo de técnica traz uma série de restrições introduzidas tanto por componentes elétricos e ópticos. Por outro lado, o desenvolvimento de sistemas de rádio baseado na transmissão de sinais digitalizados têm despertado maior interesse devido a sua robustez proveniente da maturidade dos sistemas

digitais que permite enlaces com maior alcance, maiores taxas, menor consumo de energia, entre outros.

Em [Nirmalathas et al., 2010] os autores apresentam uma revisão a respeito das diferenças entre as arquiteturas baseadas em RoF (*Radio Over Fiber*) e DRoF (*Digital Radio Over Fiber*). Um sistema DRoF multicanais é validado experimentalmente. Os resultados demonstram melhor desempenho da abordagem digital em relação a analógica, principalmente no alcance do enlace. Na análise comparativa, a transmissão do sinal DRoF mantém o mesmo desempenho até o ruído térmico no receptor se tornar predominante. Em outras palavras, o alcance máximo do DRoF não é limitado pela distância do fibra, mas a partir de certo ponto pelo ruído no receptor. Por outro lado, o enlace do sistema RoF decresce linearmente com a comprimento da fibra devido ao fenômeno da atenuação e da dispersão. Na análise apresentada, para que ambos sistemas tivessem desempenho semelhante, em termos de alcance, a transmissão baseada em RoF deveria ser compensada com aumento da potência de transmissão, representando maior consumo de energia.

No contexto de consumo de energia, o trabalho [Yang, Nirmalathas e Lim, 2011] propõe um modelo de consumo de energia para investigar a eficiência energética em diferentes arquiteturas de antena baseada em sistemas DRoF e RoF. Em todas as comparações realizadas, as técnicas baseadas em DRoF obtém vantagens em termos de eficiência energética, principalmente em BS tradicionais que possuem maior alcance, geralmente utilizadas para cobrir zonas rurais. Entretanto, soluções baseadas em transmissão RoF são potencialmente competitivas com as digitais em áreas urbanas, em que uma maior cobertura é compensada com o aumento da quantidade de BS de baixa complexidade (*small cell*) que operam com menor potência de transmissão.

A transmissão de sinais de rádio tem também atraído uma particular atenção para o uso de frequências milimétricas não licenciadas como é apresentado em [Beas, et al, 2013]. Porém, a viabilidade de implementação em sistemas digitais é estritamente limitada pelo custo associado das ADCs (*Analog to Digital Converters*) que nesse tipo de aplicação necessita operar com alta frequência de amostragem. No trabalho [Chu, Jacob e Kim, 2010] é apresentado uma solução de uma ADC com capacidade de operar em até 40 GS/s (*Giga Samples per second*), porém dispositivos com esta configuração além de possuir alto custo de

implementação, tem alto consumo de energia. Para lidar com essa limitação, alguns autores têm investigado o conceito de *downconversion* e *subsampling* [Yang, Nirmalathas e Lim, 2011] que convertem o sinal para frequências mais baixas, em IF (*Intermediate Frequency*) ou (*Base Band*), diminuindo os requisitos da frequência de amostragem na ADC. Na primeira técnica, a conversão do sinal é realizada com auxílio de componentes elétricos como *mixers* e osciladores, enquanto que a segunda é feita por meio de algoritmos.

A integração de redes ópticas e sem fio utilizando soluções baseadas em sistemas de rádio sobre fibra também tem sido investigado na arquitetura C-RAN. Diversos trabalhos abordam o conceito inicialmente introduzido pela China Mobile (China Mobile, 2010) e atualmente adotado por diversas operadoras. Em [Saadani, et al, 2013] são apresentadas oportunidades quanto ao uso de DRoF no contexto do C-RAN para o LTE-A. Sistemas baseados em DRoF além de atender a constante demanda por maiores taxas de transmissão, permite diminuir os custos de implementação visto que o processamento complexo centralizado pode ser compartilhado com múltiplas antenas, diminuindo conseqüentemente o consumo de energia. Nos resultados apresentados em [Carapellese, 2014], há uma redução de até 65% de consumo de energia para arquitetura em áreas urbanas, e até 40% de redução em áreas rurais.

Do ponto de vista de implementação prática, a utilização de transmissões DRoF com o protocolo CPRI ainda é um desafio no contexto do C-RAN devido às altas taxas de transmissão requeridas pelo DRoF no segmento *fronthaul* e também por conta dos requisitos de *jitter* e *delay*. O trabalho proposto por (Ponzini et al, 2013) tem como proposta contornar tais desafios por meio do uso de CPRI sobre WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Além de suportar altas taxas de dados, o atraso dos sistemas WDM é compatível com os requisitos requeridos pelo CPRI. Parte da solução também envolve a proposta de um algoritmo, o qual permite a sintonização automática de comprimentos de onda. Assim, cada par é capaz de alocar lambdas para transmissão no sentido *downlink* e *uplink*, bem como definir a taxa de transmissão a ser utilizada. A solução proposta demonstra ser uma solução escalável para transmissões CPRI.

Tradicionalmente, a conexão entre a CO e a antena é realizada por meio de uma transmissão digital (DRoF sobre CPRI). Entretanto, como dito anteriormente, esse tipo de

abordagem requer enlaces ópticos com alta capacidade de largura de banda. Por conta disso, alguns trabalhos na literatura propõem contornar essa limitação por intermédio da transmissão RoF no contexto da arquitetura C-RAN. Em [Liu, et al, 2013], é apresentada uma arquitetura multisserviço que visa prover altas taxas de transmissão para *small cells*. Apesar de não diferir de outras abordagens puramente analógica como proposto por [Nirmalathas et al, 2010], o trabalho enfatiza cenários heterogêneos com coexistência de sistemas legados (WiFi) e outros serviços (WiMAX e ondas milimétricas) por meio de canais WDM. Ainda que esse tipo de abordagem, baseada RoF seja uma alternativa diante dos desafios do DRoF, sua real aplicação vai na contramão do mercado cuja as soluções adotadas por operadoras (NTT, France Telecom/Orange, Vodafone e outras) e por fabricantes (Alcatel-Lucent , Samsung Smart LTE, Ericsson e outras) têm sido baseadas em CPRI (DRoF).

Como citado, do ponto de vista de implementação prática, as soluções baseadas em DRoF têm como desafio, dentre outros, as altas taxas requeridas pelo DRoF nos enlaces ópticos , como exposto em [Nirmalathas et al, 2010] e [Saadani, et al, 2013] . As técnicas de *downconversion* e *subsampling* vem sendo utilizadas como forma de diminuir a frequência de amostragem na ADC e, conseqüentemente, gerar uma menor taxa de transmissão no enlace óptico. Todavia, esse desafio não é investigado de forma mais ampla pois grande parte dos trabalhos encontrados na literatura propõem soluções para um contexto isolado, geralmente baseado na comparação entre RoF e DRoF, considerando principalmente o desempenho em termos de alcance. As investigações em torno da arquitetura C-RAN, por exemplo, começaram a ser exploradas recentemente [Liu, et al, 2013] [Ponzini et. al., 2013] [Carapellese, 2014] e por isso ainda é um tópico em aberto. Outra lacuna dentro desse contexto refere-se às tecnologias candidatas para o enlace óptico que suportarão as altas taxas de transmissão requeridas pelas novas aplicações e tecnologias.

As redes PONs são as principais candidatas devido ao baixo custo de implementação e larga utilização por parte das operadoras de telecomunicações, porém nem todos os padrões suportam os requerimentos de largura para novas demandas, como é caso do CPRI que pode requerer até 10.137 Gbit/s. O Gigabite-PON (ITU-T G.984.7, 2010), por exemplo, suporta taxas máximas de até 2.5 Gbit/s, enquanto que o XG-PON1 (ITU-T G.987, 2010) é capaz de oferecer até 10 Gbit/s no sentido *downlink*, mas apenas 2.5 Gbit/s no sentido *upstream*. Ainda

que o padrão XG-PON2 possibilite taxas simétricas de 10 Gbit/s, as tecnologias da NG-PON2 [ITU-T G.989.1, 2013] surgem como a solução mais promissora para arquiteturas que necessitam de enlaces de alta capacidade. O NG-PON2 fornece taxas agregadas de 40 Gbit/s, e opcionalmente 80 Gbit/s.

O padrão ITU-T G.989.1 consiste de TWDM-PON (*Time Division Multiple Access-PON*) como primeira solução para NG-PON2 com opcional utilização de WDM. A principal razão para essas duas abordagens serem usadas está relacionada com a necessidade de se oferecer links ponto-a-ponto de alta capacidade. O TWDM, apesar de oferecer altas taxas, é incompatível com o CPRI devido aos altos atrasos herdados do TDM-PON, como é apresentado em [Lida et al, 2013]. Por outro lado, as características do WDM são mais promissoras porque além da compatibilidade em termos de *delay* e *jitter*, oferece maior flexibilidade para o operador possibilitando uma série de configurações como o uso de canais dedicados para cada setor de uma BS [Nesset, 2014].

Diante da revisão apresentada, observa-se que as pesquisas em sistemas de rádio sobre fibra enquanto solução para integração de redes fixas e móveis tem evoluído significativamente, sobretudo na década atual. As vantagens e desvantagens sobre as duas principais abordagens, RoF e DRoF, vem sendo investigadas em diferentes contextos como o alcance do link [Nirmalathas et al, 2010] e o consumo energético [Yang, Nirmalathas e Lim, 2012] [Carapellese, 2014]. Em ambos, as transmissões baseadas em DRoF possuem a vantagem da maturidade dos sistemas digitais para a construção de enlaces robustos, o que tem impulsionado o desenvolvimento de interfaces baseadas nesse tipo de transmissão, como o CPRI. Porém nota-se que há uma carência de trabalhos que explorem o potencial dos sistemas de rádio sobre fibra em cenários mais abrangentes que considerem tanto sistemas legados (G-PON, XG-PON RF-Vídeo Overlay) como novos padrões (TWDM-PON e WDM-PON) e por conta disso é o objeto de estudo principal dessa tese.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Para um melhor entendimento dos temas aqui tratados, esse documento foi organizado da seguinte forma:

No capítulo 2, são expostas as principais tecnologias de redes de acesso cabeadas e não cabeadas, com ênfase na evolução das redes PON

No capítulo 3, são apresentados os sistemas de rádio sobre fibra analógico e digital, bem como as suas principais características, arquiteturas e fontes de degradação. Nesse capítulo também apresentada a interface CPRI e a arquitetura C-RAN.

No capítulo 4, é apresentado o estudo de caso baseado em simulação no qual investiga-se as principais limitações dos cenários RoF e DRoF, e os principais aspectos de compatibilidade em cenário de coexistência.

O capítulo 5 apresenta o estudo de caso baseado em experimentação em que a ênfase é a investigação dos sistemas de rádio sobre fibra em cenários de coexistência.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas nessa tese, as principais contribuições e também os pontos que ainda serão investigados a partir dos estudos até então realizados.

2. REDES DE ACESSO

2.1. NÃO CABEADAS

As rede sem fio são geralmente classificadas em redes pessoais, locais e de longa distância, que se diferem principalmente pela área de cobertura máxima. Atualmente, dispositivos como *smartphone* e *tablets* dispõem de interfaces para todas elas.

As redes PAN (*Personal Area Networks*) possuem alcance máximo de 10 metros e como próprio nome sugere é voltado para computação pessoal. Nesta categoria os padrões mais utilizados são o *Bluetooth* e UWB (*Ultra Wide Band*). O *Bluetooth*, especificado pelo padrão IEEE 802.15.1 [IEEE 802.15.1, 2002], permite taxas de transmissão de até 1 Mbit/s , enquanto que o UWB [IEEE 802.15.3, 2003] fornece velocidade de aproximadamente 400 Mbit/s, sendo mais utilizado para a transmissão de serviços multimídias.

As redes LAN (*Local Area Network*) ou WLAN (*Wireless-LAN*) por sua vez, baseadas na família IEEE 802.11x, possibilitam o uso mais amplo de aplicações, além de atenderem uma quantidade maior de usuários. Do ponto de vista das operadoras, essa tecnologia é uma solução atraente para cobertura *indoor* principalmente de áreas com grande densidade de usuários como aeroportos, prédios comerciais e bairros residenciais. As redes 802.11x podem ser constituídas por meio de duas topologias: infraestrutura e *ad-hoc*. No modelo baseado em infraestrutura, cada estação da rede se comunica com um elemento central chamado AP (*Access Point*), desta forma, todo tráfego de rede entre as estações passa pelo AP que, por sua vez, pode estar integrado a uma rede local fixa. A topologia *ad-hoc* segue outra linha de aplicação, nesta arquitetura as estações comunicam-se diretamente entre si, não existindo um elemento centralizador.

Os padrões associados às WLANS operam na faixa de frequência entre 2.4 - 5.0 GHz e a capacidade de transmissão varia de acordo com a tecnologia. As especificações IEEE 802.11a [IEEE 802.11a, 1999] e IEEE 802.11g [IEEE 802.11g, 2003] suportam até 54 Mbit/s, enquanto que o padrão IEEE 802.11b [IEEE 802.11b, 1999] suporta até 11 Mbit/s. O padrão mais recente, denominado IEEE 802.11ac [IEEE 802.11n, 2009], trouxe melhorias

significativas, fornecendo taxas de transmissão de aproximadamente 1 Gbit/s na faixa de frequência de 5 GHz.

Já as redes WAN (*Wide Area Network*) desde o início foram associadas às operadoras de telefonia e têm evoluído constantemente ao longo do tempo. As primeiras gerações de redes móveis transmitiam apenas voz, dentre as quais a TACS (*Total Access Communication System*) foi bastante utilizada na Europa, enquanto a AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) nos EUA. Na 2ª geração, o GSM (*Global System for Mobile Communication*) e a CDMA (*Code Division Multiple Access*) foram as tecnologias mais populares na Europa e nos EUA, respectivamente. O CDMA trabalha com o conceito de espalhamento espectral e multiplexação por divisão de código que inicialmente foi criada para transmissão de voz, porém permitia a transmissão de dados em baixas velocidades. Já o GSM utiliza o conceito de comutação por circuito com TDM (*Time Division Multiple Access*) para transmissão de voz e o HSCSD (*High-Speed Circuit-Switched Data*) para transmissão de texto (SMS) (Korowajczuk, 2011).

O primeiro padrão a considerar de fato transmissão de dados foi o GPRS (*General Packet Ratio Service*), padronizado em 2001, suporta taxas teóricas entre 57 e 144 Kbit/s. Em 2002 surgiu a tecnologia EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) que alcança taxas de aproximadamente 384 Kbit/s. Ainda que tais tecnologias possibilitassem transmissão de dados, a funcionalidade principal ainda era a transmissão de voz [Korowajczuk, 2011].

Somente as tecnologias da 3ª geração passaram a incorporar canais apropriados para transmissão de dados. Dentro desse cenário, o GSM mudou para CDMA utilizando a tecnologia de transmissão WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) por meio do padrão UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [Korowajczuk, 2011]. Esse padrão inicialmente foi definido para transmissão de voz, porém com potencial para adição de canais otimizados de dados. Nesse contexto, surgiu o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) e HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) para transmissões em *downlink* e *uplink*, respectivamente. Ambas tecnologias foram consolidadas no HSPA (*High Speed Packet Data*) e HSPA+ (Release 7).

Tabela 2.1. Características das principais tecnologias de telefonia celular

Geração	2G			3G				4G
Tecnologia	GSM	GPRS	EDGE	WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE	LTE-A
Taxa (downlink)	14,4 Kbit/s	114 Kbit/s	384 Kbit/s	2 Mbit/s	7,2-14,4 Mbit/s	21/42 Mbit/s	100 Mbit/s	1 Gbit/s
Vazão (uplink)	-	-	470 Kbit/s	470 Kbit/s	5,76 Mbit/s	7,2/11,5 Mbit/s	50 Mbit/s	0,5 Gbit/s
Tamanho do canal (MHz)	0,2	0,2	0,2	5	5	5	20	100
Latência (ms)	500	500	300	250	~70	~30	~10	<5

A 4ª geração de redes móveis cuja solução mais adotada pelas operadoras é o LTE (*Long Term Evolution*), é especificada pelo 3 GPP (*3rd Generation Partnership Project*). O LTE surgiu dentro de um novo contexto, em que o principal requisito é a alta transmissão de dados e não mais de voz [Korowajczuk, 2011]. Essa tecnologia tem como vantagem em relação às tecnologias anteriores a alta eficiência espectral, as altas taxas de transmissão, o baixo atraso e a flexibilidade em termos de frequência e largura de banda. De acordo com a especificação, o LTE fornece taxas de 1 Gbit/s, podendo alcançar até 10 Gbit/s em cenários com múltiplos setores por antena na versão mais recente, denominada de LTE-Advanced (LTE-A).

A quarta-geração (4G) se encontra em fase de expansão, entretanto muito já se tem discutido a respeito da geração seguinte. O denominado 5G ainda não é um padrão oficial e seu escopo ainda está limitado às pesquisas e debates em alguns projetos como o METIS (*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*) cujo objetivo é introduzir essa nova geração no mercado até 2020 [METIS, 2014].

Diferente das gerações anteriores cujo foco principal foi o aumento da taxa de transmissão, a evolução do 5G tem se baseado no conceito de sociedade conectada e, por conta disso, tem como fatores importantes: maior número de dispositivos conectados simultaneamente, maior eficiência espectral, menor probabilidade de falhas, menor atraso, baixo custo de implantação, maior confiabilidade, melhor cobertura, entre outras. Em relação à cobertura e capacidade, a expectativa é de que os conceitos de *small cell* e MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) sejam utilizados em grande escala. O 5G também implicará na evolução contínua de diferentes arquiteturas de implementação apropriadas para diversos cenários. A expectativa é de que as soluções baseadas em 5G utilizem uma variedade de soluções e tecnologias como fibra, cobre, e outras.

2.2. CABEADAS

2.2.1. DSL

Tradicionalmente, as operadoras de telefonia e os provedores de serviço baseado em cabo forneciam apenas um serviço, telefone e TV, respectivamente. Entretanto, os provedores expandiram sua infraestrutura para fornecer serviços bidirecionais, como acesso a internet que inicialmente foi realizado por meio de conexões *dial-up*. Diante de um novo panorama no mercado, as operadoras de telefonia decidiram investir na infraestrutura baseada em par de cabo de cobre trançado existente para aumentar a largura de banda e ter competitividade no mercado. A solução amplamente adotada foi a ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e posteriormente ADSL2+ [Starr et al, 2003]. O ADSL, em curto alcance, tem capacidade de ofertar para cada usuário até 24 Mbit/s e 1 Mbit/s em *downlink* e *uplink*, respectivamente.

Inicialmente, tais tecnologias suportaram serviços oferecidos para os usuários dentro do contexto do “*triple-play*” (TV, Internet e Telefone). Entretanto, a largura de banda oferecida pelo ADSL se mostrou limitada diante do surgimento de novos serviços como HDTV, jogos *on line*, *cloud computing*, dentre outros. Para lidar com essa limitação, algumas operadoras seguiram a mesma filosofia do DSL, e para aproveitar a infraestrutura já existente passaram a utilizar novos padrões de DSL, como o VDSL. Apesar das altas taxas, o curto alcance do VDSL implica no uso de grande quantidade de DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexers*) com a CO (*Central Office*) por meio de fibra óptica. Por conta disso, o

VDSL demanda investimentos significativos para implementação, principalmente em termos energéticos uma vez que as DSLAMs são equipamentos ativos que necessitam ser alimentados por energia.

Diante disso, algumas operadoras passaram a investir em redes com alta capacidade de transmissão, com baixo custo de manutenção e operação. Nesse contexto, as redes PONs (*Passive Optical Network*) têm atraído bastante interesse visto que toda a rede de distribuição da CO não possui equipamentos ativos.

2.2.2. REDES ÓPTICAS

A simplicidade e o baixo custo são os aspectos mais importantes das redes PON (Kazovsky, 2011), nelas uma OLT (*Optical Line Terminal*), localizada na CO, é compartilhada através de um divisor passivo de potência (*splitter*) com diversas ONUs (*Optical Network Unit*) utilizando uma mesma infraestrutura de fibra. Dependendo da direção da luz incidente, o *splitter* divide o sinal numa dada taxa de fracionamento, e o distribui da OLT para as ONUs, ou das ONUs ao OLT [Effenberger, Kramer e Pfeiffer, 2007]. Toda a infraestrutura entre a OLT e a ONU é denominada ODN (*Optical Distribution Network*). Na Figura 2.1 é demonstrado a arquitetura de uma rede PON.

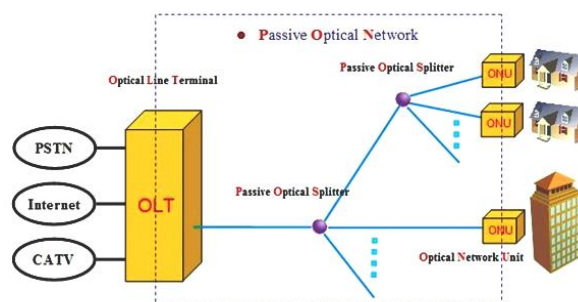


Figure 2.1: Arquitetura básica de uma rede PON.

Enlaces baseados em fibra óptica foram tradicionalmente usados no núcleo da rede e para redes metropolitanas. Tais redes geralmente utilizavam duas fibras, um para cada direção (*downlink* e *uplink*). Contudo, nas redes de acesso, por conta dos custos associados, tem-se adotado soluções com apenas uma fibra para implementação em diversas arquiteturas. Uma das opções é uso da arquitetura P2P (*Point-to-Point*) que utiliza em sua configuração fibras

dedicadas para conectar a OLT a cada ONU, conforme é ilustrado na Figura 2.2. Com uma fibra destinada para cada usuário, um alto grau de privacidade e taxas dedicadas são garantidas. Por outro lado, essa arquitetura além de possuir um alto custo devido ao preço associado a própria fibra, possui o problema de espaço devido à possibilidade de existir uma grande quantidade de fibra num mesmo duto subterrâneo.

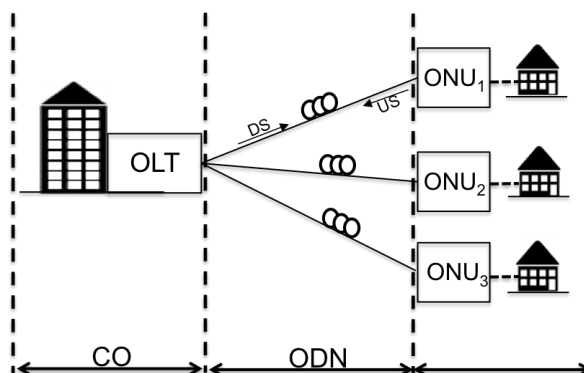


Figure 2.2: Ilustração da arquitetura *Point-to-Point*

Outra solução é uso de arquiteturas P2MP (*Point-to-Multipoint*) em que a conexão entre a OLT e a ONU pode ser compartilhada com uma mesma fibra, como demonstrado na Figura 2.3. Em P2MP, a configuração mais comum é baseada em árvore com *splitters* passivos entre a OLT e a ONU. Há também a possibilidade de configuração em modo estrela, no qual em vez de *splitters* passivos um dispositivo ativo é utilizado, todavia esta configuração não faz parte do escopo desse trabalho.

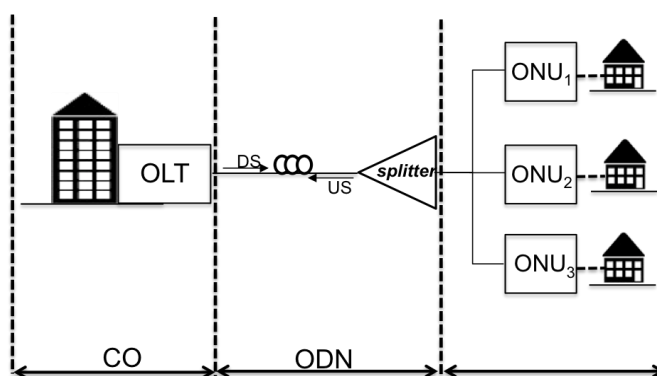


Figure 2.3: Ilustração da arquitetura P2MP

A arquitetura P2MP tem como vantagem a redução da quantidade de fibra e o compartilhamento dos custos da OLT, isso possibilita o uso de componentes de baixo custo

nas ONUs, visto que os componentes de maior complexidade estão localizados na OLT. O compartilhamento da OLT com diversas ONUs, torna o MAC (*Media Access Control*) mais complexo que o da arquitetura P2P. Além disso, a arquitetura P2MP requer uma alta largura de banda agregada para garantir a entrega de altas velocidades individualmente. Por exemplo, 100 Mbit/s garante entrega de velocidade de 100 Mbit/s na arquitetura P2P. Enquanto que na arquitetura P2MP, para 10 clientes, seria necessário pelo menos 1 Gbit/s para fornecer a mesma velocidade que o P2P.

Estudos relacionados ao custo, largura de banda, consumo de energia e cenários vem sendo realizados há algum tempo para diferentes arquiteturas [Sananes, 2005]. Contudo, para implantação em larga escala, as operadoras de telecomunicações têm optado por arquiteturas baseadas em P2MP, atualmente amplamente implementadas no mercado, particularmente nos Estados Unidos e na Europa.

