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

# Estudo comparativo de sistemas de Rádio Digital sobre Fibra aplicado a C-RAN

Renan Pereira Almeida

DM 36/2014

UFPA / ITEC / PPGEE CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ BELÉM - PARÁ - BRASIL 2014 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Renan Pereira Almeida

# Estudo comparativo de sistemas de Rádio Digital sobre Fibra aplicado a C-RAN

DM 36/2014

UFPA / ITEC / PPGEE CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ BELÉM - PARÁ - BRASIL 2014

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

Renan Pereira Almeida

# Estudo comparativo de sistemas de Rádio Digital sobre Fibra aplicado a C-RAN

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: João Crisóstomo Weyl A. Costa

DM 36/2014

UFPA / ITEC / PPGEE CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ BELÉM - PARÁ - BRASIL 2014

# Estudo comparativo de sistemas de Rádio Digital sobre Fibra aplicado a C-RAN

Renan Pereira Almeida

PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA COMUNICAÇÕES COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

**Data da defesa:** 15/12/2014

Conceito:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa (Orientador – UFPA)

Profa. Dra. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi (Avaliadora externa – IME-RJ)

Profa. Dra. Maria Aparecida Gonçalves Martinez (Avaliadora externa – IFRJ)

> Prof. Dr. Marco José Sousa (Avaliador interno – UFPA)

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais: Dilma Braga e Reginaldo Almeida que com tanto esforço conseguiram me proporcionar uma educação de qualidade num país onde uma das maiores carências é exatamente essa.

Agradeço sinceramente ao professor e amigo João Weyl pela orientação dada, apoio, confiança e principalmente por todo esforço que ele dedicou a Universidade Federal do Pará (UFPA) e imensa contribuição que ele teve para criação de diversas oportunidades a centenas de alunos, além de projetos que fazem da nossa universidade um local mais competitivo em caráter nacional e mundial.

Agradeço aos meus amigos que me apoiaram nesse caminho, dentre eles: Nayanne Moritsuka, Rosinei Oliveira, Adam Dreyton, Roberto Medeiros, Rafael Silva, Willian Paixão, Jonathas Modesto, Cindy Fernandes, Renan Santos, Ramon Pantoja, Anna Vorontsova, Edmilton Furtado, Lênon Raiol, Patrícia Muniz, Ted Vale, Vinicius Lima, dentre muitos outros que diretamente e indiretamente contribuíram com a minha formação, não somente no mestrado, mas também como ser humano.

E por fim, mas não menos importante, agradeço ao Laboratório de Redes Ópticas do Instituto Real de Tecnologia (KTH) pelo conhecimento, orientação e companheirismo durante boa parte do meu mestrado. Dentre eles destaco meus orientadores Jiajia Chen, Patryk Urban e a professora Lena Wosinska.

# Sumário

Lista de Figuras ix							
Li	sta c	le Símbolos	xii				
1	Introdução						
	1.1	Objetivo e contribuição	3				
	1.2	Organização do trabalho	4				
<b>2</b>	Conceitos de Redes Ópticas de Acesso						
	2.1	Elementos de um enlace óptico	5				
	2.2	Redes de acesso	8				
	2.3	3 Tecnologia de Rádio sobre Fibra aplicada aos padrões de arquitetura					
		CPRI e OBSAI	10				
	2.4	Redes SCM-WDM	12				
	2.5	A arquitetura C-RAN	14				
3	Cer	Cenários Desenvolvidos					
	3.1	Descrição geral da rede					
	3.2	Blocos de simulação					
		3.2.1 Transmissão	21				
		3.2.2 Meio de transmissão	25				
		3.2.3 Recepção do sinal	26				
4	$\mathbf{Res}$	Resultados					
	4.1	Análise dos cenários	30				
	4.2	Avaliação dos resultados	34				
<b>5</b>	Conclusão						
	5.1	Considerações finais					
	5.2	Trabalhos futuros	39				

Referências Bibliográficas	40
Apêndice: Descrição geral dos parâmetros	44

# Lista de Figuras

1.1	Crescimento no número de estações bases	2
2.1	Modulação óptica.	8
2.2	Níveis de redes de transmissão de dados	8
2.3	Redes ópticas de acesso em relação à distância ao usuário	9
2.4	Ilustração de uma rede PON típica	10
2.5	Exemplo de implementação de RRHs	12
2.6	Modulação por subportadora.	13
2.7	Exemplo da arquitetura C-RAN aplicada a DRoF	15
2.8	Evolução das arquiteturas de BS	16
3.1	Cenário de subportadora única (WDM-DRoF)	18
3.2	Cenário utilizando 3 subportadoras (SCM-DRoF)	18
3.3	Tratamento para as subportadora WDM-DRoF antes do ADC	18
3.4	Tratamento para as subportadoras SCM-DRoF antes do ADC	19
3.5	Processo de transmissão.	21
3.6	Transmissores Elétricos para os modelos WDM-DRoF e SCM-DRoF.	21
3.7	Conversão Analógica-Digital	24
3.8	Bloco galaxy de cossimulação.	24
3.9	Modulação óptica.	25
3.10	DAC para cenário de portadora única.	27
3.11	DAC para cenário de 3 subportadoras.	27
3.12	Receptor para cenário de uma subportadora	29
3.13	Receptor para cenário de três subportadoras	29
4.1	Exemplo de uma constelação 16-QAM	31
4.2	Espectro de recepção após DAC para cenário WDM-DRoF	32
4.3	Espectro de recepção após DAC para cenário SCM-DRoF	32
4.4	Representação binária de um sinal analógico	33
4.5	SNR para diferentes resoluções na ADC/DAC em sistema SCM	33

4.6	SNR para diferentes resoluções na ADC/DAC em sistema de uma	
	subportadora	34
4.7	$\operatorname{BER}$ para cenário SCM-DRoF usando três subportadoras digitais	35
4.8	$\operatorname{BER}$ para cenário WDM-DRoF usando uma subportadora digital	36
4.9	EVM para cenário SCM-DRoF usando três subportadoras digitais	37

# Glossário

-

ADC

AWG Arrayed Waveguide Grating -BBU Base Band Unit -BER Bit Error Rate \_ BPF - Band Pass Filter BPS Bit per Symbol \_ CO -Central Office CWContinuous Wave -CPRI Common Public Radio Interface \_

Analog-Digital Converter

- CRAN Centralized- or Cloud- Radio Access Network
- DAC Digital-Analog Converter
- DR Dynamic Range
- DRoF Digital Radio over Fiber
- EPON Ethernet Passive Optical Network
- EVM Error Vector Magnitude

FTTB	-	Fiber to the Building
FTTC	-	Fiber to the Curb
FTTN	-	Fiber to the Node
FTTP	-	Fiber to the Premises
FTTx	-	Fiber to the "x"
GPON	-	Gigabit Passive Optical Network
LO	-	Local Oscillator
LPF	-	Low Pass Filter
LTE	-	Long Term Evolution
LTE-A	-	LTE-Advanced
MZM	-	Mach-Zehnder Modulator
NIU	-	Network Interface Unit
NG-PON	-	Next-Generation Passive Optical Network
OBPF	-	Optical Band Pass Filter
OBSAI	-	<b>Open Base Station Standard Initiative</b>
ODN	-	Optical Distribution Network
OLT	-	Optical Line Terminal
OLR	-	Optical Line Rate
ONT	-	Optical Network Terminal
ONU	-	Optical Network User
OTDR	-	Optical Time Domain Reflectometry
PON	-	Passive Optical Network
RAN	-	Radio Access Network
RAU	-	Radio Access Unit
RN	-	Remote Node
RO	-	Roll-Off
RoF	-	Radio over Fiber
SCM	-	Subcarrier Multiplexing
SER	-	Symbol Error Rate
WDM	-	Wavelength Division Multiplexing

# RESUMO

O objetivo deste trabalho é comparar aspectos relacionados ao uso de Multiplexação por Subportadora (SCM) em um sistema de transmissão de Rádio Digital sobre Fibra (DRoF) aplicado à Arquitetura de Acesso a Rádio Centralizado (C-RAN). Para isso, foram criados dois cenários que fazem uso da tecnologia DRoF, onde no primeiro, três subportadoras são transmitidas em um comprimento de onda e, para o segundo cenário, três comprimentos de onda são transmitidos, onde cada um possui uma única subportadora. Para ambas configurações é visado alimentar unidades de rádio remoto (RRH) localizadas na torre de transmissão. São analisados aspectos de desempenho da recepção, alcance das redes e complexidade do sistema para cada um dos cenários propostos. Além disso, são mostrados passo a passo como os sistemas foram construídos utilizando o software de simulação VPITransmissionMaker. Foram considerados para cada subportadora uma taxa de 250 Mbps, modulação 16-QAM, centrados na frequência de 5GHz. Os resultados obtidos demonstram que, para SCM-DRoF, uma Taxa de Erro de Bit (BER) de  $10^{-6}$ é mantida constante para enlaces de até 20 km. No segundo modelo, sem uso de SCM, um desempenho similar foi verificado, contudo com alcance de até 40 km. Dado o contexto da aplicação, os fatores desempenho e distância levam a crer que ambos cenários de transmissão podem ser utilizadas para C-RAN. Contudo, levando em consideração o custo e a complexidade no domínio óptico, o sistema utilizando SCM, comparativamente, possui mais vantagens. Conclui-se então que o uso de SCM apresenta-se como uma forte opção para aplicações no contexto das novas tecnologias de redes de acesso móvel.

**Palavras-chave**: Rádio Digital sobre Fibra , Multiplexação por Subportadora, Multiplexação por divisão de comprimento de onda, Redes Ópticas de Acesso, Rede de Acesso Sem Fio de Processamento Centralizado.

# ABSTRACT

The aim of this work is based on the evaluation and comparison of aspects related to transmission of Digital Radio over Fiber (DROF) using Multicarrier Multiplexing Techniques (SCM) applied to Centralized Radio Access Networks architecture (C-RAN). The comparison was performed in two scenarios which the first made use of three subcarriers on a single wavelength, and the second scenario applied one subcarrier being carried also by one wavelength. Wavelength Division Multiplexing techniques (WDM) can be applied for both cases. Moreover, this work shows also the building process of the system step by step using the simulation software VPITransmissionMaker. As case study were considered the transmission of 16-QAM subcarriers each one with 250 Mbps carried in 5 GHz. The simulation analysis is discussed by evaluating the impact of the digitized process on the system performance, complexity and dynamic range. Results indicate that SCM-DRoF has a BER of  $10^{-6}$ for fiber links up to 20 km. For the second scenario without SCM the range can reach up to 40 km. Taking into account the cost and dynamic range, both proposals can be used as a solution for bridging the base stations. However, the complexity in the optical domain and the cost makes the SCM solution comparatively better than the case without it. It concludes that SCM is a cheaper and less complex solution which is able to feed antennas for the new generation of mobile network technologies.

**Keywords**: Digital Radio over Fiber, Subcarrier Multiplexing, Wavelength Multiplexing, Optical Access Network, Centralized Radio Access Network.

# Capítulo 1 Introdução

A arquitetura das redes de acesso tem convergido para um sistema de comunicação integrado de fibra e de *wireless* [1]. Nesse contexto, os sistemas baseados em rádio sobre fibra (RoF) têm atraído cada vez mais atenção das operadoras de telecomunicações, devido principalmente ao crescimento do uso de dispositivos móveis, tais como *smartfones*, *tablets*, etc. Estudos recentes prevêem que, até 2020, o tráfego de banda larga móvel será cem vezes maior que o atual. Além disso, espera-se que a densidade de usuários móveis aumentará por um fator de 10, de acordo com [2].