2.3. EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS BASEADAS EM P2MP

2.3.1. TECNOLOGIA BPON

BPON (*Broadband PON*) foi a primeira rede PON padronizada pelo ITU-T em 1998. Inicialmente, esse padrão oferecia taxas agregadas de 622 Mbit/s em sentido *downlink* e 155 Mbit/s em *uplink* [ITU G.983.1, 1998]. Posteriormente, a especificação foi revisada e passou a suportar taxas de 1244 Mbit/s (*downlink*) e 622 Mbit/s (*uplink*) [ITU-T G.983, 2005]. A arquitetura do BPON é baseada em árvore, com capacidade de atendimento de até 32 ONUs por cada OLT, com alcance máximo de até 20 km. A faixa de espectro reservada era de 1490 nm para *downlink* e 1390 nm para *uplink*, que atualmente são utilizados pelo padrão GPON (Gigabit-PON). O BPON padrão também é conhecido como APON ou ATM PON devido à utilização do protocolo ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) na camada 2. Esse padrão não foi largamente utilizado, ficando restrito a algumas implementações da Verizon [Finn, 2008].

2.3.2. TECNOLOGIA EPON

O EPON (Ethernet PON) ou GE-PON (Gigabit EPON) faz referência ao protocolo 802.3ah do IEEE (*Institute of Electrical and Eleectronics Engineers*) [IEEE EPON, 2008]. O EPON foi especificado em Junho de 2004 e surgiu com uma alternativa aos padrões do ITU-

T. Esse padrão fornece taxas simétricas de 1 Gbit/s, com capacidade de atender entre 16 e 32 ONUs, que dependendo da potência utilizada pode atingir até 20 km. Além disso, é bastante utilizado no Japão e na Coreia do Sul onde foi largamente implementado.

2.3.3. TECNOLOGIA 10G-EPON

O 10G-EPON é uma atualização para o EPON, sendo que ambos os padrões podem coexistir na mesma ODN. Esse padrão fornece taxas assimétricas de 10 Gbit/s, ou simétricas com 10 Gbit/s *downlink* e 1 Gbit/s em *upstream*. As transmissões em 10 Gbit/s no sentido *downlink* utilizam a faixa de espectro de 1575-1580 nm, enquanto 10 Gbit/s e 1 Gbit/s se sobrepõem na mesma faixa. Por conta disso, quando as duas configurações estão presentes na mesma ODN, o TDMA (*Time Division Multiple Access*) é utilizado para evitar interferência. A especificação 10EPON, também referenciada como 802.3av, foi padronizada em Setembro de 2009 [IEEE 10EPON, 2009].

2.3.4. TECNOLOGIA G-PON

G-PON (*Gigabit-capable PON*) é o padrão sucessor do ITU-T BPON definido pela família G.984. O processo de padronização iniciou em março de 2003 com a definição das características gerais [ITU-T G.984.1, 2003] e da camada física [ITU-T G.984.2, 2004], continuando em 2004 com a especificação da camada de convergência [ITU-T G.984.3, 2004] e do gerenciamento da ONU [ITU-T G.984.4, 2004]. As principais modificações em relação ao BPON referem-se à oferta de 2.5 Gbit/s para *downlink* e 1.25 Gbit/s para *uplink* (opcionalmente 2.5 Gbit/s), também pela adoção de um modo de encapsulamento (GEM) que remove a obrigatoriedade do uso do protocolo ATM.

Na G-PON, a distância máxima entre OLT e a ONU é 20 km, quando os equipamentos ópticos operam na classe B+ (28 dB de balanço de potência) ou 30 km para classe C+ (32 dB de balanço de potência). Posteriormente, foram publicadas especificações a respeito da faixa de comprimento de onda para assegurar uma transição gradativa para os novos protocolos [ITU-T G.984.5, 2007]. Atualizações do padrão passaram a tratar do aumento do alcance, que pode ser atingido com o uso de amplificadores ópticos e regeneradores de sinal [ITU-T G.984.6, 2008]. Entretanto, a introdução desses elementos

ativos na distribuição remove algumas vantagens em termos de OPEX (*Operational Expenditure*), porém aumenta o CAPEX (*Capital Expenditure*) principalmente quando a implementação do G-PON é realizada em áreas com baixa densidade de usuários. Algumas alterações também foram feitas para garantir maior flexibilidade no alcance das ONUs, aumentando a distância máxima de 20 km para 40 km [ITU-T G.984.7, 2010]. Atualmente, esse é o padrão PON mais dominante na Europa e nos Estados Unidos (*Verizon FiOS*).

2.3.5. REDES ÓPTICAS DE PRÓXIMA GERAÇÃO

Os padrões GPON e EPON possibilitam uma boa relação custo benefício em termos de implantação e manutenção, entretanto não exploram o verdadeiro potencial de capacidade de transmissão das fibras ópticas e, num futuro próximo, não atenderão a contínua demanda por maior largura de banda. Esse fator tem impulsionado a padronização da próxima geração de redes PON altamente escalável denominada NG-PON (*Next-Generation PON*), cuja as principais características são: (i) alta largura de banda, (ii) elevado número de usuários, (iii) maior alcance, (iv) compatibilidade com os sistemas legados, e outros.

O grupo FSAN (*Full Service Access Network*) tem conduzido estudos no contexto das NG-PONs com a motivação de proporcionar soluções no nível das prestadoras de serviço para que haja uma migração gradativa entre as tecnologias da NG-PON com os sistemas legados (GPON e EPON) [FSAN, 2015]. A NG-PON é dividida em dois grupos, NG-PON1 e NG-PON2.

A NG-PON1 suporta coexistência com GPON na mesma ODN. Esta característica permite uma migração contínua de clientes individuais para NG-PON numa ODN sem que os serviços dos demais clientes sejam interrompidos. Por outro lado, na NG-PON2 a coexistência com GPON não é obrigatória, contudo, devido aos custos de implementação, acredita-se que ambas as tecnologias irão coexistir por um longo período de tempo, até que implementação dos novos padrões sobreponha os sistemas legados. A Figura 2.4 ilustra a evolução dos padrões PON da ITU-T.

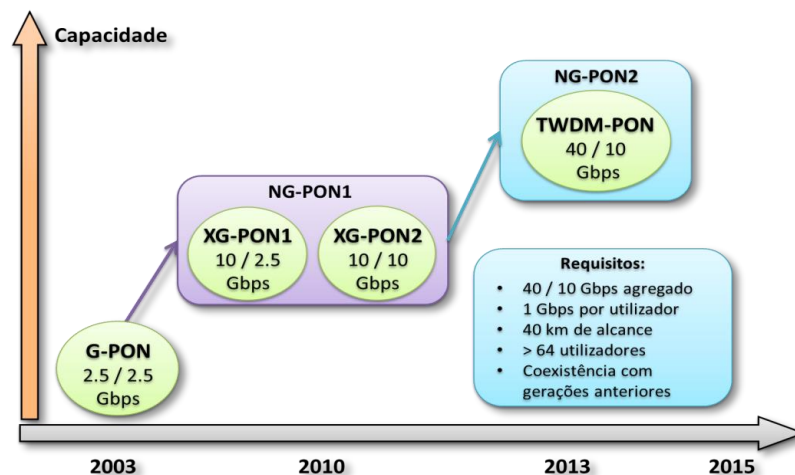


Figure 2.4: Evolução das redes PON especificadas pela ITU-T

A família XG-PON é o padrão adotado na NG-PON1. Essa família é dividida em dois grupos, XG-PON1 e XG-PON2, ambas são definidas pelo padrão G.987 (ITU G.987, 2010). O padrão suporta 10 Gbit/s em *downlink* e 2.5 Gbit/s em *uplink* no XG-PON1, e 10 Gbit/s simétrico em XG-PON2. Essa última versão ainda está em fase de debate devido aos custos envolvidos do laser em sentido *uplink*. Os padrões XG-PON podem coexistir com o G-PON na mesma ODN devido a definição de comprimentos de onda dedicados para cada padrão, conforme é ilustrado na Figura 2.5. Os ganhos em termos de taxa de transmissão ofertado pelo XG-PON traz também uma redução na utilização do espectro óptico. Além disso, a tecnologia XG-PON não é compatível com o 10G-EPON, porém algumas técnicas de convergência no nível de camada física têm sido objeto de discussão entre o IEEE e ITU-T.

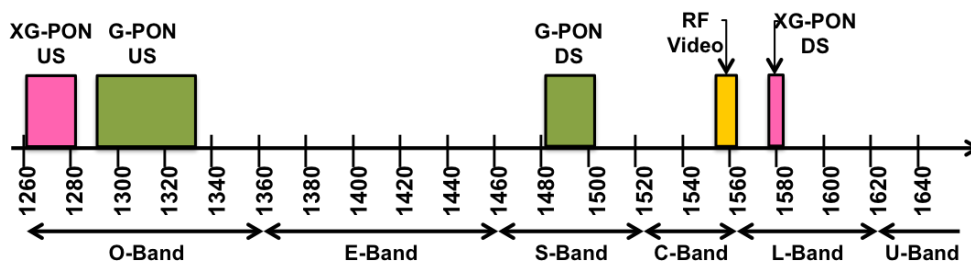


Figure 2.5: Plano de comprimento de onda de coexistência dos padrões G-PON e XG-PON

O NG-PON2 foi padronizado recentemente e suas principais funcionalidades encontram-se descritas no padrão G.989.1 [ITU-T G.989.1, 2013]. Esse padrão traz avanços significativos em relação aos padrões anteriores principalmente em relação a largura de

banda. O NG-PON2 suporta taxas agregadas de 40 Gbit/s por OLT, e opcionalmente de 80 Gbit/s.

Das diversas soluções candidatas para o NG-PON2, o padrão ITU-T G.989.1 define como primeira solução o TWDM-PON e, opcionalmente, PtP WDM-PON. O TWDM-PON é o acrónimo para *Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network* que, como o próprio nome sugere, é a combinação do TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). O sistema consiste na combinação de múltiplos canais XG-PON na mesma ODN, usando comprimentos de onda distintos. De forma resumida, o NG-PON2 oferece os seguintes requisitos:

- 4 a 8 pares de canais TWDM;
- 10 Gbit/s simétrico;
- 10 Gbit/s *downlink* e 2.5 *uplink*
- 2.5 Gbit/s simétrico
- Alcance mínimo de 40 km, com possibilidade de alcançar 60 km sem utilização de componentes ativos.
- Suporte a *splitters* de 1:256 utilizadores

O NG-PON2 também permite flexibilidade dependendo do cenário utilizado. O padrão suporta por exemplo:

- 40 Gbit/s de capacidade em *downlink* e 20 km de alcance com suporte para, pelo menos, 1:64 usuários.
- 10 Gbit/s de capacidade em *uplink* e 20km com suporte para, pelo menos, 1:64 usuários.
- Utilização de P2P WDM com capacidade de coexistir com outros sistema PONs.

No que diz respeito à alocação de comprimentos de onda, alguns fatores que podem influenciar na definição, visto que alguns componentes como lasers, receptores, amplificadores e padrões existentes possuem uma faixa de operação no espectro. O uso de SOAs (*Semiconductor Optical Amplifier*) não apresenta qualquer restrição particular uma vez

que podem operar em qualquer banda, no entanto, geralmente EDFAs (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*) operam apenas em banda C e L. Esses aspectos devem ser considerados sobretudo devido à necessidade do NG-PON2 aumentar o alcance e também suportar um maior número de usuários.

Deve-se analisar também o aspecto da coexistência, no qual o NG-PON2 irá operar em infraestruturas que possuem sistemas legados implementados (G-PON e serviços de vídeo) que possuem faixas de espectro reservadas. A primeira versão ITU-T G.989.1 não define a faixa de frequência a ser utilizada, contudo a solução mais natural é a utilização das bandas C e L para *downlink* e *uplink* por atender grande parte dos requisitos acima descritos.

A Figura 2.6 resume a evolução dos padrões acima apresentados. Os padrões definidos pelo IEEE estendem os protocolos Ethernet para as arquiteturas P2MP que tem como *background* a redes de computadores. Por outro lado, os padrões ITU-T estão mais próximos das operadoras de telecomunicações.

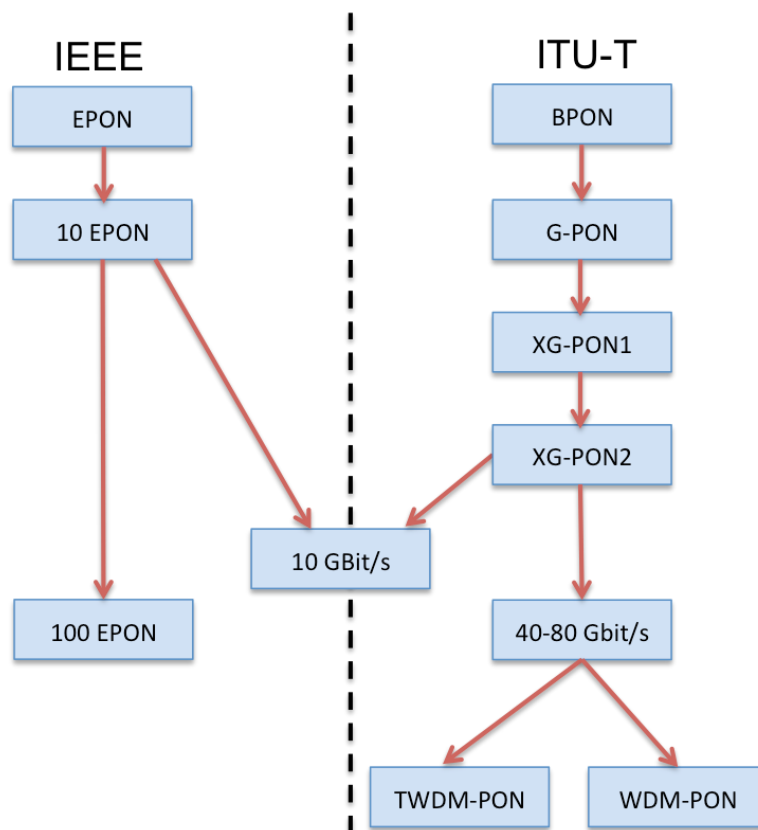


Figure 2.6: Evolução dos padrões de rede PON do IEEE e ITU-T

3. SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA

Os sistemas de rádio sobre fibra têm sido investigado desde a década de 90, entretanto o processo de padronização dessa tecnologia iniciou em 2014 pelo *Study Group 15*¹ do ITU-T. Como a especificação ainda se encontra em andamento, as definições ainda estão restritas a membros do ITU-T. Entretanto, os sistemas propostos nessa tese já consideram grande parte das especificações definidas no documento provisório.

O funcionamento de um sistema de rádio sobre fibra consiste na transmissão de um sinal elétrico de rádio frequência em um enlace óptico, por meio da modulação de uma portadora elétrica em uma portadora óptica. A Figura 3.1 ilustra a arquitetura básica de um sistema de rádio sobre fibra em que as informações são transmitidas da CO (*Central Office*) para a BS (*Base Station*) que em seguida é distribuído para pontos de acesso, residências, dispositivos móveis, dentre outros.

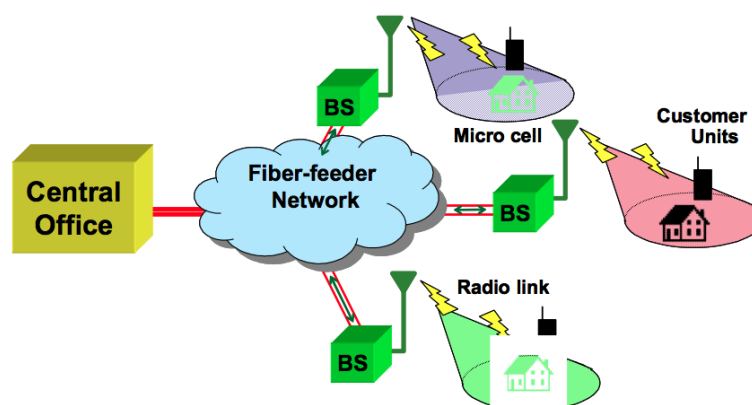


Figure 3.1: Arquitetura de um Sistema de Rádio Sobre Fibra

Os sistemas de rádio sobre fibra simplificam significativamente a BS uma vez que as funções de maior complexidade são processadas na CO, ficando a antena responsável por funcionalidades com menor processamento como recepção e amplificação do sinal. Além disso, sistemas de rádio sobre fibra apresentam outros benefícios [Ng'oma, 2005], tais como:

¹Study Group 15: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup55-201507-P/en>

- **Baixa atenuação:** Meios de transmissão como par de cobre e rádio apresentam altas perdas. Por outro lado, a baixa atenuação da fibra possibilita o alcance de sinais de rádio em longas distâncias, sem a necessidade do uso de repetidores. Nas fibras multimodo que são mais utilizadas pelos operadores, as perdas por atenuação são de aproximadamente 0.2 dB/km e 0.5 dB/km nas janelas de 1550 nm e 1300 nm, respectivamente [Keiser, 2003].
- **Largura de banda:** As fibras ópticas permitem elevadas taxas de transmissão, possibilitando o desenvolvimento de sistemas com oferta de dezenas de gigabits. [ITU-T G.989.1, 2013];
- **Imunidade a interferências eletromagnéticas:** As fibras são constituídas de materiais dielétricos, ou seja, não conduzem eletricidade. Essa característica torna os sistemas de rádio sobre fibra imunes a interferências eletromagnéticas (EMI – *Electromagnetic Interference*) [Keiser, 2003];
- **Custo reduzido:** A centralização das funcionalidades mais complexas na CO possibilita BSs mais simples, tornando possível a redução no consumo de energia. Considerando o cenário em que a operadora já dispõe de infraestrutura de rede, os custos de implementação podem ser reduzidos visto que os recursos de uma mesma CO podem ser compartilhados com várias BSs [Yan, Lim e Nirmalathas, 2011];
- **Oferta de múltiplos serviços:** A entrega de serviços baseados em sistemas de rádio sobre fibra independe de tecnologia o que possibilita a entrega tanto de novas tecnologias e serviços, quanto de sistemas legados. Dessa forma, podem coexistir na mesma rede serviços IEEE 802.11x, 2 G, 3G, 4G, entre outros;

O princípio fundamental de sistemas de rádio sobre fibra consiste na transmissão de sinais analógicos. Entretanto, a maturidade e a diminuição dos custos de componentes digitais permitem a construção de sistemas robustos. Nas seções abaixo, serão descritas as principais

características e limitações dos sistemas de rádio sobre fibra. O termo RoF (*Radio over Fiber*) será utilizado como referência para sistema analógico, já o termo DRoF (*Digitized Radio over Fiber*) será utilizado para referenciar sistemas digitais.

3.1. ANALÓGICO – ROF

Sistemas RoF são divididos em transmissor, meio de transmissão e receptor, conforme é ilustrado na Figura 3.2. Na transmissão da CO para a BS, uma portadora elétrica é modulada em uma portadora óptica e em seguida é transmitida na fibra com uso de um laser como fonte óptica. No receptor, após a detecção, o sinal é convertido novamente para o domínio elétrico e finalmente propagado pela antena para os receptores. A transmissão no sentido inverso, da BS para CO, segue o mesmo princípio de funcionamento.

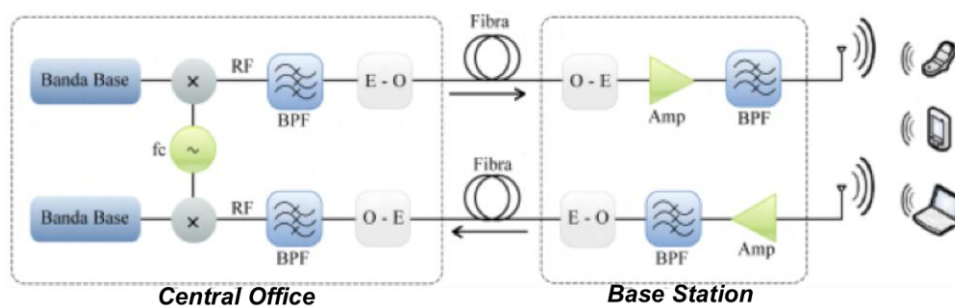


Figure 3.2: Arquitetura básica de um sistema RoF

A transmissão de sinais analógicos tem como principal vantagem a simplificação da antena que, dependendo da frequência transmitida, pode conter apenas amplificadores e receptores elétricos. Por outro lado, as transmissões analógicas são degradadas por uma série de ruídos introduzidos por filtros, amplificadores, fotodetectores, além dos efeitos na fibra. Entretanto, nessa tese foram considerados apenas os principais ruídos que degradam o desempenho de modo mais significativo, conforme é ilustrado na Figura 3.3. No domínio elétrico, as degradações estão associadas, principalmente, com as distorções de intermodulação e com o ruído térmico no receptor, porém foi considerado ainda o ruído introduzido no processo de filtragem do sinal [Yang, 2011]. Esses ruídos serão descritos na seção a seguir.

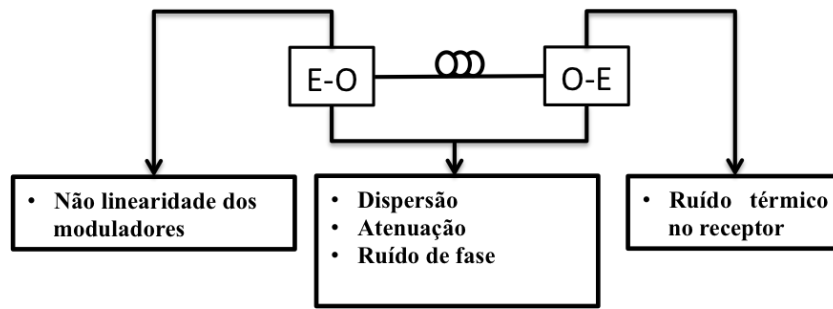


Figure 3.3: Principais fontes de degradação de um sistema RoF

3.1.1. FONTES DE RUÍDO NO EMISSOR

3.1.1.1. RUÍDO DO FILTRO

Geralmente, os filtros são utilizados para selecionar o sinal de interesse e eliminar as réplicas indesejadas, entretanto durante o processo de filtragem ruídos são adicionados por esse componente. Sob o pressuposto de que o ruído térmico introduzido num dispositivo de amostragem é um ruído branco gaussiano aditivo (*AWGN – Additive White Gaussian Noise*) com média zero e a densidade espectral de potência (*PSD – Power Spectral Density*) é uma constante N_0 , a relação sinal ruído (*SNR – Signal To Noise Ratio*) correspondente ao ruído introduzido por um filtro BPF (*Band Pass Filter*) pode ser obtida a partir da equação 3.1, em que P_s é a potência elétrica do sinal e B é a largura de banda do filtro [Yang, 2011].

$$SNR_{BPF} = \frac{P_s}{N_0 B} \quad (3.1)$$

3.1.1.2. DISTORÇÕES DE INTERMODULAÇÃO

Durante o processo de conversão E-O (*Eletro-Óptico*), o sinal analógico está associado a uma eficiência de conversão determinada pelo tipo de modulação utilizada. Em enlaces com modulação externa, as degradações de não linearidade são geradas principalmente por moduladores MZM (*Mach Zehnder Modulator*) dos quais se originam distorções harmônicas e de intermodulação que contribuem para a degradação global do enlace (Lee, 2013). A modulação direta, apesar de mais simples, apresenta como limitação a pequena banda de modulação e o elevado RIN (*Relative Intensity Noise*).

As distorções de intermodulação de segunda e terceira ordem são mais comuns [Kolner e Dolfi, 1987]. Geralmente seus produtos no espectro são obtidos por meio do *two-tone test*, conforme é demonstrado na Figura 3.4. As distorções de intermodulação de segunda ordem podem ser removidas com uso de filtros. Porém, a eliminação das de terceira ordem é mais problemática visto que elas estão localizadas próximo as frequências de interesse, como pode ser observado na linha tracejada na figura. Os produtos de terceira ordem são introduzidos em $2f_1-f_2$ e $2f_2-f_1$, próximo à banda do espectro do sinal transmitido.

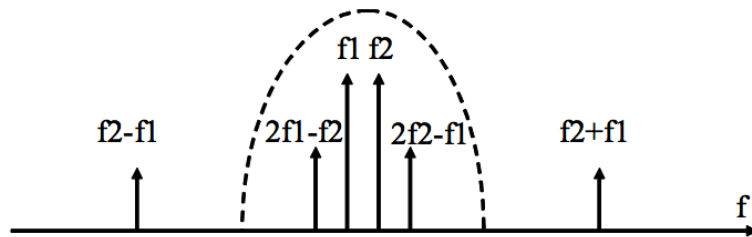


Figure 3.4: Ilustração do *two-tone test* para caracterização dos produtos de intermodulação de 2ª e 3ª ordem.

O método denominado ponto de intercepção tem sido o mais utilizado para caracterizar e mensurar o desempenho dos sistemas de rádio sobre fibra em função dessas distorções [Scott e Frobenius, 2013]. O produto da intermodulação de terceira ordem é dado pela equação (3.2), em que P_{in} é a potência do sinal, IP é o ponto de intercepção, IM é o produto da potência de intermodulação.

$$IM(dBm) = 3P_{in} - 2IP \quad (3.2)$$

A SNR das distorções de intermodulação podem obtidas a partir da equação (3.3)

$$SNR_{IM} = 2IP - 2P_{in} \quad (3.3)$$

3.1.2. DEGRADAÇÕES NO DOMÍNIO ÓPTICO

No domínio óptico, as degradações são decorrentes principalmente dos efeitos da atenuação e da dispersão cromática [Nirmalathas et al, 2010]. Esses efeitos provocam um impacto mais significativo em transmissões com altas frequências e elevadas taxas de bits, visto que esse tipo de cenário necessita de uma alta potência transmitida, o que pode levar o sistema a operar em zonas nas quais os efeitos não lineares são mais severos. Em fibras

monomodo, a dispersão cromática limita o alcance do enlace e pode originar decorrelação de fase, levando a um aumento do ruído de fase na portadora [Novak, 2004]. Já em fibras multimodo, a dispersão modal, além da distância, limita também a largura de banda do enlace. [Ng'oma, 2005].

A transmissão de sinais analógicos em RF (*Radio Frequency*) (RoF-RF), tem como vantagem a simplificação da estação base visto que não há necessidade de adição de componentes elétricos para conversão de sinal para frequências mais baixas, todavia, os efeitos da dispersão da fibra são mais severos em frequências mais elevadas, o que limita significativamente o alcance. Além disso, esse tipo de transmissão requer técnicas de detecção com alta velocidade devido às altas frequências transmitidas. Por outro lado, a utilização de sinais em IF (*Intermediate Frequency*) (RoF-IF) reduz significativamente os efeitos da dispersão. Em contrapartida, a implementação da BS, para incorporar essa transmissão, requer o uso de equipamentos elétricos adicionais como osciladores locais e filtros, diminuindo assim a simplicidade da antenna.

Na transmissão de sinais em BB (*Base Band*) (RoF-BB), o impacto da dispersão da fibra é insignificante, contudo a configuração da estação é mais complexa devido ao aumento de componentes elétricos na antenna, o que pode tornar o sistema menos competitivo quando comparado a enlaces tradicionais baseados em transmissão sem fio. A Figura 3.5 ilustra as diferentes arquiteturas para os sistemas RoF-RF, RoF-IF e RoF-BB.

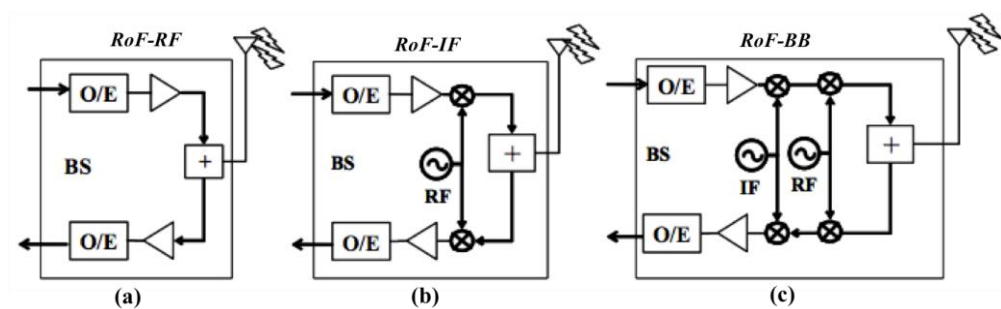


Figure 3.5: Modelos de BS para sistemas RoF, onde as letras representam as diferentes arquiteturas em: (a) Radio Frequency ; (b) Intermediate Frequency e (c) Base Band.

3.1.3. FONTES DE RUÍDO NO RECEPTOR

3.1.3.1. RUÍDO DO FOTODETECTOR

As degradações no receptor são originadas no fotodetector em função do ruído térmico dos circuitos elétricos e do ruído de *shot* devido à aleatoriedade de recepção dos fótons [Agrawal, 2010]. O ruído térmico pode ser obtido a partir da equação (3.4), em que I_d é a corrente escura (*dark current*), q é a carga do elétron, $\Delta f = \frac{B_{DR}}{2}$ é a largura de banda, B_{DR} é a taxa total transmitida, R_L é a resistência de carga para converter a corrente de saída para a voltagem do sinal e R corresponde a responsividade no fotodetector.

$$N_s^2 = 2q(I_d + I_p)\Delta f, I_p = RP_{in} \quad (3.4)$$

Já o ruído de *shot* pode ser calculado a partir da equação (3.5). Em que K_b é a constante de Boltzmann, T é a temperatura do fotodetector, F_n é a figura de ruído.

$$N_{th}^2 = \frac{4k_bTF_n\Delta f}{R_L} \quad (3.5)$$

Logo, o ruído total no fotodetector pode ser calculado a partir da equação (3.6).

$$N_p^2 = N_s^2 + N_{th}^2 \quad (3.6)$$

Para sistemas com detecção direta, o SNR do fotodetector pode ser obtido a partir da equação (3.7).

$$SNR_{fotodetector} = \frac{R^2 P_{in}^2}{\frac{4K_bTF_n\Delta f}{R_L} + 2qRP_{in}\Delta f} \quad (3.7)$$

3.1.4. SNR TOTAL DOS SISTEMAS ROF

A partir das fontes de ruído acima descritas, a SNR total do sistema RoF poder obtido a partir da somatória de todos os ruídos [Yang, 2011], como é apresentado em (3.8). A utilização do ruído introduzido pelos filtros na SNR irá depender da forma com que o sinal é transmitido, conforme ilustrado na Figura 3.5.

$$\frac{1}{SNR} = \frac{1}{SNR_{BPF} + SNR_{IM}} + \frac{1}{SNR_{fotodector} + SNR_{BPF}} \quad (3.8)$$

3.2. DIGITAL - DROF

O processamento digital de sinais revolucionou os sistemas de comunicações modernos, trazendo muitos benefícios relacionados principalmente à flexibilidade e confiabilidade das transmissões, imunidade a ruídos, dentre outros. Nesse contexto, a maturidade dos sistemas digitais têm possibilitado a implementação de arquiteturas de rádio sobre fibra mais robustos que se apresentam como uma alternativa aos sistemas analógicos.

Na transmissão digital, as degradações no domínio óptico que afetam os sistemas RoF são minimizados assim, os enlaces possuem melhor desempenho e alcance [Nirmalathas et al, 2010]. Além disso, a diminuição dos custos das ADCs e das DACs (*Digital-to-Analog Converters*) e os avanços nos requerimentos de *hardware* têm possibilitado a instalação desses componentes nas BS e não somente na CO. Dessa forma, o enlace do transmissor ao receptor passar ser realizada no domínio digital.

A Figura 3.6 ilustra a arquitetura básica de um sistema DRoF (Nirmalathas et al, 2010). No transmissor, o sinal elétrico é digitalizado por uma ADC com frequência de amostragem definida pelo teorema de Nyquist [Zayed, 1993]. Posteriormente, a sequência de bits em série modula uma portadora óptica e transmitida através da fibra. Do lado do receptor, após a detecção, o sinal é convertido para o domínio elétrico e em seguida convertido para analógico novamente por meio de um DAC. No estágio final, o sinal é propagado pela antena para os receptores. A transmissão no sentido inverso, da antena para a CO, segue o mesmo princípio de funcionamento descrito.

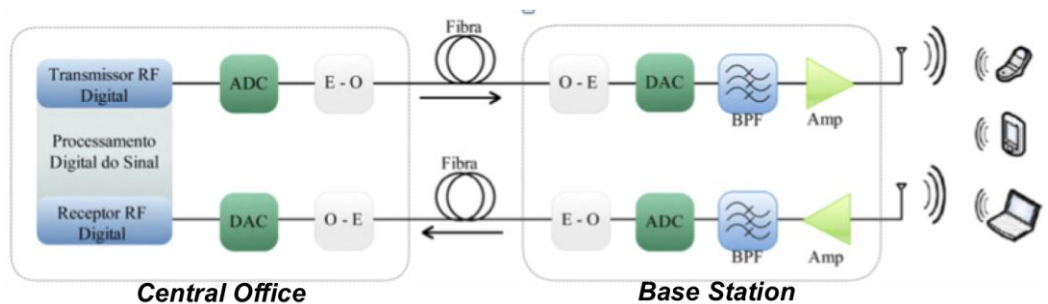


Figure 3.6: Arquitetura básica de um sistema DRoF

Semelhante às transmissões analógicas, o desempenho do sistema DRoF está relacionado com o impacto dos ruídos na transmissão. O sistema digital é afetado por uma série de ruídos, originados principalmente nas ADCs e no receptor, conforme é demonstrado na Figura 3.7. No transmissor, durante o processo de conversão analógico-digital na ADC, o sistema é afetado principalmente pelos ruídos de *jitter* e de quantização. No receptor, o sinal também é afetado pelo ruído térmico, conforme descrito no sistema RoF. Por outro lado, o ruído de *jitter* na DAC é menos significativo que na ADC e por conta disso não foi considerado nessa tese. Os principais ruídos serão descritos na seção a seguir.

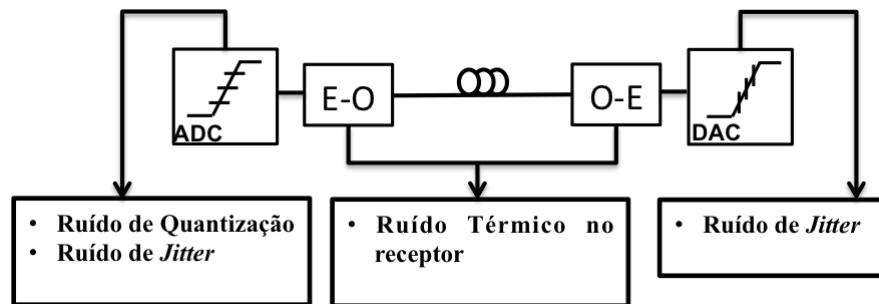


Figure 3.7: Principais fontes de degradação dos sistemas DRoF

3.2.1. FONTES DE RUÍDO NO EMISSOR

3.2.1.1. RUÍDO DO FILTRO

Nas transmissões DRoF, o ruído originado no processo de filtragem é o mesmo do sistema RoF. Portanto, o SNR do ruído do filtro pode ser obtido a partir da equação (3.1).

3.2.1.2. RUÍDO DE JITTER NA ADC

O ruído de *jitter* pode ser definido como um desvio temporal do sinal amostrado em relação ao instante de amostragem ideal [Azeredo, 2011]. A potência do sinal amostrado é dado pela equação (3.9), em que y é o sinal a entrada da ADC, t_n é o instante ideal de amostragem, $t_n - \tau_n$ é o instante de amostragem real, ε_x é o erro ocorrido em função do *jitter*, N_j é a potência do ruído durante um período de amostragem e n representa a ordem do sinal discreto amostrado.

$$N_j(n) = E[\varepsilon_\tau(n)]^2, \varepsilon_\tau(n) = y(t_n - \tau_n) - y(\tau_n) \quad (3.9)$$

Para um sinal sinusoidal $y = (t) = A \sin(2\pi ft)$ e $2\pi ft_n \ll 1$ no qual a amostragem é satisfeita por uma ADC normal, a média correspondente da potência de ruído pode ser aproximada a partir da equação (3.10), em que σ_τ é o erro quadrático médio do instante de amostragem.

$$\overline{N_j} \approx 2\pi^2 f^2 \sigma_\tau^2 A^2 \quad (3.10)$$

Considerando apenas o ruído de *jitter*, o SNR pode ser calculado a partir da equação (3.11) em que P_s é a potencia do sinal.

$$SNR_j = \frac{P_s}{N_j} \quad (3.11)$$

3.2.1.3. RUÍDO DE QUANTIZAÇÃO

O ruído de quantização como a diferença de voltagem entre o sinal de entrada e o sinal de saída. Esse erro é definido por $e_q(n) = y_q(n) - y(n)$, onde $y(n)$ é o sinal de entrada e $y_q(n)$ é o sinal quantizado. Em uma ADC ideal, o erro é uniformemente distribuído entre $-1/2$ e $+1/2$ do LSB (*Least Significant Bit*). O RMS de $e_q(n)$ é dado por (3.12), onde Q é a resolução de bits usados na ADC [Haykin, 2001].

$$RMS_{e_q(n)} = \sqrt{2^{Q-1} \int_{-1/2^Q}^{1/2^Q} e_q^2(n) = \frac{1}{\sqrt{3}2^Q} \quad (3.12)$$

A relação sinal ruído de quantização é dada pela razão entre o erro quadrático médio do sinal de entrada e de quantização. No caso de um sinal $y(n)$ uniformemente distribuído e com faixa dinâmica de -1 a +1 tem-se que o $RMS_{e_q(n)} = 3^{-1/2}$. Dai, e de 3.12, a SNR de quantização (SNR_Q) é representada por (3.13).

$$SNR_Q = 20 \log_{10}(3^{-1/2} \sqrt{3}2^Q) = 6.0206Q \quad (\text{dB}) \quad (3.13)$$

Para um sinal M-QAM, não uniformemente distribuído, onde M é a modulação de um sinal QAM, nessa tese 16 (16-QAM) o RMS é dado por (3.14).

$$\mathbf{RMS}_{x(n)} = \left(\frac{\sqrt{M} + 1}{3\sqrt{M} - 3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.14)$$

O SNR_Q é então obtido por (3.15). A equação denota que cada bit a mais na ADC, representa um ganho de aproximadamente, 6 dB no SNR.

$$\begin{aligned} \text{SNR}_Q &= 20 \log_{10} \left(\left(\frac{\sqrt{M} + 1}{3\sqrt{M} - 3} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{32^Q} \right) \\ &= 6.02Q + 10 \log \left(\frac{\sqrt{M} + 1}{\sqrt{M} - 1} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.15) \end{aligned}$$

3.2.2. DEGRADAÇÕES NO DOMÍNIO ÓPTICO

A transmissão em sistemas DRoF pode ocorrer em diferentes frequências. No modo mais simples, a transmissão é realizada com frequências em RF (DRoF-RF) em que a BS é composta basicamente pelas ADCs/DACs e amplificadores/receptores, como ilustra a Figura 3.8 (a). Por outro lado, esse tipo de implementação requer conversores com alta taxa de amostragem. Os conversores de alta frequência além de operar de forma instável, possuem custo elevado e alto consumo de energia. Além disso, as altas frequências de amostragem contribuem para a taxa total de bits transmitido na fibra que pode ser compreendida como o produto da frequência de amostragem da ADC e da quantidade de bits utilizados na digitalização do sinal.

A transmissão de sinais em IF (DRoF-IF) diminui os requisitos dos conversores com altas frequências de operação e, conseqüentemente, a taxa total na fibra. Entretanto, esse sistema requer componentes adicionais como osciladores locais e filtros na BS, os quais elevam os custos do sistema. O modelo de uma BS DRoF-IF é demonstrado na Figura 3.8 (b).

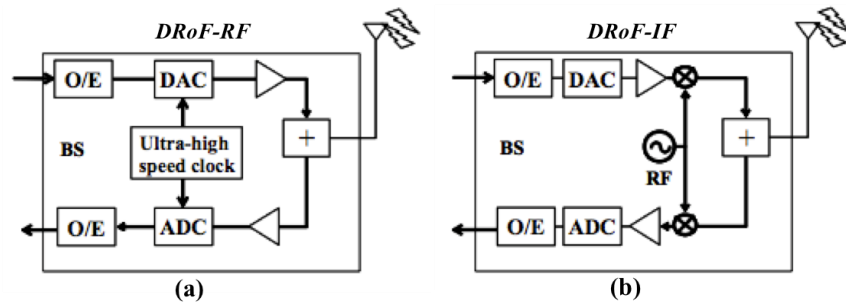


Figure 3.8: Modelos de BS para sistemas DRoF, nos quais as letras representam as diferentes arquiteturas: (a) *Radio Frequency* e (b) *Intermediate Frequency*.

3.2.3. RUÍDOS NO RECEPTOR

3.2.3.1. RUÍDO DO FOTODETECTOR

O ruído no fotodetector foi descrito anteriormente no sistema RoF. Portanto, o SNR do ruído do filtro pode ser obtido a partir da equação (3.7) na seção 3.1.3.1.

3.3. SNR TOTAL DOS SISTEMAS DRoF

A partir das fontes de ruído acima descritas, a SNR total do sistema DRoF é dado pela equação (3.16). A quantidade de ruído do processo de filtragem poderá variar de acordo com a arquitetura utilizada, entretanto nessa tese no sistema DRoF foi considerado a adição equivalente a um filtro no emissor e um no receptor, conforme é demonstrado na Figura 4.3 (seção 4.2.2).

$$SNR_{SNR_{Total}}^{-1} = SNR_{BPF}^{-1} + SNR_{Jitter}^{-1} + SNR_Q^{-1} + SNR_{fotodetector}^{-1} + SNR_{BPF}^{-1} \quad (3.16)$$

3.4. INTERFACE DE RÁDIO CPRI

As vantagens do sistema DRoF têm impulsionado a padronização de arquiteturas de antenas que incorporam interfaces de dados digitalizados para transmissão de sinais de rádio. A implementação dessas arquiteturas tem sido baseada em especificações como CPRI (*Common Public Radio Interface*) [CPRI, 2013] e OBSAI (*Open Base Station Architecture Initiative*) [OBSAI, 2006], sendo que o CPRI é solução mais adotada uma vez que sua implementação envolve operadoras de telecomunicações (NTT, France Telecom/Orange, Vodafone e outras) e fabricantes (Alcatel-Lucent , Samsung Smart LTE, Ericsson, entre

outras). O CPRI suporta várias taxas de transmissão que variam entre 614.4 Mbit/s e 10.137 Gbit/s.

De acordo com a especificação, o CPRI tem como objetivo principal a implementação de uma interface de rádio que independe de tecnologia (2G, 3G, 4G) e atua como link entre o REC (*Radio Equipment Control*) e o RE (*Radio Equipment*). A visão geral da interface é demonstrada na Figura 3.9 e possui o seguinte escopo:

1. Uma interface de rádio digitalizada estabelece uma conexão entre o REC e o RE, permitindo comunicação ponta-a-ponto e ponto-multiponto. Nesse último cenário, um mesmo REC pode ser compartilhado com diversas REs.
2. Informações de controle e gerenciamento, sincronização e dados dos usuários são multiplexados por meio da interface.
3. A especificação abrange as camadas 1 e 2:
 - a. A camada 1 oferece suporte tanto para interface elétrica (geralmente utilizado em BS tradicionais) quanto para interface óptica (para interfaces REC)
 - b. A camada 2 oferece funcionalidade que garantem flexibilidade e escalabilidade.

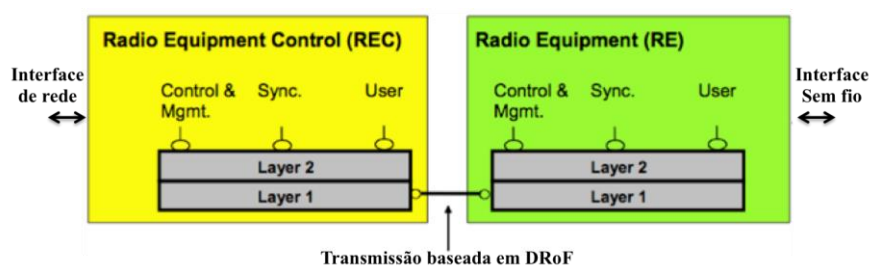


Figure 3.9: Arquitetura da interface CPRI

3.5. ARQUITETURA C-RAN

Tradicionalmente, nas arquiteturas de RAN (*Radio Access Network*) a unidade controladora BBU (*Base Band Unit*) e a unidade remota RRU (*Remote Radio Unit*) estão localizadas no mesmo espaço como é ilustrado na Figura 3.10 (a).

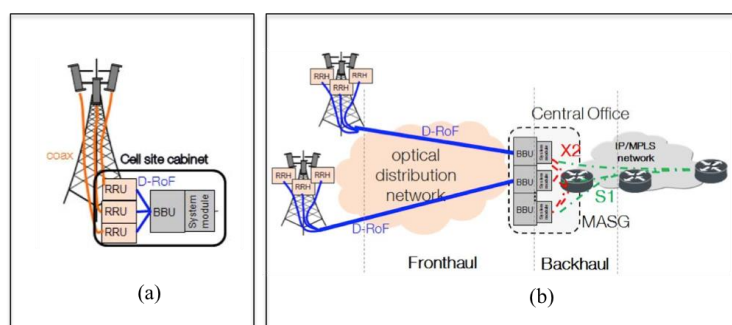


Figure 3.10:Arquiteturas de estações base, nas quais, as letras representam: (a) arquitetura tradicional RAN; (b) arquitetura atual C-RAN

Nessa arquitetura a conexão com a CO é realizada por meio de links de rádio. Entretanto, a utilização de sistemas de rádio sobre fibra tem modificado a arquitetura tradicional com a introdução de um novo cenário denominado C-RAN, em que C pode se referir a “Centralização” ou “Cloud”.

O conceito C-RAN foi introduzido pela operadora China Mobile [China Mobile, 2010] e sua implementação representa um rompimento com o paradigma da arquitetura tradicional, visto que a BBU e RRU estão localizados em locais diferentes, conforme é demonstrado na Figura 3.10 (b). Na arquitetura C-RAN, as funcionalidades complexas que requerem mais processamento são executadas na BBU localizada na *Central Office*, enquanto que a RRH, localizada na própria antena, é responsável basicamente pelas funcionalidades de recepção e amplificação do sinal. No *fronthaul*, a conexão entre a BBU e RRU é realizada por uma interface de rádio digital (CPRI ou OBSAI).

A arquitetura C-RAN permite reduzir os investimentos das operadoras em infraestrutura móvel. Primeiro, isso é possível devido à redução dos custos de implementação das RRHs em comparação com arquitetura tradicional. Segundo, o compartilhamento de uma mesma BBU com várias RRU também traz ganhos significativos em termos de consumo de energia que conseqüentemente diminui os custos de manutenção. Por conta dessas vantagens, as RRHs podem ser implantadas não somente para novas gerações de rede móvel (LTE e LTE-A), mas também para gerações já existentes na infraestrutura tradicional (2.5G e 3G). Dependendo da tecnologia, diferentes taxas são requeridas no *fronthaul* para conexão entre a BBU e o RRU. Considerando a interface CPRI, por exemplo, o *fronthaul* deve ser capaz de

suportar taxas de até 10.137 Gbit/s. Assim, os requisitos de largura de banda na ODN representam um dos maiores desafios na implementação do C-RAN.

4. ESTUDO DE CASO BASEADO EM SIMULAÇÃO

4.1. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Um problema comum na simulação de sistemas de rádio sobre fibra é a grande diferença de largura de banda dos sinais em domínios distintos. Por exemplo, uma transmissão óptica na janela de 1550 nm opera na banda de 193.4 THz, essa frequência possui a ordem de magnitude de 12 quando comparado a frequência unitária, Hertz. Enquanto que os sinais elétricos geralmente variam na faixa de MHz até 60 GHz, ou seja, em relação ao domínio óptico há uma diferença de magnitude 6 (10^6). De acordo com os critérios do teorema de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a largura de banda do sinal amostrado, portanto o tempo de amostragem deveria ser menor que $T_s > \frac{1}{2 \cdot 193.4 \cdot 10^{12}} \approx 2,6 \cdot 10^{-15} s$. Para simular 1000 bits a 1 Gbit/s, aproximadamente $4 \cdot 10^8$ amostras seriam necessárias, que exige recursos computacionais com alta capacidade de processamento.

A suíte *VPItransmissionMaker* [VPI, 2015] torna possível a simulação de diversos cenários de RoF, pois fornece uma variedade de representação de sinais que permite realizar simulações em diferentes domínios. A ferramenta dispõe de uma larga coleção de blocos como lasers, fotodetectores, moduladores, fibras, filtros elétricos, ADCs, DACs, entre outros. Além disso, o simulador permite a interação por meio de co-simulação, com códigos desenvolvidos em Matlab ou Python, de forma que novos modelos de dispositivos possam ser adicionados a simulação. Nesta tese, além da utilização do VPI para o desenvolvimento dos cenários baseados em simulação, pretende-se utilizar a característica de co-simulação para geração e tratamento dos sinais que serão transmitidos nos cenários experimentais.

4.2. CENÁRIOS

4.2.1. ROF-RF E ROF-IF

Os sistemas RoF foram investigados em dois diferentes cenários. O primeiro, RoF-RF, é baseado na transmissão de frequência central (*RF – Radio Frequency*), enquanto que o

segundo em frequência intermediária RoF-IF (*IF - Intermediate Frequency*). Ambos são ilustrados nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

No cenário RoF-RF, em sentido *downlink* da CO para a BS, um sinal 16-QAM com 5GHz de frequência é modulado externamente por um MZM que em seguida é transmitido numa *SSMF (Standard Single Mode Fiber)* por um laser DFB (*Distributed Feedback Laser*). No processo de recepção, o sinal é detectado por um APD (*Avalanche Photodiode*), convertido para o domínio elétrico e finalmente detectado pelo receptor QAM. O desempenho da transmissão é mensurada por meio do BER (*Bit Error Rate*) e do EVM (*Error Vector Magnitude*). Para o cálculo dessas métricas os cenários foram simulados com 2^{16} bits.

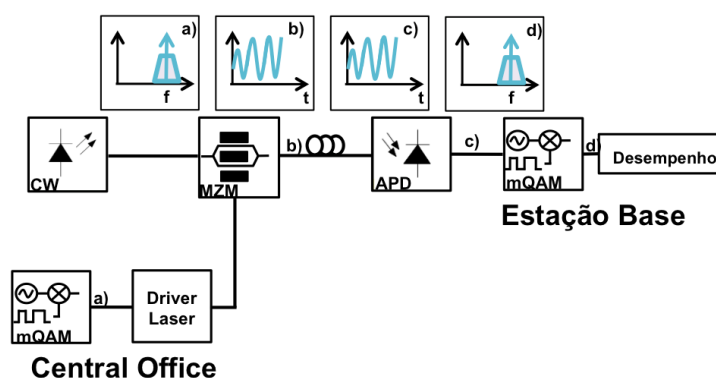


Figure 4.1: Cenários RoF-RF nos quais as letras representam: a) sinal em frequência central; b) sinal analógico no domínio óptico; c) sinal convertido para o domínio da frequência e d) sinal recuperado após a transmissão

Diferente do sistema anterior, o sistema RoF-IF utiliza a premissa de enviar o sinal em frequência intermediária (IF) como forma de minimizar os requisitos dos componentes elétricos e maximizar o desempenho. Como é ilustrado na Figura 4.2, o sinal em 5 GHz é convertido para uma frequência intermediária com auxílio de oscilador local deslocado em 4.6 GHz. Em seguida, a IF de 400 MHz é selecionada por um *BPF (Band Pass Filter)*. Os estágios seguintes, de modulação, envio e detecção do sinal, são semelhantes ao do sistema RoF-RF. Todavia, como descrito, a transferência é realizada em frequência intermediária. Na BS, após a detecção e conversão para o domínio elétrico realizado pelo APD, o sinal IF em 400 MHz é submetido a um oscilador em 4.6 GHz e, com auxílio de um BPF, a frequência original em 5 GHz é recuperada.