A tecnologia RoF é uma solução atrativa para prover transmissão de sinais rádio em redes ópticas. No contexto de arquiteturas que utilizam RoF, a Rede de acesso a Rádio Centralizado (C-RAN) baseia-se na ideia de simplificar a estrutura das estações bases (BS) de maneira a centralizar, na central telefônica (CO), parte das funcionalidades que antes eram atribuídas a BS, tais como, conversão de frequência, modulação de portadoras, multiplexação e etc. A arquitetura C-RAN faz uso de transmissão RoF Digital (DRoF) para conectar central e BS [3], e além disso, também utiliza o protocolo CPRI (*Common Public Radio Interface*), este protocolo faz parte de uma iniciativa conjunta entre diversas empresas do ramo de telecomunicações, que tem em vista a padronização de sistemas de acesso em redes móveis [4].

Com a simplificação das arquiteturas de estações base, o custo total da rede também diminui, possibilitando assim um aumento na densidade de antenas, consequentemente maiores taxas de dados, logo maior número de usuários atendidos. Na Figura 1.1 [2] é mostrada a tendência de crescimento no número de estações bases estimado até o ano de 2020.



Figura 1.1: Crescimento no número de estações bases.

Algumas abordagens utilizando o RoF foram propostas em [5, 6]. Em [5], é apresentado experimentalmente um sistema de transmissão de sinais DRoF para aplicações Fibra-Wireless. Nos esquemas desenvolvidos, foi mostrado que o desempenho de um enlace DRoF pode ser melhorado aumentando a taxa de amostragem ou a resolução da ADC e que, a partir de um limiar, a mudança desses parâmetros não altera de maneira significativa a qualidade do sistema, alcançando assim uma condição ótima em relação a custo e desempenho.

Em outra análise [6], foi proposto um sistema para transmissão utilizando multiplexação de subportadora (SCM) também baseado em DRoF. São comparados o desempenho para sistemas de RoF analógico e RoF digital levando em consideração o contexto das novas arquiteturas para estações base. Os resultados evidenciaram que a magnitude de vetor erro (EVM) no canal se manteve constante independentemente do espaçamento entre os canais. De acordo com a análise feita pelo autor, considerando os parâmetros de SNR e EVM, foi concluído que os sistemas RoF analógicos são preferíveis para a próxima geração de sistemas wireless.

Ainda neste mesmo tema, no trabalho desenvolvido em [7], um sistema SCM-WDM utilizando RoF é proposto. São confirmados experimentalmente os efeitos da intermodulação de terceira ordem em sistemas analógicos de transmissão de rádio. São explicitados também os problemas encontrados devido, principalmente ao alcance da fibra, ao espaçamento entre as portadoras ópticas e à frequência de transmissão óptica.

Em [8], também foi demonstrado, experimentalmente e analiticamente, o desempenho de uma transmissão em um enlace híbrido SCM-WDM utilizando a técnica RoF aplicada à tecnologia GPON (*Gigabit Passive Optical Networks*). Foi empregada a modulação 8-DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) em uma frequência de 2,4 GHz. Para diferentes comprimentos de fibra, foram analisadas as características de supressão dos efeitos de intermodulação. Os resultados mostraram que, para um sistema com 64 usuários, o alcance da rede pode ser de até 25 km para fibra monomodo com taxas de até 2,5 Gbps.

Em [9], são apresentados dois cenários experimentais de um sistema RoF utilizando SCM aplicado para redes WDM-PON de alta densidade. Os cenários comparam o desempenho, dentre outros aspectos, da transmissão SCM-WDM utilizando subportadoras mapeadas por banda (*Band-mapped*) ou independentes (*all-band*). Nos resultados, é concluído que ambas soluções são válidas para sistemas de redes acesso móvel, e que isto só é possível por da conta grande redução da complexidade da rede de acesso provida pelas novas arquiteturas de BS.

Por fim, no trabalho desenvolvido em [10], são apresentadas e comparadas diferentes soluções para implementação de tecnologias híbridas fibra-wireless aplicado a arquitetura C-RAN. É feito um estudo aprofundado sobre as diversas tecnologias de transmissão Wireless levando em consideração o cancelamento da interferência entre células, o crescimento da capacidade do sistema, o desenvolvimento de procedimentos de gerência destas redes e alocação de recursos. Além disso, são apresentados também as tendências, benefícios e implicações no uso de C-RAN destacando as vantagens de RoF digital e analógico.

## 1.1 Objetivo e contribuição

O objetivo deste trabalho é investigar o uso de técnicas de multiplexação de subportadora em sistemas DRoF e comparar com sistemas WDM tradicionais, onde somente uma subportadora é usada. Isto é feito tendo em vista possíveis aplicações dessas tecnologias em redes híbridas (rádio-fibra) para suporte a sistemas móveis de última geração, que fazem uso de arquitetura de redes com processamento centralizado (C-RAN).

Utilizou-se o software de simulação VPITransmissionMaker para desenvolvimento e análise dos dois cenários criados. Sendo assim, os cenários possuem, respectivamente, uma e três subportadoras 16-QAM com taxa individual de 250 Mbps centradas na frequência de 5 GHz. As contribuições feitas neste trabalho tem em vista, principalmente, fornecer um estudo comparativo entre o uso, ou não, de SCM aplicado à DRoF, e também, como estas tecnologias podem beneficiar a transmissão de sinais no contexto da arquitetura C-RAN. Além disso, é descrito detalhadamente o projeto feito neste trabalho, fato este que pode potencialmente auxiliar outros alunos no estudo de sistemas ópticos feitos por intermédio de simulação.

No decorrer do trabalho, é dada ênfase nos passos para a construção de ambos os modelos, nos parâmetros que foram utilizados para a simulação, na razão da escolha de cada um, e também, como estes parâmetros influenciam nos aspectos de qualidade da recepção, alcance do sinal e complexidade do sistema. Tendo em vista este fim, são extraídas métricas de Taxa Erro de Bit (BER), Magnitude do Vetor de Erro (EVM), diagramas de constelação, taxa de linha e Relação Sinal-Ruído (SNR).

# 1.2 Organização do trabalho

Na sequência, o trabalho é organizado da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 são explorados os principais conceitos de redes ópticas que serão utilizados na descrição do trabalho. São também abordados os principais termos de redes de acesso, a tecnologia RoF, a integração Fibra-Wireless e como esta integração é feita no contexto de C-RAN.
- No Capítulo 3 é detalhado o processo de construção dos dois cenários utilizados neste trabalho. São descritos todos os blocos utilizados nos esquemas, os parâmetros que os compõem, como todos eles funcionam e o motivo da escolha dos valores para cada um dos parâmetros.
- No Capítulo 4 é feita a análise dos cenários e são levantadas as principais características aplicadas aos modelos. São apresentados também os resultados obtidos pela simulação baseados em parâmetros de BER, EVM e SNR.
- No Capítulo 5 são feitas as considerações finais e conclusões acerca dos resultados alcançados. Além disso, são exploradas as aplicações futuras que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho.

# Capítulo 2 Conceitos de Redes Ópticas de Acesso

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos sobre Redes Ópticas de Acesso que se aplicam no contexto deste trabalho. Além disso, são feitas descrições de algumas das características dos principais elementos presentes em um enlace óptico, da mesma maneira, acerca das principais arquiteturas utilizadas em redes ópticas atualmente. Por fim, são apresentados conceitos de Rádio sobre Fibra aplicada à arquitetura C-RAN.

## 2.1 Elementos de um enlace óptico

Um sistema de comunicação óptica pode ser dividido, de uma maneira simplista em transmissor, meio de propagação e receptor. Dentro deste contexto, as redes ópticas são formadas por uma série de elementos básicos, sendo os principais deles descritos nos tópicos abaixo [11, 12, 13].

- Transmissor óptico: Laser ou LED com função de conversão eletro-óptica;
- Fibra Óptica: Principalmente diferenciada em Monomodo e Multimodo;
- Receptor: Fotodiodos com função de conversão opto-elétrica, seguidos de amplificadores elétricos e circuitos de decisão;
- Dispositivos passivos;
- Dispositivos ativos.

O *Transmissor óptico*, de uma maneira muito simplificada, pode ser entendido como uma fonte de luz associada a um dispositivo eletrônico que transmite informação. A fonte pode ser um LED ou um *laser*, sendo principal deles o *laser*. A estabilidade de

saída da luz é controlada eletronicamente e a variação do sinal óptico é proporcional ao sinal de informação. Em sistemas ópticos, a potência de um laser pode variar de acordo com o alcance da rede ou tipo de tecnologia aplicada. Parâmetros como corrente de limiar (*current threshold*) e eficiência de declive (*slope efficiency*) são importantes de serem notados dado que se referem, respectivamente, ao regime de operação linear do laser e à razão entre a saída óptica e a corrente de entrada do laser. Outra característica essencial para este componente é a largura de linha, este parâmetro fisico determina quão largo é o espectro que o laser ocupa. Com uma estreita largura de linha, é possível transmitir mais comprimentos de onda com um menor espaçamento entre elas, reduzindo assim o total espectro utilizado e por consequência o custo da rede. Por fim, idealmente, é exigido que o laser mantenha suas características estáveis em função de fatores externos, sendo o principal deles a temperatura. Logo, para cada tipo de laser, são especificadas faixa de temperatura onde as características da transmissão mantêm-se estáveis.

A *Fibra Óptica*, como meio de propagação da luz, possui como principais características: o modo de propagação (Monomodo ou Multimodo), a atenuação, a dispersão cromática e modal, o diâmetro do núcleo e a abertura numérica. Além disso, em projetos de redes, deve-se considerar em relação à fibra: a taxa de bits (devido ao potencial de gerar efeitos não lineares), o comprimento do enlace (devido principalmente à atenuação total do sistema), a faixa de espectro de transmissão (em relação a cada tipo de janela de transmissão) e todas as eventuais especificidades do ambiente em que a rede vai ser instalada.

Os fotodetectores são responsáveis pela conversão opto-elétrica dos sinais após percorrerem a fibra. Um receptor, além do fotodiodo, também possui um amplificador de entrada (front-end amplifier). Este amplificador pode ter diferentes propósitos dependendo da aplicação. Os dois principais tipos de amplificadores de entrada são os de alta impedância e de transimpedância. O princípio básico do fotodetector é gerar uma corrente elétrica proporcional a potência óptica incidente. A eficiência com que este componente faz esta conversão é comumente definida pelo parâmetro responsividade. Outra característica dos fotodetectores é a larga faixa de operação, isto é demonstrado, por exemplo, pelo fato de um fotodetector para janela de 1.55  $\mu m$  também poder ser usado para janelas de 1.3  $\mu m$ .

Os *dispositivos ativos* e *passivos* de uma rede óptica são diferenciados respectivamente pela necessidade, ou não, de controle eletrônico no mesmo. Dentre os dispositivos ativos destacam-se principalmente amplificadores, lasers, moduladores, filtros ajustáveis, atenuadores, divisores, *switches* e etc. Dentre os dispositivos passivos encontram-se: conectores ópticos, emendas, isoladores ópticos, filtros ópticos e acopladores.