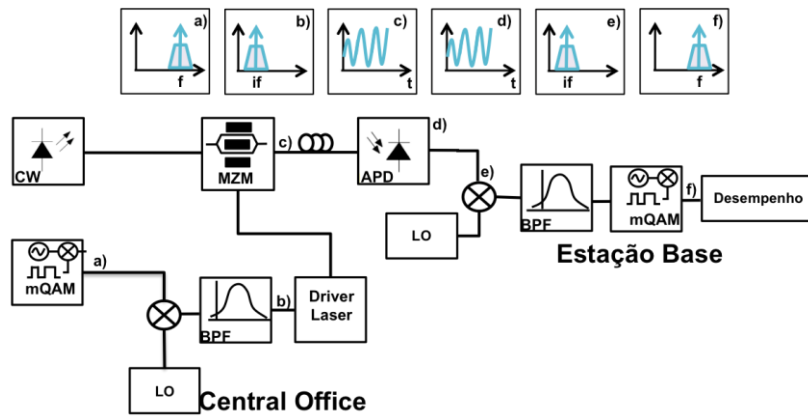


Figure 4.2: Figura Cenário RoF-IF onde as letras representam: a) o sinal na frequência central; b) sinal na frequência intermediária; c) sinal analógico no domínio óptico; d) sinal convertido para o domínio elétrico; e) sinal em frequência intermediária e f) sinal em frequência central recuperado

4.2.2. DRoF

Para o sistema DRoF foi considerada a conversão do sinal para frequência intermediária, visto que permite minimizar os requisitos da ADC. Com intuito de investigar o impacto do ruído de jitter em diferentes frequências, foram considerados dois cenários DRoF com IF em 200 MHz e 400 MHz. Os estágios de geração e conversão dos sinais, ilustrados por “a” e “b” na Figura 4.3, seguem o mesmo princípio de funcionamento do sistema RoF-IF, descrito anteriormente. No estágio de geração das IFs de 200 MHz e 400 MHz, os osciladores locais foram configurados com defasagem de 4.8 GHz e 4.6 GHz, respectivamente.

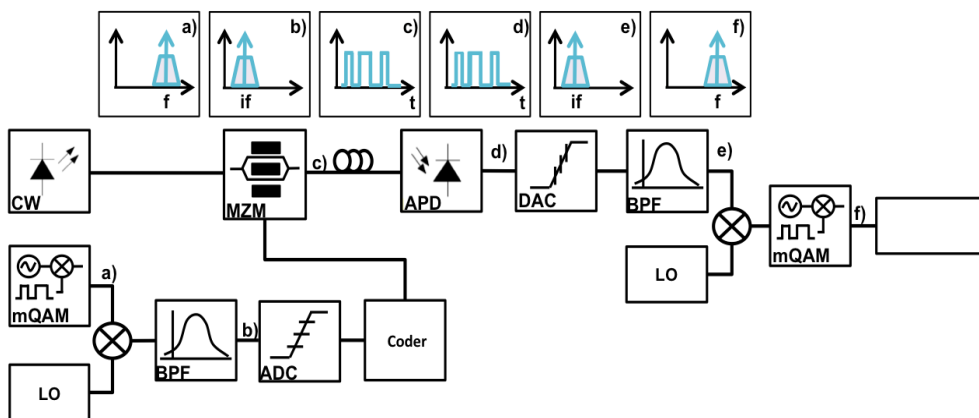


Figure 4.3: Cenário DRoF-IF onde as letras representam: a) o sinal na frequência central; b) sinal na frequência intermediária; c) sinal digital no domínio óptico; d) sinal convertido para o domínio elétrico; e) sinal em frequência intermediária e f) sinal em frequência central recuperado.

Após a filtragem da frequência intermediária, o sinal é submetido ao processo de digitalização por meio dos estágios de normalização, quantização e codificação, consecutivamente. O estágio de normalização tem como objetivo delimitar a amplitude máxima de operação da ADC. Desse modo os demais módulos, tanto do lado do transmissor quanto do receptor, irão operar dentro do limiar estabelecido evitando que amostras sejam recuperadas fora da faixa de operação estabelecida. Em seguida, no processo de quantização, o sinal contínuo é discretizado em níveis determinados pela quantidade de bits utilizados na ADC (2^{bits}). Ao final desse processo, o sinal tem uma nova representação, passando a ser discreto no tempo e na amplitude. O sinal, digitalizado, é agrupado e convertido para um sequência de bits em série por meio de um codificador NRZ (*Non Return Zero*) que, após ser modulado por MZM, é enviado na fibra por meio de um laser DFB.

Na BS, após a detecção pelo APD e a conversão para o domínio elétrico, o sinal é submetido ao processo inverso, ou seja, transformação para o formato analógico. Após a ADC, surgem várias réplicas do sinal transmitido ao longo do espectro dispostas nas zonas de *Nyquist*. As réplicas são afetadas por um fator do tipo seno cardinal cuja função de transferência é dada pela equação 4.1. nos quais FA e FA_ADC representam a frequência de amostragem do sinal QAM e da ADC, respectivamente. A FA do sinal QAM foi de 15 GHz, enquanto o do ADC foi de 1.25 GHz.

$$FT(ADC) = \text{sen}\left(\frac{FA}{FA_ADC}\right) = \frac{\text{sen}\left(\pi \frac{FA}{FA_ADC}\right)}{\left(\pi \frac{FA}{FA_ADC}\right)} \quad (4.1)$$

As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram a densidade espectral de potência após a subamostragem à saída da DAC obtida a partir da equação 4.1. Como pode ser observado, os nulos são dispostos em múltiplos inteiros da frequência de amostragem. Nota-se, também, que a atenuação do sinal, decorrente do comportamento da função seno cardinal, é maior nas frequências mais elevadas, por conta disso, o sistema DRoF com IF de 200 MHz possui maior SNR. Como as zonas de *Nyquist* mais próximas a zero possuem uma maior potência espectral, o filtro BPF foi configurado para extrair a primeira réplica na primeira zona de Nyquist, de acordo com a IF utilizada em cada cenário, 200 MHz e 400 MHz. No último estágio, utilizou-

se novamente um oscilador defasado em 4.8 GHz e 4.6 GHz para recuperar a frequência original (5 GHz).

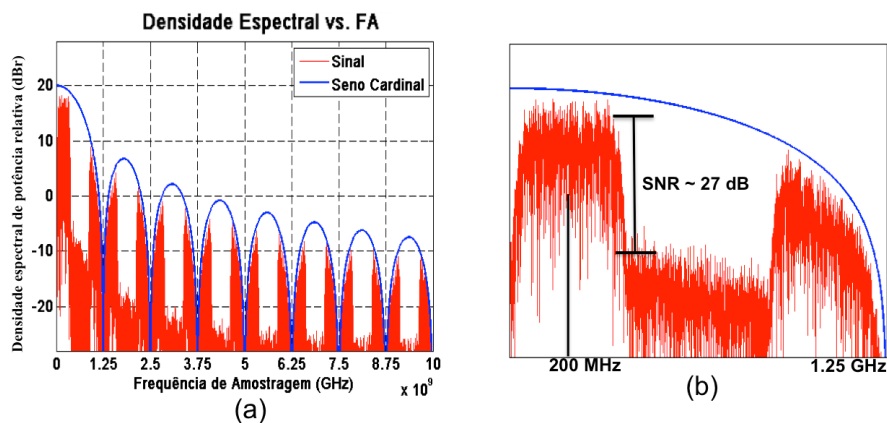


Figure 4.4: Espectro após a DAC: (a) função de transferência da DAC para com IF de 200 MHz e (b) visão ampliada da primeira zona de Nyquist.

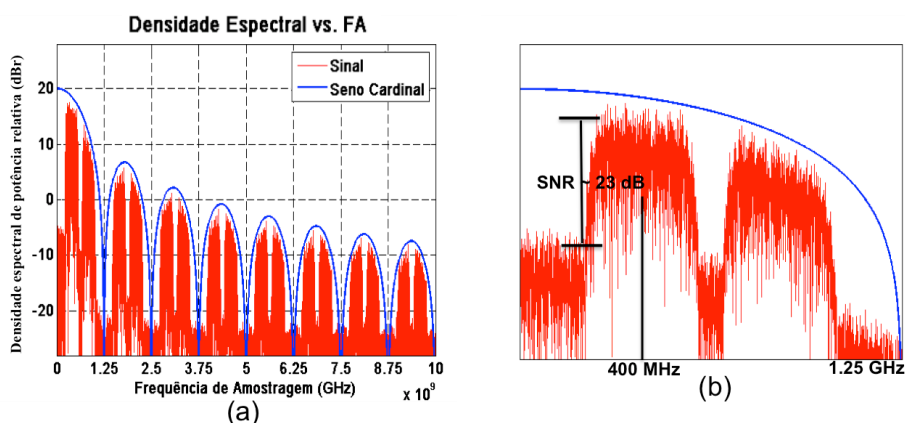


Figure 4.5: Espectro após a DAC: (a) função de transferência da DAC para com IF de 400 MHz e (b) visão ampliada da primeira zona de Nyquist.

4.2.3. CENÁRIO DE COEXISTÊNCIA

Na Figura 4.6 é demonstrada a arquitetura baseada no padrão ITU-T G.989.1 que foi proposta com o intuito de avaliar a aplicação dos sistemas de rádio sobre a fibra em cenários de coexistência. Os sistemas de rádio sobre fibra foram descritos nas seções 4.2.1 e 4.2.2. Por outro lado, os demais sistemas do cenário de coexistência (G-PON, XG-PON e TWDM) estão descritos no Apêndice B.

A CO consiste de sistemas legados formados por um canal G-PON e um canal XG-PON, e também duas OLTs NG-PON2 compostas por 4 canais TWDM-PON e 3 canais

WDM-PON. Todos os canais operam sobre a mesma ODN cuja compatibilidade é garantida por meio de uma interface de coexistência. Para manter o cenário mais próximo da realidade, foram consideradas perdas nos MUX (2 dB cada), na CEx (1 dB) e no *splitter* de 1:64 (21 dB). Como os sistemas de rádio sobre fibra ainda estão sobre padronização, considerou-se a sua aplicação sobre WDM uma vez que essa tecnologia mantém compatibilidade com o CPRI (DRoF) em termos de *delay* e *jitter*, e, além disso, suporta as altas taxas requeridas por novas aplicações.

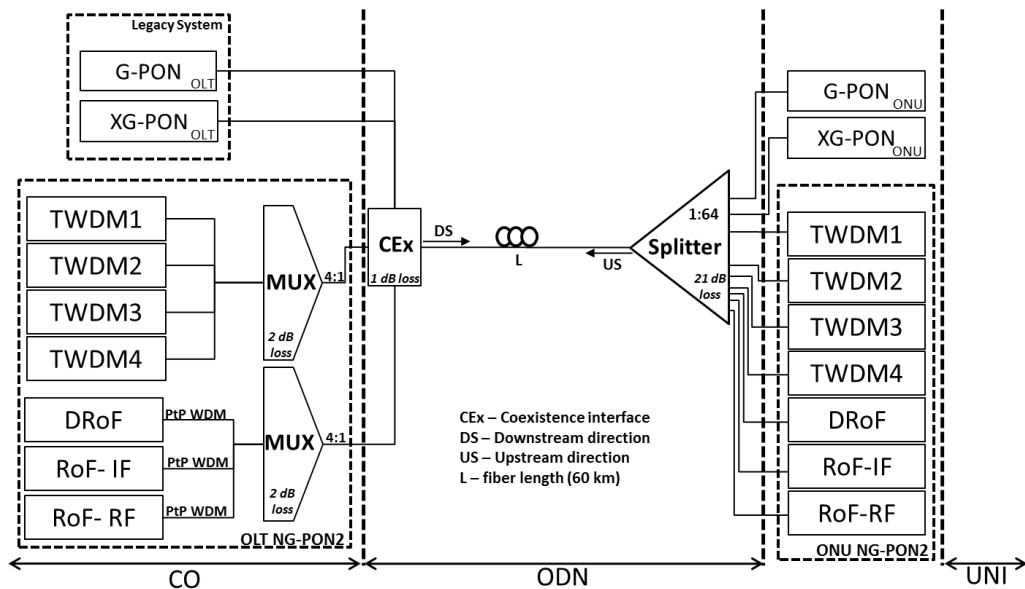


Figure 4.6: Arquitetura de coexistência baseada no padrão ITU-T G.989.1 (NG-PON2)

A coexistência entre os sistemas legados e os novos padrões trazem como desafios a disponibilidade na faixa de espectro óptico e o impacto que as tecnologias podem provocar nas outras. Entretanto, no estudo de caso baseado em simulação é investigado apenas aspectos de compatibilidade e validação de cenário propostos. Outros aspectos como impacto em função do espaçamento entre canais e potência, serão investigados no estudo de caso baseado em experimentos reais.

Na figura 4.7, está representado o plano de comprimento de onda utilizado no estudo de caso baseado em simulação. A faixa de espectro reservada para os sistemas legados seguem a padronização que define no sentido *downlink* comprimentos de onda entre 1260-1280 para XG-PON e 1290-1330 para G-PON. Enquanto para *uplink* 1575-1580 e 1480-1500, respectivamente.

A versão 2 do documento de padronização do NG-PON (G.989.2), ainda restrita ao grupo de trabalho, define as bandas C e L para operação do TWDM e WDM. A principal motivação para uso nessas faixas de espectro se dá em função da baixa atenuação na fibra e devido a região de operação de alguns componentes optoeletrônicos, como amplificadores EDFA, conforme descrito na seção 2.3.5 (Redes PON de próxima geração). Diante disso, os quatro canais TWDM foram configurados para operar entre 1530-1540 nm no sentido *uplink* (banda C), e 1595-1625 nm em *downlink* (banda L). Já os canais de rádio, em ambos os sentidos, foram configurados para operar na faixa de 1603-1625 nm (banda L), mesma faixa do espectro reservada para as transmissões P2P WDM, conforme ilustra a imagem do espectro compartilhado na Figura 4.7

Uma das potencialidades da NG-PON2 refere-se à flexibilidade quanto ao uso da tecnologia. No espectro compartilhado, o qual foi baseado a arquitetura ilustrada na Figura 4.7, as tecnologias TWDM-PON e WDM-PON coexistem na mesma rede, contudo há possibilidade de apenas uma delas operar. No contexto do C-RAN, por exemplo, a incompatibilidade do CPRI com o TWDM possibilitaria determinada operadora utilizar todo espaço do espectro reservado para NG-PON2 para aplicações sobre WDM, conforme é ilustrado no espectro estendido.

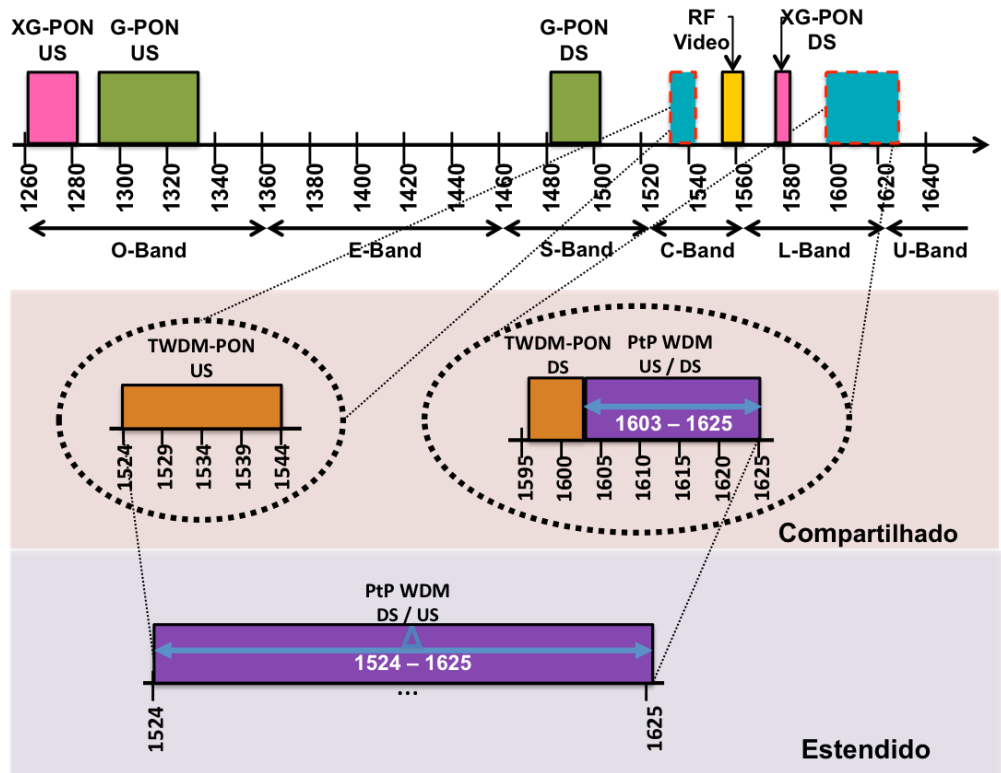


Figure 4.7: Plano de comprimento de onda utilizado que garante a compatibilidade dos sistemas legados e os novos padrões

4.3. RESULTADOS

4.3.1. CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS

Esta seção apresenta os parâmetros utilizados tanto nos cenários de rádio sobre fibra quanto no cenário de convergência que estão sumarizados na Tabela 4.1. Tais valores também foram utilizados para o cálculo do SNR total do sistema DRoF obtido a partir da equação (3.16), detalhada na seção 3.3. Tais valores foram baseados no trabalho proposto por [Nirmalathas et al, 2010].

Tabela 4.1: Configurações dos cenários de rádio sobre fibra

Parâmetro	Valor
Frequência da Portadora RF	5 GHz
Frequência da Portadora IF	200 MHz e 400 MHz
Potência do sinal	0 dBm
Taxa de Transmissão	1.25 Gbit/s
Formato de Modulação	16-QAM
Filtro RollOff	0.18 %
Razão de Extinção do MZM	20 dB
Largura de linha do Laser	10 MHz

Responsividade do APD	0.7 A/W
Largura de banda do BPF	400 MHz
Constante de Boltzmann	1.3806503e-23
Temperatura do APD	290 k
Figura de Ruído do APD	3 dB
Load Resistance	100
Carga do eletro	1.602176e-19
Ruído Gaussiano	1e-16 A/Hz ^(1/2)
RMS de Jitter	0.1e-12 até 2.1e-12

Além dos parâmetros descritos acima, na Tabela 4.2 estão sumarizados os parâmetros das configurações utilizadas no cenários de coexistência, descrito anteriormente na seção 4.2.3. Os valores das tecnologias PON (G-PON, XG-PON e NG-PON 2) foram baseadas nas suas respectivas padronizações. Na configuração do cenário, foram ainda consideradas as seguintes perdas: 21 dB no atenuador localizado no receptor para simular perdas equivalentes a um *splitter* de 1:64 utilizadores; 2 dB de perda em cada MUX e 1 dB na interface de coexistência.

Tabela 4.2: Configurações do cenário de coexistência

Tecnologia	Comprimento de Onda (nm)	Taxa de transmissão (por canal)	Potência Óptica Emitida (por channel)
G-PON	1310 (US), 1490(DS)	2.5 Gbit/s NRZ	+3 dBm
XG-PON	1270 (US), 1577 (DS)	10 Gbit/s NRZ	+6 dBm
TWDM-PON	1532-1535 (US), 1596-1602 (DS)	4 x 10 Gbit/s NRZ	+9 dBm
RoF-IF	1604(US), 1605(DS)	1.25 Gbit/s 16-QAM	+9 dBm
RoF-RF	1603(US), 1606(DS)	1.25 Gbit/s 16-QAM	+9 dBm
DRoF	1602 (US), 1606(DS)	1.25 Gbit/s 16-QAM	+9 dBm

4.3.2. DESEMPENHO DO CENÁRIO DROF

Primeiramente, serão discutidos as principais limitações do sistema DRoF. As análises foram realizadas em transmissão *back-to-back*. Visto que a resolução da ADC é um dos parâmetros mais importantes num sistema DRoF , investigou-se a sua influência no ruído de jitter, de quantização e o impacto na sensibilidade do sistema.

Na Figura 4.8 (a) e (b), é apresentado o impacto do ruído de jitter tanto para o cenário 1 (IF com 200 MHz) quanto para o cenário 2 (IF com 400 MHz). A transmissão de 200 MHz apresenta um desempenho superior ao de 400 MHz, visto que frequências mais baixas possuem maior potência espectral, conforme discutido na seção 4.2.2, ilustrado nas Figuras 4.4 e 4.5. Considerando o limite de EVM de 12.5% para modulação 16-QAM, observa-se que é necessário pelo menos 4 bits de resolução no cenário 1, todavia a partir de 5 bits todos os valores de *jitter* podem ser utilizados. Além disso, o cenário 2 é limitado para valores de *jitter* a partir de 0.3 pico segundos. Com base nessas observações, as próximas análises foram feitas considerando transmissão DRoF IF com 200 MHz.

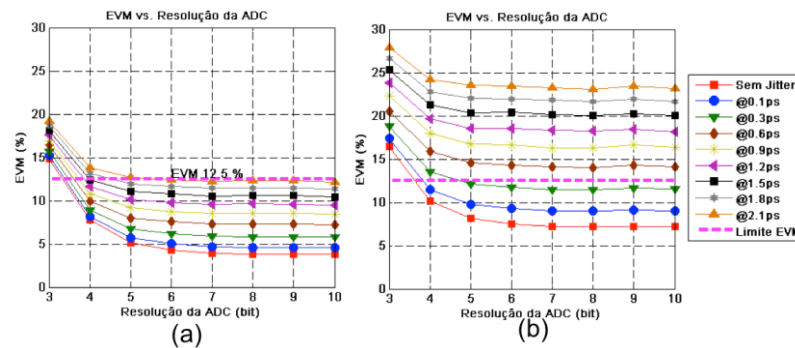


Figure 4.8: Impacto dos ruído de jitter para diferentes valores de bits de resolução da ADC onde as letras representam: (a) desempenho para DRoF com 200 MHz e (b) desempenho para DRoF com 400 MHz

Com intuito de analisar o quanto o ruído de quantização e jitter influenciam no desempenho, foi calculado o SNR para diferentes valores de bits de resolução da ADC como é demonstrado na Figura 4.9. O SNR teórico do ruído de quantização e o SNR total do sistema foram obtidos a partir das equações (3.15) e (3.16), respectivamente. Ambas estão descritos na seção 3.2. A partir dos resultados, observa-se que considerando somente o ruído de quantização teórico, o desempenho apresenta uma melhora linear com ganho de aproximadamente 6 dB para cada bit extra na resolução na ADC. Todavia, quando os demais ruídos são considerados, esse ganho decresce sobretudo em função do ruído de *jitter*.

Para ilustrar o impacto do *jitter*, o SNR foi calculado com e sem esse ruído. Sem o *jitter*, a diminuição erro de quantização é significativo até 7 bits, a partir desse valor o sistema passa ser limitado por outros ruídos, como ruído térmico do APD. Entretanto, percebe-se que a maior limitação do sistema é decorrente do ruído de jitter. A comparação das curvas do SNR total com o valor do ruído de *jitter* (linhas tracejadas) permitem verificar que os efeitos desse

ruído impactam significativamente o desempenho do sistema. Com *jitter* de 0.9 pico segundos, o sistema converge a partir de 6 bits, enquanto que para 1.5 pico segundos em 5 bits. A partir desses valores de bits, os ganhos do sistema estão relacionados com o erro de *jitter* e não mais com o ruído de quantização. Em outras palavras, o ruído de *jitter* torna-se predominante.

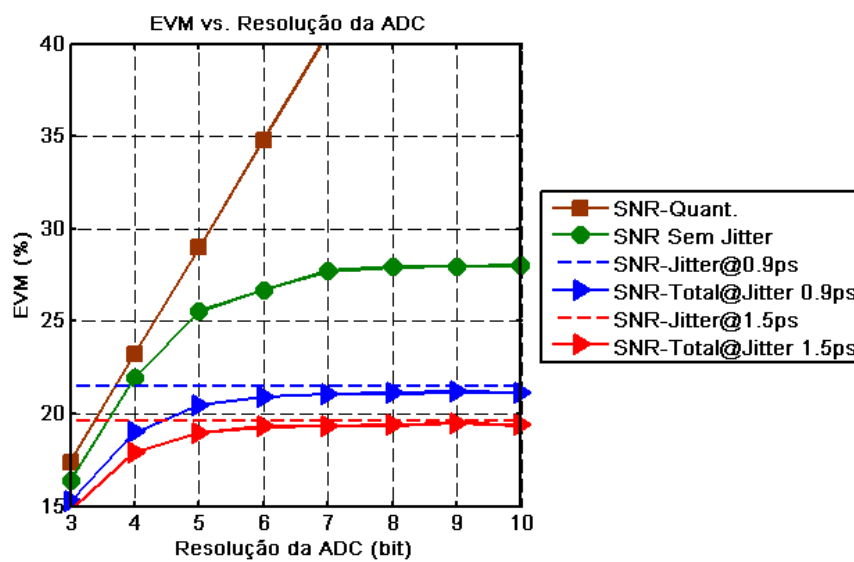


Figure 4.9: SNR para diferentes valores de bits de resolução da ADC.