De acordo com a classificação dos dispositivos já citados, os multiplexadores ópticos podem ser ativos ou passivos. Este componente tem fundamental importância por ser uma das principais fontes de perda na rede. Os multiplexadores e demultiplexadores funcionam em conjunto, agregando os comprimentos de onda em um único canal e, após percorrer a fibra, separando os comprimentos de onda para seus respectivos receptores. Dentre as principais categorias de multiplexadores e ncontram-se os divisores de potência (*Power Splitter*) e as grades de guias de onda vetorizado (AWG). Para o primeiro, a multiplexação dos sinais pode gerar uma perda de até 17 dB [14], e na demultiplexação, os sinais são espalhados por todos os canais de saída (*broadcasting*) sendo necessária a instalação de filtros ópticos para detecção de um comprimento de onda específico. Já para o AWG, a perda é menor, cerca de 2,5 dB [15], e a saída de cada canal já seleciona o comprimento de onda a ser enviado para o receptor. Pelo fato de possuir uma baixa perda por inserção, o AWG possibilitou um grande avanço nas redes de acesso WDM. Para ambos os multiplexadores, a perda por inserção será ainda maior dependendo do número de canais utilizados.

Dentre os dispositivos ativos é necessário dar um destaque aos moduladores ópticos. Os tipos de modulação óptica podem ser classificados basicamente em direta e externa. Para a modulação direta (DML), a informação elétrica é modulada diretamente sobre a fonte óptica do laser, de maneira similar ao que é mostrado na Figura 2.1 [13]. Já na modulação externa, em uma análise simplista, a diferença de tensão aplicada no dispositivo gera uma interferência que modula o sinal óptico de acordo com o sinal elétrico, sendo o principal dispositivo usado neste tipo de modulação chamado modulador Mach-Zehnder (MZM). Além do que já foi dito, uma das principais vantagens da modulação externa é o fato de permitir transmissão de dados em taxas mais altas, quando comparado com os moduladores diretos. Além disso, o alcance dos moduladores externos também é maior, dado que para DML o alargamento do espectro óptico não permite que o sinal se mantenha estável em longas distâncias, impossibilitando assim a recepção do mesmo, efeito este que não ocorre para modulação externa [16].



Figura 2.1: Modulação óptica.

Na Figura 2.1 é demonstrada a modulação óptica de um sinal elétrico, onde  $f_s$  representa a frequência da portadora elétrica e  $f_c$  é a frequência da portadora óptica. A saída do laser é formada a partir da variação da informação elétrica transmitida [13].

## 2.2 Redes de acesso

Segundo [17], a hierarquia das redes de comunicação pode ser definida, do macro ao micro, em: *backbone*, rede regionais, redes metro-core e por fim as redes de acesso, que se conectam com o usuário, tendo cerca de poucas dezenas ou centenas de quilômetros. Na Figura 2.2 é mostrada a hierarquia de níveis para as redes transmissão de dados.



Figura 2.2: Níveis de redes de transmissão de dados.

Comparado a qualquer outro nível de rede, o *backbone* é a linha de transmissão que alcança o maior tráfego de dados. Estes enlaces são caracterizados por conectarem regiões separadas por longas distâncias, como por exemplo, países ou continentes. Os backbones também alimentam outras subredes possuindo assim diversas ramificações. As subredes alimentadas pelos backbones são chamadas redes regionais, estas redes possuem um tráfego de dados menor em relação ao backbone, porém maior que as demais, e alimentam por sua vez as redes metro-core. As redes metro-core são comumente chamadas de redes metropolitanas, elas conectam grandes cidades e em geral possuem topologia em anel, estrela ou *mesh*. Conectados às redes metro-core estão as redes de acesso, estas redes são responsáveis pela conexão das centrais telefônicas com o usuário ou com outra possível rede, como por exemplo, uma rede local ou uma rede móvel. Os cenários abordados neste trabalho estão localizados no contexto de redes ópticas de acesso, e conectam a central telefônica com uma antena, que por sua vez faz a distribuição dos sinais para os demais usuários móveis.

As redes ópticas de acesso podem ser definidas de acordo com o destino final do enlace óptico. Genericamente chamado como FTTx (do inglês, *Fiber to the* x), onde o x é o destino da fibra. Os diversos subtipos de redes ópticas dão origem aos seguintes termos: FTTB, FTTA, FTTH, FTTC, significando respectivamente o destino da fibra como sendo: prédio (*Building*), apartamento, residência (*Home*) ou armário de distribuição (*Curb*) [13].

A ideia da rede óptica de acesso é conectar uma CO, ou terminais ópticos (OLT), até o usuário final, ou um centro de distribuição, percorrendo para este fim nós remotos (RN) até chegar às unidades da rede óptica (ONU) e/ou unidades de interface da rede (NIU). Na Figura 2.3 [13], são ilustrados os diferentes tipos de redes de acesso baseado em quão perto a fibra está em relação ao usuário.



Figura 2.3: Redes ópticas de acesso em relação à distância ao usuário.

Partindo deste contexto, uma rede óptica passiva (PON) é definida como uma rede óptica ponto-multiponto que não utiliza amplificação entre seus terminais. Sua composição consiste de uma OLT localizada na CO que provê serviço a múltiplas ONUs [13], como mostra a Figura 2.4.



Figura 2.4: Ilustração de uma rede PON típica.

Das técnicas de multiplexação aplicadas a PON, o WDM-PON é o mais usual. A ideia desta tecnologia consiste basicamente em transmitir dados em uma rede óptica simultaneamente, utilizando múltiplos comprimentos de onda. Em contraste ao WDM-PON, outra importante técnica de multiplexação é o TDM. Nesta técnica, o sinal é multiplexado no domínio do tempo, e cada sinal de informação é identificado pelo tempo de chegada ao receptor. O desenvolvimento de redes ópticas tem migrado para o uso de tecnologias de WDM ao invés de TDM, isto se deu por vários motivos, dentre eles, os principais são complexidade e custo [13, 11]. Dentre as principais tecnologias de acesso que utilizam TDM-PON encontram-se: EPON e GPON. Já para WDM-PON, destacam-se NG-PON e NG-PON2 [18].

# 2.3 Tecnologia de Rádio sobre Fibra aplicada aos padrões de arquitetura CPRI e OBSAI

Para suportar a demanda gerada para a próxima geração de serviços wireless, é de vital importância a integração entre as tecnologias ópticas e wireless em uma plataforma que combine a alta capacidade da fibra com a ampla cobertura provida pelas redes sem fio [19]. Neste contexto, a tecnologia RoF tem atraído bastante atenção devido à possibilidade de transmissão de microondas em longas distâncias usando fibra óptica [7]. RoF é uma técnica promissora para o desenvolvimento de sistemas de acesso a rádio flexíveis e com melhor custo-benefício. Através da alocação e controle de múltiplos serviços wireless na CO, os sistemas RoF são aptos a entregar à estação base o sinal analógico pronto para ser propagado, sem diferenciação de protocolos ou interfaces, reduzindo assim consideravelmente o custo [9].

A tecnologia RoF, em seu formato clássico, é aplicada no formato analógico. Entretanto, sistemas Digitais RoF (DRoF) tem sido amplamente desenvolvidos devido a recém especificação de arquiteruras de BS abertas, tais como CPRI [4] e a Iniciativa de padronização de estações de rádio base abertas (OBSAI)[20], explanadas no próximo parágrafo. E, além disso, por conta da interoperabilidade entre diferentes fornecedores e pela diferenciação flexível entre produtos [9]. Enlaces DRoF são considerados como, pelo menos, uma ordem de magnitude mais caros que RoF analógico, principalmente por conta das altas taxas de linha requeridas pelos canais de rádio [9]. Por outro lado, a tecnologia RoF analógica apresenta algumas limitações principalmente relacionadas a um curto alcance e também por requerer alta linearidade dos sistemas de transmissão [21][22], problemas estes que a DRoF consegue contrapor.

As principais arquiteturas de estação base em desenvolvimento na atualidade são CPRI e OBSAI. Os objetivos destas propostas são: reduzir o custo de criação e operação da rede, reduzir a complexidade do hardware utilizado, possibilitar a compatibilidade entre hardwares de diversos fabricantes e melhorar o desempenho e a cobertura de sistemas de transmissão de Rádio sobre Fibra. Os padrões se diferenciam principalmente em relação ao custo e a flexibilidade do software utilizado.

O padrão OBSAI define o uso de interfaces digitais abertas e padronizadas para comunicação entre os módulos da rede independente de fabricantes, com isso, a estação base para esta proposta permite a escalabilidade e compatibilidade entre fabricantes e os padrões de interface sem fio, sendo esta a principal característica do modelo. Para o CPRI, a principal característica é o fato de que somente a camada física e a camada de dados são padronizadas, ou seja, tanto a camada de transporte, quanto a camada de aplicação são dependentes de cada fabricante. O modelo também dá enfase no uso de rádio digital sobre fibra, contudo restringe a interface a um contexto ponto-a-ponto. Esta proposta inclui também mecanismos de controle, gerenciamento e sincronização. As unidades de rádio remoto (RRH) são dispositivos utilizados tanto para as iniciativas OBSAI quanto CPRI [23, 20, 4, 24]. Na Figura 2.5 [24] é mostrado um exemplo de implementação de RRHs para torre, para teto de prédios e paredes.

Com o uso de RRHs, o sistema de transmissão apresenta as seguintes vantagens: redução de custos de resfriamento do hardware, menor consumo de potência, maior confiabilidade, uma estação base pode servir a múltiplas RRHs, melhor desempenho da transmissão de rádio, dentre outras. Já na estação base as vantagens apresentam-se por conta da presença de um sistema de gerenciamento que permite a configuração da taxa de dados e largura de canal via software. Para ambas propostas a fibra óptica necessária deve ter alcance de até 20 km [24].



Figura 2.5: Exemplo de implementação de RRHs.

# 2.4 Redes SCM-WDM

Dentro do contexto de RoF encontra-se o SCM. Com a aplicação de SCM, busca-se reduzir a complexidade das redes de acesso à rádio e permitir que seja feito o gerenciamento do espectro para distribuição de sinais wireless [7]. Unindo as vantagens do SCM com as vantagens da transmissão óptica WDM, o híbrido SCM-WDM foi criado. A partir da combinação destas tecnologias, a portadora óptica é capaz de transmitir múltiplas subportadoras elétricas, criando assim diversas vantagens, como por exemplo, a otimização do espectro óptico, ou a transmissão de diferentes tipos de dados em um único comprimento de onda. Com o uso de SCM é possível adequar o espectro de transmissão de acordo com um determinado contexto, como por exemplo, utilizar as frequências que são menos susceptíveis a ruído para transmissão de dados, ou então, como é o caso deste trabalho, utilizar um grupo de subportadoras para alimentar um certo número de antenas localizadas em uma torre. Outra vantagem para o uso de SCM é a aplicação para redes ópticas, isto é, ao invés de modular dados na portadora óptica diretamente, é possível primeiramente modular portadoras elétricas em uma faixa de frequência de micro-ondas, tipicamente de 2 GHz à 10 GHz, e então convertê-las para o domínio óptico.

Na Figura 2.6 é ilustrado de maneira simplificada um sistema SCM. O princípio básico deste tipo de sistema considera a existência de múltiplos sinais de informação em banda base que são deslocados para faixas de frequência mais alta a partir de um processo de batimento com portadoras dos osciladores locais, gerando assim um sinal agregado da informação em alta frequência. Este processo é conhecido como Multiplexação de Subportadora, sendo este vastamente utilizado em sistemas de TV, telecomunicações e etc. O SCM possui o mesmo comportamento da Multiplexação por divisão de Frequência (FDM), porém, o nome SCM é convencionado para a aplicação em redes ópticas, dado que as subportadoras elétricas são posteriormente convertidas para o domínio óptico. Entende-se também que, para a existência de subportadoras, existem também portadoras, isto é, o termo subportadora se dá a sinais elétricos localizados em diferentes frequências (subportadoras elétricas) que, quando modulados em uma fonte, ou portadora óptica, podem ser transmitidos em redes ópticas. Por último, dado que em SCM vários sinais são transmitidos simultaneamente, é comum a ocorrência de interferências, de forma a evitar estas interferências, e principalmente, a superposição desses sinais, é necessário garantir um espaçamento adequado entre as diferentes subportadoras, denominado banda de guarda. Desse modo, a largura do sinal resultante da agregação das subportadoras é maior que a somatória entre elas.



Figura 2.6: Modulação por subportadora.

SCM pode ser usado de várias formas. Por exemplo, a maioria dos sistemas WDM desenvolvidos transmitem alguma informação de controle sobre o canal WDM, e para isso, o SCM é utilizado [13]. Por último e concluindo, a grande vantagem do esquema SCM é a de poder utilizar tecnologias de detecção coerente no domínio elétrico. Enquanto a tecnologia para detecção coerente no domínio óptico apresenta alto custo, a tecnologia de detecção coerente no domínio elétrico tem sido implementada comercialmente. Portanto, a detecção coerente no domínio elétrico se torna mais viável que no domínio óptico, permitindo utilizar formatos avançados de modulação, aumentando assim a exploração da banda espectral disponível na fibra óptica utilizada [25].

## 2.5 A arquitetura C-RAN

O fato da integração fibra-wireless ter acontecido provocou uma grande mudança na arquitetura das redes de acesso de rádio (RAN). Neste sentido, a C-RAN foi idealizada com objetivo de possibilitar a redução da complexidade das arquiteturas de BS, aumentar o alcance das mesmas e, por consequência das tecnologias aplicadas, permitir um maior número de usuários e maior vazão de dados. Neste modelo de arquitetura, o processamento de dados, antes localizado na CO, passa a localizar-se na BS, reduzindo assim o custo da mesma [26].

Diferentemente da arquitetura RAN tradicional, no qual as unidades de banda base (BBU) e a RRH estão no mesmo local, na C-RAN estes dois principais componentes estão localizados em locais distintos, como mostra a Figura 2.7. Desta maneira, as funcionalidades que requerem maior capacidade de processamento e maior consumo de potência são centralizadas na BBU, dentro da CO, e a RRH, localizada na torre de transmissão é basicamente responsável pela recepção do sinal, amplificação e conversão digital-analógica [27].

A conexão do fronthaul, feita entre a BBU e a RRH, pode utilizar diversas interfaces que envolvem RoF. Para as tecnologias de quarta geração, tais como LTE/LTE-A, as interfaces CPRI e OBSAI são as mais utilizadas, em ambas DRoF é aplicado [28].

Na Figura 2.8 [26], é mostrada a evolução das estações bases desde a tradicional macro BS até a C-RAN. A primeira arquitetura, da esquerda para a direita, mostra a tradicional Macro BS. Esta arquitetura é utilizada principalmente para as tecnologias de 1G e 2G, e a conexão entre a BS e as RRH (presentes nas antenas) era feita por



Figura 2.7: Exemplo da arquitetura C-RAN aplicada a DRoF.

intermédio de cabos de cobre. Na segunda arquitetura, o conceito de BS distribuída foi introduzido. O uso desta arquitetura veio juntamente com a tecnologia 3G, e a partir desta, foi feito uso de fibra óptica para conectar a RRH e a BBU. A interface da conexão utilizada na fibra segue o padrão OBSAI ou CPRI. A RRH é localizada no topo da torre, próximo da antena, reduzindo assim a perda da mesma, quando comparado com a BS tradicional, onde o sinal de rádio trafega desde a cabine, presente na BS, até a antena. O enlace entre RRH e BBU também permite maior flexibilidade no planejamento e desenvolvimento da rede, dado que, com o uso de fibra, a BS pode estar distante em até centenas de metros da BBU. No terceiro e último quadro, a C-RAN pode ser vista como uma evolução da arquitetura de BS distribuída. Esta arquitetura foi criada com base em um conjunto de tecnologias wireless e ópticas existentes. Como exemplo destas tecnologias, a C-RAN faz uso do padrão CPRI e também utiliza WDM para transmissão do sinal de banda base em longas distâncias. A arquitetura C-RAN faz uso de tecnologias de rede de centralização de dados, com isso reduz custos, aumenta a confiabilidade do sistema, reduz a latência e expande a largura de banda para interconexão entre as BBUs. Além disso, a C-RAN faz uso de uma plataforma aberta, possui tecnologias de virtualização em tempo real, é compatível a múltiplos fabricantes e múltiplas tecnologias [10][29][26].



Figura 2.8: Evolução das arquiteturas de BS.

# Capítulo 3 Cenários Desenvolvidos

Neste Capítulo são descritos os passos para construção dos dois cenários propostos para este trabalho. É dada ênfase nos parâmetros definidos e na configuração de cada um deles. É apresentado, também, um fluxograma que segue a sequência de transmissão até a recepção do sinal passando por todos os blocos.

Para a modelagem e simulação dos cenários foi utilizado o software VPITransmissionMaker na versão 9.1 [30]. Este software provê um ambiente próprio para modelagem de redes e projetos de fotônica com grande número de componentes ópticos e elétricos utilizados em sistemas reais além de ferramentas de análise e documentação teórica e prática dos componentes.

# 3.1 Descrição geral da rede

Primeiramente, é importante destacar que a principal diferença entre os cenários desenvolvidos é o número de portadoras que são moduladas em um único comprimento de onda. Desta forma, a transmissão sem uso do SCM é chamada WDM-DRoF. Consequentemente, o sistema que possui três subportadoras foi denominado SCM-DRoF. Resumidamente, para ambos os sistemas, três comprimentos de onda são emitidos, sendo cada um composto de uma ou três subportadoras elétricas. Os sistemas WDM-DRoF e SCM-DRoF são mostrados, respectivamente, nas Figuras 3.1 e 3.2. O objetivo deste trabalho é comparar o comportamento de um sistema de subportadora única com um sistema com múltiplas subportadoras, utilizando DRoF, aplicado ao contexto das arquiteturas C-RAN.



Figura 3.1: Cenário de subportadora única (WDM-DRoF).



Figura 3.2: Cenário utilizando 3 subportadoras (SCM-DRoF).

No primeiro cenário apresentado na Figura 3.1, um oscilador local (LO) de valor 4,95 GHz é aplicado na subportadora única de 16-QAM, centrada na frequência de 5 GHz. Com isso, dois batimentos do mesmo sinal são gerados nas frequências de 50 MHz e 9,95 GHz. A réplica da subportadora centrada em banda base é então filtrada por um filtro passa baixa (LPF), para na sequência, ser encaminhada ao conversor analógico-digital (ADC). Após isso, o sinal da subportadora, agora digitalizado, modula a fonde de luz proveniente de um Laser de onda contínua (CW) através de um modulador MZM, como ilustra o processo mostrado na Figura 3.3. Este processo ocorre em paralelo em mais outros dois comprimentos de onda. Sendo assim, a partir deste ponto, três comprimentos de onda, contendo uma subportadora cada, são inseridos na fibra por intermédio de um multiplexador (MUX). Para este contexto, a BBU é composta por três comprimento de onda, e cada comprimento de onda alimenta uma RRH presente na antena. Devido a isto, um número maior de componentes ópticos se faz necessário no emissor, impactando diretamente no custo do sistema.



Figura 3.3: Tratamento para as subportadora WDM-DRoF antes do ADC.

Após percorrer a fibra, para o WDM-DRoF, o processo de recepção segue os seguintes passos: primeiramente, um filtro óptico passa faixa (OBPF) seleciona cada um dos três comprimentos de onda para suas respectivas RRHs. Depois disso, o sinal óptico é convertido para o domínio elétrico por um fotodiodo PIN, com isso o sinal digital, que foi enviado, é recuperado. Após convertido para o domínio elétrico, o sinal digital é processado por um conversor digital-analógico (DAC). E finalmente, estando no formato analógico, o sinal de banda base é deslocado de volta para frequências de rádio por intermédio de outro LO e então é feita a recepção de cada uma das subportadoras. Em um ponto de vista prático, o local onde é feita a recepção da subportadora é o ponto de partida de onde a antena propagaria o sinal de rádio para os usuários móveis. Lembrando que, no modelo WDM-DRoF, para cada uma das RRHs, existirá um filtro óptico, um fotodiodo, uma DAC, um oscilador local e um filtro elétrico.

No segundo cenário apresentado na Figura 3.2, três subportadoras 16-QAM centradas nas frequências de 4,9 GHz, 5 GHz e 5,1 GHz são transladadas por um oscilador local de valor 4,8 GHz. Após o LO, as frequências de rádio são duplicadas apresentando correspondências centradas nas frequências de 100, 200 e 300 MHz para as frequências menores, e 9,7 GHz, 9,8 GHz e 9,9 GHz. Da mesma maneira que no cenário anterior, os sinais de banda base das subportadoras, centrados em 0,2 GHz, são filtrados por um filtro LPF e encaminhados a um ADC. Após isso, já digitalizadas, as subportadoras, através de um modulador MZM, modulam a luz do Laser CW, como é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Tratamento para as subportadoras SCM-DRoF antes do ADC.

Continuando o cenário SCM-DRoF, o sinal óptico após percorrer a fibra é recebido na outra extremidade, onde é convertido para o domínio elétrico por um fotodiodo PIN. Após a conversão opto-elétrica, o sinal é encaminhado para o DAC. A partir daí, cada subportadora é então deslocada novamente para as frequências de rádio através de um LO. Neste ponto, um filtro elétrico passa banda (BPF) é responsável por selecionar cada subportadora para seu devido receptor. Da mesma maneira que no cenário anterior, os receptores QAM representam as respectivas RRHs que enviam seus sinais para a antena em si. Lembrando que, no cenário SCM-DRoF, um único comprimento de onda irá conter todas as três subportadoras, implicando assim em uma economia na rede, já que todas as subportadoras vão compartilhar os mesmos componentes, tanto no transmissor quanto no receptor.

Baseado nos formatos de modulação utilizados para LTE-A, foi pensado em se utilizar as modulações de 64-QAM ou 16-QAM para o sistema deste trabalho. Tendo em vista que, para um sistema com maior quantidade de bits por símbolo, a largura de banda é menor (dada uma mesma taxa de transmissão), mas em contrapartida, a sensibilidade do sinal ao ruído é maior, foi definido o uso de 16-QAM. Considerando esta modulação, o espectro ocupado seria maior para uma mesma taxa transmitida, ou seja, foi considerado o uso do pior caso.

Dado que, em todos os cenários, as subportadoras possuem taxa de transmissão unitária de 250 Mbps. A largura de banda de cada subportadora será de 75 MHz. Tendo em vista adequar o sinal de informação e evitar interferências entre as subportadoras, para o cenário SCM-DRoF, o espaçamento entre os canais é definido em 100 MHz, formado basicamente pela largura de banda do sinal somado a uma banda de guarda. Este mesmo problema não é presente no cenário WDM-DRoF, dado que cada subportadora possui seu próprio comprimento de onda.