O impacto da resolução de bits também foi mensurada por meio da sensibilidade do sistema em função do BER. Os resultados representados na Figura 4.10 enfatizam a análise anteriormente apresentada, ou seja, o aumento da quantidade de bits na ADC melhora significativamente o desempenho do sistema em termos da taxa de erros de bit, contudo esta melhoria é mais perceptível até 6 bits quando a BER alcança $10 \text{ E-}9$. A partir desse ponto, a melhoria é menos significativa.

É possível observar o impacto da ADC na taxa de transmissão. O valor em cada linha de resolução representa a taxa total na fibra decorrente do produto dos bits de resolução da ADC e da frequência de amostragem utilizada. Considerando a frequência de amostragem de 1.25 GHz, para 2, 5 e 8 bits a taxa total na fibra é de 2.5 Gbit/s, 6.25 Gbit/s e 10 Gbit/s, respectivamente. Ou seja, se por um lado o aumento da quantidade de bits melhora o desempenho do sistema em termos de BER, por outro lado há um aumento na taxa total de bits transmitido na fibra que impacta no nível de sensibilidade do sistema. Além disso,

observa-se que com apenas 4 bits de resolução o desempenho obtém uma taxa de erro abaixo do limite de BER 1E-3 [HOOD e TROJER, 2012].

Assim, pode-se considerar que um sistema com 4 bits de resolução representa a configuração ideal para um sistema DRoF visto que minimiza os ruídos de quantização conforme apresentado na Figura 4.9, e também representa uma taxa total suportada pelas redes NG-PON2.

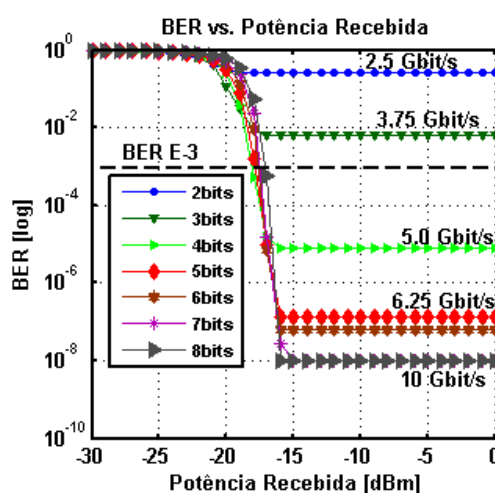


Figure 4.10: Impacto dos bits da ADC na sensibilidade do sistema onde os valores em cada linha representam a taxa total na fibra decorrente do processo de digitalização

A análise acima discutida evidencia que a relação entre a quantidade de bits e a frequência de amostragem torna a implementação do sistema DRoF um grande desafio, uma vez que as altas taxas impõem limites diante da capacidade dos enlaces ópticos e o aumento do custo do sistema em termos dos requisitos de hardware. Considerando cenários com múltiplos setores por antenas (ex. MIMO), esse desafio pode se tornar ainda maior, uma vez que a taxa total gerada será produto da quantidade de bits e da resolução da ADC com a quantidade de setores. Portanto, a relação de compromisso (*trade-off*) entre a resolução e frequência de amostragem da ADC precisa ser cuidadosamente investigado, especialmente no segmento *fronthaul* cuja viabilidade do sistema pode ser comprometida pela taxa requerida pelos sistemas DRoF.

4.3.3. DESEMPENHO DO CENÁRIO DE COEXISTÊNCIA

Esta análise é baseada na arquitetura descrita na Figura 4.6. Sendo assim, de acordo com os resultados discutidos anteriormente, para o cenário de coexistência, foi considerado um sistema DRoF com apenas 4 bits de resolução cujo desempenho será comparado com os sistemas RoF-RF e RoF-IF. As simulações realizaram-se em sentido *downlink* e *uplink*, considerando um enlace de 60 km de fibra SSMF. Também foram considerados 21 dB de perda referente a um *splitter* 1:64, 2 dB de perda para cada MUX e mais 1 dB na interface de coexistência. Os parâmetros utilizados estão sumarizados na Tabela 4.2, baseados no documento de referência do NG-PON2 (ITU G 989.1, 2013).

Na Figura 4.11, o desempenho do cenário de convergência foi mensurado por meio do BER em função do comprimento da fibra. Os resultados em *downlink* evidenciam que os sinais analógicos (RoF-RF e RoF-IF) são competitivos com o sistema DRoF para enlaces mais curtos. O sistema RoF-RF é o sinal mais suscetível às degradações decorrentes sobretudo da atenuação e da dispersão cromática, as quais impõem limites no alcance do enlace, conforme descrito na seção 3.1.2. Considerando o limite de BER $10E-3$, observa-se que o alcance máximo desse sistema é de aproximadamente 20 km. Já a transmissão em frequência intermediária (RoF-IF), minimiza os impactos das degradações que afetam as transmissões em RF, permitindo que o sistema tenha um alcance de aproximadamente 30 km. Por outro lado, observa-se que na transmissão do sistema DRoF os efeitos da atenuação e da dispersão são amenizados de modo que o desempenho se mantém constante até 30km e, a partir dessa distância, o sinal se deteriora bruscamente devido a predominância dos ruídos no receptor.

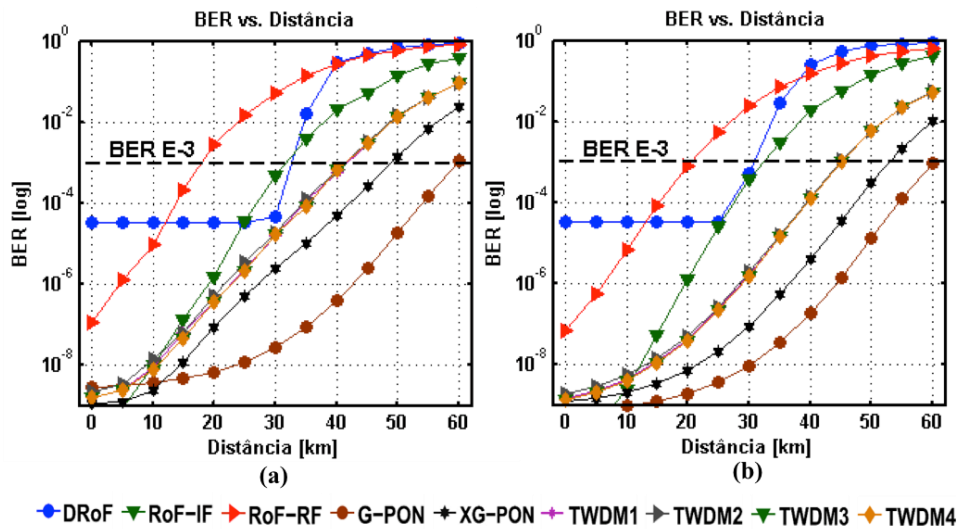


Figure 4.11: Cenários de coexistência onde as letras representam: (a) *downlink* e (b) *uplink*

Diferente do sistema DRoF, no qual a limitação principal é originada pelos ruídos de quantização, *jitter* e térmico, as demais transmissões PON têm o desempenho influenciado, em grande parte, pela dispersão cromática. Sendo assim, a transmissão do G-PON obtém um melhor desempenho em relação ao XG-PON e TWDM-PON principalmente pela baixa taxa de transmissão utilizada nesse padrão. Para ambos os sentidos, o G-PON alcança 60 km dentro do limite de BER considerado ($10E-3$).

Os padrões XG-PON e TWDM-PON apresentam um desempenho diferente, apesar de terem configurações semelhantes em termos de taxa de transmissão e potência emitida (10 Gbit/s e +6 dBm). Como é possível observar, para ambas as direções, a transmissão do XG-PON é significativamente melhor devido à diferença de potência recebida. Enquanto o XG-PON sofre 1 dB de penalidade da interface de coexistência, os canais TWDM-PON acumulam 2 dB de perdas introduzidas pelo MUX. No geral, ambas as transmissões sofrem degradações com a distância do enlace cujo desempenho é limitado sobretudo pela dispersão cromática, que causa um maior impacto em transmissões em altas taxas. Entretanto, nota-se que para ambas as direções, todas as tecnologias alcançam o limite de 40km, especificado pelo NG-PON2, sem qualquer amplificação. Isso evidencia que as potências utilizadas são suficientes para compensar os 29 dB de perdas acumuladas da atenuação da fibra (8 dB) e do *splitter* (21 dB).

A Figura 4.12 ilustra o desempenho das transmissões de rádio (RoF e DRoF) por meio do EVM em função do comprimento da fibra. Considerando o limite de EVM de 12.5% estabelecido pelo 3 GPP [3 GPP, 2015], percebe-se que o desempenho é semelhante à análise da BER. No sentido *downlink*, a transmissão RoF-IF e DRoF alcançam aproximadamente 30 km, enquanto a transmissão baseada em RoF-RF atinge apenas 15 km. O diagrama de constelação obtidos em 25 km ilustram a degradação do sinal nos diferentes sistemas. No sentido uplink os sistemas possuem desempenho semelhante ao downlink. Os diagramas de constelação ilustram as degradações para 30 km.

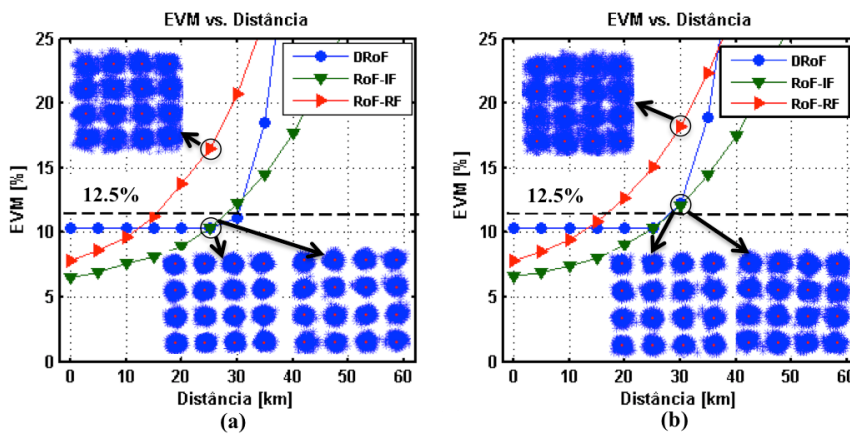


Figure 4.12: Desempenho dos sistemas de rádio sobre fibra em função do EVM onde as letras representam os sentidos: (a) downlink e (b) uplink

5. ESTUDO DE CASO BASEADO EM EXPERIMENTAÇÃO

5.1. AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os estudos experimentais realizados em laboratório. Nos estudos baseados em simulação, o objetivo foi a caracterização dos sistemas de rádio, a identificação das principais limitações e a compatibilidade com outras aplicações em cenários de coexistência. Por outro lado, os estudos experimentais têm como objetivo principal investigar o desempenho dos sistemas de rádio sobre fibra coexistindo com outras tecnologias. Nesse contexto são propostos dois cenários. No primeiro será investigado a influência da tecnologia NG-PON2 (baseada em canais TWDM) nos sistemas de rádio sobre fibra, enquanto que no segundo será avaliado o impacto da tecnologia RF-Vídeo Overlay [Coppinger e Piehler, 2006]. Ambos os cenários estão descritos na seção 5.2. Devido à indisponibilidade de equipamentos operando em banda L, a investigação foi conduzida considerando apenas banda C.

5.2. CENÁRIOS

5.2.1. COEXISTÊNCIA ENTRE SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA E TWDM

O cenário de coexistência dos sistemas de rádio com sinais TWDM, emulando a tecnologia NG-PON2, é ilustrado na Figura 5.1. A OLT é constituída por sistemas de rádio RoF (RoF-RF e RoF-IF) e DRoF, além da tecnologia TWDM. Devido às limitações de laboratório a coexistência dos sistemas RoF e DRoF com TWDM foram realizados de forma intercalada.

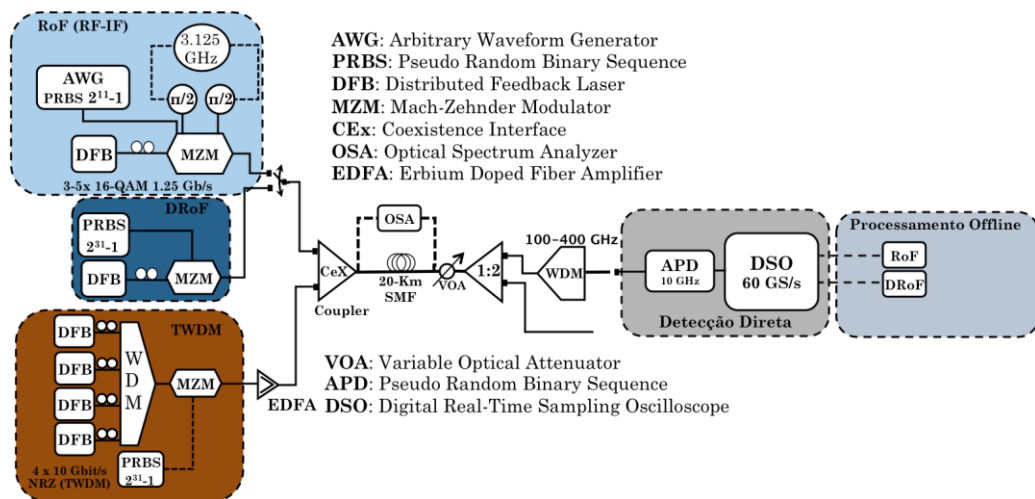


Figure 5.1: Cenário experimental de coexistência entre canais rádio e TWDM

Para os cenários RoF (RoF-RF e RoF-IF) foram avaliadas transmissões com 3 e 5 portadoras multiplexadas em SCM (*Subcarrier Multiplexing*). Os estágios de geração do sinal, conversão para IF e filtragem são realizados em *off-line* no VPI, seguindo o mesmo princípio de funcionamento descritos na seção 4.2.1. No apêndice A tais estágios estão descritos mais detalhadamente.

O transmissor RoF é constituído por um AWG (*Arbitrary Waveform Generator*), um laser DFB e um modulador MZM. No primeiro estágio os sinais são gerados no VPI e em seguida inseridos num AWG de 65 GS/s (Agilent M8195A) que possui largura de banda de 18 GHz. O sinal elétrico à saída do AWG, após ser modulado externamente por um Dual Drive MZM de 10 GHz é então transmitido por um laser DFB em fibra SSMF que possui atenuação 0.2 dB/km e dispersão de 16.5 ps/nm/km. Para os sistemas RoF foram propostos os seguintes cenários: RoF-RF com 3 e 5 portadoras e cenários RoF-IF com 3 e 5 portadoras. As portadoras são moduladas em 16-QAM, igualmente espaçadas em 50 MHz, com taxa de transmissão de 1.25 Gbit/s (por portadora) e filtro *raised cosine* com *roll-off* de 0.18%. Como cada portadora possui 1.25 Gbit/s, a taxa total agregada para os cenários com 3 e 5 portadoras é de 3.75 Gbit/s e 6.25 Gbit/s, respectivamente. A Figura 5.2 ilustra o espectro elétrico dos cenários RoF obtido em transmissão back-to-back, com potência óptica de recepção fixada em -14 dBm.

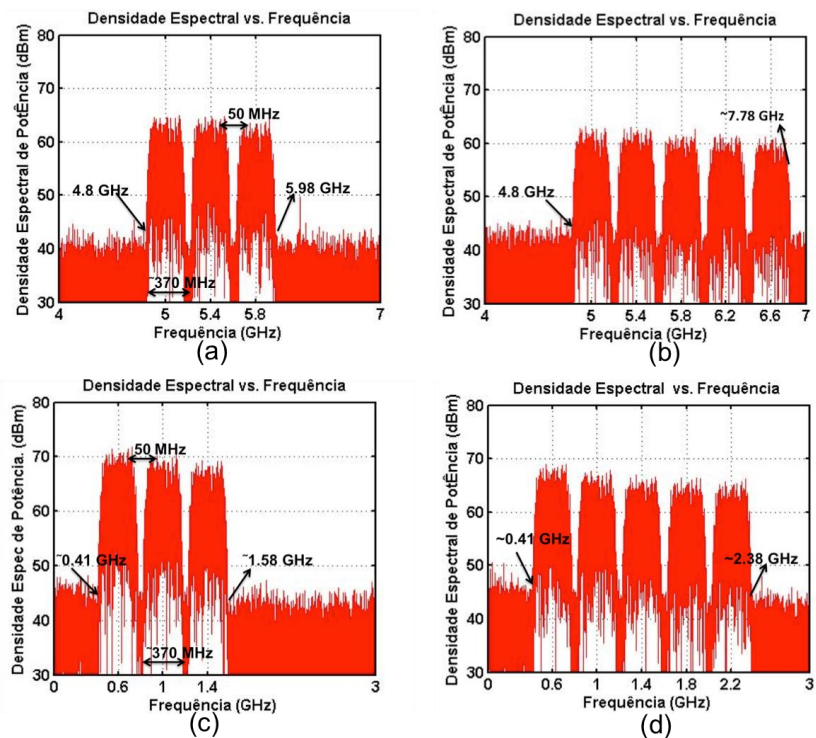


Figure 5.2: Espectro elétrico dos canais de radio sobre fibra analógico onde as letras representam: (a) 3 portadoras RF; (b) 5 portadoras RF; (c) 3 portadoras IF e (d) 5 portadoras IF

Nos cenários DRoF, o sinal gerado no VPI é inserido pelo *pattern generator*. O processo de transmissão é semelhante ao descrito anteriormente, ou seja, o sinal a saída do *pattern generator* é modulado externamente por um MZM e, em seguida, transmitido na fibra utilizando o laser DFB como fonte óptica. Os testes experimentais foram baseados nos estudos previamente realizados por simulação. Entretanto, devido à grande quantidade de experimentos necessários para reproduzir os cenários apresentados na seção 4.3.2 (Figura 4.8), optou-se por considerar sistemas DRoF com erro de *jitter* de 0.3 ps e 0.9 ps com 4, 5 e 8 bits de resolução da ADC com IF de 200 MHz. A taxa total na fibra decorrente do processo de digitalização para 4,5 e 8 bits é equivalente aos valores de operação do CPRI.

A OLT também é constituída tecnologia TWDM formada por 4 canais de 10 Gbit/s com formato de modulação NRZ, gerados por um *pattern generator*. A transmissão dos canais é realizada por 4 lasers DFB com espaçamento de 100 GHz na faixa de espectro entre 1549.51-1551.72 nm. A potência óptica dos canais TWDM é controlada por um amplificador EDFA.

Apesar do laboratório dispor vários comprimentos de fibra, os experimentos foram realizados em back-to-back e 20 km de fibra. Como a atenuação é um dos parâmetros críticos nos sistemas de transmissão óptica utilizou-se um VOA no receptor com intuito de avaliar o desempenho para diferentes níveis de potência recebida. Por fim, a ODN é constituída por um AWG (Arrayed Wave Guide Grating) que realiza a filtragem dos canais de rádio. O estudo da influência da tecnologia TWDM nos sistemas RoF e DRoF foram investigados com espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz, conforme ilustra o espectro óptico obtido a partir de um OSA no início da fibra, ilustrado na Figura 5.3.

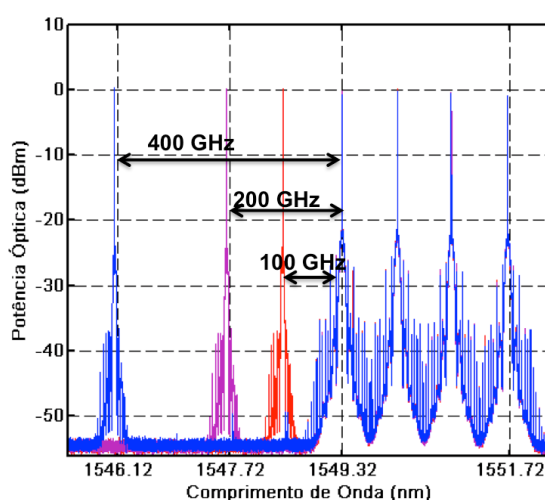


Figure 5.3: Espectro óptico dos canais TWDM e rádio a saída do OSA para espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz.

Após a detecção da transmissão através do APD, o sinal de rádio é capturado por um DSO (Digital Signal Oscilloscope – Tektronix DPO 720004B) com uma taxa de amostragem de 60 GS/s (largura de banda de 20 GHz). O processo de reconstrução, demodulação e avaliação do sinal são realizados em *off-line* com o uso combinado de VPI e Matlab. Neste último estágio, o VPI faz a leitura do sinal capturado pelo DSO por meio de uma interface de co-simulação cuja estrutura interna consiste de um código em Matlab. As demais etapas de reconstrução seguem o mesmo princípio de funcionamento descritos nas seções 4.2.1 e 4.2.2.

5.2.2. COEXISTÊNCIA ENTRE SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA E RF-VIDEO OVERLAY

Na Figura 5.4 é ilustrado o cenário de coexistência dos sistemas de rádio com a tecnologia RF- *Video Overlay*. Este cenário é semelhante ao apresentado na seção 5.2.1., no qual o processo de geração e recepção dos canais de rádio sobre fibra segue o mesmo princípio de funcionamento descrito anteriormente. Por outro lado, transmissão de vídeo é constituída por um sinal que possui canais entre 180-780 MHz.

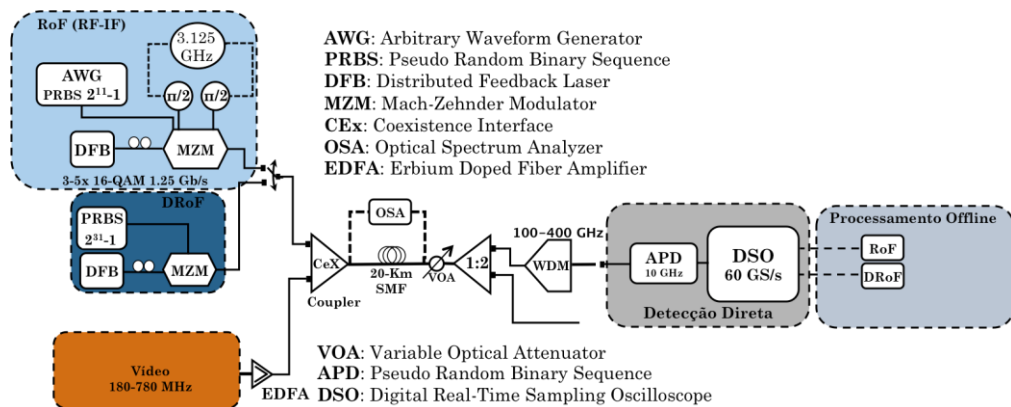


Figure 5.4: Cenário experimental de coexistência entre canais rádio e RF-Video Overlay para espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz.

Para o estudo de coexistência também foram considerados espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz entre os canais de rádio e a transmissão de vídeo. Na Figura 5.5 é ilustrado o espectro referente aos espaçamentos entre os canais de rádio sobre fibra e vídeo obtidos a partir do OSA.

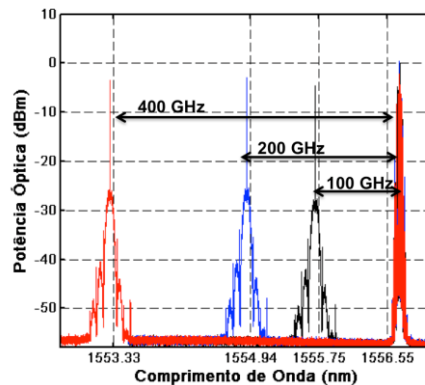


Figure 5.5: Espectro óptico dos canais de rádio e RF-Video Overlay a saída do OSA

Na Figura 5.6 é ilustrado o experimento de coexistência configurado no laboratório.

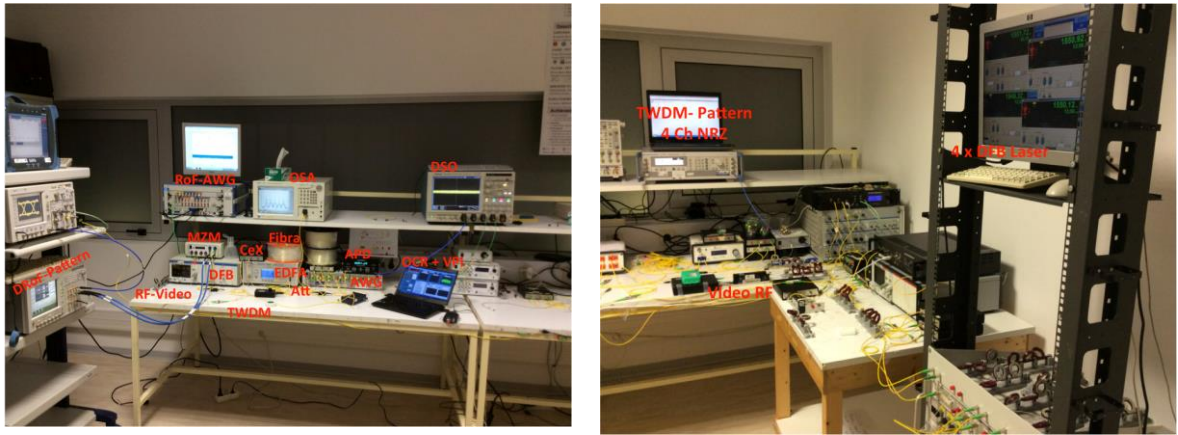


Figure 5.6: Imagens da instrumentação utilizada no experimento de coexistência

5.3. RESULTADOS

5.3.1. CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS

A Tabela 5.1 resume os parâmetros utilizados na configuração dos cenários descritos nas seções 5.2.1 e 5.2.2. Como descrito anteriormente, o experimento foi baseado no uso combinado do simulador VPI e equipamentos de laboratórios. O desempenho dos cenários é avaliado por meio do EVM, calculado a partir de 16 transmissões independentes com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na geração e reconstrução do sinal no VPI.