Neste trabalho, as frequências originais das subportadoras são definidas com base nas frequências utilizadas pelas novas tecnologias de redes de acesso, como por exemplo, 2,4 GHz ou 5 GHz no caso de LTE-A [2]. Além disso, para o cenário SCM-DRoF, foi escolhido o uso de somente três subportadoras visando um modelo simplista de antena com três RRHs com cobertura de 120 graus cada. Se considerado o uso de mais uma subportadora no sistema, isto significaria um acréscimo no número de componentes da rede e, principalmente, um aumento na complexidade do ADC/DAC por conta da limitação de banda. Por exemplo, para um sistema SCM de 4 subportadoras, com antenas de menor cobertura angular (90 graus) e mantendo a taxa de bits em 250 Mbps por setor, a frequência de amostragem da ADC/DAC teria de ser muito superior que 1 GHz de forma a garantir a qualidade da transmissão do sistema, e isto, além de ser complexo, possui alto custo.

## 3.2 Blocos de simulação

Nesta seção, são descritos os passos para construção dos modelos simulados e os principais parâmetros utilizados para o simulador *VPITransmissionMaker*. Muitos

dos blocos são definidos utilizando-se de parâmetros globais. Os parâmetros globais são variáveis definidas, durante a criação dos cenários, para organizar a simulação e facilitar a alteração de informações importantes, dado que estas informações encontram-se frequentemente em mais de um bloco. Os valores dos parâmetros globais encontram-se no apêndice deste trabalho.

#### 3.2.1 Transmissão

De uma maneira geral, para ambos cenários, os blocos no processo de transmissão seguem a seguinte ordem, como é mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Processo de transmissão.

Tendo como referência a Figura 3.5, para o primeiro diagrama o sistema será simulado de acordo com o mostrado na Figura 3.6. Os blocos elétricos com modulação de 16-QAM localizados em frequência central de 5 GHz são multiplicados pelo oscilador local criando assim duas réplicas equivalentes nas frequências  $f_0 + f_{LO}$  e  $f_0 - f_{LO}$ , sendo  $f_0$  a frequência de rádio original das subportadoras e  $f_{LO}$  a frequência do oscilador local. Posteriormente a réplica em banda base será filtrada por um filtro BPS e encaminhada para o processo de digitalização.



Figura 3.6: Transmissores Elétricos para os modelos WDM-DRoF e SCM-DRoF.

Na Figura 3.6, é mostrado como as subportadoras e osciladores locais estão organizados dentro do software de simulação para cada cenário projetado. Os blocos mQAM são responsáveis por criar o sinal elétrico modulado no formato 16-QAM. Os principais parâmetros que compõem este bloco são *SampleRate* (taxa de amostragem), *BitRate* (taxa de bits), *ChannelLabel* (Identificação do canal), *BitsPerSymbol* (Bit por símbolo), *CarrierFrequency* (Frequência da subportadora) e a fator de *RollOff*. Os demais parâmetros existentes não foram alterados, sendo assim apresentam-se de acordo com o padrão (*Default*).

As subportadoras QAM são definidas de acordo com variáveis globais da simulação. Para frequência de emissão da subportadora, a variável "Frequency" é utilizada, sendo igual a 5 GHz. Para a taxa de amostragem é utilizada a variável "SampleRateQAM", igual a quatro vezes a variável "Frequency".

Ainda na Figura 3.6, para o funcionamento do oscilador local, é utilizado um bloco gerador de onda senoidal responsável por transladar o sinal das subportadoras para a banda base. Neste bloco, os únicos parâmetros alterados são a amplitude do sinal, a frequência de emissão da senóide e a frequência de amostragem, onde respectivamente a primeira é igual a 1 e as outras duas são definidas pelos parâmetros globais "LO" e "SampleRateQAM", LO é definido de acordo como já foi citado, e SampleRateQAM é igual quatro vezes a frequência de emissão do LO. Por fim, o restante dos componentes mostrados são basicamentes somadores e multiplicadores elétricos.

No projeto da rede, é importante notar a largura de banda de cada subportadora antes de digitalizar o sinal. Em conversores ADC/DAC, quanto maior a frequência de amostragem, mais caros se tornam os componentes. Na Equação 3.1 [30], é mostrada a fórmula que define a largura de banda de uma subportadora ( $BW_{SC}$ ). Onde, BR representa a taxa de bits, BPS significa o número de bit por símbolos e o fator de Roll-Off é representado por RO.

$$BW_{SC} = \frac{BR * (1 + RO)}{BPS} \tag{3.1}$$

Dado que a taxa de cada subportadora é de 250 Mbps, o fator de Roll-Off é de 0.2 e modulação escolhida foi 16-QAM, ou seja, o número de bits por símbolos é  $4 (2^4 = 16)$ . Então, a largura de cada subportadora assume o valor de 75 MHz. Sendo assim, no sistema de três subportadoras, sabendo-se que as subportadoras encontram-se nas frequências 4.9 GHz, 5 GHz e 5.1 GHz, ou seja, com espaçamento de canal de 100 MHz, a largura de banda agregada será de, pelo menos, 400 MHz. Para o cenário que faz uso de uma subportadora, o entendimento é mais simples. Dado que a subportadora encontra-se na frequência de 4.95 GHz, a largura da subportadora também será de 75 MHz, logo a banda total ocupada será de no máximo 100 MHz. Dessa maneira o ADC/DAC se torna, em teoria, mais barato, porém o sistema passa a necessitar um número maior de componentes ópticos, fato este que interfere

negativamente no custo.

Em sistemas digitais, o custo total da rede é diretamente proporcional ao espectro ocupado. Isto ocorre, pois, para o processamento de sinais em altas frequências no domínio elétrico são necessárias tecnologias e componentes de maior complexidade, que por consequência são mais caros. Os fatores que influenciam diretamente no espectro ocupado para sistemas com multiportadoras QAM são: o número de subportadoras, o número de bits por símbolo, a taxa de bits e o espaçamento entre os canais. Sendo assim, para sistemas com maior taxa de bits, o espectro ocupado também será maior, se mantido constante os demais parâmetros. Já mantendo constantes os demais parâmetros e variando o número de bits por símbolo, quanto maior for este, menor é o espectro ocupado, em contrapartida, o sinal estará mais sujeito a interferências. Por fim, e logicamente, quanto menor o número de subportadoras, menor é o espectro e menor é a taxa transmitida. Contudo, o aumento de uma subportadora, para este sistema, implica em um ADC/DAC com maior frequência de amostragem, apesar de que somente dois componentes a mais são adicionados. Comparando este cenário com o cenário WDM-DRoF, para adicionar uma subportadora é necessária inclusão de pelo menos mais oito componentes na rede, dado que cada subportadora tem um comprimento de onda, logo um ADC/DAC, filtros, e etc. Através da análise dos parâmetros citados acima foi possível obter, para este trabalho, um sistema de transmissão que equilibra o número de subportadoras utilizadas para um determinado limiar de espectro com taxa de 250 Mbps em cada subportadora.

Continuando a sequência da Figura 3.5, no segundo bloco, o processo de digitalização pode ser definido em três partes, como é mostrado na Figura 3.7. Inicialmente o sinal em banda base é normalizado entre valores de 0 a 1 e convertido para o formato digital por um bloco ADC, este bloco possui suas características de função de transferência, não linearidades e *jitter* de acordo com valores realísticos em um arquivo pré-definido pelo software de simulação. No segundo passo, o sinal de saída é multiplicado por um valor constante referente à resolução do ADC igual a  $2^{M} - 1$ , onde M é o número de bits do ADC. A saída deste bloco, do tipo *float*, é então convertida para inteiro, serializada e convertida para binário. No último passo, a sequência binária é convertida para sinal elétrico através de um bloco de modulação elétrica NRZ.



Figura 3.7: Conversão Analógica-Digital.

Ainda na Figura 3.7, o bloco normalizador, não é um bloco padrão do VPI. Blocos de simulação que encapsulam outros blocos são chamados pelo VPI como blocos "galaxy". Neste caso, a galaxy criada é composta de três outros blocos, são eles: "CoSimInput\_ El", "CoSimOutput\_ El" e "CoSimInterface", responsáveis respectivamente pela entrada de dados, saída de dados, e cossimulação utilizando umas das linguagens permitidas (Matlab e Python). Na Figura 3.8, são mostrados os blocos que fazem parte deste componente, as setas em azul indicam a entrada e saída do galaxy. A cossimulação faz uso da interface Python e utiliza um código disponível do VPI chamado de "normalizer.py". O parâmetro "RunCommand" é definido como "output = normalizer(input)", sendo "input" e "output" os nomes dos parâmetros de entrada dos blocos antes e depois do cossimulador.



Figura 3.8: Bloco galaxy de cossimulação.

Na sequência da Figura 3.7, após o normalizador, a ADC possui "taxa de amostragem" (SamplingRate) definida de acordo com o parâmetro global "SampleRateADC". Da mesma maneira, a resolução é definida também por um parâmetro global chamado "Resolution". A função de transferência utilizada é Unipolar e a definição de escalamento (*FSR definition*, onde FSR significa Full-scale-range) é definida como nominal limitada de 0.01 à 0.99. Os blocos seguintes, após o ADC, tiveram seus parâmetros descritos anteriormente e, em geral, não apresentam muitos parâmetros, com excessão ao bloco NRZ. Na entrada do NRZ, o sinal lógico binário é modulado com uma taxa de bit (BitRate) e frequência de amostragem (SampleRate), em função de parâmetros globais, sendo 0 "SampleRateADC\*Resolution" primeiro igual à segundo igual à е 0 "BitRateDefault\*Resolution\*16".

Na última parte do fluxograma da Figura 3.5, a Figura 3.9 ilustra a modulação externa do sinal que foi digitalizado. É feito o uso dos blocos: modulador Mach-Zehnder e laser CW. Além disso, também é feito uso de um amplificador ideal. Este componente é utilizado exclusivamente para garantir que a potência óptica na entrada da fibra seja igual a potência previamente definida no Laser, igual a 1 mW.



Figura 3.9: Modulação óptica.

#### 3.2.2 Meio de transmissão

Após o processo de transmissão, os comprimentos de onda são injetados na fibra óptica através de um multiplexador ideal. O único parâmetro presente neste bloco é a perda por inserção (*InsertionLoss*), sendo configurada como nula. Neste trabalho, a maioria das perdas relativas aos componentes ópticos foi idealizada. Entretanto, foi configurado um atenuador óptico no valor de 16 dB para representar tais perdas. Este atenuador está localizado logo após a fibra. Esta configuração foi feita com o intuito de verificar, isoladamente, as perdas e efeitos referentes ao processo de digitalização e interferências geradas entre as subportadoras.

No software de simulação utilizado neste trabalho, existem uma série de configurações disponíveis chamadas de macros. As macros existem com o intuito de facilitar a configuração dos componentes simulados. Nos cenários desenvolvidos, a fibra óptica utilizada faz uso de uma macro que possui informações reais de medições providas pela empresa ACREO AB. A fibra utilizada é denominada Corning SMF-28 [31].

Além do uso da macro, o único parâmetro da fibra que foi alterado na simulação foi o comprimento (*FiberLength*). Para este parâmetro foram configurados valores que variam de 0 à 70 km, com passo de 10 km entre cada valor.

#### 3.2.3 Recepção do sinal

Depois de percorrer a fibra, o sinal óptico possuirá diferentes formas de recepção de acordo com cada sistema em consideração. Para o sistema WDM-DRoF, cada comprimento de onda será selecionado por um respectivo filtro óptico para então ser convertido para o domínio elétrico. Quanto ao sistema SCM-DRoF, pelo fato deste cenário ser composto por somente um comprimento de onda, a recepção pode ser feita diretamente. Contudo, após a conversão opto-elétrica, é necessário o uso de filtros elétricos para separar cada subportadora para seu respectivo receptor.

No escopo deste trabalho, não foi dada ênfase nos métodos de multiplexação utilizados. Contudo, em um cenário que fizesse uso de um multiplexador divisor de potência (*Power Splitter*), a perda por inserção na rede pode variar de 3.5 dB à 17 dB [14], dependendo do número de comprimentos de onda utilizados. No cenário WDM-DRoF, o processo de recepção possui comportamento similar ao uso de um *Power Splitter*, pois, depois da fibra, todos os três sinais ópticos são propagados todas ramificações, sendo necessário o uso de filtros ópticos para permitir que cada receptor selecione o seu respectivo comprimento de onda. De outra maneira, se fosse feito o uso de um AWG para a rede, não seria necessário o uso de filtros ópticos, dado que este componente já faz a filtragem de cada comprimento de onda para um respectivo canal. Além disso, para este componente a perda pode variar de 1 dB à 3 dB [32, 15], reduzindo assim as perdas da rede.

Para o sistema de subportadora única, o uso de filtros elétricos se torna desnecessário para a recepção do sinal de dados. Contudo, o sinal recebido só poderia alimentar uma única RRH e conter somente um tipo de modulação. Por outro lado, em um sistema de múltiplas subportadoras, o uso de filtros elétricos se faz necessário, aumentando o número de componentes da rede, porém possibilitando o uso de um mesmo comprimento de onda para alimentar diversas RRHs e também a manipulação do espectro elétrico.

Nos cenários desenvolvidos para este trabalho, a recepção dos sinais funciona como é mostrado na sequência. Primeiramente, cada comprimento de onda deve ser detectado por um respectivo fotodiodo, para isto é feito uso de filtros ópticos. Após o fotodiodo converter o sinal para o domínio elétrico, é feito o processo de conversão digital-analógica pelo DAC, mostrado na Figura 3.10. Por exigências da simulação, é feito uso de um *clock* ideal (1) para sincronizar o sinal NRZ que contém os bits digitais. No cenário de portadora única este sincronizador é localizado logo após o fotodiodo, porém para o cenário multiportadora este bloco é localizado antes do receptor QAM, como é mostrado na Figura 3.11. Seguindo o processo de recepção da Figura 3.10, em (2) o primeiro bloco é responsável por remover a corrente contínua do sinal elétrico agindo como um capacitor de capacitância infinita e o segundo bloco tem função de fazer a amostragem do sinal digital proveniente da onda de formato analógico. Em (3), o primeiro bloco é uma interface que transforma o sinal elétrico de entrada em sinal de dados do tipo *float*, no segundo bloco é feita a quantização dos valores de entrada de acordo com um limiar de 0 a 1, no terceiro bloco é feita a conversão do sinal quantizado de bits para inteiro e no quarto bloco o sinal inteiro é convertido para *float* novamente. Para finalizar o processo de conversão, em (4), o bloco DAC emula um conversor digital-analógico utilizando função de transferência, ganho, erro e não linearidades definidos pelo software de simulação.



Figura 3.10: DAC para cenário de portadora única.



Figura 3.11: DAC para cenário de 3 subportadoras.

Tomando como exemplo a Figura 3.10, no fotodiodo, os principais parâmetros são responsividade (*Responsivity*), com valor de 0.95 A/W, e o tipo de fotodiodo (*PhotodiodeModel*), definido como PIN. Após convertido, o sinal no domínio elétrico é encaminhado para um bloco que extrai o nível de corrente contínua do sinal digital, este bloco não possui parâmetros. Na sequência, o sinal segue para um bloco amostrador que possui três parâmetros: *SampleTime, SignalSampleRate* e *SamplingRate*, onde o primeiro é definido em 0.5, o segundo é definido de acordo com o parâmetro global SampleRateDefault e o terceiro como BitRateDefault\*Resolution. Na sequência, o próximo bloco é responsável por coletar os pacotes de dados digitais que foram recebidos, o único parâmetro deste componente é o *SampleRate*, que é definido como BitRateDefault\*Resolution. O bloco seguinte um quantizador, que possui dois parâmetros: thresholds, definido em 0.0, e levels definido em "0 1". Por fim, nos três últimos blocos, o primeiro faz a conversão de binário para números inteiros, com parâmetro único *nBits* igual ao parâmetro global "Resolution", e o segundo faz a conversão de inteiro para dados do tipo *float*, sem parâmetros, e finalmente o bloco DAC. No DAC, os principais parâmetros são definidos como é mostrado na Tabela 3.1.

Parâmetro Valor *SymbolRate* BitRateDefault **TransferFunction** Bipolar Resolution Resolution *FSR*definition Nominal  $2^{Resolution} - 1$ Vmax SampleRate SampleRateDefault GainError 0.18Interpolation Yes

Tabela 3.1: Parâmetros do bloco DAC.

Para o WDM-DRoF, após o DAC, um filtro elétrico passa-banda seleciona o sinal elétrico em banda base para que, através de um LO, este possa ser deslocado de volta para as frequências de RF. O sinal filtrado é então encaminhado a outro filtro passa-banda com o intuito de selecionar somente o sinal na frequência original de 5 GHz, passando então por um regenerador de *clock*, para finalmente ser encaminhado ao receptor do sinal QAM. Na Figura 3.12, o primeiro filtro possui como principais parâmetros FilterType, definido como "BandPass", TransferFunction, definido como "Rectangular", Bandwidth, definido de acordo com o parâmetro global "Filter\_ Bandwidth" e CenterFrequency, igual à "Frequency - LO". O LO possui as mesmas características já citadas no transmissor. E o filtro seguinte só difere do filtro anterior pelo parâmetro CenterFrequency ser definido pela variável "Frequency". O bloco "ClockRecoveryIdealRef" é usado na regeneração do sinal antes de ser encaminhado ao receptor, neste bloco todos os parâmetros estão definidos como "On". Por fim, o receptor possui as mesmas características do emissor com uma exceção: a existência das saídas (parâmetro *Output*), igual à "EVM, SER", sendo SER a taxa de erro de símbolo.



Figura 3.12: Receptor para cenário de uma subportadora.

No cenário SCM-DRoF, diferentemente do cenário de uma subportadora, o sinal é diretamente multiplicado pelo LO, e segue para três filtros que seguem as mesmas configurações do cenário anterior, exceto pela frequência central, que é definida de acordo com a frequência original de cada subportadora. Cada sinal das subportadoras é encaminhado para o regenerador de clock para, posteriormente, ser feita a recepção, também seguindo os mesmos parâmetros do cenário anterior, salvo o parâmetro *CarrierFrequency*. Na Figura 3.13 é mostrado o processo de recepção para este cenário.



Figura 3.13: Receptor para cenário de três subportadoras.

Em todo este processo, o sinal analógico, após convertido e deslocado para sua frequência original, é encaminhado aos receptores QAM. O receptor QAM, neste contexto, representa o sinal chegando à torre de transmissão, especificamente na RRH. A partir deste ponto, depois da RRH, o sinal de rádio é enviado de fato à antena para então ser propagado para dispositivos móveis.

# Capítulo 4 Resultados

Neste capítulo são apresentadas análises dos cenários descritos no capítulo anterior. São reapresentadas algumas informações do sistema, tais como, taxa de transmissão, potência utilizada, especificações da fibra, dentre outros, mostrando a interação entre os parâmetros na busca de um cenário optimizado. São discutidos também alguns dos motivos para as escolhas feitas nos sistemas e os impactos gerados por estas escolhas. Além disso, também são mostrados os resultados de BER e alcance para ambos cenários.

## 4.1 Análise dos cenários

Para as simulações apresentadas neste trabalho, foram usados valores típicos para Lasers CW aplicados em modulação externa, com potência óptica de 1 mW e largura de linha de 10 MHz. A frequência óptica para ambos os cenários foi centrada em 193.1 THz, correspondende a banda C no espectro de transmissão óptica. Para o espaçamento de canal, de acordo com as redes WDM para transmissão óptica [12], foi definido o valor de 100 GHz. A partir disso, foram escolhidas as frequências em 193, 193.1 e 193.2 THz. O modulador elétrico 16-QAM foi configurado com frequência de amostragem de 20 GHz, sendo quatro vezes maior que a frequência da subportadora, ou portadora elétrica, que é de 5 GHz, obedecendo assim o Teorema de Nyquist. A razão de extinção para o modulador óptico MZM foi de 30 dB e a fibra óptica possui atenuação de 0,2 dB/km com dispersão de  $16.10^{-6}s/m^2$ . Na recepção, o fotodiodo PIN apresenta responsividade de 0.95 A/W.

Para uma mesma taxa de bits, quanto maior o número de símbolos transmitidos, menor se torna o espectro. Isto se dá devido à ortogonalidade da modulação QAM, pois dessa forma, mais informações podem ser contidas em uma mesma faixa de frequência. Por outro lado, um sinal com maior quantidade de símbolos também se torna mais susceptível a ruídos. A modulação 16-QAM indica que cada símbolo de informação transmitido é formado por 4 bits. Estes símbolos podem ser representados como a composição de números de bits, podendo ser representados também por diagramas de constelação, onde cada ponto é um símbolo, como é exemplificado na Figura 4.1.



Figura 4.1: Exemplo de uma constelação 16-QAM.

Para este trabalho cada uma das subportadoras 16-QAM possui taxa de 250 Mbps. De acordo com o que foi mostrado anteriormente na Equação 3.1, a largura de banda da subportadora depende diretamente da taxa transmitida e do número de bits por símbolo no sinal QAM. Dado que, quanto maior a frequência alcançada pelos espectros das subportadoras, maior é a complexidade da tecnologia aplicada nos conversores analógico-digitais, o custo para estes componentes também cresce. Portanto, para este trabalho, cada subportadora terá uma largura de banda de aproximadamente 75 MHz, e por isso, o espaçamento entre as subportadoras foi definido em 100 MHz. Dessa forma, uma subportadora não sobrepõe o espectro de suas adjacentes, gerando menos interferência entre elas.

Devido ao espaçamento de canal utilizado, e conforme o Teorema de Nyquist, é exigido que o conversor analógico-digital tenha frequência de amostragem pelo menos duas maior que o espectro do sinal que se deseja digitalizar. Para um espaçamento de 100 GHz, o sistema SCM-DRoF alcança um espectro total de 400 MHz. Sendo assim, foi escolhido uma amostragem com frequência de 1 GHz. Para o sistema de subportadora única, o espectro total tem a mesma largura do espaçamento definido, 100 GHz, logo a frequência de amostragem foi definida em 250 MHz. Nas Figuras 4.2 e 4.3, é mostrada a recepção dos espectros dos sistemas de subportadora única e de multi-subportadora. Em azul destaca-se a função de transferência dos receptores em formato de seno hiperbólico (*sinc*), que também demonstra a frequência de amostragem de acordo com o sistema.



Figura 4.2: Espectro de recepção após DAC para cenário WDM-DRoF.



Figura 4.3: Espectro de recepção após DAC para cenário SCM-DRoF.