Configurações utilizadas no VPI	
Parâmetro	Valor
Frequência dos canais RF	5-6.6 GHz
Frequência dos canais IF	0.6-2.2 GHz
Taxa de Transmissão	1.25 Gbit/s
Formato de Modulação	16-QAM
Largura de banda do sinal	~0.370 MHz
Espaçamento entre as subportadoras	50 MHz
Filtro RollOff	0.18
RMS de Jitter	0.3 ps e 0.9 ps
Resolução de bits da ADC	4, 5 e 8 bits
Configurações utilizadas nos equipamentos	
Frequência do canal de Vídeo	180-740 MHz
Taxa de transmissão dos canais TWDM	10 Gbit/s (por canal)
Razão de Extinção do MZM	20 dB
Potência emitida pelos canais de rádio	3 dBm
Potência emitida pelos canais TWDM	3-11 dBm (por canal)
Potência emitida pelo canal de Vídeo	16 dBm
Largura de linha do Laser	< 100 kHz
Responsividade do APD	0.7 A/W
Distância da fibra	20km
Atenuação	0.2 dB/km
Dispersão	16 ps/nm/km

Os valores dos comprimentos de onda utilizados nos cenários de coexistência estão resumidos nas Tabelas 5.2 e 5.3. Como descrito anteriormente, os sistemas de rádio sobre fibra (RoF e DRoF) foram utilizados de forma intercalada, por conta disso ambos foram configurados com o mesmo comprimento de onda.

Tabela 5.2: Comprimento de onda utilizado no cenário de coexistência entre TWDM e rádio sobre fibra.

Comprimento de onda dos canais TWDM				Espaçamento dos canais de rádio sobre fibra para os canais TWDM		
Canal1	Canal2	Canal3	Canal4	100 GHz	200 GHz	400 GHz
1551.72 nm	1550.92 nm	1550.12 nm	1549.32 nm	1548.51 nm	1547.72 nm	1546.12 nm

Tabela 5.3: Comprimento de onda utilizado no cenário de coexistência entre RF-Vídeo Overlay e rádio sobre fibra

Comprimento do canal de Vídeo	Espaçamento dos canais de rádio sobre fibra para os canais TWDM		
1556.55	100 GHz	200 GHz	400 GHz
	1555.75 nm	1554.94 nm	1553.33 nm

5.3.2. ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS SISTEMAS DE RÁDIO SOBRE FIBRA

Como a atenuação é um parâmetro crítico, especialmente nos sistemas de rádio sobre fibra, inicialmente investigou-se o desempenho dos sistemas RoF (RoF-RF e RoF-IF) e DRoF em back-to-back e 20 km de fibra. Conforme descrito na Tabela 5.1, a potência óptica emitida para os canais de rádio sobre fibra foi fixada em 3 dBm. Por outro lado, a potência no receptor foi atenuada entre -14 e -25 dBm com auxílio de um VOA.

5.3.2.1. DESEMPENHO DOS CENÁRIOS DROF

Na Figura 5.7 é demonstrado o EVM em função da potência óptica recebida obtido a partir das transmissões em back-to-back e 20km para os cenários DRoF digitalizados com 0.3 e 0.9 ps. As barras verticais identificam o intervalo de confiança.

Semelhante aos resultados apresentados na Figura 4.8 (seção 4.3.2), as transmissões com ruído de *jitter* de 0.3 ps apresentam melhor desempenho. Com 4 bits de resolução, por exemplo, o EVM mínimo para 0.3 ps é 9% conforme pode ser observado em “a” e “b”, enquanto que para a 0.9 ps é de 11% (“c” e “d”). Como era esperado, a degradação do EVM

diminui com o aumento da quantidade de bits da ADC devido à diminuição do ruído de quantização.

É importante destacar que o EVM se mantém constante até determinado valor de potência recebida, e depois degrada rapidamente. Os resultados evidenciam que os efeitos da atenuação são minimizados até -21 dBm para 4, 5 e 8 bits, não se observando nenhuma degradação como é destacado pelos retângulos em “a”, “b”, “c” e “d”. Todavia, a partir de -22 dBm o desempenho do sistema passa ser limitado pelo ruído térmico no receptor que se torna mais crítico com a diminuição da potência do sinal.

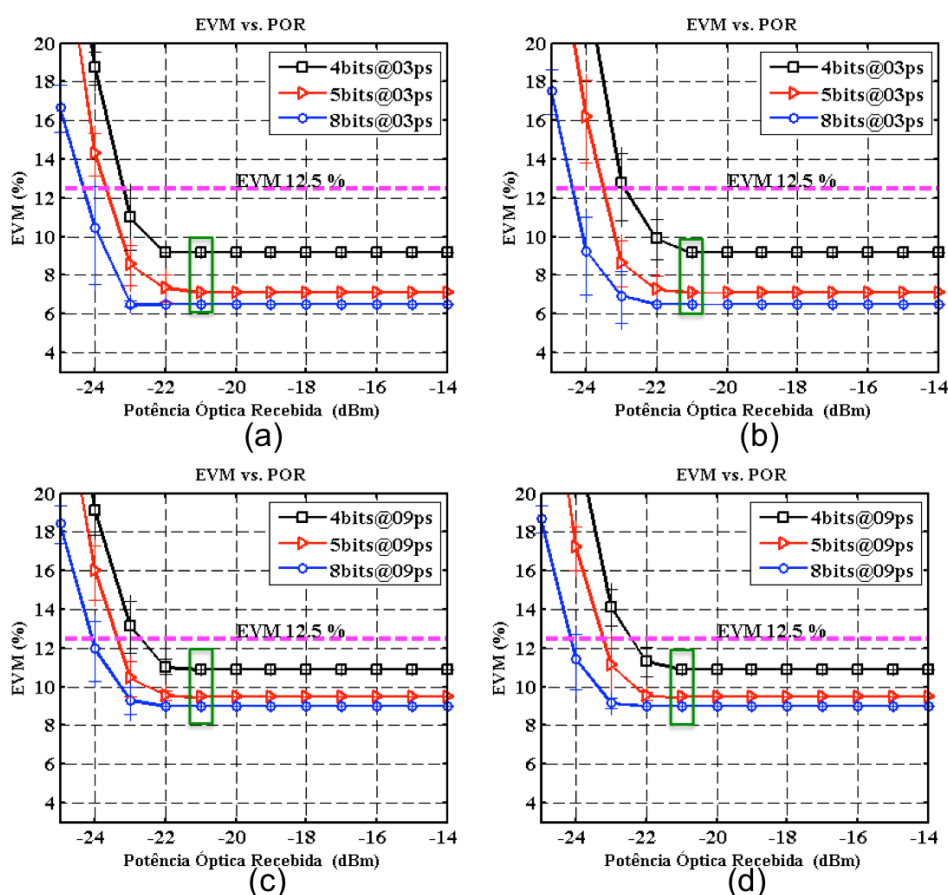


Figure 5.7: Desempenho das transmissões DRoF para diferentes valores de potência recebida onde as letras representam os cenários: (a) 0.3 ps de jitter em back-to-back ;(b) 0.3 ps de jitter com 20 km de fibra; (c) 0.9 ps de jitter em back-to-back e (d) 0.9 ps de jitter com 20 km de fibra .

5.3.2.2. DESEMPENHO DOS CENÁRIOS ROF

Na Figura 5.8, é demonstrado o espectro elétrico obtido no receptor com potência óptica de recepção fixada em -14 dBm em transmissão com 20 km de fibra. As letras “a” e “b” ilustram o espectro para os cenários 3 portadoras, enquanto “c” e “d” demonstram o espectro para 5 portadoras.

A partir dos espectros obtidos é possível observar degradações mais severas nas transmissões em RF. Nota-se uma penalidade de 3 dB no SNR entre os cenários com 3 portadoras RF e IF, conforme é ilustrado em “a” e “b”. Como era esperado, a degradação passa a ser maior com o aumento das portadoras em função de maior influência do *crosstalk* entre as subportadoras.

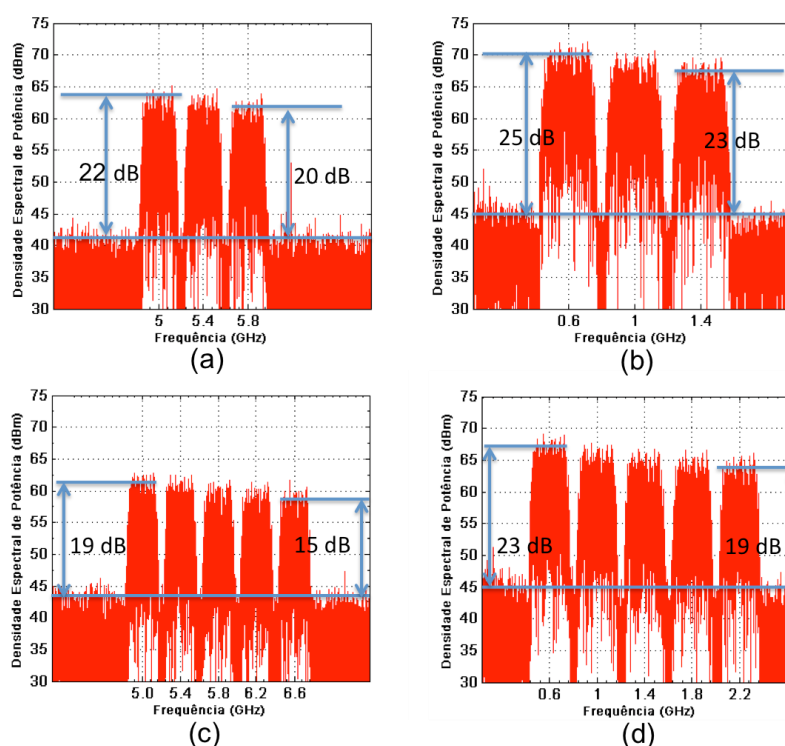


Figure 5.8: Espectro recebido para 20km onde as letras representam com -14 dBm de potência recebida onde as letras representam os cenários: (a) 3 portadoras em IF; (b) 3 portadoras em RF; (c) portadoras em IF e (d) 5 portadoras em RF.

Em todas as transmissões a última portadora é mais afetada. Nos experimentos realizados constatou-se que essa degradação é devido às distorções harmônicas decorrente de regiões de não linearidade do MZM, uma das principais limitações dos enlaces de rádio sobre fibra analógico [Lee, 2013] e adicionalmente devido as atenuações de largura de banda elétrica principalmente do AWG e do osciloscópio. Essa limitação torna-se maior com o aumento das portadoras que passam operar próximo do regime não linear do modulador, ocasionando perda de potência.

A análise seguinte apresenta o desempenho em função da potência óptica recebida. Na Figura 5.9, é demonstrado o EVM para os cenários com 3 portadoras nos quais “a” e ”b” representam as transmissões em RF para back-to-back e 20km, enquanto “c” e “d” demonstram o desempenho para IF. Diferente dos cenários DRoF, o desempenho das transmissões decresce à medida que a potência diminui. Os resultados demonstram que a atenuação é mais evidente nas transmissões em RF do que IF, como pode ser visualizado em “b” e “c”. Considerando o limite do EVM, a sensibilidade do sistema RoF-RF para os três portadoras é de aproximadamente -17 dBm, enquanto que para as transmissões em RoF-IF é de -19 dBm.

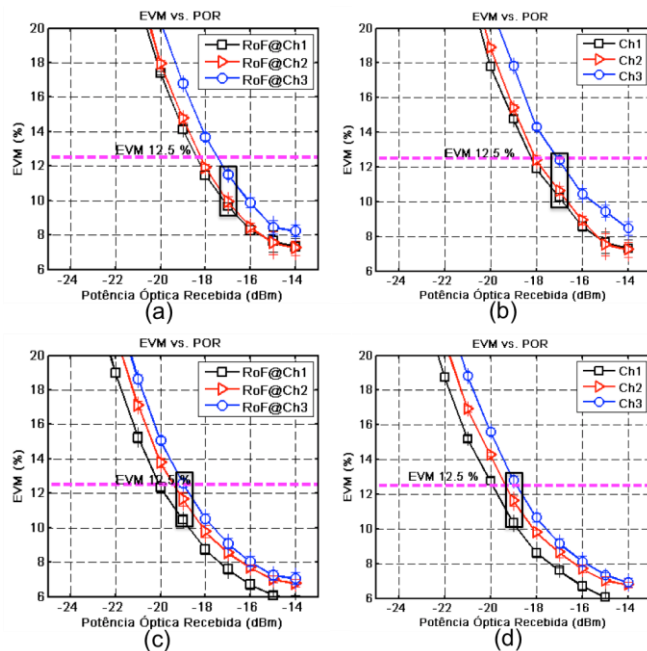


Figure 5.9: Desempenho das transmissões RoF para diferentes valores de potência recebida onde as letras representam os cenários: (a) 3 portadoras RF em back-to-back; (b) 3 portadoras RF em 20km de fibra; (c) 3 portadoras IF em back-to-back e (d) 3 portadoras IF em 20km de fibra.

Na última análise de sensibilidade dos cenários RoF é investigado o desempenho para 5 portadoras, conforme ilustrado na Figura 5.10 nos quais “a” e “b” representam a transmissão para RF em back-to-back e 20 km de fibra, enquanto em “c” e “d” demonstram o desempenho para IF. Em comparação com o desempenho dos cenários com 3 portadoras é possível notar maior degradação das transmissões com 5 portadoras em função do aumento do *crosstalk* devido ao número de portadoras. A sensibilidade das transmissões em RF e IF é de aproximadamente -14 dBm e -16 dBm, como pode ser visualizado em “c” e “d”, respectivamente.

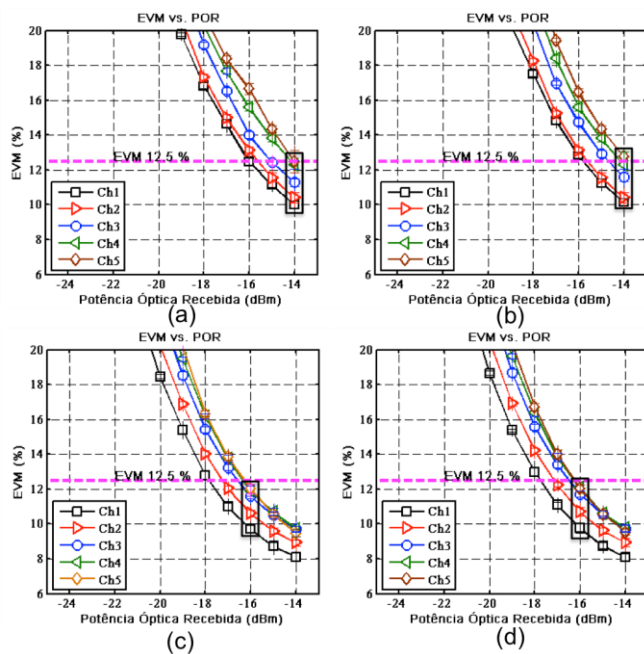


Figure 5.10: Desempenho das transmissões RoF para diferentes valores de potência recebida onde as letras representam os cenários:: (a) 5 portadoras RF em back-to-back; (b) 5 portadoras RF em 20km de fibra; (c) 5 portadoras IF em back-to-back e (d) 5 portadoras IF em 20km de fibra.

5.3.3. CENÁRIOS DE COEXISTÊNCIA

5.3.3.1. DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE DRoF E TWDM

Esta seção apresenta os resultados para coexistência entre DRoF e TWDM. Devido à grande quantidade de experimentos necessários para investigar todos os cenários DRoF apresentados na seção 5.3.2.1 (Figura 5.7), optou-se por utilizar o cenário com erro de *jitter* de 0.9 ps em 20 km de fibra. A potência de recepção foi fixada em -21 dBm visto nesse ponto

todas o desempenho das transmissões permanece dentro do limite de EVM estabelecido pelo limite (12.5%), conforme destacado na Figura 5.7 (b).

A Figura 5.11 apresenta o EVM para os cenários DRoF investigados. Observa-se uma pequena degradação no desempenho dos canais DRoF em função do aumento da potência dos canais TWDM para 4, 5 e 8 bits de resolução. Essa degradação é devido ao efeitos não linear XPM (*Cross-Phase Modulation*) entre os canais, induzindo tanto distorções de amplitude quanto de fase no sinal recebido. É possível notar que as distorções, decorrente do aumento da potência dos canais TWDM, são mais severas para espaçamentos de 100 GHz entre as tecnologias (TWDM e DRoF), conforme pode ser visto em “a”, “b” e “c”. Os resultados obtidos estão coerentes com as análises realizadas por (Ferreira et al, 2014). Entretanto nessa tese é investigada a coexistência em cenários baseados em rádio sobre fibra, o trabalho proposto investiga a coexistência entre TWDM e QPSK.

Nota-se que o *trade-off* entre a quantidade de bits de resolução da ADC e a taxa total na fibra descrito na seção 4.3.2 (Figura 4.10) é um aspecto significativo no cenário de coexistência visto que pode influenciar no impacto que os canais TWDM exercerão no sistema DRoF. Observa-se em “b” que o EVM no cenário com 5 bits diminui mais significativamente nos espaçamentos de 200 e 400 GHz em comparação aos cenários com 4 e 8 bits. Esse resultado é devido ao *trade-off* entre minimização das limitações do processo de digitalização com a diminuição do ruído de quantização e o aumento do impacto dos efeitos não lineares em função do aumento da taxa de bits. Na Figura 4.9 (seção 4.3.2), por exemplo, o nível da relação sinal ruído com 5 bits (21 dB) é maior que 4 (18 dB).

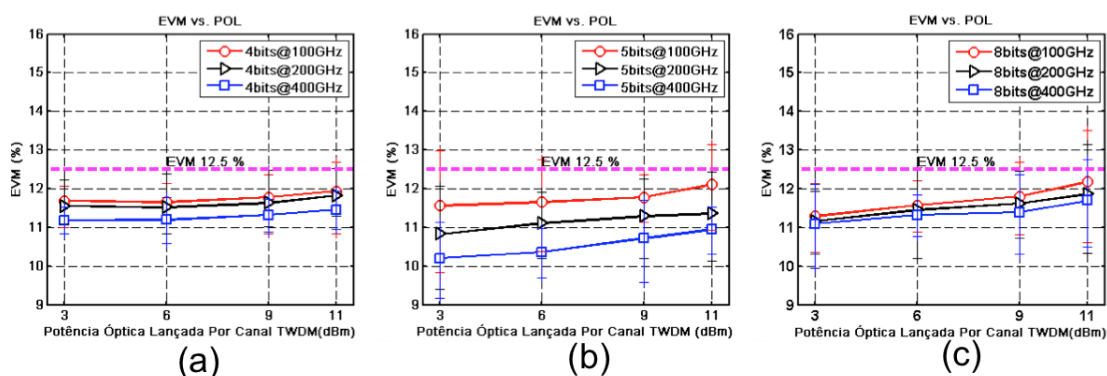


Figure 5.11: Impacto dos canais TWDM nos canais DRoF onde as letras representam os cenários DRoF: (a) 4 bits de resolução; (b) 5 bits de resolução e (c) 8 bits de resolução.

Apesar das degradações nos canais DRoF, em todos os cenários o EVM permanece abaixo de 12.5 % mesmo com altas potências e espaçamentos de 100 GHz. Entretanto a partir dos resultados é possível concluir que a melhor configuração nesse cenário de coexistência é alcançada no cenário com 5 bits de resolução e espaçamento superior a 200 GHz entre as tecnologias.

5.3.3.2. DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE ROF E TWDM

Nessa seção são apresentados os resultados de coexistência dos cenários RoF e TWDM. A partir do estudo de sensibilidade apresentado na Figura 5.9 (b) e (c) a potência óptica no receptor foi fixada em -17 e -19 dBm para os cenários com 3 portadoras em RF e IF.

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram o desempenho do EVM em função da potência óptica emitida pelos canais TWDM para os cenários RF e IF, respectivamente. A partir dos resultados é possível observar maior influência dos canais TWDM para transmissões em RF com 100 GHz de espaçamento conforme pode ser visualizado na Figura 5.12 (a) em que se nota que as penalidades são mais significativas quando a potência emitida pelos canais TWDM é superior a 6 dBm. Para os demais cenários, o impacto é minimizado em função do aumento do espaçamento entre as tecnologias. O pior desempenho da terceira portadora é devido às distorções harmônicas decorrente das regiões de não linearidade do MZM que se tornam mais severas no cenário de coexistência em função do impacto dos canais TWDM.

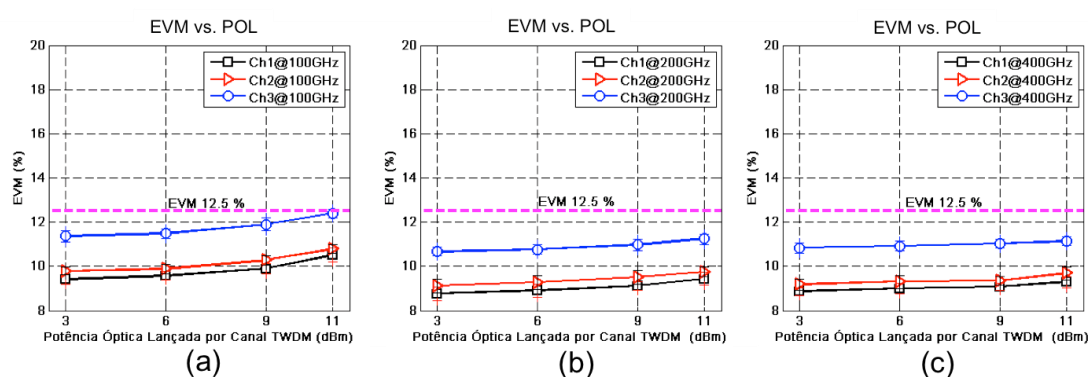


Figure 5.12: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-RF com 3 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz.

Com relação ao impacto dos canais TWDM observa-se que o desempenho das transmissões com 3 subportadoras em IF não difere dos cenários em RF descritas no cenário

anterior, conforme demonstra a Figura 5.13. A maior degradação é observada apenas na terceira subportadora na transmissão TWDM com 11 dBm de potência e espaçamento de 100 GHz, enquanto que nos demais cenários a influência dos canais TWDM é desprezível.

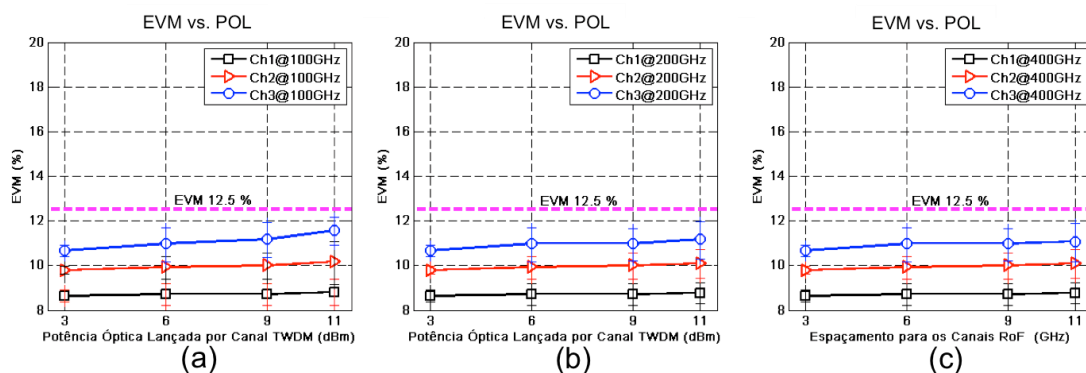


Figure 5.13: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-IF com 3 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz. .

Nas Figuras 5.14 e 5.15 é demonstrado o desempenho para os cenários com 5 portadoras. A potência no receptor foi fixada em -14 e -16 dBm para RF e IF, respectivamente.

Nos cenários com 5 portadoras, as desvantagens da transmissão em RF em relação a IF são mais evidentes. O aumento da potência dos canais TWDM induz degradações mais severas devido às distorções de não linearidade entre as tecnologias. Nota-se que há um ganho de desempenho significativo com o aumento do espaçamento. Nesse cenário, mesmo com espaçamento de 400 GHz, o desempenho é superior ao limite do EVM estabelecido com potências superior à 3 dBm.