Os conversores ADC/DAC possuem um número definido de bits que limitam as faixas de quantização do sistema, também chamado de resolução, como é ilustrado na Figura 4.4. O número de bits da ADC/DAC é outro fator de importância que influencia diretamente no custo do sistema. Contudo, dado uma série de fatores do sistema, nem sempre o uso de um número maior de bits implica em uma melhora da qualidade no sinal. Para este trabalho, foram feitos testes considerando, para uma mesma transmissão, conversores que possuem de 2 à 8 bits. Os resultados são mostrados posteriormente, levando em consideração figuras de mérito para avaliação da qualidade.



Figura 4.4: Representação binária de um sinal analógico.

Quanto maior a quantidade de bits, ou resolução, para descrever um sinal analógico, maior é a taxa de dados que percorre a linha óptica, dado que uma qualidade maior de bits é usada para representar cada sinal analógico. Com isso, efeitos de dispersão podem ser gerados no sistema. Tendo em vista verificar a taxa de transmissão no enlace, ou taxa óptica de dados (OLR), foi verificada a SNR para cada valor de número de bits utilizado nos conversores analógico-digitais, como é mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6.



Figura 4.5: SNR para diferentes resoluções na ADC/DAC em sistema SCM.

O parâmetro OLR é gerado de acordo com a Equação 4.1, sendo TA é a taxa de amostragem do sistema e Rs a resolução dos conversores analógico-digitais.

$$OLR = TA_{ADC} * Rs \tag{4.1}$$

Na Figura 4.5, no sistema com três subportadoras, verifica-se que a OLR começa a atingir um nível de SNR estável, em 35 dB, para resoluções com 7 e 8 bits. Já para o sistema de subportadora única (WDM-DRoF), é possível notar que, entre os valores de resolução de 4 e 5 bits, a SNR do sistema não muda expressivamente, e



Figura 4.6: SNR para diferentes resoluções na ADC/DAC em sistema de uma subportadora.

posteriormente atinge um limiar, com SNR em cerca de 25 dB. Buscando testar os cenários desenvolvidos e também um menor custo, o valor de 4 bits foi escolhido como resolução da ADC/DAC para simular a rede óptica deste trabalho. Além disso, para uma resolução de 4 bits, a OLR no sistema WDM-DRoF chega a 1 Gbps, valor este ainda maior para o sistema SCM-DRoF, igual a 4 Gbps. A Equação 4.2 [33, 34] foi utilizada para gerar a curva teórica de SNR mostrada na Figura 4.6, onde Rs é a resolução da ADC.

$$SNR_{teorico} = 6.02 * Rs + log10(5/3)$$
 (4.2)

Além destes, os outros parâmetros que foram utilizados para os cenários são descritos no apêndice deste trabalho.

## 4.2 Avaliação dos resultados

Nesta seção são descritos os resultados alcançados a partir das configurações definidas na seção anterior. O estudo realizado foi feito com base na variação do comprimento da fibra a fim de se verificar o comportamento do sinal de acordo com cada tipo de transmissão. Foram extraídas as figuras de mérito de BER, EVM e alcance, e além disso, a potência óptica recebida para cada distância. No software de simulação utilizado, existe um parâmetro chamado "TimeWindow" que define o número de amostras que são enviadas em cada simulação, sendo este parâmetro inversamente proporcional à taxa de bits definida pelos transmissores. Quanto maior o TimeWindow, mais tempo leva a simulação, porém mais preciso é o resultado. Para as simulações deste trabalho, ambos os sistemas foram transmitidos com 8192 (8\*1024) símbolos para cada simulação.

E importante destacar que, dado o contexto deste trabalho, explorar a arquitetura C-RAN, é esperada que a distância que a fibra percorre da CO até a antena seja de no máximo 20 km [35].

Na Figura 4.7 é mostrado o valor da BER em relação a cada valor de comprimento da fibra para o cenário. É possível verificar que para um comprimento de fibra de 0 km a 20 km, a BER apresenta três níveis distintos de qualidade. Basicamente, existem dois principais efeitos prejudiciais que podem ser notados, o primeiro é a influência, ou ruído, que as próprias subportadoras exercem entre si mesmas, e o segundo é o efeito do filtro passa-baixa usado na recepção. Como o filtro tende a atenuar as maiores frequências, é possível observar que para as subportadoras 2 e 3 o nível de BER é mais elevado, significando maior taxa de erro. E como a subportadora 2 ainda recebe influência das duas subportadoras adjacentes, a qualidade se torna ainda pior. Para concluir a análise, após 20 km verifica-se que a BER tende a piorar, sendo próxima de  $10^{-3}$  para enlaces de 30 km.



Figura 4.7: BER para cenário SCM-DRoF usando três subportadoras digitais.

Na Figura 4.8, cada comprimento de onda possui somente uma subportadora. Como resultado a este fato, a qualidade da transmissão apresenta-se consideravelmente superior quando comparado ao modelo que usa 3 subportadoras moduladas na portadora óptica. É mostrado que, para comprimentos de fibra de 0 km a 40 km, o valor da BER apresenta-se constante com nível igual a  $10^{-6}$ , nível este aceitável para recepção elétrica de dados. E por fim, após 40 km de fibra, o valor da BER aumenta a ponto de atingir níveis não aceitáveis de transmissão.



Figura 4.8: BER para cenário WDM-DRoF usando uma subportadora digital.

Comparando os cenários, a qualidade máxima para ambos os sistemas é a mesma, igual a  $10^{-6}$ . A diferença apresenta-se no quesito distância. O cenário WDM-DRoF, por não ter influência de nenhuma outra subportadora, mantém sua qualidade até uma distância equivalente ao dobro do que o cenário SCM-DRoF apresentou. Por outro lado, cada um dos três comprimentos de onda gera a necessidade do uso de pelo menos mais três filtros ópticos e três conversores analógico-digitais. Além disso, seria possível aumentar a taxa de dados no cenário de uma portadora, contudo o espectro ocupado seria também maior, e este fator se tornaria crucial no custo do sistema. O balanceamento entre o número de portadoras, a taxa transmitida em cada uma delas e o formato de modulação são fundamentais para a busca de um sistema otimizado.

Na Figura 4.9, é mostrado o resultado proveniente da métrica EVM para o cenário usando três subportadoras. Os pontos relativos à potência óptica recebida é a mesma para ambos os sistemas, e a qualidade da EVM possui o mesmo nível do primeiro canal SCM, mostrado na cor azul. Este resultado é um complemento aos gráficos de alcance, sendo assim estima-se que para uma EVM de 30% a sensibilidade será de -24 dBm.



Figura 4.9: EVM para cenário SCM-DRoF usando três subportadoras digitais.

O cenário SCM-DRoF, apesar de apresentar menor alcance, ainda assim é viável. Dado que as tecnologias de acesso que usam rádio são de curto alcance, tal sistema mostra-se perfeitamente cabível de aplicação. A arquitetura C-RAN foi escolhida para o escopo deste trabalho, e as tecnologias de acesso, que fazem uso desta arquitetura, são pensadas para conectar o usuário móvel em curtas distâncias. Sendo assim sistemas multiportadora podem ser uma forma viável para reduzir custos e aumentar a taxa de transmissão em sistemas ópticos.

# Capítulo 5 Conclusão

# Conclusão

# 5.1 Considerações finais

Neste trabalho foi apresentada uma comparação entre a transmissão de sistemas de subportadora única e sistemas de multi-subportadora aplicados no contexto de transmissão de Rádio sobre Fibra Digital. São descritos dois cenários projetados através do uso do software de simulação *VPITransmissionMaker*. Os cenários propostos são diferenciados pelo número de subportadoras elétricas que são moduladas na portadora óptica.

O contexto deste estudo é baseado na arquitetura C-RAN, que é aplicada a redes sem fio de curto alcance. A arquitetura C-RAN combinada com as tecnologias de RoF são interessantes pelo fato de simplificarem as estações bases e possibilitarem a flexibilidade na transmissão de sinais aplicados a redes móveis.

O estudo mostrou que sistemas de subportadora única possuem melhor alcance para transmissão DRoF quando comparado a sistemas SCM, com BER de  $10^{-6}$  em um alcance de até 40 km. Contudo, assim como já foi dito, as novas tecnologias de acesso para *backhaul* visam o aumento na densidade de estações bases e a redução do alcance, sendo este alcance de no máximo 10 km. Sendo assim, tanto a opção de sistema SCM quanto a solução de subportadora única podem satisfazer tais exigências.

Outro aspecto levantado neste trabalho faz menção ao custo que cada transmissor terá. Dado que o sistema SCM-DRoF utiliza um conversor AD/DC com maior frequência de amostragem, o custo deste componente, individualmente, será mais caro em comparação com um único conversor utilizado no sistema WDM-DRoF. Entretanto, o sistema WDM-DRoF utiliza três conversores AD/DC e, além disso, faz uso de um número maior de componentes ópticos, como por exemplo, filtros ópticos, que em contrapartida são substituídos por filtros elétricos no modelo SCM-DRoF. Levando em consideração todos os aspectos citados, é levado a crer que o sistema SCM-DRoF é uma solução econômica para arquiteturas C-RAN quando comparado com WDM-DRoF. Além disso, sistemas de múltiplas subportadoras podem ser usados com maior eficiência espectral, pois, apesar de usar uma maior quantidade de banda, a taxa de dados pode ser maior e a organização das subportadoras pode ser feita de maneira otimizada de acordo com o número de RRHs da antena e outras características do sistema.

## 5.2 Trabalhos futuros

Futuros trabalhos seguindo esta mesma linha poderiam abordar a otimização de sistemas SCM baseados no uso de variados formatos de modulação. Para tecnologias emergentes, tal como LTE-A, o uso de OFDM ou 64-QAM é mais indicado. Sendo assim, um estudo especializado em descobrir o melhor formato de modulação, utilizando o menor espectro sem prejudicar as subportadoras transmitidas, seria essencial.

E possível também explorar a arquitetura C-RAN após a fibra, isto é, passada a transmissão RoF a antena é responsável por transmitir o sinal sem fio até o usuário. Um sistema generalista que abordasse todas as fases de transmissão, tanto óptico quanto *wireless*, traria uma contribuição fundamental para a visualização de todos os aspectos que podem vir a ser importantes neste processo.

Por fim, partindo da premissa de que nenhum trabalho de engenharia está verdadeiramente concluído, uma vez que sempre é possível aperfeiçoá-lo, reestruturá-lo ou até fazer de forma diferente. A pesquisa de DRoF aplicada a C-RAN é vasta. Baseado neste trabalho, uma análise específica de custo pode ser feita abordando numericamente a influência do uso de SCM em sistemas DRoF.

# **Referências Bibliográficas**

- Yizhuo Yang, C. Lim, and A. Nirmalathas. Experimental Demonstration of Multi-Service Hybrid Fiber-Radio System Using Digitized RF-Over-Fiber Technique. *Lightwave Technology, Journal of*, 29(14):2131–2137, July 2011.
- [2] Nokia Siemens Networks Corporation. 2020: Beyond 4G Radio Evolution for the Gigabit Experience. 2011.
- [3] H. Chettat, L. M. Simohamed, Y. Bouslimani, and H. Hamam. RoF Networks : A comprehensive study. In Wireless Pervasive Computing, 2008. ISWPC 2008. 3rd International Symposium on, pages 495–498, May 2008.
- [4] CPRI: Common Public Radio Interface. Disponível em http://www.cpri.info, 2014.
- [5] C. Lim, Yizhuo Yang, and A. Nirmalathas. Digitized RF-over-Fiber for efficient fiber-wireless signal transport. In *Photonics Global Conference (PGC)*, 2012, pages 1–5, Dec 2012.
- [6] Yizhuo Yang, C. Lim, P. Gamage, and A. Nirmalathas. Demonstration of SCM signal transmission based on digitized radio-over-fiber technique. In *Microwave Photonics, 2009. MWP '09. International Topical Meeting on*, pages 1–4, Oct 2009.
- [7] Yon-Tae Moon, Woon-Kyung Choi, and Young-Wan Choi. Dispersion penalty analysis using light injection method in the feedforward optical transmitter for WDM/SCM radio-over-fiber systems. Optics Communications, 281(23):5851 – 5854, 2008.
- [8] A. O. Aldhaibani, S.M. Idrus, and N. Zulkifli. 2.5-Gb/s hybrid WDM/TDM PON using radio over fiber technique. In *Photonics (ICP)*, 2012 IEEE 3rd International Conference on, pages 255–257, Oct 2012.

- [9] Ming Zhu, Liang Zhang, Jing Wang, Lin Cheng, Cheng Liu, and Gee-Kung Chang. Radio-Over-Fiber Access Architecture for Integrated Broadband Wireless Services. J. Lightwave Technol., 31(23):3614–3620, Dec 2013.
- [10] P. Monteiro and A. Gameiro. Hybrid Fibre Infrastructure for Cloud Radio Access Networks. *ICTON*, 2014.
- [11] Gerd Keiser. Optical Communication Essentials. McGraw-Hill Companies, 2004.
- [12] Govind P. Agrawal. Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley & Sons, Inc., 3rd edition, 2002.
- [13] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, and Galen H. Sasaki. Optical Networks: a Practical Perspective. Morgan Kaufman: Elsevier Inc., 2010.
- [14] PLC Splitter for PON applications 1XN. Disponível em www.cubeoptics.com/ uploads/tx\_cuboproducts/CP\_1xN\_Rev.02.pdf, 2014.
- [15] Arrayed Waveguide Grating, 100 GHz, Narrowband (Gaussian). Disponível em http://www.jdsu.com/ProductLiterature/awg100n\_ds\_cc\_ae.pdf, 2014.
- [16] Gustavo Silva Oliveira. Formatos de modulação de uma portadora óptica com detecção direta. Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
- [17] Biswanath Mukherjee. Optical WDM Networks. Springer, 2006.
- [18] Huawei Technologies Co. Next-generation pon evolution. Disponível em www. huawei.com/ilink/en/download/HW\_077443, 2010.
- [19] M.P. Thakur, S. Mikroulis, C.C. Renaud, J.E. Mitchell, and A. Stohr. DWDM-PON mm Wave Wireless Converged Next Generation Access Topology using Coherent Heterodyne Detection. *ICTON*, 2014.
- [20] Open Base Station Architecture Initiative. OBSAI System Specification. Disponível em http://www.obsai.com/, 2014.
- [21] R.M. Ribeiro, F. Lucarz, and B. Fracasso. Proposal and design of an all-optical encoder for digitising radio-over-fibre transceivers. In Network and Optical Communications (NOC), 2013 18th European Conference on and Optical Cabling and Infrastructure (OC i), 2013 8th Conference on, pages 35–42, July 2013.

- [22] R.M. Ribeiro, V.N.H Silva, A.P.L. Barbero, F. Lucarz, and B. Fracasso. Design of an analogiser for optically digitised radio-over-fibre signals. *ICTON*, 2014.
- [23] Bin Guo, Wei Cao, An Tao, and D. Samardzija. CPRI compression transport for LTE and LTE-A signal in C-RAN. In *Communications and Networking in China* (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on, pages 843–849, Aug 2012.
- [24] Radiocomp. Open Base Station Architecture: Can Standardization enable true innovation? Disponível em http://www.mti-mobile.com/, 2008.
- [25] Daniel J.C. Coura, Diogo V. N. Coelho, Arnaldo P. Togneri, Marcelo E. V. Segatto, Maria José Pontes, Maria Thereza M. R. Giraldi, and João C. W. A. Costa. Análise do desempenho de um sistema scm utilizando modulação 16-QAM. International Information and Telecommunication Technologies Symposium, 2010.
- [26] China Mobile Research Institute. C-RAN The Road Towards Green RAN. White Paper Version 2.5:pp. 1–48, 2011.
- [27] Rosinei de Sousa Oliveira, Nayanne Satie Moritsuka, Renan Carlos Santos, Renan Pereira Almeida, João Costa, and Renato Francês. Low Cost Digital Radio over Fiber System. Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG), 2014.
- [28] Bin Guo, Wei Cao, An Tao, and Dragan Samardzija. LTE/LTE-A signal compression on the CPRI interface. *Bell Labs Technical Journal*, 18(2):117–133, Sept 2013.
- [29] M. HadZialic, B. Dosenovic, M. Dzaferagic, and J. Musovic. Cloud-RAN: Innovative radio access network architecture. In *ELMAR*, 2013 55th International Symposium, pages 115–120, Sept 2013.
- [30] VPI Photonics. VPI TransmissionMaker Optical Systems User's Manual, 2014.
- [31] Corning PureForm Single-Mode Fiber DCM Modules for C-Band. Disponível em www.ztoptics.com/product/of\_01.pdf, 2014.
- [32] NxN AWG multiplexers and demultiplexers router module. Disponível em www. enablence.com/media/pdfs/Datasheet\_OCSD\_AWG\_Other\_NxN\_APRTE\_0.pdf, 2014.

- [33] S.R. Abdollahi, H.S. Al-Raweshidy, S.M. Fakhraie, and R. Nilavalan. Digital radio over fibre for future broadband wireless access network solution. In Wireless and Mobile Communications (ICWMC), 2010 6th International Conference on, pages 504–508, Sept 2010.
- [34] Joana dos Santos Tavares. Rádio Digitalizado sobre Fibra. Master's thesis, Facultade de Engenharia da Universidade de Porto, 2012.
- [35] F. Ponzini, L. Giorgi, A. Bianchi, and R. Sabella. Centralized Radio Access Networks over Wavelength Division Multiplexing: a plug-and-play implementation. *Communications Magazine*, *IEEE*, 51(9):94–99, September 2013.

# Apêndice Descrição geral dos parâmetros

Nota: Os parâmetros que não são especificados nesta lista foram estabelecidos de acordo com o padrão de funcionamento do software de simulação (valores *default*).

# Parâmetros Globais

TimeWindow: (8\*1024)/BitRateDefault GreatestPrimeFactor: 7 SampleRateDefault: 16\*Resolution\*BitRateDefault BitRateDefault: 0.25e9 (WDM-DRoF) BitRateDefault: 1e9 (SCM-DRoF) LaserPower: 1e-3 Resolution: 4 Fiber: Não fixo (definido de 0 à 6e3) BitsPerSymbol: 4 Frequency: 5e9 LO: 4.95e9 (para WDM-DRoF) LO: 4.9e9 (para SCM-DRoF) Filter\_Bandwidth: (BitRateQAM/BitsPerSymbol)\*(1.1+RollOff) SampleRateQAM: 4\*Frequency SampleRateADC: BitRateDefault BitRateQAM: 250e6 freq\_drof1: 193.0e12 (para WDM-DRoF) freq\_drof2: 193.1e12 (para WDM-DRoF e SCM-DRoF) freq\_drof3: 193.2e12 (para WDM-DRoF)

# Blocos de transmissão

### Subportadoras

SampleRate: SampleRateQAM BitRate: BitRateQAM ChannelLabel: QAM\_ Ch1/QAM\_ Ch2/QAM\_ Ch3 (para SCM-DRoF) BitsPerSymbolQAM: BitsPerSymbol CarrierFrequency: Frequency Roll-off: 0.2

#### **Oscilador** Local

SampleRate: SampleRateQAM Amplitude: 1 Frequency: LO

### Filtro para SCM-DRoF

FilterType: Passa baixa TransferFunction: Gaussian Bandwidth: 1e9 GaussianOrder: 6

#### Normalizer

TimeWindow: TimeWindow SampleRate: SampleRateQAM

#### ADC

SamplingRate: SampleRateADC TransferFunction: Unipolar Resolution: Resolution FSRdefinition: Nominal Vmin: 0.01 Vmax: 0.99 SamplingJitter: Gaussian GainError: 0.18

### Bloco MpyScalar\_ M

(Não existem parâmetros para este bloco)

#### Bloco const

level:  $2^{(\text{Resolution})} - 1$ 

### Bloco FloatToInt\_ M

(Não existem parâmetros para este bloco)

## Bloco $UnPkInt_{-}M$

numRows: !"expr (TimeWindow)\*(BitRateDefault)
numCols: 1

# Bloco IntToBits

nBits: Resolution

#### Codificador NRZ

BitRate: SampleRateADC\*Resolution SampleRate: BitRateDefault\*Resolution\*16

#### Laser CW

EmissionFrequency: 193.1 THz SampleRate: SampleRateQAM AveragePower: LaserPower Linewidth: 10e6

## $Modulador \ MZM$

Extinction: 30 dB ChirpDefinition: Simétrico

## Amplificador óptico

AmplifierType: PowerControlled OutputPower: LaserPower

# Via de transmissão

**Fibra** GroupRefractiveIndex: 1.47 Attenuation: 0.2e-3

Atenuador: 16 dB

# Blocos de recepção

### Filtros ópticos

FilterType: BandPass TransferFunction: Gaussian CenterFrequency: freq\_ drof1 ou freq\_ drof2 ou freq\_ drof3 Bandwidth: 4\*BitRateDefault GaussianOrder: 1

#### Reamostrador

SampledSignalMode: Absolute CenterFrequency: freq\_ drof1 ou freq\_ drof2 ou freq\_ drof3 SampleRate: SampleDateDefault

#### Fotodiodo

Responsivity: 0.95 A/W PhotodiodeModel: PIN

#### Block de recuperação do clock

Resyncronize: Off ChannelLabel: (de acordo com o ChannelLabel da subportadora)

### Bloco $DC_{-}$ Block

(Não existem parâmetros para este bloco)

# Amostrador (Sampler) SampleTime: 0.5 SignalSampleRate: SampleRateDefault SamplingRate: BitRateDefault\*Resolution

#### Bloco UnpackBlockEl

SampleRate: BitRateDefault\*Resolution

#### Quantizador

Thresholds: 0.0 Levels: 0.1

#### DAC

SymbolRate: BitRateDefault TranferFunction: Bipolar Resolution: Resolution SamplesPerSymbol: 1 Range: 1 Vmin: 0 Vmax: 2 ^ (Resolution) -1 SampleRate: SampleRateDefault: Gain: 0.18 Interpolation: Yes

#### Oscilador Local

Mesmas configurações do anterior

## **Filtros elétricos para SCM** (3 no total) FilterType: BandPass

TranferFunction: Rectangular Bandwidth: Filter\_Bandwidth CenterFrequency: Frequency-LO StopBandAttenuation: 12 dB

#### Filtros elétricos para WDM (2 no total)

FilterType: BandPass
TranferFunction: Rectangular
Bandwidth: Filter\_ Bandwidth
CenterFrequency: Frequency-LO (Filtro antes do Oscilador local)
CenterFrequency: Frequency (Filtro depois do Oscilador local)
StopBandAttenuation: 12 dB

### Receptores QAM

Seguem os mesmos parâmetros dos transmissores.