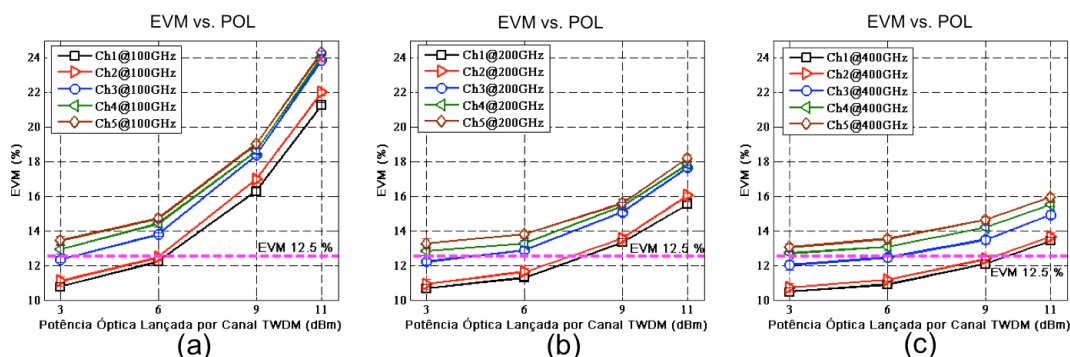


Figure 5.14: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-RF com 5 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz. .

Em comparação com o cenário anterior, nas transmissões em IF o impacto dos canais TWDM é claramente minimizado, como pode ser visualizado na Figura 5.15. O desempenho com espaçamento de 100 GHz e 200 GHz é bem semelhante. Nesses cenários, o EVM permanece dentro do limite de 12.5% entre 3 e 9 dBm. Enquanto que para 400 GHz o impacto é desprezível até com 11 dBm.

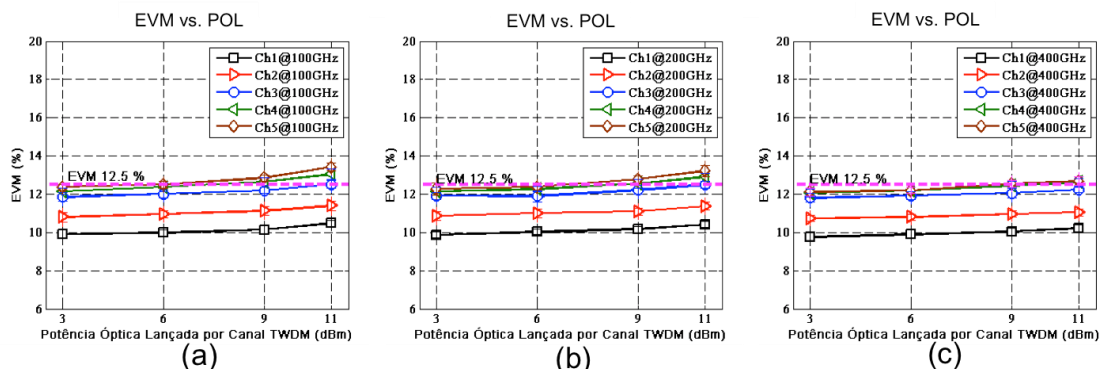


Figure 5.15: Impacto dos canais TWDM no sistema RoF-IF com 5 portadoras onde as letras representam os espaçamentos de: (a) 100 GHz; (b) 200 GHz e (c) 400 GHz. .

5.3.3.1. DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE DROF E RF-VIDEO OVERLAY

Nesta seção serão apresentados os resultados do cenário de coexistência convergência dos sistemas de rádio e RF-*Vídeo Overlay*. Diferente dos canais TWDM em que a potência de emissão variou entre 3 e 11 dBm por canal, na transmissão de vídeo o potência foi fixada em 16.2 dBm. Por outro lado a escolha da potência de recepção dos canais de rádio foi baseada na análise de sensibilidade apresentada na seção 5.3.2.

A Figura 5.16 apresenta o impacto dos canais de vídeo na transmissão DRoF para 4, 5 e 8 bits resolução na ADC e ruído de jitter 0.9 ps. A potência de recepção foi fixada em -21 dBm. Em comparação com o cenário de coexistência com canais TWDM nota-se que o impacto do sinal de vídeo nas transmissões DRoF é mais significativo. Para espaçamento de 100 GHz entre as tecnologias, o desempenho para todos o valores bits é superior ao limite de 12.5%. Como era esperado, o impacto diminui com o aumento do espaçamento.

É importante destacar que a transmissão com 8 bits de resolução apresenta pior desempenho. Mesmo com 400 GHz de espaçamento o EVM permanece acima do limite. Por

outro lado, nos cenários com 4 e 5 bits o impacto é minimizado. Para 200 GHz de espaçamento o EVM para 4 e 5 bits é aproximadamente 12.5% e 11.5%, respectivamente.

Semelhante a análise entre DRoF e TWDM, o cenário com 5 bits de resolução obtém melhor desempenho, como pode ser visualizado na Figura 5.16. Esses resultados evidenciam a análise apresentada na Figura 5.11 (b) no qual nas transmissões digitais as limitações no cenário de convergência não são impostas somente pelas degradações no domínio elétrico, principalmente com os ruídos de *jitter* e de quantização, mas também pela taxa total transmitida na fibra, que é mais ou menos favorável a interferências não lineares no canal óptico. A partir dos experimentos realizados é possível afirmar que para coexistência com vídeo o espaçamento mínimo da transmissão deve ser superior a 200 GHz e a quantidade de bits de resolução inferior a 5 bits.

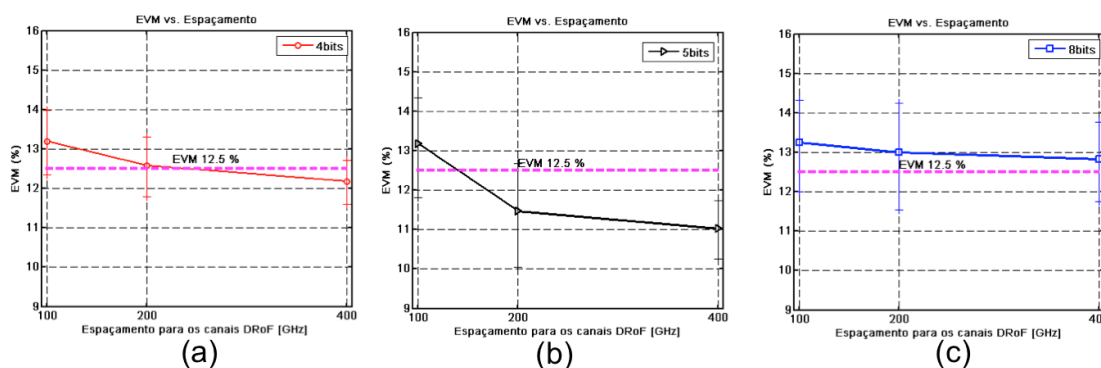


Figure 5.16: Impacto do sinal de Vídeo-RF nos cenários DRoF para os espaçamentos de 100 GHz, 200 GHz e 400 GHz nos cenários no qual as letras representam os cenários para: (a) 4 bits, (b) 5bits e (c) 8 bits de resolução da ADC.

5.3.3.2. DESEMPENHO DA COEXISTÊNCIA ENTRE ROF E RF-VIDEO OVERLAY

O impacto dos canais de vídeo nos cenários RoF estão demonstrados na Figura 5.17. A potência de recepção para os cenários com 3 portadoras foi de -17 e -19 dBm para transmissões em RF e IF, respectivamente. Enquanto que para os cenários com 5 portadoras foi de -14 e -16 para RF e IF.

Observa-se que os efeito do XPM é mais crítico nas transmissões analógicas. Nos cenários com 3 e 5 portadoras, tanto para transmissão em RF e IF, o desempenho permanece

acima do limite do EVM estabelecido em todos os espaçamentos investigados. Para os cenários com 5 portadoras o impacto do sinal de vídeo é mais severo em função do aumento dos *crosstalk*, como pode ser observado em “c” e “d”. Apesar do cenário em IF minimizar o impacto dos canais de vídeo, o desempenho da transmissão é superior ao limite mesmo com 3 portadoras IF e 400 GHz espaçamento, conforme é demonstrado em “b”.

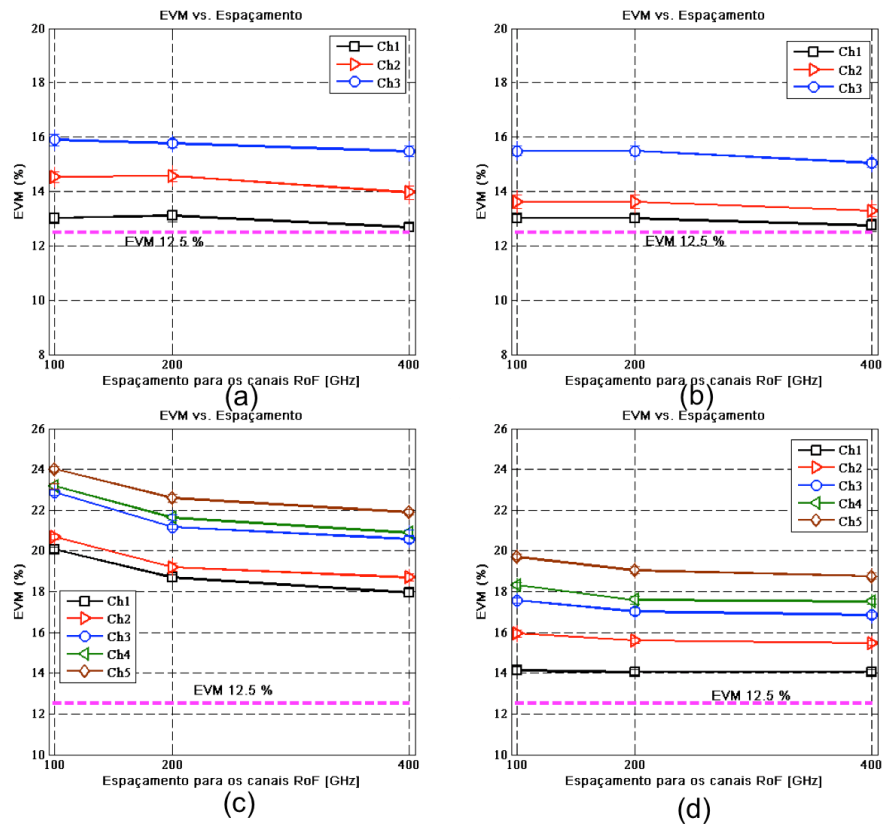


Figure 5.17: Impacto dos sinais de RF-Vídeo Overlay nos cenários RoF nos quais as letras representam os cenários: (a) 3 portadoras em RF, (b) 3 portadoras em IF, (c) 5 portadoras em RF e (d) 5 portadoras em IF.

6. CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e análise sistêmica de cenários de rádio sobre fibra enquanto solução para redes de acesso. De acordo com o levantamento realizado na literatura constatou-se a ausência de trabalhos que investigassem sistemas de rádio sobre fibra de modo mais abrangente, considerando especialmente cenários heterogêneos em que uma mesma ODN é constituída por sistemas legados e novos padrões. A partir dessa lacuna, sistemas analógicos e digitais foram desenvolvidos e avaliados em estudos conduzidos por meio de simulação e experimentação.

Nos estudos conduzidos por meio de simulação, inicialmente investigou-se as limitações dos sistemas analógicos e digitais. Os resultados demonstraram que o sistema digital (DRoF) é mais robusto por tomar vantagens da maturidade da transmissão em modo digital que minimizam as degradações no enlace óptico, por outro lado esse tipo de sistema requer atenção em função dos ruídos originados principalmente no processo de conversão analógica-digital dos quais se destacam os ruídos de *jitter* e de quantização. Adicionalmente, a relação de compromisso entre a quantidade de bits utilizados no processo de digitalização e a taxa de transmissão total a ser transferida na fibra é também um aspecto que deve ser cuidadosamente investigado visto que o segmento *fronthaul* pode não suportar a taxa requerida pelo DRoF, principalmente quando a ODN é composta por sistemas legados, como por exemplo, GPON. No estudo de coexistência baseado em simulação constatou-se que essa limitação pode ser contornada com sistemas DRoF digitalizado com baixo número de bits. Os resultados demonstraram que um sistema DRoF com 4 bits de resolução mantém o desempenho constante, abaixo do limite de BER ($1E-3$), para comprimentos de fibra de até 30 km.

Já o desempenho dos sistemas baseados em transmissões analógicas irá depender do modo em que as frequências são transmitidas. A transmissão em RF apresenta como principal vantagem a simplicidade da estação base composta por poucos dispositivos visto que nenhum processo conversão de frequência é realizada. Entretanto, nesse tipo de transmissão o alcance é limitado principalmente pela atenuação e dispersão cromática, que impacta mais

severamente transmissões em frequências elevadas. Por outro lado, nas transmissões em frequência intermediária os efeitos que degradam as transmissões em RF são amenizados, entretanto a complexidade da antena é maior devido a adição de componentes elétricos como filtros e osciladores locais utilizados no processo de conversão. Nos resultados de coexistência o alcance máximo da transmissão em RF foi de 15 km, enquanto que em IF foi de até 30km.

Nos estudos baseados em experimentação, foi possível observar o impacto dos canais adjacentes nos sistemas de rádio sobre fibra. As degradações são decorrentes, principalmente, do efeito não linear XPM entre as tecnologias que induz distorções de fase e de amplitude no sinal recebido.

No cenário com TWDM os resultados demonstraram que o impacto do XPM nos canais DRoF não compromete o desempenho do sistema. Observou-se degradações mais significativas para 8 bits de resolução em função da relação de compromisso entre a resolução de bits utilizadas no processo de digitalização e o aumento da taxa de transmissão total na fibra. Tais resultados evidenciaram os estudos previamente realizados via simulação em que esse *trade-off* representa um importante aspecto do ponto de vista de implementação prática.

Por outro lado, a compatibilidade entre TWDM e sistemas RoF irá depender da quantidade de portadoras utilizadas e do modo de transmissão. A partir dos resultados obtidos, notou-se um impacto mais significativo do efeito do XPM, entretanto considerando o limite do EVM é possível afirmar que nos cenários com 3 subportadoras as degradações não lineares não comprometem significativamente o desempenho do sistema. Por outro lado, nos cenários com 5 canais os efeitos são críticos. Nesses cenários, somente as transmissões em IF são compatíveis com os canais TWDM no cenário de coexistência.

Por fim, no estudo de coexistência com *RF-Video Overlay* observou-se que o impacto do XPM é mais crítico. Nos cenários DRoF o impacto é minimizado com a diminuição da quantidade de bits utilizados no processo de digitalização e com o aumento do espaçamento entre as tecnologias. Por outro lado, os resultados obtidos para os sistemas RoF demonstram que a coexistência com os canais *RF-Video Overlay* representa desafios maiores

de modo que em todos os cenários investigados o desempenho foi superior ao limite do EVM estabelecido.

A análise sistêmica, em especial a baseada em experimentação, revela que há muitos desafios relacionados com os sistemas de rádio sobre fibra, principalmente quando se considera o posicionamento dessa tecnologia na mesma faixa de espectro de outras tecnologias. Entretanto, as vantagens inerentes dos sistemas digitais se mostra como uma solução promissora que satisfaz as alterações que têm ocorrido na infraestrutura de arquitetura móvel tradicional, permitindo a construção de redes de acesso de alta capacidade diante da constante demanda por largura de banda.

6.2. CONTRIBUIÇÕES

Ao cumprir os objetivos almejados, este trabalho oferece uma série de contribuições, com destaque para:

- O levantamento atual do estado-da-arte no que se refere ao uso de sistemas de rádio sobre fibra enquanto solução para redes de acesso, enfatizando seus principais desafios e limitações.
- A concepção e desenvolvimento de cenários de redes de acesso baseados em sistemas de rádio sobre fibra o qual foi possível investigar os principais aspectos e limitações decorrente do modo de transmissão (analógico e digital).
- O desenvolvimento de sistemas de rádio sobre fibra por meio de simulação os quais permitiram conduzir diversos estudos a cerca das limitações impostas nos domínios óptico e elétrico em cenário de coexistência.
- A análise experimental em cenário de coexistência com ênfase no impacto que os sistemas legados (RF *Vídeo-Overlay*) e os novos padrões (TWDM) exercem sobre os canais de rádio.
- O caráter interinstitucional da pesquisa, envolvendo diretamente pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará (UFPA) e o Grupo de

6.3. PUBLICAÇÕES

As publicações geradas tendo como base essa pesquisa, as quais se constituem em excelente forma de divulgação do trabalho à comunidade acadêmica. Com resultados diretos desta tese, elaborou-se os seguintes artigos:

1. Oliveira, R.S.; Viana, D.F.R.; Lima, M., Frances, C.R.L.; Costa, J.C.W.A.; Lima, M.; Teixeira, A., **Digital Radio over Fiber System in the NG-PON2 Context**. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*. *Special Issue on Wireless Communications*, vol. 14, no. SI2, pp. 179-193. September, 2015.
 2. Oliveira, R. S., Moritsuka, N.S., Santos, R. C., et al.:”**Low Cost Digital Radio over Fiber System**”, *Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO) – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag) – MOMAG*, 2014, Curitiba, Brasil.
 3. Almeida, R.P.; Oliveira, R.S.; Moritsuka, N.S.; Frances, C.R.L.; Teixeira, A.; Costa, J.C.W.A., "**Digital radio over fiber transmission based on SCM and WDM system for C-RAN architecture**,"*Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International*, pp.1-5, 17-20 Aug. 2014
 4. Oliveira, R.S.; Frances, C.R.L.; Costa, J.C.W.A.; Viana, D.F.R.; Lima, M.; Teixeira, A., "**Analysis of the cost-effective digital radio over fiber system in the NG-PON2 context**," *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks), 2014 16th International*, vol., no., pp.1,6, 17-19 Sept. 2014
- Como resultados indiretos estão relacionados os seguintes trabalhos:
 1. Moritsuka, N.S., **Análise de Sistemas de Rádio sobre Fibra – Uma comparação entre Sistemas Analógicos e Digitais**. Trabalho de

Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia da Computação da UFPA, apresentada e aprovada em 13/01/2014.

2. Almeida, R.P., **Estudo comparativo de sistemas de Rádio Digital sobre Fibra aplicado a C-RAN**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, apresentada e aprovada em 15/12/2014
 3. Costa, G.N.D., **Propagação de Sinais de Rádio Digitalizados sobre Fibra no Contexto de NG-PON2**. Dissertação de Mestrado do Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro – Portugal, apresentada e aprovada em 10/09/2015.
- Outros trabalhos ainda encontram-se em desenvolvimento visto que os artigos publicados até a escrita desta tese foram baseados nos estudos por meio de simulação, conforme apresentado no capítulo 4. Diante disso, o planejamento é que até o final do primeiro semestre de 2016 sejam submetidos os seguintes artigos relacionados com os experimentos apresentados no capítulo 5 artigos:
 1. **Impact of TWDM on the Radio Over Fiber Systems**. A ser submetido para revista *IEEE Photonics Journal*, classificada como periódico A1 na CAPES
 2. **Experimental Investigation of the Radio over Fiber Systems in the Coexistence Scenario**. A ser submetido para revista *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, classificada como periódico A1 na CAPES

6.4. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Análise e desenvolvimento de sistemas de rádio sobre fibra com outros formatos de modulação como 64 QAM e 256 QAM. A utilização desses formatos permitirá maior eficiência espectral devido a redução da largura

de banda dos sinais, o que pode representar vantagens principalmente para os cenários DRoF em função da diminuição dos requisitos de frequência de amostragem da ADC, e conseqüentemente da taxa de bits total transmitida na fibra.

- Análise e desenvolvimento de cenários C-RAN considerando a transmissão de múltiplos canais DRoF multiplexados em SCM. Estudos semelhantes foram conduzidos no trabalho **Digital radio over fiber transmission based on SCM and WDM system for C-RAN**, todavia a taxa de transmissão utilizada (150 Mbit/s) não representa cenários mais realísticos com velocidades acima de 1 Gbit/s requeridas pelo CPRI e LTE, por exemplo. Adicionalmente, pretende-se investigar as implicações do controle centralizado na *central office* no qual uma única *base band unit* é compartilhada com várias antenas.
- Desenvolvimento de um modelo matemático para estimar o consumo de energia dos diferentes sistemas RoF e DRoF, especialmente nas antenas. O objetivo é propor uma extensão do modelo proposto por [Yang, Nirmalathas e Lim, 2011] visto que nesse trabalho a investigação é limitada a cenários isolados de rádio sobre fibra com apenas um canal. A partir do estado da arte, acreditamos haver uma lacuna no estudo dos aspectos relacionados ao consumo de energia para cenários C-RAN, dentro do que será proposto no tópico anterior.
- Análises mais extensas no cenário de coexistência dentro do contexto do NG-PON2 elevando o número de canais TWDM para 8 e 16, por exemplo. Adicionalmente também pretende-se realizar mais experimentos com RF-Vídeo Overlay considerando espaçamentos superiores a 400 GHz.
- Análises sistêmicas experimentais de sistemas DRoF em fibra do tipo POF (*Polymer Optical Fiber*) visto que esse tipo de solução tem atraído bastante interesse das operadoras de telecomunicações para utilização em ambientes *indoor*. Na literatura foram encontrados apenas trabalhos considerando transmissões RoF, como é apresentado em [Han et al, 2010].

REFERÊNCIAS

- [3GPP, 2015] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. Technical Specification Group Radio Access Network. **Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception** (3GPP TS 36.104 version 11.8.2 Release 11), 2015.
- [ACKERMAN, 2001] E.I. ACKERMAN e C. H. COX., RF Fiber-Optic Link Performance. **IEEE Microwave**, pp. 50-58, 2001.
- [AGRAWAL, 2010] AGRAWAL, G. P., **Fiber-Optical Communication Systems**. Wiley, 4^a Edição, Novembro, 2010.
- [AZEREDO, 2011] AZEREDO, C. L., Clock Jitter Effects on Sampling: A Tutorial. **Circuits and Systems Magazine, IEEE**, 2011. 11(3): p. 26-37.
- [BEAS et al, 2013] BEAS, J., CASTANON, G., ALDAYA, I., ARAGON-ZAVALA, A. et al.: Millimeter Wave Frequency Radio Over Fiber Systems: A survey. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, 2013, 15, (4), pp. 1593 – 1618.
- [CABLELABS, 2011] CABLELABS, **Data Over Cable Service Interface Specifications DOCSIS 3.0**, Physical Layer Specification, Novembro, 2011. Acessado em Março, 2015.
- [CARAPELLESE et al, 2014] CARAPELLESE, A., PIZZINAT, A., TORNATORE, M., CHANCLOU, P., GOSSELIN, S., **An Energy Consumption Comparison of Different Mobile Backhaul and Fronthaul Optical Access Architectures**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATIONS (ECOC), Cannes, France, 2014.
- [CHINA MOBILE, 2010] CHINA MOBILE RESEARCH INSTITUTE, **C-RAN: The Road Towards Green RAN**, In: C-RAN INTERNATIONAL WORKSHOP, Beijing, China, Apr. 23rd 2010.
- [CHU, JACOB E KIM, 2010] CHU. M., JACOB. P., KIM. J., A 40 Gs/s Time Interleaved ADC Using SiGe BiCMOS Technology. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 2010,

45, (2), pp. 380-390.

[CISCO SYSTEMS, 2013] CISCO SYSTEMS, **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012 – 2017**, February, 2013, pp. 1-34.

[CISCO SYSTEMS, 2014] CISCO SYSTEMS, **Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2013–2018**, 10 Jun. 2014.

[COOPER, 1990] COOPER. J., **Fiber/Radio for the Provision of Cordless/Mobile Telephony Services in the Access Network**. Electronics Letters, vol.26, no.24, pp.2054,2056, 22 Nov. 1990.

[COPPINGER E PIEHLER, 2006] COPPINGER, F.; PIEHLER, D., **RF video overlay in an Ethernet passive optical network**. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE, 2006 and the 2006 NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC 2006), 5-10 Mar. 2006.

[CPRI, 2013] CPRI, **Interface Specification v6.0**, 2013. Acessado em Fevereiro, 2015.

[HOOD E TROJER, 2012] Hood, D., Trojer, E., "Gigabit-Capable Passive Optical Network - Forward ^[1]_{SEP}Error Correction". Appendix I, pp. 364-365, John Wiley & Sons 2012.

[EFFENBERGER, KRAMER e PFEIFFER, 2007] EFFENBERGER, F. J., KRAMER, G., PFEIFFER, T., An Introduction to PON Technologies. **IEEE Communication Magazine**, vol. 45, no. 3, pp. S17–S25, Mar. 2007.

[FERREIRA ET AL, 2014] FERREIRA, R. M., SHAHPARI, A., AMADO, S. B., COSTA, P., GUIOMAR, F. P., PINTO, A. N., TEIXEIRA, A. L., **Impact of TWDM on Optional Real-Time QPSK WDM Channels**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATION (ECOC), Cannes, France, 2014.

[FINN, 2008] FINN, J. **PON Technology in the Verizon Network**, In: IEEE GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM), 2008.

[FYE, 1990] FYE, D. M., Design of fiber optic antenna remoting links for cellular radio applications. **Proceedings...** IEEE Vehicular Technology Conference, 622 – 625, 1990.

- [HAN ET AL, 2010] LU, H. H., CHANG, C. H., PENG, C. P., SU, H. S., HU, H. W., A **Radio-Over-GI-POF Transport System**, in Lightwave Technology, vol.28, no.13, pp.1917-1921, 1 Jul. 2010.
- [HAYKIN, 2001] S. HAYKIN, **Communication systems**, 2001: Wiley.
- [IEEE 10EPON, 2009] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – **Local and Metropolitan area networks – Specific requirements Part 3. Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks**, IEEE Std 802.3av-2009 (Amendment to IEEE Std 802.3-2008), pp. c1-214, 2009. Acessado em Março, 2015.
- [IEEE 802.11a, 1999] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band**. Acessado em Março, 2015.
- [IEEE 802.11b, 1999] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **Local and Metropolitan Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band**, IEEE 802.11b-1999. Acessado em Março, 2015.
- [IEEE 802.11g, 2003] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band**, IEEE 802.11g-2003. Acessado em Março, 2015.

- [IEEE 802.11n, 2009] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput**. Acessado em Março, 2015.
- [IEEE 802.15.1, 2002] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **LAN/MAN - Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)**. Acessado em Março, 2015.
- [IEEE 802.15.3, 2003] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN)**, IEEE 802.15.3-2003. Acessado em Março, 2015.
- [IEEE EPON, 2008] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - **Local and Metropolitan are networks – Specific requirements Part 3. Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications**, IEEE Std. 802.3-2008, Section 5, Clause 60, 26 Dec. 2008. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.983.1, 1998] ITU-T Recommendation G.983.1. **Broadband Optical Access System Based on Passive Optical Network (PON)**, Primeira Edição, Outubro, 1998. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.983.1, 2005] ITU-T Recommendation G.983.1. **Broadband Optical Access System Based on Passive Optical Network (PON)**, Segunda Edição, Janeiro, 1998. Acessado em Março, 2015.

- [ITU-T G.984.1, 2003] ITU-T Recommendation G.984.1. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General Characteristics**, Março, 2003. Acessado em Dezembro, 2015.
- [ITU-T G.984.2, 2003] ITU-T Recommendation G.984.2. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification**, Março, 2003. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.984.3, 2004] ITU-T Recommendation G.984.3. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission Convergence Layer Specification**, Fevereiro, 2004. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.984.4, 2004] ITU-T Recommendation G.984.4. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT Management and Control Interface Specification**, Junho, 2004. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.984.5, 2007] ITU-T Recommendation G.984.5. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Enhancement Band**, Setembro, 2007. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.984.6, 2008] ITU-T Recommendation G.984.6. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Reach Extension**, Março, 2008. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.984.7, 2010] ITU-T Recommendation G.984.7. **Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Long Reach**, Julho, 2010. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.987, 2010] ITU-T Recommendation G.987.1. **10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON): General Requirements**, Janeiro, 2010. Acessado em Março, 2015.
- [ITU-T G.989.1, 2013] ITU-T Recommendation G.989.1. **40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements**, Março, 2013.
- [KAZOVSKY, 2011] KAZOVSKY, L. G. et al, **Challenges in Next-Generation Optical Access Networks: Addressing Reach Extension and Security Weakness**, Optoelectronics, IET, vol. 5, pp. 133-143, 2011.

- [KEISER, 2003] KEISER. G., **Optical Communications Essentials**. McGraw-Hill Professional, 2003.
- [KOLNER E DOLFI, 1987] KOLNER, B. H. e DOLFI, D. W., **Intermodulation Distortion and Compression in an Integrated Electrooptic Modulator**, Applied Optics, Vol. 26, No. 17, Setembro, 1987.
- [KOROWAJCZUK, 2011] KOROWAJCZUK, L., **LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis**, Wiley, 2011.
- [LEE, 2013] LEE, C. H. (Ed.), **Microwave Photonics**. CRC Press, 2013.
- [LIDA et al, 2013] LIDA. D., KUWANO. S., KANI. J. et al, **Dynamic TWDM-PON for Mobile Radio Access Networks**, Optics Express, 2013, 21, (22), pp. 26209–26218.
- [LIU et al, 2013] LIU C., ZHANG L., ZHU M. et. al, **A Novel Multi-Service Small-Cell Cloud Radio Access Network for Mobile Backhaul and Computing Based on Radio-over-Fiber Technologies**, Lightwave Technology, vol.31, no.17, pp.2869, 2875, 1 Sep, 2013.
- [METIS, 2014] METIS PROJECT, **Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System**, Deliverable 1.1. Acessado em Março, 2015.
- [MITCHELL, 2006] MITCHELL E., Techniques for Radio Over Fiber Networks. **Proceedings...** 19th Annual Meeting, IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), pp. 346–347, October, 2006.
- [NESSET, 2014] NESSET, D., **NGPON2 Technology and Standards**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATION (ECOC), Cannes, France, 2014.
- [NG'OMA, 2005] NG'OMA, A., **Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems**. 2005. Thesis (PhD in Electrical Engineering), Eindhoven University of Technology.
- [NIRMALATHAS, et al, 2010] NIRMALATHAS, M. BAKAUL, GAMAGE P., LEE K.L., Yang Y., Novak D., Waterhouse R., **Fiber - Wireless Networks and Subsystem**

Technologies. **Journal of Lightwave Technology**, vol. 28, no. 4, 2010.

[NIRMALATHAS et al, 2010] NIRMALATHAS A., GAMAGE, P.A., LIM, C. et al, Digitized Radio-Over-Fiber Technologies for Converged Optical Wireless Access Network. **Journal of Lightwave Technology**, 2010, 28, (16), pp. 2366 – 2375.

[NOKIA, 2011] NOKIA SIEMENS NETWORKS, **2020: Beyond 4G, Radio Evolution for the Gigabit Experience**, pp. 1-16, August, 2011. Acessado em Março, 2015.

[NOVAK, 2004] NOVAK, D., **Fiber Optics in Wireless Applications**, OFC 2004, Mini Curso 217, 2004.

[OBSAI, 2008] **OBSAI System Specification**, ‘v2.0’, 2008. Available at www.obsai.com.

[PONZINI, et al, 2013] PONZINI. F., GIORGI. L., BIANCHI. A. et al, Centralized Radio Access Networks Over Wavelength Division Multiplexing: A Plug-And-Play Implementation. **IEEE Communications Magazine**, 2013, 51, (9), pp. 94-99.

[SAADANI, et al, 2013] SAADANI. A., MAMDOUH. E. T., PIZZINAT, A. et. al. **Digital Radio over Fiber for LTE-Advanced: Opportunities and Challenges**. In: 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL NETWORK DESIGN AND MODELING (ONDM), 2013, pp. 194-199.

[SANANES, 2005] SANANES, R., et al., Techno-economic Comparison of Optical Access Networks. Transparent Optical Networks, 2005. **Proceedings...** 2005 7th International Conference.

[SCOTT e FROBENIUS, 2013] SCOTT, A. W., FROBENIUS, R., **RF Measurements for Cellular Phones and Wireless Data Systems**. Wiley-IEEE Press. 1ª Edição, Julho, 2013.

[STARR et al, 2003] STARR T., SORBARA M., CIOFFI J. M., SILVERMAN P. J., **DSL Advances**, Prentice Hall, 2003.

[VPI, 2015] **VPItransmissionMaker(TM) / VPIcomponentMaker(TM)**, Tech. Rep., 2013.

- [WAKE, 2002] WAKE D., Trends and Prospects for Radio over Fibre Picocells. **Proceedings...** International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP'02), pp. 21–24, November, 2002.
- [YANG, LIN e NIRMALATHAS, 2011] YANG, Y., LIM, C., NIRMALATHAS, A., **Comparison of Energy Consumption of Integrated Optical-Wireless Access Networks**, OFC 2011, 2011.
- [YANG, 2011] YANG, Y., **Investigation on Digitized RF Transport over Fiber**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade de Melbourne, Australia, 2011.
- [ZAYED, 1993] ZAYED, I. A., **Advances in Shannon's Sampling Theory**, CRC Press, Julho, 1993.

APÊNDICE A

Os sistemas de rádio sobre fibra do estudo de coexistência foram realizados com uso combinado da suíte VPI e dos componentes laboratórios, conforme citado na seção 5.2. Por outro lado, os sistemas TWDM e Vídeo-RF foram desenvolvidos apenas com equipamentos de laboratório. Entretanto neste apêndice serão descritos apenas os cenários de rádio visto que os demais sistemas já foram descritos detalhadamente nas seções 5.2 e 5.3.

ROF-RF

A Figura A.1 ilustra o diagrama que representa o sistema RoF-RF para 3 portadoras. No primeiro estágio, três subportadoras 16-QAM centradas nas frequências de 5.0 GHz, 5.4 GHz e 5.8 GHz, multiplexadas em SCM, são geradas *off-line* no VPI. No estágio seguinte, o sinal exportado para o Matlab é colocado no formato reconhecido pelo AWG. O sinal elétrico a saída do AWG, após ser modulado externamente por um Dual Drive MZM é então transmitido por um laser DFB em 20 km fibra SSMF.

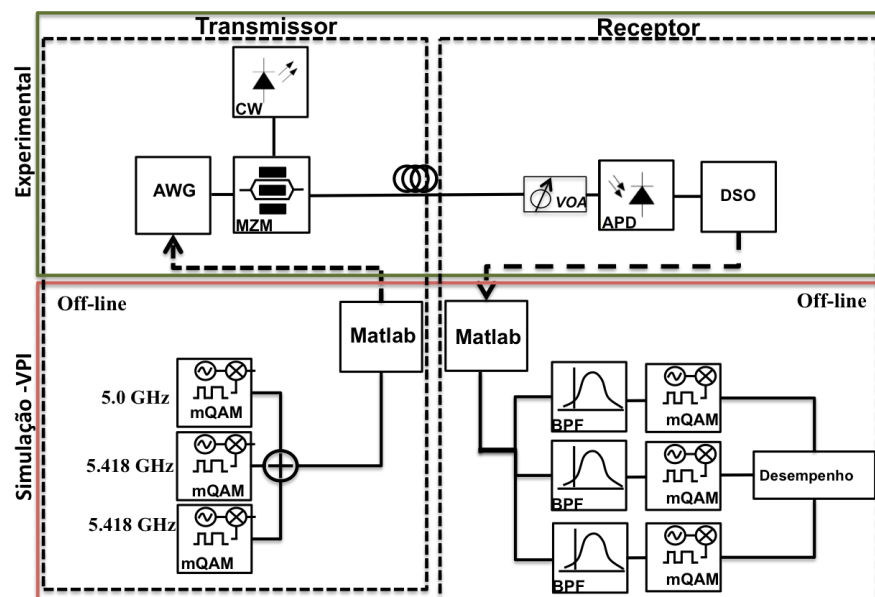


Figura A.1: Ilustração do sistema RoF-RF do estudo de caso baseado em experimentação.

Após a recepção pelo APD, o sinal é capturado por meio do DSO. No último estágio, a leitura do sinal transmitido experimentalmente é realizada no VPI por meio de uma interface de co-simulação cuja estrutura interna consiste do código em Matlab que realiza a leitura do sinal transmitido e conversão para o formato reconhecido pelo VPI novamente. O código é ilustrado abaixo:

```
%Interface a porta elétrica do VPI
function y=GetNRZ_el(input_signal)

% Leitura do sinal capturado pelo DSO
c=load('Localizacao/Sinal.mat');
Ex_ReceivedSamples=c.Ex_ReceivedSamples(1:end)

%Estágio de Sincronização do Sinal
Ex_ReceivedSamples= interp(Ex_ReceivedSamples,6);
Ex_ReceivedSamples=Ex_ReceivedSamples(1:5:end);

%Transforma o sinal de acordo com o formato do VPI.
[a,b ]=size(input_signal.band.E);
input_signal.band.E= real(Ex_ReceivedSamples(1:b));

%Sinal transmitido repassado
y=input_signal;          %mtx_decoded;      % mtx
```

O processo de transmissão e recepção para o cenário RoF-RF com 5 portadoras segue o mesmo princípio de funcionamento descrito anteriormente.

RoF-IF

No cenário RoF-IF as portadoras em RF são submetidas ao processo de conversão para frequência intermediária, conforme é ilustrado na Figura 2. As frequências RF são convertidas para frequências intermediárias com auxílio do oscilador local deslocado em 4.4 GHz e posteriormente filtradas por um filtro BPF. Os demais estágios no transmissor são semelhantes ao descrito anteriormente, ou seja, após a formatação do sinal no matlab o sinal é inserido no AWG, modulado externamente e transmitido na fibra em 20 km de fibra.

No processo de recepção, após a captura pelo DSO o sinal é convertido novamente para frequência RF no VPI através de um oscilador local também defasado em 4.4 GHz.

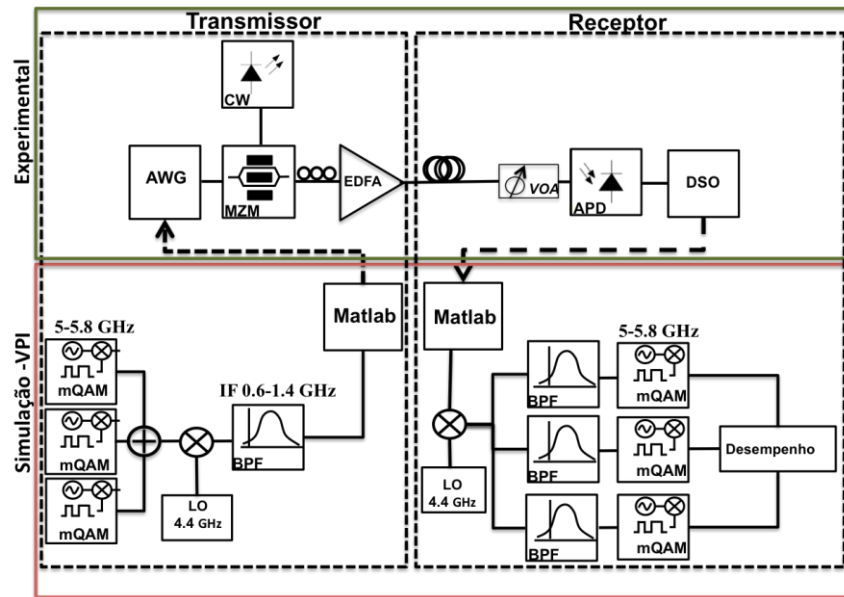


Figura A.2: Ilustração do sistema RoF-IF do estudo de caso baseado em experimentação.

DROF

No sistema DRoF, o processo de geração e recepção do sinal no VPI segue os mesmos estágios descritos no cenário de simulação descrito na seção 4.2.2. Entretanto, de forma semelhante a proposta do cenário RoF experimental, também foi utilizado um bloco de co-simulação em matlab como interface com o cenário experimental.

Os estágios de transmissão, detecção, captura, e avaliação do sinal tiveram os mesmos estágios descritos anteriormente no cenário RoF.

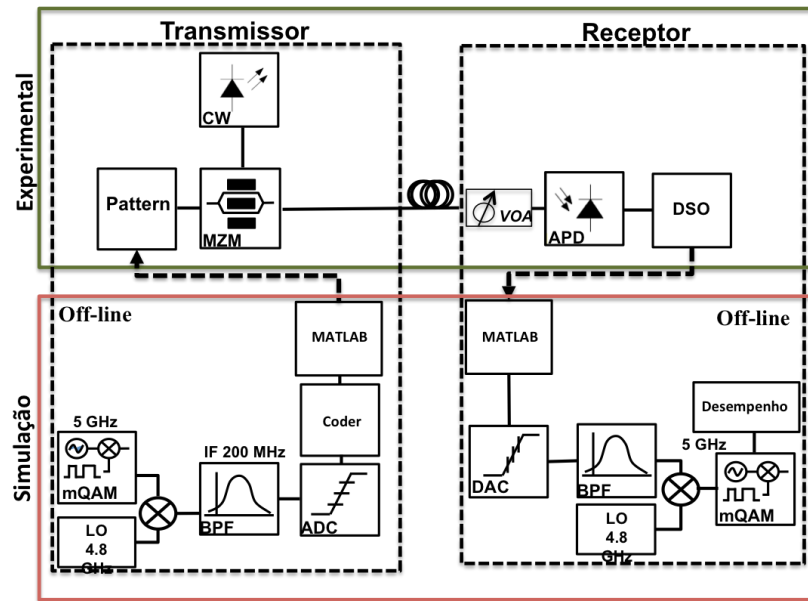


Figura A.3: Ilustração do sistema DRoF-IF do estudo de caso baseado em experimentação.

APÊNDICE B

Este apêndice descreve as configurações utilizadas nos cenários de coexistência. Os sistemas de rádio sobre (RoF e DRoF) foram descritos detalhadamente nas seções 4.2.1 e 4.2.2, dessa forma nessa seção serão descritos os sistemas G-PON, XG-PON e TWDM-PON implementados no simulador VPI. A modelagem dos sistemas G-PON, XG-PON e TWDM utiliza o mesmo conjunto de blocos, entretanto a configuração de cada tecnologia é baseada na especificação dos respectivos padrões.

G-PON

O diagrama de blocos do sistema simulado é ilustrado na Figura B.1. A taxa total transmitida na fibra foi de 2.5 Gbps nos sentidos *downlink* e *uplink* conforme especificado no padrão ITU-T G.984 (G-PON).

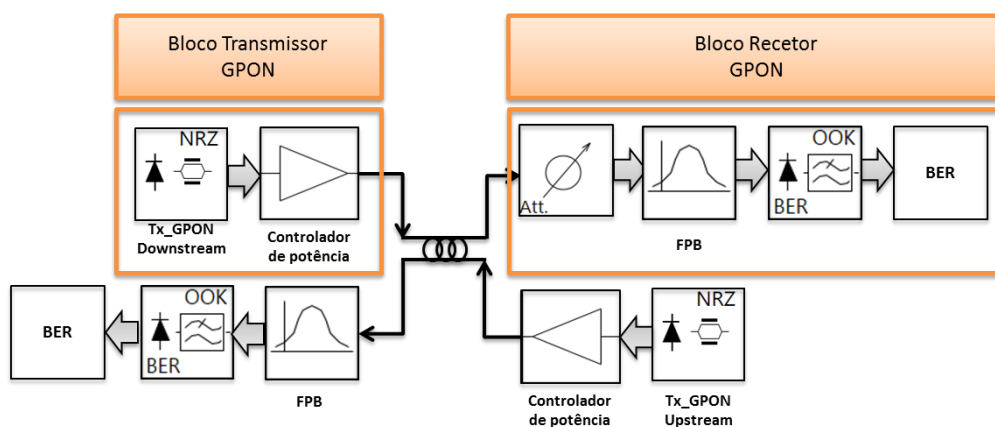


Figura B.1: Ilustração do sistema G-PON desenvolvido no simulador VPI

No sentido *downlink*, o transmissor é constituído por um bloco *TxExtModLaser* que é composto por um gerador de sinal NRZ (*Non Return-to-Zero*), um laser CW (*Continuous Wave*) e um modulador do tipo MZM (*Mach-Zender Modulator*). No sistema G-PON e nos demais sistemas (XG-PON, TWDM e DRoF) foi utilizado um bloco de “controlador de

potência” para garantir que a potência óptica na fibra fosse a mesma emitida no laser, dessa forma as perdas no modulador são desconsideradas.

No processo de recepção, no domínio óptico, a filtragem do canal G-PON é realizada por um filtro passa-banda gaussiano. No último estágio a conversão O-E e a avaliação de desempenho transmissão é realizada por um bloco OOK (*On-off keying*) constituído por um foto diodo receptor APD (*Avalanche Photodiode*), um filtro elétrico (*Bessel*), um atenuador e um estimador de BER.

A transmissão no sentido *uplink* ocorre de forma semelhante, com os mesmos blocos do transmissor e receptor descritos anteriormente. O plano de comprimentos de onda utilizado para o sistema G-PON segue a definição do padrão o qual especifica:

- *Downstream*: 1490 nm
- *Upstream*: 1310 nm.

XG-PON

O diagrama de blocos do sistema XG-PON simulado é ilustrado na Figura B.2. Nesta tese foi considerado a tecnologia XG-PON 2 (ITU-G.987) que possui taxas assimétricas de 10 Gbit/s.

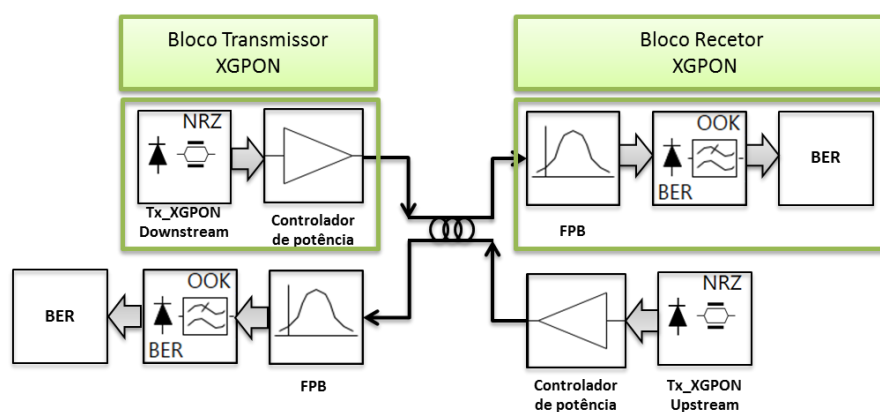


Figura B.2: Ilustração do sistema XG-PON desenvolvido no simulador VPI

Como descrito, o princípio de funcionamento do XG-PON é semelhante ao G-PON. O bloco *TxExtModLaser* é constituído por um gerador de sinal NRZ, um laser CW (*Continuous Wave*) e um modulador do tipo MZM.

Do lado do receptor após a filtragem realizada por um filtro passa-banda gaussiano, o sinal é detectado, convertido para o domínio eléctrico e finalmente o desempenho da transmissão é avaliada. De forma semelhante ao sistema G-PON, nos estágios de recepção é utilizado um bloco OOK, constituído por um foto díodo receptor (APD), um filtro eléctrico (Bessel) e um estimador de BER.

A transmissão no sentido *uplink* ocorre de forma semelhante aos estágios descritos anteriormente para downlink. O plano de comprimentos de onda utilizados para este sistema XG-PON encontra-se de acordo com o referido na norma o qual especifica:

- *Downstream*: 1577 nm
- *Upstream*: 1270 nm.

TWDM

O diagrama de bloco do sistema TWDM é ilustrado na Figura B.3. A tecnologia TWDM é constituída por 4 canais XG-PON2 que possui taxas simétricas de 10 Gbit/s (*downlink* e *uplink*).

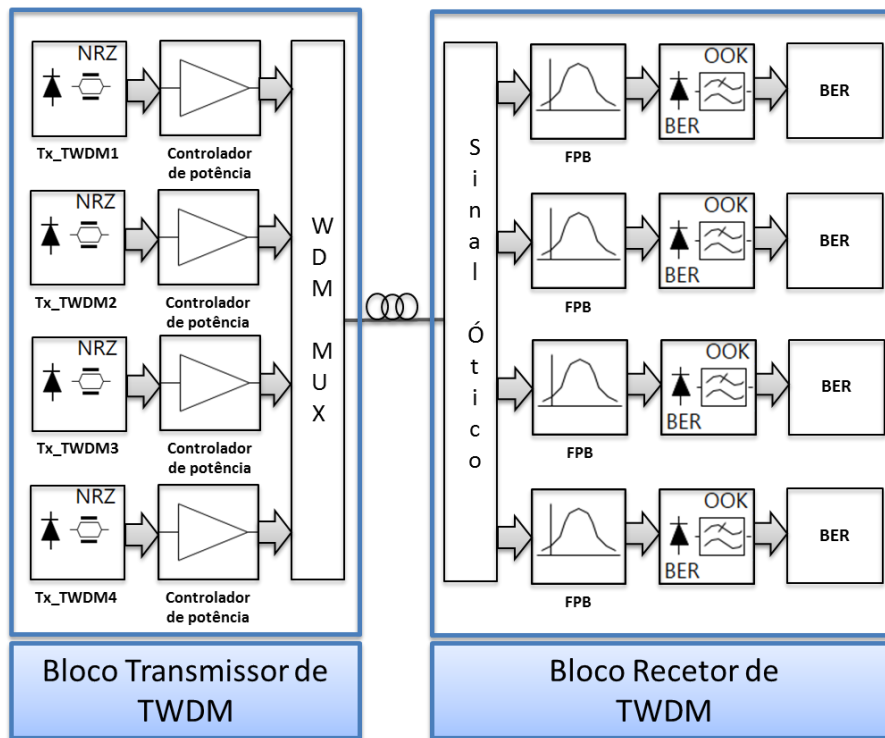


Figura B.3: Ilustração do sistema TWDM-PON desenvolvido no simulador VPI

O transmissor, constituído por 4 blocos *TxExtModLaser*, possui 4 geradores NRZ com taxa de transmissão de 10 Gbit/s. Cada bloco possui um laser CW, um modulador MZM e o bloco controlador de potência. Após a modulação, todos os sinais são multiplexados por um MUX e transmitidos na fibra.

Do lado do receptor, cada sinal é extraído por um filtro passa-banda gaussiano configurado para o sinal da portadora ótica e um bloco OOK constituído por um foto dídodo receptor (APD), um filtro elétrico (Bessel) e um estimador de BER.

No bloco receptor utilizou-se um bloco atenuador para simular as perdas de um divisor óptico de 1:64, um filtro passa-banda gaussiano para configurado para deixar passar o sinal da portadora ótica e um bloco OOK constituído por um foto dídodo receptor (APD), um filtro elétrico (Bessel) e um estimador de BER

O plano de comprimentos de onda, utilizado para este sistema TWDM-PON, escolhido encontra-se descrito a seguir:

- *Downstream ch1*: 1595.0 nm
- *Downstream ch2*: 1595.8 nm
- *Downstream ch3*: 1596.6 nm
- *Downstream ch4*: 1597.4 nm
- *Upstream ch1*: 1530.0 nm
- *Upstream ch2*: 1531.4 nm
- *Upstream ch3*: 1532.8 nm
- *Upstream ch4*: 1534.2 nm.

